



Hochschule **RheinMain**
University of Applied Sciences
Wiesbaden Rüsselsheim



Für eine lebenswerte Zukunft

Rückgewinnung von Phosphor aus der Asche von Biomasseverbrennungsanlagen in Hessen

BACHELORARBEIT

zur Erlangung des Grades
Bachelor of Engineering

verfasst von Celine Tiemann

am Fachbereich Ingenieurwissenschaften der
Hochschule RheinMain im Studiengang Umwelttechnik
in Zusammenarbeit mit dem
Hessischen Landesamt für Umwelt und Geologie

Matrikelnummer: 769865
Referentin: Prof. Dr. Ursula Katharina Deister
Korreferenten: Dipl.-Ing. (FH) Volker Kummer und Prof. Dr. Thomas Schmid
Abgabedatum: 04.05.2015

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich, Celine Tiemann, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne unzulässige Hilfe Dritter verfasst habe.

Die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Texte, Gedankengänge, Konzepte usw. in meinen Ausführungen habe ich als solche eindeutig gekennzeichnet und mit vollständigen Verweisen auf die jeweilige Urheberschaft und Quelle versehen.

Alle weiteren Inhalte wie Textteile, Abbildungen, Tabellen etc. ohne entsprechende Verweise stammen im urheberrechtlichen Sinn von mir.

Die vorliegende Arbeit wurde bisher weder im In- noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form einer anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Mir ist bekannt, dass ein Täuschungsversuch vorliegt, wenn sich eine der vorstehenden Versicherungen als unrichtig erweist.

Ort, Datum

Unterschrift

Zusammenfassung

Phosphor ist ein limitierter und endlicher Rohstoff, der für alle Lebewesen von essentieller Bedeutung ist. Zur Schonung der Ressourcen ist es sinnvoll, Phosphor aus Sekundärrohstoffen zurückzugewinnen. Daher wurde in Kooperation mit dem Hessischen Landesamt für Umwelt und Geologie (HLUG) diese Bachelorarbeit mit dem Ziel verfasst, das Phosphorpotential in Biomasseverbrennungsaschen zu ermitteln und den aktuellen Stand der Entsorgungswege der Biomasseverbrennungsaschen darzustellen. Hierzu wurden Betreiber von Biomasseverbrennungsanlagen befragt und die Phosphorgehalte verschiedener Biomasseverbrennungsaschen im Labor ermittelt.

Die Befragung der Betreiber von Biomasseverbrennungsanlagen ergab, dass derzeit nur 20 % der Rostaschen im Sinne der Kreislaufschließung als Kompostbeimischung oder als Düngemittelzusatz verwertet werden. 40 % der Rostaschen werden deponiert, 10 % werden im Untertagebau verwertet. 10 % werden Bauschutt beigemischt, weitere 20 % werden an einen Aufbereiter/Entsorgungsfachbetrieb weitergegeben. Der durchschnittliche Phosphorgehalt in den Rostaschen der befragten Anlagen liegt im Durchschnitt bei 1,26 % P_2O_5 (\cong 0,55 % P).

Die Phosphorbestimmung der Aschen brachte sehr unterschiedliche Ergebnisse. Die Asche einer Altholzverbrennung enthielt lediglich 0,042 % P. In der Asche einer Anlage, die Landschaftspflegeholz sowie Waldrestholz verbrennt, konnten 0,285 % P nachgewiesen werden. Mit 2,09 % P lag der Phosphorgehalt der Asche einer Hausfeuerung deutlich über den Werten der Kraftwerke.

Die Potentialabschätzung mit einem geschätzten Wert von 1,3 % P ergab, dass in hessischen Biomasseverbrennungsaschen ein Phosphorpotential von 2.680 t P_2O_5 enthalten ist. Zusammen mit der Potentialabschätzung aus einer vorherigen Masterthesis ergibt sich ein Gesamtposphorpotential von etwa 22.000 t P_2O_5 aus hessischen phosphorhaltigen Abfallströmen. Durch Rückgewinnung dieses Gesamtpotentials wäre es möglich, etwa 70 % des gesamten Phosphorbedarfs von Hessen aus Sekundärrohstoffen zu decken.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	I
Tabellenverzeichnis.....	IV
Abbildungsverzeichnis	V
Abkürzungsverzeichnis.....	VI
1 Einleitung in die Thematik	1
2 Zielsetzung.....	3
3 Notwendigkeit der Phosphorrückgewinnung	4
4 Grundlagen zur Biomasseverbrennung	8
4.1 Definition Biomasse	8
4.2 Funktionsweise der Biomasseverbrennungsanlagen.....	9
4.2.1 Biomasseheizkraftwerk (BMHKW).....	13
4.2.2 Biomasseheizwerk (BMHW).....	15
4.2.3 Biomassekraftwerk (BMKW)	16
4.3 Genehmigung.....	16
4.4 Nutzbare Brennstoffe	18
4.5 Beschreibung der Biomasseaschen.....	22
4.5.1 Aschefraktionen.....	22
4.5.2 Nähr-und Schadstoffe	24
4.5.3 Ascheverwertung und -beseitigung	27
4.5.4 Qualitätssicherung der Aschen	30
5 Erneuerbare Energien - Situation in Hessen	32
5.1 Ergebnisse der Biomassepotentialstudie	34
6 Befragung der Biomasseverbrennungsanlagen in Hessen	39
6.1 Befragte Anlagen	39
6.2 Auswertung der Befragung	40
7 Ermittlung der Phosphorgehalte von Biomasseverbrennungsaschen.....	45
7.1 Probenahme	45
7.2 Analyse der Aschen	47
7.2.1 Reagenzien und Geräte	47
7.2.2 Berechnung der Einwaage.....	47
7.2.3 Durchführung	48

7.3 Ergebnisse der Phosphorbestimmung.....	50
7.3.1 BMHKW B.....	50
7.3.2 BMKW C	52
7.3.3 Hausfeuerung	54
7.4 Auswertung und Diskussion der Messergebnisse.....	55
8 Abschätzung des hessischen Phosphorpotentials.....	58
8.1 Potential der Biomasseverbrennungaschen.....	58
8.2 Hessisches Phosphorgesamtpotential	59
9 Fazit und Ausblick.....	62
Literaturverzeichnis	64
Anhang.....	69
A Fragebogen für Biomasseverbrennungsanlagen.....	69
B Ergebnisse der Phosphorbestimmung.....	73

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Brennstofftechnische Eigenschaften verschiedener biogener Festbrennstoffe (entnommen aus (Kaltschmitt, et al., 2009)).....	21
Tabelle 2: Anteile der Aschefractionen an der Trockenmasse der Gesamtasche für unterschiedliche Brennstoffe (entnommen aus (Oberberger, 1997)).....	23
Tabelle 3: Korngrößenverteilung der Aschefractionen (entnommen aus (Oberberger, et al., 1995)).....	24
Tabelle 4: Durchschnittliche Nährstoffgehalte in den Aschefractionen verschiedener Brennstoffe (entnommen aus (Oberberger, 1997)).....	25
Tabelle 5: Schwermetallgehalte in den Aschefractionen verschiedener Brennstoffe (entnommen aus (Oberberger, 1997)).....	25
Tabelle 6: Grenzwerte für Schadstoffe in Düngemitteln nach der Düngemittelverordnung (entnommen aus (Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz, 2012))	26
Tabelle 7: Anzahl der hessischen Biomasse(heiz)kraftwerke nach 11. BImSchV und deren gesamte Brennstoffmenge (Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie, 2015)	40
Tabelle 8: Qualitätssicherungsmaßnahmen der 9 befragten Anlagen.....	42
Tabelle 9: Übersicht der Messergebnisse und des P-Gehalts der Probe B.....	50
Tabelle 10: Übersicht der Messergebnisse und des P-Gehalts der Probe C.....	52
Tabelle 11: Messergebnisse und berechneter Phosphorgehalt der Probe H	54
Tabelle 12: Phosphorpotentiale der bekannten und geschätzten Rostaschemenge.....	59
Tabelle 13: P-Potentiale aus hessischen Abfallströmen (entnommen aus (Höhne, 2014))	59
Tabelle 14: Hausfeuerung – Übersicht der Daten und Messergebnisse.....	74
Tabelle 15: BMHKW B – Übersicht der Daten und Messergebnisse	75
Tabelle 16: Massenbezogene Berechnung der Proben „B msm500 5“ und „B msm500z 6“	75
Tabelle 17: BMKW C – Übersicht der Daten und Messergebnisse.....	76
Tabelle 18: Massenbezogene Berechnung der Proben „C msm500 5“ und „C msm500z 6“	76

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schematische Darstellung einer Unterschubfeuerung (entnommen aus (C.A.R.M.E.N. e.V. - Biomasseheizwerke)).....	10
Abbildung 2: Funktionsschema eines Biomasseheizkraftwerkes mit Dampfkraftprozess (entnommen aus (ESWE BioEnergie GmbH)).....	13
Abbildung 3: Schematische Darstellung des ORC-Prozesse (entnommen aus (BIOS Bioenergiesysteme GmbH))	15
Abbildung 4: Funktionsschema eines Biomassekraftwerks (entnommen aus (Biomasse Rhein-Main GmbH))	16
Abbildung 5: Anfallende Aschefractionen mit Gewichtsanteilen am Gesamtascheanfall (entnommen aus (Obernberger, 1997))	23
Abbildung 6: Anteile der Erneuerbaren Energien an der Stromerzeugung 2012 (Hessisches Statistisches Landesamt, 2015)	32
Abbildung 7: Stromerzeugung aus erneuerbaren Energieträgern 2001 bis 2012 (entnommen aus (Hessisches Statistisches Landesamt, 2015))	33
Abbildung 8: Erzeugter Strom aus Biomasse und fester Biomasse in Hessen von 2001 bis 2014 (entnommen aus (Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie e.V. (DGS), 2014), (Hessisches Statistisches Landesamt, 2015)).....	34
Abbildung 9: Anteile der BFBS an der Strom- und Wärmebereitstellung in Hessen 2008 (entnommen aus (Witzenhausen-Institut GmbH; Pöyry Environment GmbH, 2010))	36
Abbildung 10: Genutztes und verbleibendes Potential der biogenen Festbrennstoffe bei der Endenergiebereitstellung in Hessen 2008 (entnommen aus (Witzenhausen-Institut GmbH; Pöyry Environment GmbH, 2010))	37
Abbildung 11: Brennstoffinput der befragten Anlagen (Gesamtinput: 634.000 t/a)	41
Abbildung 12: Herkunft der Brennstoffe.....	41
Abbildung 13: Angegebene Entsorgungswege der Rostaschen.....	43
Abbildung 14: Aufnahmen der verjüngten Proben der zu analysierenden Asche	46
Abbildung 15: P-Gehalte der untersuchten Teilproben der Probe B in mg P/g Asche.....	51
Abbildung 16: P-Gehalte der B-Probe bei einer Einwaage von 250 mg in mg P/g Asche	52
Abbildung 17: P-Gehalte der untersuchten Teilproben aus Probe C in mg P/g Asche.....	53
Abbildung 18: P-Gehalte der C-Probe bei einer Einwaage von 250 mg in mg P/g Asche	54
Abbildung 19: P-Anteil in der Hausfeuerungsasche in mg P/g Asche.....	55

Abkürzungsverzeichnis

AltholzV	<i>Altholzverordnung</i>
As	<i>Arsen</i>
AVV	<i>Abfallverzeichnis-Verordnung</i>
BFBS	<i>Biogene Festbrennstoffe</i>
BGH	<i>Bundesgütegemeinschaft Holzasche</i>
BGK	<i>Bundesgütegemeinschaft Kompost</i>
BImSchG	<i>Bundesimmissionsschutzgesetz</i>
BImSchV	<i>Bundesimmissionsschutzverordnung</i>
BioAbfV	<i>Bioabfallverordnung</i>
BiomasseV	<i>Biomasseverordnung</i>
BMHKW	<i>Biomasseheizkraftwerk</i>
BMHW	<i>Biomasseheizwerk</i>
BMKW	<i>Biomassekraftwerk</i>
CaO	<i>Calciumoxid</i>
Cd	<i>Cadmium</i>
CO ₂	<i>Kohlenstoffdioxid</i>
Cr	<i>Chrom</i>
Cu	<i>Kupfer</i>
C _x H _y O _z	<i>Biomasse allgemein</i>
DepV	<i>Deponieverordnung</i>
DüMV	<i>Düngemittelverordnung</i>
DüngMProbV	<i>Düngemittel-Probenahme- und Analysenverordnung</i>
EEG	<i>Erneuerbare-Energien-Gesetz</i>
GWh	<i>Gigawattstunden = 10⁹ Wh</i>
H ₂	<i>Wasserstoff</i>
H ₂ O	<i>Wasser</i>
H ₂ O _{dest.}	<i>Destilliertes Wasser</i>
H ₂ SO ₄	<i>Schwefelsäure</i>
Hg	<i>Quecksilber</i>
HKW	<i>Heizkraftwerk</i>
HLUG	<i>Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie</i>
HW	<i>Heizwerk</i>
K ₂ O	<i>Kaliumoxid</i>
KrWG	<i>Kreislaufwirtschaftsgesetz</i>
KSA	<i>Klärschlammasche</i>
kW	<i>Kilowatt = 10³ Watt</i>
KWK	<i>Kraft-Wärme-Kopplung</i>
LIS-A	<i>LänderInformationsSystem für Anlagen</i>
Mg	<i>Megagramm = Tonne</i>
MgO	<i>Magnesiumoxid</i>

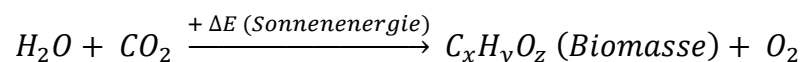
MJ/kg	<i>Megajoule pro Kilogramm</i>
mm	<i>Millimeter = 10^{-3} Meter</i>
MW	<i>Megawatt = 10^6 Watt</i>
Na ₂ O	<i>Natriumoxid</i>
NaOH	<i>Natronlauge</i>
NaWaRo	<i>Nachwachsende Rohstoffe</i>
Ni	<i>Nickel</i>
Nr.	<i>Nummer</i>
O ₂	<i>Sauerstoff</i>
ORC	<i>Organic-Rankine-Cycle</i>
P	<i>Phosphor</i>
P ₂ O ₅	<i>Phosphorpentoxid</i>
PAK	<i>Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe</i>
Pb	<i>Blei</i>
PCB	<i>Polychlorierte Biphenyle</i>
PCDD/PCDF	<i>Polychlorierte Dibenzodioxine und Dibenzofurane</i>
SCR	<i>Selektive katalytische Reduktion</i>
SNCR	<i>Selektive nicht-katalytische Reduktion</i>
SWS	<i>stationäre Wirbelschichtfeuerung</i>
t/a	<i>Tonnen pro Jahr</i>
TA-Luft	<i>Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft</i>
TM	<i>Trockenmasse</i>
Zn	<i>Zink</i>
ZWS	<i>zirkulierende Wirbelschichtfeuerung</i>

1 Einleitung in die Thematik

Die Verbrennung von Biomasse ist eine der ältesten Formen der Wärme­gewinnung. Schon in der Steinzeit wurde die Verbrennung von Holz zur Wärme­gewinnung genutzt. Durch stetig steigende Ölpreise, die Diskussion um Kohlenstoffdioxidemissionen und ihren Beitrag zum anthropogenen Treibhauseffekt rückt ein nachhaltiger und schonender Umgang mit den vorhandenen Ressourcen mehr und mehr in den Blickpunkt. In diesem Zuge fällt das Augenmerk immer häufiger auf die Nutzung regenerativer Energien sowie auf die Rückgewinnung endlicher Rohstoffe, bevor deren Ressourcen und Reserven aufgebraucht sind.

Biomasse ist gespeicherte Sonnenenergie, die als Rohstoff gut gelagert werden kann und so immer dann Energie liefert, wenn eine Energienachfrage besteht. Dadurch können natürliche Schwankungen von Wind- und Solarenergie ausgeglichen werden. Die Nutzung von Biomasse zur Wärme- und Stromerzeugung ist eine indirekte Nutzung der Sonnenenergie, die zuvor über die Photosynthese der Pflanzen gebunden wurde. Bei der Photosynthese werden Kohlenstoffdioxid (CO₂) und Wasserstoff (H₂) als Biomasse gebunden und Sauerstoff (O₂) wird freigesetzt. (Kaltschmitt, et al., 1997)

Vereinfacht lässt sich dieser Prozess wie folgt darstellen (Quaschnig, 2011):



Bei der energetischen Nutzung von Biomasse wird die gebundene Sonnenenergie als Wärme frei, Wasser und CO₂ entstehen. Dabei wird jedoch nur so viel CO₂ frei, wie zuvor durch die Photosynthese gebunden wurde. Daher ist Biomasse ein sogenannter „CO₂-neutraler“ Energieträger. Neben CO₂ und Wasser binden die Pflanzen bei der Photosynthese auch Nährstoffe, die, bis auf Stickstoff, bei der Verbrennung nicht freigesetzt werden und in der Asche verbleiben. (Dannenberg, et al., 2012)

Einer dieser in der Asche verbleibenden Nährstoffe ist Phosphor. Dieser nicht erneuerbare, essentielle und endliche Rohstoff ist Bestandteil der Nahrungskette, der DNA und von vielen biologischen Prozessen. Da Phosphor in der Natur nicht in elementarer Form vorkommt, muss er aus Phosphatgestein gewonnen werden. Die vorhandenen Phosphat-

lagerstätten sind jedoch zum Teil schon erheblich erschöpft, die Reserven werden in absehbarer Zeit aufgebraucht sein. (Montag, 2008)

Daher stellt sich die Aufgabe, neue Wege zu finden, mit denen Phosphor aus Sekundärrohstoffen gewonnen werden kann. Zur Schonung der Rohstoffressourcen müssen bisher ungenutzte Stoffkreisläufe geschlossen und Verfahren zur Rohstoffrückgewinnung etabliert werden. Bei diesen Rückgewinnungsverfahren erfolgt eine gezielte Schadstoffentfrachtung, Wertstoffe und Schadstoffe werden voneinander getrennt. Der gewonnene Phosphor aus bereits bestehenden Verfahren zur Phosphorrückgewinnung aus Klärschlammaschen liegt schließlich als Calcium-, Magnesium- oder Magnesiumammoniumphosphat vor, die in der Landwirtschaft als Dünger, in der Düngemittel- oder Phosphorindustrie genutzt werden können (Pinnekamp, et al., 2013). Es handelt sich somit um Phosphatrückgewinnungsverfahren, der Begriff „Phosphorrückgewinnung“ hat sich jedoch in Politik und Fachliteratur etabliert und wird deshalb auch in der vorliegenden Arbeit verwendet.

Ergänzend zu den bereits untersuchten Stoffströmen Abwasser, Klärschlamm, Klärschlammaschen, Bioabfall und tierische Nebenprodukte (Höhne, 2014) soll in der vorliegenden Arbeit der Einsatz von Biomasseaschen als möglicher Sekundärrohstofflieferant für Phosphor betrachtet werden. Dabei wird diskutiert, ob Biomasseasche sich für die Rückgewinnung eignet und welche Potentiale zur Rückgewinnung in Hessen vorhanden sind.

2 Zielsetzung

Phosphor als limitierter und zugleich essentieller Rohstoff für alle Organismen muss auch in Zukunft noch ausreichend zur Verfügung stehen. Ohne Phosphor ist auf der Erde kein tierisches und pflanzliches Wachstum möglich. Bereits im Jahr 2035 kann der sogenannte „Phosphor-Peak“ erreicht sein: Der Zeitpunkt an dem der weltweite Phosphorverbrauch die Produktion von Phosphor übersteigt (Schaum, et al., 2012). Daher sind Bestrebungen und Entwicklungen zum Phosphorrecycling unerlässlich, denn diese schonen die natürlichen Ressourcen und vermindern die Abhängigkeit von den wenigen Exportländern.

In Kooperation mit dem Hessischen Landesamt für Umwelt und Geologie (HLUG) und aufbauend auf eine vorangegangene Masterarbeit (Höhne, 2014) ist das Ziel dieser Arbeit, das Phosphorpotential in Biomasseverbrennungsaschen aus Hessen zu ermitteln und den aktuellen Stand der Entsorgungswege der Biomasseverbrennungsaschen darzustellen. Die Befragung verschiedener Biomasseverbrennungsanlagen in Hessen ist dabei ein wichtiger Schritt, um benötigte Daten zu erheben und das Spektrum der Entsorgungswege zu erfassen. Neben der Befragung der Biomasseverbrennungsanlagen sollen die Phosphorgehalte verschiedener Biomasseverbrennungsaschen analysiert werden, um anschließend Aussagen über die Möglichkeit der Phosphorrückgewinnung treffen zu können.

Diese Arbeit soll neben dem Potential der Klärschlammaschen ein mögliches zusätzliches Potential der Phosphorrückgewinnung aufzeigen und einen weiteren Beitrag zur Ressourcenschonung und zum Stoffrecycling leisten.

3 Notwendigkeit der Phosphorrückgewinnung

Das chemische Element Phosphor (P) ist ein Nichtmetall und kann in den Modifikationen weißer, roter und schwarzer Phosphor hergestellt werden. Phosphor kommt in der Natur nur gebunden als Phosphat in Mineralien oder Böden beziehungsweise in organischen Verbindungen in Lebewesen vor. (Freudig, 2003)

Phosphor ist für alle Lebewesen ein essentielles Element. In allen Organismen ist Phosphor für biologische Prozesse wie den Energiestoffwechsel und die Photosynthese, aber auch für den Aufbau von RNA, DNA, den Knochen und Zähnen ein bedeutender Rohstoff, der über die Nahrung aufgenommen werden muss. Neben Stickstoff ist Phosphor einer der wichtigsten Nährstoffe und gilt als begrenzender Faktor beim Pflanzenwachstum. Im Gegensatz zu Stickstoff, der in unbegrenzter Menge aus der Luft gewinnbar ist, muss Phosphor aus den weltweiten Phosphatlagerstätten gewonnen werden. (Montag, 2008)

Die bedeutendsten Phosphatlagerstätten befinden sich in Marokko, China, USA, Russland sowie in Südafrika und Jordanien. Deutschland ist auf den Import aus zum Teil politisch instabilen Ländern angewiesen, da keine abbauwürdigen Phosphatlagerstätten vorhanden sind. Phosphor ist zu etwa 0,1 % am Aufbau der Erdkruste beteiligt und liegt zu 95 % in Form von Apatit, meist Fluorapatit, vor (Kelker, 1979). Dieses Phosphaterz wird überwiegend im Tagebau gewonnen und aufwendig aufbereitet. Mit Hilfe eines Säureaufschlusses mit Schwefelsäure kann Phosphorsäure hergestellt werden, die anschließend vor allem als Ausgangsstoff für Düngemittel verwendet wird. Über die thermische Reduktion ist die Gewinnung von elementarem Phosphor möglich. (Montag, 2008)

Die Reichweite der bekannten Phosphorreserven wird sehr unterschiedlich angegeben. Nach Angabe des U.S. Geological Survey sind weltweit etwa $67 \cdot 10^9$ Mg Phosphaterz als Phosphatreserven nachgewiesen, die statistische Reichweite beträgt noch etwa 300 Jahre (Pinnekamp, 2014 S. Abschnitt 8), während andere Wissenschaftler von einem Jahrhundert ausgehen (Pinnekamp, 2014 S. Abschnitt 1). Die Qualität des abgebauten Rohphosphats nimmt jedoch immer weiter ab, die Verunreinigung mit Schadstoffen, insbesondere Schwermetallen, und der Aufbereitungsaufwand nehmen stetig zu. Dies führt zu erhöhten Umweltbelastungen und einem höheren Energie- und Wasserverbrauch. (Grünes, et al., 2014)

Der größte Teil (rund 60 %) der Mineralphosphate wird in Deutschland in der Düngemittelindustrie eingesetzt, danach folgt die Futtermittelherstellung (20 %). In geringerem Maße wird Phosphor in der Lebensmittelindustrie, bei der Trinkwasserversorgung, in Flammenschutzmitteln und bei der Herstellung von Reinigungs-, Wasch- und Pflegemitteln eingesetzt. (Grünes, et al., 2014) In einigen Bereichen, wie in Reinigungs- und Waschmitteln, kann Phosphor durch andere Stoffe ersetzt werden. Dies ist in dem größten Verbrauchszweig, der Düngemittelindustrie, nicht möglich. Das Pflanzenwachstum ist ein natürlicher Phosphorkreislauf, in der Wachstumsphase wird Phosphor dem Boden entzogen. Stirbt die Pflanze ab und verrottet, wird der gebundene Phosphor an den Boden abgegeben und der Stoffkreislauf geschlossen. Auf Flächen, die in der industriellen Landwirtschaft genutzt werden, wird dieser Kreislauf jedoch unterbrochen. Die Ernterückstände verbleiben und verrotten nicht mehr auf dem Feld, daher muss Phosphor zum Ausgleich der Ernteentnahmen dem Boden künstlich über die Düngemittel zugeführt werden. (Pinnekamp, 2014)

Um die natürlichen Phosphorressourcen zu schonen, müssen die Gesteinsphosphate ersetzt und Verfahren zum Phosphorrecycling aus verschiedenen Sekundärrohstoffen entwickelt werden. Diese Verfahren ermöglichen eine Abtrennung der Schadstoffe, der recycelte Phosphor soll anschließend vor allem in der Düngemittel- und Phosphorindustrie eingesetzt werden. (Pinnekamp, 2014)

Zur Phosphorrückgewinnung sind vor allem folgende Stoffströme geeignet (Grünes, et al., 2014):

- Abwasser, Klärschlamm, Klärschlammasche (KSA)
- Tier- und Fleischknochenmehle (tierische Nebenprodukte)
- Wirtschaftsdünger
- Gärrückstände
- Komposte, Bioabfall
- Biomasseaschen

Im Rahmen einer Masterthesis (Höhne, 2014) wurden für Hessen tierische Nebenprodukte, Bio- und Grünabfälle, Abwasser, Klärschlamm und Klärschlammaschen auf ihre Phosphorpotentiale hin untersucht.

Bio- und Grünabfälle weisen ein relativ hohes Phosphorpotential auf. Bioabfallkompost enthält nach HÖHNE 4,9 kg P_2O_5 /t Frischmasse, Grüngutkompost 4 kg P_2O_5 /t Frischmasse. Da diese Komposte landwirtschaftlich verwendet werden, geht nur das Potential des energetisch verwerteten Grünabfalls ohne Rückgewinnung verloren. Da der Phosphor in der Asche als Rückstand der energetischen Verwertung verbleibt, wird dieses Potential in der vorliegenden Arbeit betrachtet.

In den Stoffströmen Abwasser, Klärschlamm und Klärschlammasche liegt das größte Rückgewinnungspotential. Vor allem die Klärschlammaschen stehen im Vordergrund, da die derzeitige politische Entwicklung auf ein Ausbringungsverbot von Klärschlämmen als Düngemittel hinweist. Im Bereich des Abwassers sind die bestehenden Abwasserreinigungsverfahren auch auf die Phosphorelimination ausgerichtet, sodass Phosphor in den Klärschlämmen angereichert wird. Dennoch gibt es auch Verfahren zu Rückgewinnung aus der flüssigen Phase, die nach HÖHNE jedoch eine geringe Rückgewinnungsrate und Wirtschaftlichkeit aufweisen. Im Bereich der Klärschlämme muss Phosphor zunächst aus der chemisch oder biologisch gebundenen Form rückgelöst und in eine für die Pflanze beziehungsweise für die Industrie geeignete Form überführt werden. Ein Nachteil hierbei ist jedoch die gleichzeitige Rücklösung der gebundenen Schwermetalle. Dennoch gibt es bereits großtechnisch umgesetzte Verfahren, die von HÖHNE positiv bewertet und empfohlen werden. Klärschlammaschen eignen sich allerdings am besten zur Rückgewinnung von Phosphor, da hier im Vergleich zu den Klärschlämmen die zu behandelnden Volumenströme und die einzusetzenden Chemikalienmengen deutlich geringer ausfallen. Eine Monoverbrennung vorausgesetzt, enthalten KSA etwa 5 bis 10 % P_2O_5 der Trockensubstanz (Schaum, et al., 2012). Sie können als Ersatz für Rohphosphat genutzt und nasschemisch oder thermochemisch aufbereitet werden. Die verschiedenen Verfahren werden von HÖHNE ausführlich dargestellt und bewertet. Aus den KSA können mit einigen Verfahren P-Rückgewinnungsquoten von bis zu 90 % erreicht werden.

Bei den tierischen Nebenprodukten wurde ein geringes Phosphorpotential in Hessen festgestellt, sodass die Betrachtung auf Deutschland ausgeweitet wurde. Phosphor in tierischen Nebenprodukten und deren Aschen weist eine geringe Wasserlöslichkeit und daher auch eine geringe Pflanzenverfügbarkeit auf. Die Verfahren zur Phosphorrückge-

winnung sind ähnlich wie bei Klärschlammaschen, wobei auch hier die Monoverbrennung vorausgesetzt werden muss. Eine Rückgewinnung von Phosphor aus tierischen Nebenprodukten ist theoretisch möglich (3-6 % P enthalten). Ein Großteil der Produkte wird weiterverarbeitet, daher wird nur die Kategorie 1 der tierischen Nebenprodukte, die spezifisches Risikomaterial und von Tierseuchen befallene Tiere beinhaltet, als mögliches Potential angesehen.

Der Phosphorgehalt wird in % P oder in % P_2O_5 angegeben. Um die unterschiedlichen Angaben miteinander vergleichen zu können, wird folgende Umrechnung angewendet:

$$P_2O_5 \cdot 0,4363 = P$$

$$P \cdot 2,2915 = P_2O_5$$

Vergleicht man den Phosphorgehalt der potentiellen Stoffströme zur Phosphorrückgewinnung wird deutlich, dass sich die Gehalte erheblich unterscheiden: Klärschlammaschen weisen einen Phosphorgehalt von 5-10 % P_2O_5 auf (Schaum, et al., 2012), tierische Nebenprodukte haben einen Phosphorgehalt von 3-6 % P (\cong 7-14 % P_2O_5). Bio- und Grünabfälle enthalten dagegen nur 4,9 kg P_2O_5 /t Frischmasse (Bioabfallkompost) beziehungsweise 4 kg P_2O_5 /t Frischmasse (Grüngutkompost), sodass der Phosphoranteil hier bei < 1 % P_2O_5 liegt (Höhne, 2014). Die Nährstoffe liegen, außer in Kompost, jedoch nicht in pflanzenverfügbarer Form vor, daher müssen diese in eine lösliche Form überführt werden. Da Phosphor in den Aschen ein ähnliches Verhalten wie Rohphosphat aufweist, kann es über einen nasschemischen Säureaufschluss genutzt und weiterverarbeitet werden. (Pinnekamp, 2014 S. Abschnitt 6) Möglicherweise können die Biomasseverbrennungaschen analog zu den Klärschlammaschen und den tierischen Nebenprodukten mit den hierfür bereits entwickelten Verfahren weiterverarbeitet werden, sodass eine kombinierte Nutzung der vorhandenen phosphorhaltigen Stoffströme möglich wird.

4 Grundlagen zur Biomasseverbrennung

Im Folgenden werden Grundlagen behandelt, die einen Einstieg in das Thema der Biomasseverbrennung bieten und für das Verständnis der Arbeit benötigt werden. Zunächst wird der Begriff „Biomasse“ definiert und die Funktionsweise der verschiedenen Biomasseverbrennungsanlagen dargestellt. Anschließend wird näher auf die Brennstoffe als Input einer Biomasseverbrennungsanlage eingegangen und die Asche als Output beschrieben.

4.1 Definition Biomasse

Der Begriff „Biomasse“ ist in der Literatur und in den geltenden Rechtsvorschriften eindeutig definiert.

Die Biomasseverordnung (BiomasseV) bestimmt in §2, welche Stoffe als Biomasse im Sinne des Erneuerbare-Energien-Gesetzes anerkannt sind. Gemäß §2 (1) gelten *„Energieträger aus Phyto- und Zoomasse“* sowie hieraus *„resultierende Folge- und Nebenprodukte, Rückstände und Abfälle“* als Biomasse. Im Besonderen sind dies nach Absatz 2 *„Pflanzen und Pflanzenbestandteile“* und daraus hergestellte Energieträger. *„Abfälle und Nebenprodukte pflanzlicher und tierischer Herkunft aus der Land-, Forst- und Fischwirtschaft“* zählen ebenso als Biomasse wie *„Bioabfälle nach §2 Nr.1 der Bioabfallverordnung“*. Gase und Alkohole, die aus Biomasse im Sinne von Absatz 1 hergestellt werden, und *„Treibsel aus der Gewässerpflege, Uferpflege und -reinhaltung“* gehören auch zur anerkannten Biomasse. (Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz, 2014)

Nach KALTSCHMITT (Kaltschmitt, et al., 2009) gelten alle Stoffe organischer Herkunft als Biomasse. Ebenso wie in der BiomasseV werden die lebende sowie die abgestorbene, aber noch nicht fossile Phyto- und Zoomasse und die hieraus resultierenden Rückstände als Biomasse definiert. Daneben werden Stoffe, die durch stoffliche Nutzung beziehungsweise technische Umwandlung entstanden sind, genannt. Torf dient als Abgrenzung zwischen Biomasse und den fossilen Energieträgern und ist in der BiomasseV als nicht anerkannte Biomasse aufgeführt.

Biomasse kann weiterhin in Primär- und Sekundärprodukte unterteilt werden. Primärprodukte sind durch die direkte Ausnutzung der Sonnenenergie mittels Photosynthese

entstanden. Dies sind die gesamte Pflanzenmasse und Produkte, die durch stoffliche Nutzung beziehungsweise technische Umwandlung daraus entstanden sind.

Sekundärprodukte entstehen durch die indirekte Nutzung der Sonnenenergie. Dies sind die gesamte Zoomasse und deren Rückstände, die durch Abbau oder Umbau der Primärprodukte in höheren Organismen (zum Beispiel Menschen, Tieren) entstehen. (Kaltschmitt, et al., 2009)

Die so entstandenen Energieträger können in allen Aggregatzuständen vorhanden sein, sodass sich die Energieträger aus Biomasse in feste, flüssige und gasförmige Bioenergieträger unterteilen lassen (Dannenber, et al., 2012). Die flüssigen und gasförmigen Bioenergieträger sind für diese Arbeit nicht relevant, die als Brennstoff eingesetzten festen Bioenergieträger werden unter Punkt 4.4 näher beschrieben.

4.2 Funktionsweise der Biomasseverbrennungsanlagen

Durch die Verbrennung von Biomasse in Kraftwerken kann elektrische (Strom) und thermische (Wärme) Energie erzeugt werden. Diese Kraftwerke können den Wärme- oder Strombedarf von Industriebetrieben oder auch ganzen Stadtgebieten decken. Man unterscheidet verschiedene Kraftwerke, die nach der Art der erzeugten Energie benannt werden:

- Biomasseheizwerk (BMHW): Erzeugung von Wärme
- Biomassekraftwerk (BMKW): Erzeugung von Strom
- Biomasseheizkraftwerke (BMHKW): Erzeugung von Strom und Wärme

Bevor die Biomasse verbrannt werden kann, muss sie meist mechanisch aufbereitet werden. Das Ziel dieser Aufbereitung ist es, einen homogenen und leicht handhabbaren Biomassebrennstoff mit gleichbleibenden Eigenschaften zu erhalten. Die Rohstoffe werden zuerst zerkleinert, anschließend gesiebt und sortiert. Weiterhin kann die Biomasse gepresst und zu Briketts oder Pellets verarbeitet werden. Diese Aufbereitungsschritte werden nicht mit jedem Brennstoff durchgeführt, dienen jedoch oft zum Aussortieren möglicher Fremdstoffe und zur Qualitätssicherung. So ist es möglich, Brennstoff und Verfahren optimal aufeinander abzustimmen und die Kosten zu senken. (Kaltschmitt, et al., 1997), (Kaltschmitt, et al., 2009)

Je nach Brennstoff und Leistung der Anlagen wird ein bestimmtes Feuerungssystem gewählt. Diese werden in Festbett-, Wirbelschicht- und Flugstromfeuerung unterschieden. Bei der Festbettfeuerung, die vor allem bei Pellets, Hackgut und Rinde verwendet wird, durchströmt die Verbrennungsluft das Brennstoffbett, ohne dass dieses aufgelockert wird. Man kann die Festbettfeuerung in Unterschub-, Seitenschub- und Abwurfteuerung unterteilen. Bei der Unterschubfeuerung (siehe Abbildung 1) wird der Brennstoff mit einer Schnecke eingetragen und die Verbrennung erfolgt in einer Mulde, auch Retorte genannt. Der Ausbrand der Gase findet über der Mulde in der Brennkammer statt. Die Unterschubfeuerung eignet sich vor allem für trockene und aschearme Brennstoffe, die nicht zu grobstückig und nicht zu feinkörnig sind.

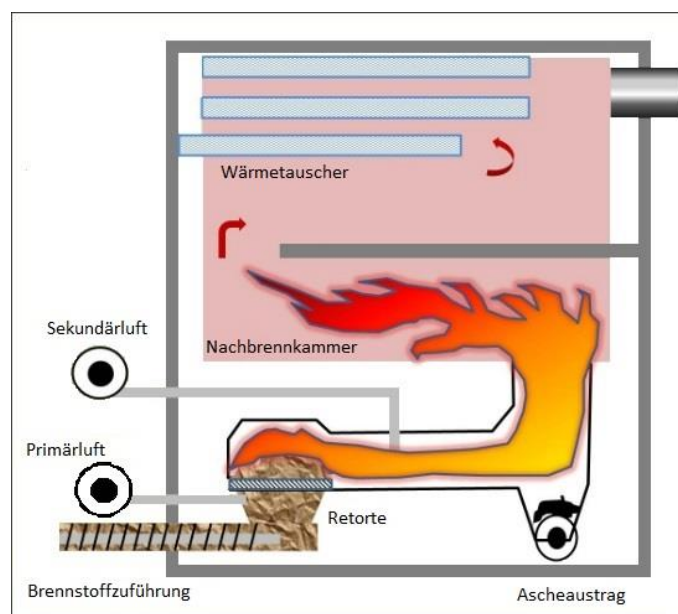


Abbildung 1: Schematische Darstellung einer Unterschubfeuerung (entnommen aus (C.A.R.M.E.N. e.V. - Biomasseheizwerke))

Feuerungen mit seitlichem Einschub sind Rostfeuerungen, überwiegend wird ein Vorschubrost verwendet. Der Rost ist meist schräg und besteht abwechselnd aus einem festen und einem beweglichen Element, durch dessen Bewegung der Brennstoff weitergeschoben wird. Diese Schürwirkung verbessert den Ausbrand und verhindert ein Anbacken. Zudem ist die Geschwindigkeit frei wählbar und kann dem Brennstoff angepasst werden.

Abwurfteuerungen werden meist in Verbindung mit einem Wanderrost verwendet. Dieser stellt ein endloses Band mit beweglichen Gliedern dar, das horizontal durch die Brennkammer verläuft und an zwei Wellen umgelenkt wird. Da bei dieser Rostart keine Schürwirkung vorhanden ist, erfolgt eine Wurfbeschickung, bei der die feinen Brennstoffpartikel im Flug zünden und im Fallen verbrennen. Die größeren Brennstoffpartikel

bilden eine gleichmäßige Schicht auf dem Rost und backen aufgrund der fehlenden Feinpartikel nicht an. Der Brennstoff muss für diese Art der Feuerung eine gleichmäßige und gleichbleibende Zusammensetzung und Struktur aufweisen, daher ist die Abwurf-
feuerung nur in geringem Maße für die Verbrennung von Biomasse geeignet. (C.A.R.M.E.N. e.V. - Biomasseheizkraftwerke), (C.A.R.M.E.N. e.V. - Biomasseheizwerke)

Die Wirbelschichtfeuerung ist unterteilbar in stationäre Wirbelschichtfeuerung (SWS) und in zirkulierende Wirbelschichtfeuerung (ZWS). Bei der SWS werden die Brennstoffpartikel durch die Anströmgeschwindigkeit der Verbrennungsluft aufgelockert, angehoben und verbleiben in einem Schwebestand. Wird die Anströmgeschwindigkeit noch weiter erhöht, werden Brennstoffpartikel partiell ausgetragen und müssen aus dem Gasstrom ausgetragen und rückgeführt werden (ZWS). Bei der Wirbelschichtfeuerung wird der Brennstoff in einem heißen Bettmaterial, das aus inertem Material (zum Beispiel Quarz-Sand) besteht, umgesetzt. Dieses Bettmaterial dient zur Temperaturstabilisierung, da das inerte Material die Verbrennungswärme aufnehmen kann. Die Wirbelschichtfeuerung wird vorwiegend im größeren Leistungsbereich eingesetzt und weist eine starke Flexibilität bei den Brennstoffeigenschaften auf. (Kaltschmitt, et al., 2009)

Bei der Flugstromfeuerung, die für trockene und feinkörnige Brennstoffe verwendet wird, werden alle Brennstoffpartikel mit dem Luftstrom transportiert und die Verbrennung erfolgt im Flug. Diese Art der Feuerung wird aufgrund des einsetzbaren Brennstoffs auch als Staubfeuerung bezeichnet. (Kaltschmitt, et al., 2009)

Je besser Feuerungstechnik und Brennstoff aufeinander abgestimmt sind, desto besser ist der Wirkungsgrad der Anlage und desto geringer sind die Schadstoffemissionen und der Ascheanfall (Kaltschmitt, et al., 2009). Dennoch werden bei der Verbrennung feine Staubpartikel und Schadstoffe freigesetzt, sodass eine Rauchgasreinigung erforderlich ist. Diese lässt sich in unterschiedliche Bereiche einteilen.

Zunächst erfolgt direkt nach der Brennkammer eine Staubabscheidung. Die Stäube bestehen aus Aschepartikeln, unverbrannten Stoffen und, je nach Brennstoff, auch aus Schwermetallen und Salzen. Mittels Fliehkraft- und Schwerkraftabscheidern, zum Beispiel Zyklone und Gewebe-/Elektrofilter, oder auch mit einer Nass-Entstaubung (Wäscher) können diese Stoffe aus dem Abgasabgeschieden werden.

Weiterhin werden Maßnahmen zur Minderung von Stickoxiden durchgeführt. Möglich ist die selektive nicht-katalytische Reduktion (SNCR) und die selektive katalytische Reduktion (SCR). Durch Zugabe eines stickstoffhaltigen Reduktionsmittels, zum Beispiel Ammoniak oder Harnstoff, werden die Stickstoffoxide zu molekularem Stickstoff umgesetzt. Dies erfolgt entweder bei hoher Temperatur (SNCR) oder in Kombination mit einem Katalysator (SCR). Um mögliche Chlorwasserstoffemissionen zu verhindern, wird Kalkhydrat eingemischt oder das Abgas durch einen Wäscher geführt. Zur Minderung von Feinstaubemissionen werden elektrostatische oder filternde Abscheider eingesetzt. Diese Feinstaubabscheider sind in allen Anlagen mit einer Feuerungsleistung ab 1 MW verpflichtend (C.A.R.M.E.N. e.V. - Biomasseheizwerke).

Um den Wirkungsgrad einer Anlage noch weiter zu steigern, ist eine Wärmerückgewinnung aus dem Abgas mit einem Economiser oder einer Kondensation sinnvoll. Im Economiser wird das Abgas in einem Wärmeüberträger bis kurz über den Taupunkt abgekühlt, die gewonnene Wärme wird zur Vorwärmung des Systemrücklaufs genutzt. In einer Abgaskondensationsanlage wird das Abgas unter den Taupunkt abgekühlt, sodass eine Entschwadung des Abgases erfolgt und noch verbliebene Feinstpartikel abgeschieden werden. (C.A.R.M.E.N. e.V. - Biomasseheizwerke), (Kaltschmitt, et al., 2009)

Ein beispielhafter Aufbau der Rauchgaseinigung ist in Abbildung 2 und Abbildung 4 dargestellt.

Um den Ascheanfall möglichst gering zu halten, müssen Brennstoff und Anlagentechnologie aufeinander abgestimmt sein. Einfluss auf die Asche haben der Ausbrand, die Feuerraumtemperatur und die Temperatur, bei der die Asche anfällt. Die Verbrennung sollte vollständig sein, um organische Rückstände wie PAK und PCDD/F in der Asche zu vermeiden. (Bayrisches Landesamt für Umwelt, 2009)

Untersuchungen haben ergeben, dass durch eine Erhöhung der Temperatur der Ascheanfall gesenkt werden kann. Um die Partikelgröße in den Aschen möglichst klein zu halten, ist eine gleichmäßige Verteilung des Brennstoffs nötig und für die Asche muss eine hohe Beweglichkeit vorhanden sein. Zudem nimmt bei guter und gleichmäßiger Belüftung die Verschlackung der Asche ab. (Obernberger, et al., 1995)

Die Funktionsweisen der verschiedenen Biomasseverbrennungsanlagen werden im Folgenden ausführlich erläutert.

4.2.1 Biomasseheizkraftwerk (BMHKW)

Ein BMHKW kombiniert die Erzeugung von Wärme und Strom mittels Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) und steigert so die energetische Ausnutzung der Biomasse. Der Wirkungsgrad dieser Anlagen liegt in der Regel bei 85-90 % (Dannenberg, et al., 2012). Die Erzeugung von Strom und Wärme erfolgt dabei mit einem Dampfkraftprozess oder mit der ORC-Technik. In Anlagen mit einer elektrischen Leistung von mehr als 2 MW werden überwiegend Dampfturbinen eingesetzt, darunter Dampfkolbenmotoren oder bei einer elektrischen Leistung zwischen 200 kW und 1 MW die ORC-Technik. (C.A.R.M.E.N. e.V. - Biomasseheizkraftwerke)

Der Dampfkraftprozess ist der am weitesten verbreitete Stromerzeugungsprozess. Basierend auf dem Clausius-Rankine-Prozess wird Wasser als Arbeitsmedium verwendet. Durch die Verbrennung der Biomasse wird das Wasser im Dampferzeuger erhitzt, es verdampft und überhitzt. Der Dampf treibt eine Turbine an, die mittels eines Generators die gewonnene Energie in Strom umwandelt. Der Dampf wird anschließend kondensiert und zum Dampferzeuger zurückgeführt. Die im Kondensator gewonnene Wärme kann anschließend genutzt werden. (Kaltschmitt, et al., 2009)

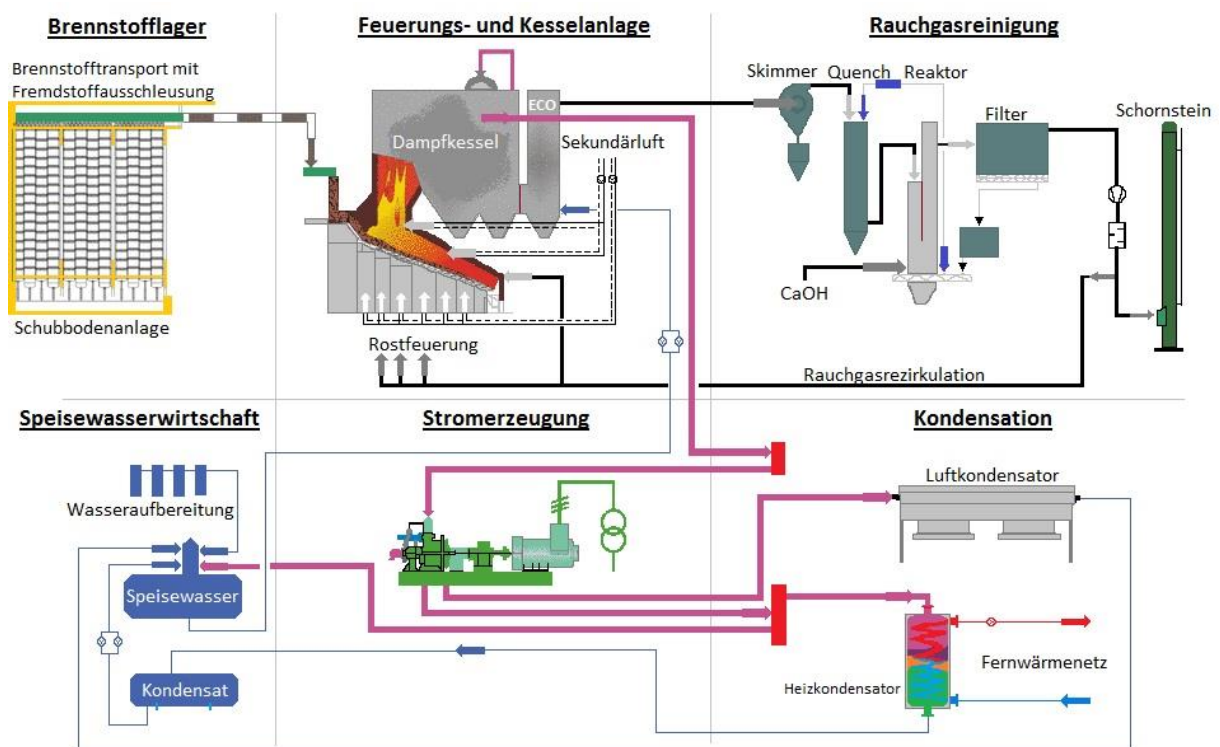


Abbildung 2: Funktionsschema eines Biomasseheizkraftwerkes mit Dampfkraftprozess (entnommen aus (ESWE BioEnergie GmbH))

Abbildung 2 zeigt schematisch den Aufbau eines Biomasseheizkraftwerkes mit Dampfkraftprozess. Der Dampfkreislauf ist in Magenta dargestellt, der Speisewasserkreislauf der Anlage in Blau. Die Dampfturbine ist in grün in den Kreislauf eingebunden, die Bereitstellung der Fern-/Nahwärme ist im rechten unteren Bereich zu sehen. Der elektrische Wirkungsgrad einer solchen Anlage beträgt etwa 20-25 %, durch KWK lassen sich Wirkungsgrade von bis zu 80 % erzielen. (C.A.R.M.E.N. e.V. - Biomasseheizkraftwerke), (Kaltschmitt, et al., 2009)

Neben der Dampfturbine wird bei kleineren Anlagen (< 2 MW) der Dampfkolbenmotor eingesetzt. Dieser arbeitet nach dem Prinzip der Verdrängermaschine, wobei die Leistung und die Laufgeschwindigkeit durch die Kolben begrenzt sind. Die erzielten elektrischen Wirkungsgrade liegen mit rund 15 % deutlich unter denen der Dampfturbine. (C.A.R.M.E.N. e.V. - Biomasseheizkraftwerke)

Außer dem klassischen Dampfkraftprozess ist auch die ORC-Technik zur Stromerzeugung in Biomasseverbrennungsanlagen verbreitet. Der ORC-Prozess (Organic-Rankine-Cycle-Prozess) basiert auf dem Clausius-Rankine-Prozess, arbeitet jedoch nicht mit Wasser als Arbeitsmedium. Hier wird mit einem organischen Arbeitsmedium gearbeitet, welches eine geringere Siede- und Kondensationstemperatur als Wasser besitzt. Dieser Prozess, üblicherweise als Nachschaltprozess, ermöglicht die Energiebereitstellung aus Wärme, die auf einem niedrigen Temperatur- und Dampfniveau anfällt. (Kaltschmitt, et al., 2009) Daher kann die bei der Biomasseverbrennung entstehende Wärme nicht direkt auf das Arbeitsmedium des ORC-Prozesses übertragen werden, die Folge wäre eine Überhitzung beziehungsweise Zerstörung des organischen Arbeitsmediums. Um dies zu verhindern, ist ein Heizwasser- oder Thermoölkreislauf zwischengeschaltet, mit dem die Wärmeenergie aus der Verbrennung in einem Verdampfer auf das organische Arbeitsmedium übertragen wird.

Abbildung 3 zeigt den klassischen Aufbau eines ORC-Prozesses (roter Kreisprozess). Die Verbrennung der Biomasse erwärmt das Thermoöl, welches in einem geschlossenen Kreislauf geführt wird. Im Verdampfer wird die Wärmeenergie auf das Arbeitsmedium übertragen, welches verdampft. Der Dampf wird über eine Dampfturbine geleitet, die direkt mit einem Generator gekoppelt ist. Der entspannte Dampf geht über einen Regenerator und einen Kondensator im Kreislauf zurück, die im Kondensator gewonnene

Wärme kann als Nah-, Fern- oder Prozesswärme genutzt werden. (C.A.R.M.E.N. e.V. - ORC-Technik)

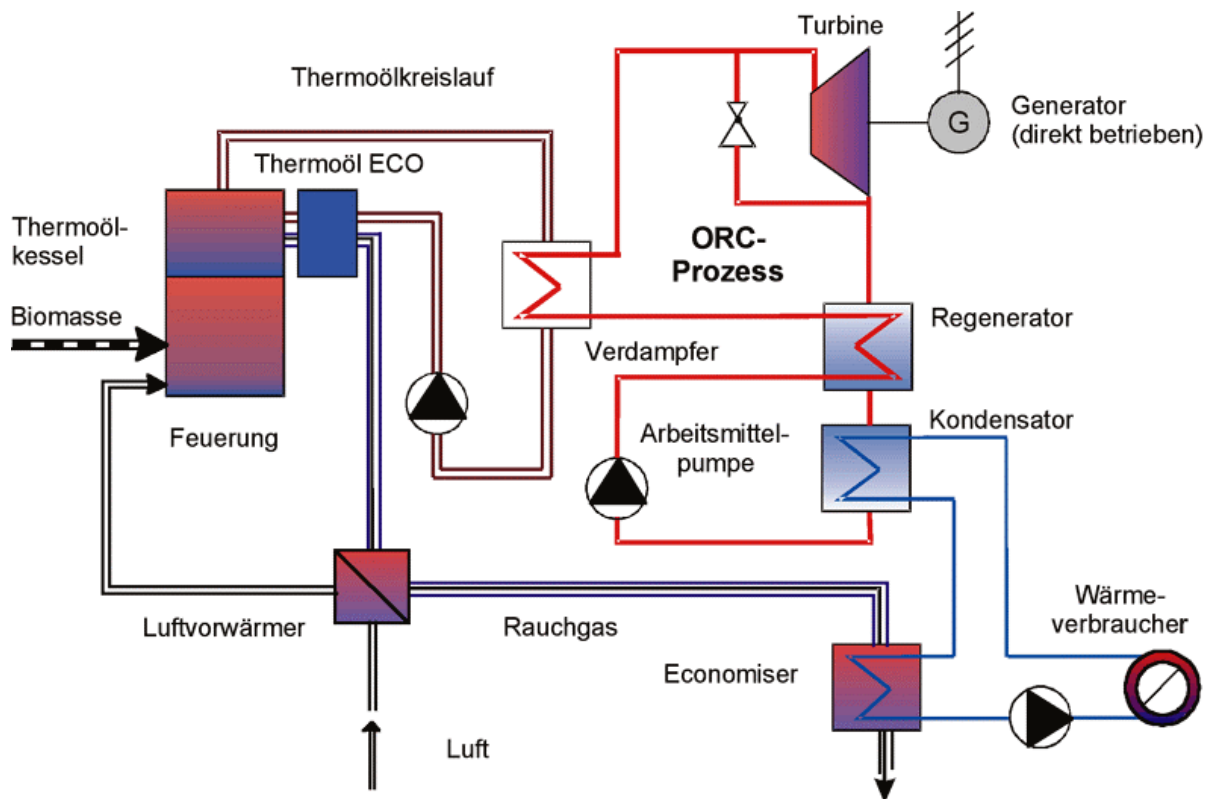


Abbildung 3: Schematische Darstellung des ORC-Prozesse (entnommen aus (BIOS Bioenergiesysteme GmbH))

Biomassekraftwerke, die mit Dampfturbinen arbeiten, sind beispielsweise das Biomasseheizkraftwerk in Wiesbaden (ESWE BioEnergie GmbH) und in Frankfurt Fechenheim (Mainova AG, 2009). Das Biomassekraftwerk in Hosenfeld (Stadtwerke Düsseldorf AG, 2010) arbeitet mit der ORC-Technik.

4.2.2 Biomasseheizwerk (BMHW)

In BMHW wird durch die Verbrennung der Biomasse ausschließlich Wärme erzeugt. Über die Verbrennung wird Wasser in einem Heizkessel auf eine bestimmte Temperatur gebracht und über ein Rohrleitungssystem zu den Verbrauchern transportiert. Neben Warm- oder Heißwasser kann auch Dampf zu den Verbrauchern transportiert werden. Die Prozesse zur Wärmeerzeugung sind die gleichen wie unter Punkt 4.2.1 erläutert, die Verluste liegen bei 10-15 %. (Kaltschmitt, et al., 2009)

Biomasseheizwerke sind in Hessen meist für die Beheizung öffentlicher Gebäude zuständig, zum Beispiel die der Stadtwerke Gießen (Stadtwerke Gießen AG), oder Bestandteil eines Bioenergiedorfs wie in Oberrospe (Bioenergiedorf Oberrospe eG).

4.2.3 Biomassekraftwerk (BMKW)

In BMKW wird Strom durch die Verbrennung von Biomasse erzeugt. In Abbildung 4 ist deutlich zu erkennen, dass auch hier die gleichen Prozesse wie in BMHKW verwendet werden. Hierbei kommt es jedoch zu großen Verlusten von 65-75 %, da die entstehende Wärme ohne KWK nicht genutzt wird. (Kaltschmitt, et al., 2009)

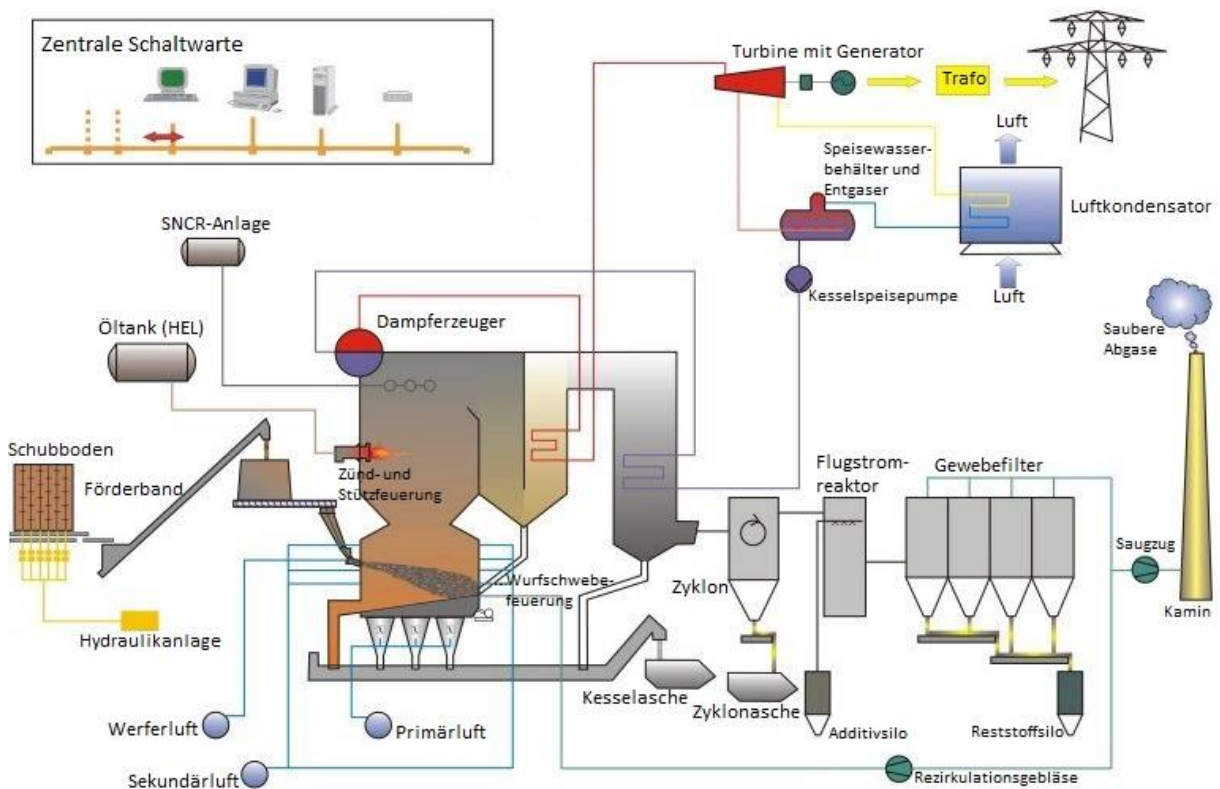


Abbildung 4: Funktionsschema eines Biomassekraftwerks (entnommen aus (Biomasse Rhein-Main GmbH))

Biomassekraftwerke, die wesentlich zur Stromversorgung beitragen, stehen beispielsweise in Flörsheim-Wicker (Biomasse Rhein-Main GmbH) oder Heidenrod-Kemel (Naturenergie Heidenrod GmbH, 2015).

4.3 Genehmigung

Für Biomasseverbrennungsanlagen gelten die gesetzlichen Anforderungen des Bundesimmissionsschutzgesetzes (BImSchG), insbesondere die 1. und 4. BImSchV und die TA-Luft. Die erforderliche Genehmigung der betreffenden Anlagen erfolgt daher nach den Vorgaben des BImSchG.

Die 1. BImSchV gilt für Anlagen, die keine Genehmigung nach BImSchG benötigen. Dies sind kleine und mittlere Feuerungsanlagen für Holz und Kohle unter 1 MW sowie Anlagen für Stroh, Getreide und ähnliche pflanzliche Brennstoffe unter 100 kW. In der 1. BImSchV sind die zulässigen Brennstoffe, Grenzwerte, Anlagenanforderungen und die Überwachung der Anlage geregelt. (Schmitt, 2012)

Die 4. BImSchV ist die Verordnung über genehmigungsbedürftige Anlagen. Dies sind Anlagen mit einer Feuerungsleistung > 1 MW (Holz, Kohle) und Anlagen mit einer Feuerungsleistung > 100 kW (Stroh Getreide, ähnliche pflanzliche Brennstoffe). Für Anlagen dieser Größen muss ein Genehmigungsantrag bei der zuständigen Behörde gestellt werden. In Hessen ist das jeweilige Regierungspräsidium die zuständige Genehmigungsbehörde für Genehmigungen nach BImSchG.

Der Genehmigungsantrag enthält Angaben zur Anlage und deren Emissionen, die Bauunterlagen und Nachweise zum Gewässerschutz und der Abfallverwertung. (Schmitt, 2012)

Man unterscheidet zwei Genehmigungsverfahren: Das vereinfachte Verfahren, bei dem alle betroffenen Behörden beteiligt sind, sowie das förmliche Verfahren, bei dem zusätzlich die Öffentlichkeit beteiligt wird. Beim vereinfachten Verfahren wird davon ausgegangen, dass von der Anlage ein geringeres Gefahrenpotential ausgeht, sodass eine Reihe von Vorschriften des förmlichen Verfahrens nicht zur Anwendung kommt. Beim förmlichen Verfahren wird zunächst der schriftliche Antrag an die Genehmigungsbehörde mit allen geforderten Informationen und Beschreibungen gestellt. Anschließend erfolgt eine amtliche Bekanntmachung, der Genehmigungsantrag ist einen Monat von jedermann einsehbar und Einwände der Öffentlichkeit können bis zwei Wochen nach Auslegungsfrist eingereicht werden. Nachdem der Antrag von der zuständigen Behörde überprüft wurde, findet ein Erörterungstermin statt. Teilnehmen darf dort jeder, der zuvor Einwände erhoben hat. Zuletzt wird die Genehmigung schriftlich erteilt, die mit Auflagen und Bedingungen verknüpft sein kann. Auf der Grundlage der TA-Luft werden die Emissionsgrenzwerte festgelegt, die mit Hilfe kontinuierlicher oder diskontinuierlicher Messungen überprüft werden. Mit dem Bau der Anlage darf nur dann vor der Genehmigung begonnen werden, wenn ein entsprechender Antrag gestellt wurde.

Die erteilte Genehmigung kann jedoch nachträglich erlöschen. Dies erfolgt, wenn die Anlage nicht innerhalb der gesetzlichen Frist errichtet beziehungsweise in Betrieb ge-

nommen wird oder wenn die Anlage drei Jahre still steht. Werden die Auflagen aus der Genehmigung nicht erfüllt, kann die Behörde den Betrieb untersagen und die Anlage stilllegen, bis der Betreiber die geforderten Auflagen erfüllt. Erfolgt dies nicht innerhalb der gesetzten Frist, kann die Behörde die Genehmigung widerrufen. Dies kann ebenso erfolgen, wenn das öffentliche Interesse gefährdet ist und schwere Nachteile für das Gemeinwohl auftreten. Treten nachträglich Tatsachen auf, die nicht in der Genehmigung enthalten sind, wird die Genehmigung ebenfalls widerrufen. (Sabo, 2011), (Schmitt, 2012)

4.4 Nutzbare Brennstoffe

In Biomasseverbrennungsanlagen werden nur feste Bioenergieträger verbrannt. Diese lassen sich in Hölzer und Halmgüter einteilen. Halmgutartige Biomasse umfasst die Energiepflanzen sowie Stroh, Getreide und Erntereste aus der Landwirtschaft (zum Beispiel Kartoffelblätter). Die Energiepflanzen lassen sich in Lignocellulosepflanzen, Ölpflanzen und Zucker- und Stärkepflanzen einteilen. Zu den Lignocellulosepflanzen zählen Miscanthus (Chinaschilf), Rutenhirse, Rohrglanzgras, Getreidepflanzen (Weizen, Roggen) und Futtergräser. Zu den Ölpflanzen zählen Raps und die Sonnenblume; Mais, Getreide, Zuckerrübe und Kartoffeln zählen zu den Zucker- und Stärkepflanzen. Die Öl-, Zucker- und Stärkepflanzen werden nicht näher betrachtet, da bei diesen Energiepflanzen zur Weiterverarbeitung erst das Öl/Ethanol gewonnen werden muss. (Kaltschmitt, et al., 2009)

Zur Gruppe der Hölzer gehören naturbelassenes Holz und Waldrestholz, welches zu Stückholz, Hackschnitzeln, Holzpellets oder- briketts verarbeitet wird. Weiterhin zählt die Rinde sowie Landschaftspflegematerial (zum Beispiel Verkehrswegebegleitholz, Baumschnitt aus öffentlichen Anlagen, Schwemmholz) zu den Hölzern. Eine weitere Gruppe der Hölzer sind Industrierestholz und Alt- beziehungsweise Gebrauchtholz. Industrierestholz fällt in der Holzbe- und verarbeitenden Industrie an. Hierzu zählen Reststücke beim Zuschnitt von Rundholz, Sägespäne und Schleifstäube sowie Rinde. (Kaltschmitt, et al., 2009)

Das Altholz wird in vier Kategorien eingeteilt, die in der Altholzverordnung (AltholzV) geregelt sind. Die Altholzverordnung gilt für die stoffliche und energetische Verwertung sowie für die Beseitigung von Altholz und beinhaltet auch das Industrierestholz. Erzeu-

ger und Besitzer von Altholz sowie „*Betreiber von Anlagen, in denen Altholz verwertet oder beseitigt wird*“ müssen die AltholzV beachten. Altholz im Sinne der Verordnung ist nach §2 Altholz, Industrierestholz aus holzbe- oder -verarbeitenden Betrieben und Gebrauchtholz, welches als „*gebrauchte Erzeugnisse aus Massivholz, Holzwerkstoffen oder aus Verbundstoffen mit überwiegendem Holzanteil*“ beschrieben wird. Der Massenanteil an Holz muss bei allen Hölzern über 50 % liegen und die Hölzer müssen im Sinne des §3 Absatz 1 des Kreislaufwirtschaftsgesetzes als Abfall deklariert sein. (Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz, 2002)

Die Altholzkategorien AI – AIV werden wie folgt definiert:

- **Kategorie AI**
Altholz der Kategorie AI ist „*naturbelassenes oder lediglich mechanisch bearbeitetes Altholz, das bei seiner Verwendung nicht mehr als unerheblich mit holzfremden Stoffen verunreinigt wurde*“
- **Kategorie AII**
Altholz der Kategorie AII ist „*verleimtes, gestrichenes, beschichtetes, lackiertes oder anderweitig behandeltes Altholz ohne halogenorganische Verbindungen in der Beschichtung und ohne Holzschutzmittel*“
- **Kategorie AIII**
Altholz der Kategorie AIII ist „*Altholz mit halogenorganischen Verbindungen in der Beschichtung ohne Holzschutzmittel*“
- **Kategorie AIV**
Altholz der Kategorie AIV ist Altholz, welches mit Holzschutzmitteln behandelt wurde „*sowie sonstiges Altholz, das aufgrund seiner Schadstoffbelastung nicht den Altholzkategorien AI – AIII zugeordnet werden kann*“

Weiterhin wird PCB-Altholz unterschieden, welches polychlorierte Biphenyle enthält und daher nach den Vorschriften der PCB/PCT-Abfallverordnung entsorgt werden muss. Die AltholzV regelt in §5 durch welche Maßnahmen der Betreiber die Anforderungen aus §3 einhalten kann. Hierzu zählen Sichtkontrolle und Sortierung des Altholzes nach den Kategorien, wobei das Altholz bei Unsicherheit immer in eine höhere Altholzkategorie eingestuft werden soll. Weiterhin müssen Störstoffe aussortiert werden und das Personal muss über Sachkunde verfügen. (Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz, 2002)

Damit ein Brennstoff optimal für die Strom- oder Wärmeerzeugung in Biomasseverbrennungsanlagen genutzt werden kann, muss die Qualität des Rohstoffes bekannt sein und mit der Anlage abgestimmt werden. Die Brennstoffqualität wird dabei durch die Elementgehalte, den Heizwert, Aschegehalt, Wassergehalt und das Ascheerweichungsverhalten beeinflusst. (Kaltschmitt, et al., 2009)

Die Elementgehalte beeinflussen vor allem den Heizwert sowie den Luftbedarf bei der Verbrennung, aber auch die Emissionen und die Eigenschaften der Asche.

Der Heizwert, auch als spezifische Verbrennungswärme bezeichnet, ist die auf ein Kilogramm des Brennstoffes bezogene Wärmemenge, die bei einer vollständigen Verbrennung des Brennstoffes freigesetzt wird. Hierbei nicht berücksichtigt ist die Kondensationswärme, die im Abgas enthalten ist. Wird diese berücksichtigt, spricht man vom Brennwert. Der Heizwert ist daher die Beurteilungsgröße der Energiemenge eines Brennstoffs, da die Wärme des Abgases nur mit Hilfe nachgeschalteter Anlagen und nicht bei der Verbrennung selbst genutzt werden kann. Geht man von trockener, wasserfreier Biomasse aus, so ist mit einem Heizwert von 16,5-19 MJ/kg zu rechnen, für lufttrockenes Holz kann ein Heizwert von 14,5-16,5 MJ/kg angenommen werden. In der Praxis gilt folgender Richtwert: 2,5 kg lufttrockenes Holz entsprechen einem Liter Heizöl mit einem Heizwert von etwa 36 MJ, wobei Nadelhölzer einen rund 9 % höheren Heizwert gegenüber Laubholz haben. Da der Heizwert vor allem durch den Wassergehalt der Brennstoffe beeinflusst wird, ist ein Vergleich nur dann möglich, wenn der Heizwert auf die absolute Trockenmasse bezogen ist. (Kaltschmitt, et al., 2009)

Nach KALTSCHMITT ist der Wassergehalt des Brennstoffs der Gehalt an Wasser, „*der sich unter definierten Bedingungen aus dem Brennstoff entfernen lässt*“. Der Wassergehalt ist auf die feuchte Biomasse bezogen und unterscheidet sich damit von der Brennstofffeuchte, die auf die Trockenmasse bezogen ist. Waldfrisches Holz hat einen Wassergehalt von 45-60 %, lufttrockenes Holz von 10-20 %.

Der Aschegehalt gibt an, wie viel anorganischer Rückstand, unter Umständen mit Verunreinigungen, nach der Verbrennung als Rest verbleibt. Holz hat, je nach Rinden- und Nadelanteil, einen Aschegehalt von 0,5 % bezogen auf die Trockenmasse. Bei Industrie- und Altholz kann der Aschegehalt höhere Werte aufweisen, da deutlich mehr Verunrei-

nigungen in der Asche enthalten sind. Rinde hat einen Aschegehalt von 2,5-5 %, Halmgüter weisen einen Aschegehalt von mehr als 5 % auf. (Kaltschmitt, et al., 2009)

Das Ascheerweichungsverhalten eines Brennstoffs beschreibt die physikalischen Veränderungen der Asche bei einem bestimmten Temperaturniveau. Diese Veränderungen können ein Verkleben aber auch völliges Aufschmelzen der Partikel sein. Das Ascheerweichungsverhalten ist abhängig von der Aschezusammensetzung. Holz und Rinde haben eine Erweichungstemperatur von 1.300 °C - > 1.400 °C, während diese bei Halmgut mit < 1.200 °C kritischer zu sehen ist. Liegt die Erweichungstemperatur im Bereich der Verbrennungstemperatur kann es zu Anbackungen oder Anlagerungen in der Anlage kommen. (Kaltschmitt, et al., 2009)

In Tabelle 1 sind für verschiedene biogene Festbrennstoffe die beschriebenen Werte angegeben. Es ist zu erkennen, dass sich Hölzer und halmgutartige Biomasse voneinander unterscheiden. Auch wird ersichtlich, dass der Brennwert aufgrund seiner Definition um einige Prozent höher gegenüber dem Heizwert ist. Das Ascheerweichungsverhalten ist für das Temperaturniveau angegeben, bei dem erste Verformungen erkennbar sind.

Tabelle 1: Brennstofftechnische Eigenschaften verschiedener biogener Festbrennstoffe (entnommen aus (Kaltschmitt, et al., 2009))

Brennstoff	Heizwert [MJ/kg]	Brennwert [MJ/kg]	Aschegehalt [% der TM]	Ascheerweichung [°C]
Hölzer				
Fichtenholz (mit Rinde)	18,8	20,2	0,6	1.426
Buchenholz (mit Rinde)	18,4	19,7	0,5	-
Pappelholz (Kurzumtrieb)	18,5	19,8	1,8	1.335
Weidenholz (Kurzumtrieb)	18,4	19,7	2,0	1.283
Rinde (Nadelholz)	19,2	20,4	3,8	1.440
Halmgüter				
Roggenstroh	17,4	18,5	4,8	1.002
Rapsstroh	17,1	18,1	6,2	1.273
Maisstroh	17,7	18,9	6,7	1.050
Sonnenblumenstroh	15,8	16,9	12,2	893
Roggenganzpflanzen	17,7	19,0	4,2	-
Roggenkörner	17,1	18,4	2,0	710
Rapskörner	26,5	-	4,6	-
Miscanthus	17,6	19,1	3,9	973
Landschaftspflegeheu	17,4	18,9	5,7	1.061
Straßengrasschnitt	14,1	15,2	23,1	1.200

4.5 Beschreibung der Biomasseaschen

Bei der Biomasseverbrennung fällt Asche an, die in verschiedene Fraktionen eingeteilt wird. Die Aschen bestehen überwiegend aus anorganischen Bestandteilen und aus den im Brennstoff enthaltenen Nähr- und Schadstoffen. (Bayrisches Landesamt für Umwelt, 2009) Die Verwertung oder Beseitigung der Aschefraktionen ist von verschiedenen Faktoren abhängig. Im Folgenden wird näher auf die Klassifizierung, Eigenschaften und Stoffgehalte der Aschefraktionen sowie deren Verwertung und Beseitigung eingegangen.

4.5.1 Aschefraktionen

Die Asche lässt sich grob in drei Fraktionen aufteilen, wobei je nach Rauchgasreinigung der Anlage auch nur zwei Fraktionen anfallen können. (Obernberger, 1997)

Die Feuerraumasche, auch Grob-, Rost- oder Brennraumasche genannt, entsteht im Verbrennungsteil der Anlage und besteht aus dem mineralischen Überrest des Brennstoffes sowie möglichen Fremdstoffen wie Steinen, Nägeln, Schlackebrocken und Klammern. Wird die Anlage mit Wirbelschichtfeuerung betrieben, enthält diese Aschefraktion zusätzlich das ausgetragene Bettmaterial.

Die Zyklonasche, auch Fein- oder Flugasche genannt, ist die von den Rauchgasen mitgeführte Asche. Sie fällt in den zur Rauchgasreinigung verwendeten Fliehkraftabscheidern (Zyklonen) an und beinhaltet die festen anorganischen Brennstoffbestandteile.

Die Filter- oder auch Feinstflugasche bezeichnet die in den filternden Abscheidern (Elektro- oder Gewebefilter) anfallende Asche beziehungsweise den bei Abgaskondensationsanlagen anfallenden Kondensatschlamm. Sind in einer Biomasseverbrennungsanlage keine filternden Abscheider vorhanden, wird die Feinstflugasche als Reststaub in die Atmosphäre ausgestoßen. Die aus dem Wendekammer- und Wärmeüberträgerbereich stammende Kesselasche wird meist zusammen mit der Grobasche erfasst, kann aber auch als Zyklonasche anfallen. Bei getrennter Erfassung von Kesselasche wird sie wie Zyklonasche behandelt. (Kaltschmitt, et al., 2009), (Bayrisches Landesamt für Umwelt, 2009)

Abbildung 5 zeigt schematisch die Bereiche, in denen die verschiedenen Aschefraktionen anfallen sowie deren Gewichtsanteil an der Trockenmasse des Gesamtaschenanfalls. Die Aschemenge und die genaue stoffliche Zusammensetzung sind abhängig von dem verwendeten Brennstoff und der Anlagentechnologie. Wie schon unter Punkt 4.4 be-

schrieben haben verschiedene Hölzer unterschiedliche Aschegehalte, bei der Altholzverbrennung ist mit höheren Verunreinigungen und daher mit mehr Ascheanfall zu rechnen. Ebenso ist bei einer Wirbelschichtfeuerung durch den Austrag des Bettmaterials der Ascheanteil größer. Die anfallende Aschemenge kann jedoch in allen Biomasseverbrennungsanlagen durch eine Anpassung von Anlage und Brennstoff beeinflusst werden. Je besser der Ausbrand in der Brennkammer ist, desto weniger Asche fällt an. Dagegen fällt mehr Asche an, je besser die Staubabscheidetechnologie in der Rauchgasreinigung ist. (Bayrisches Landesamt für Umwelt, 2009)

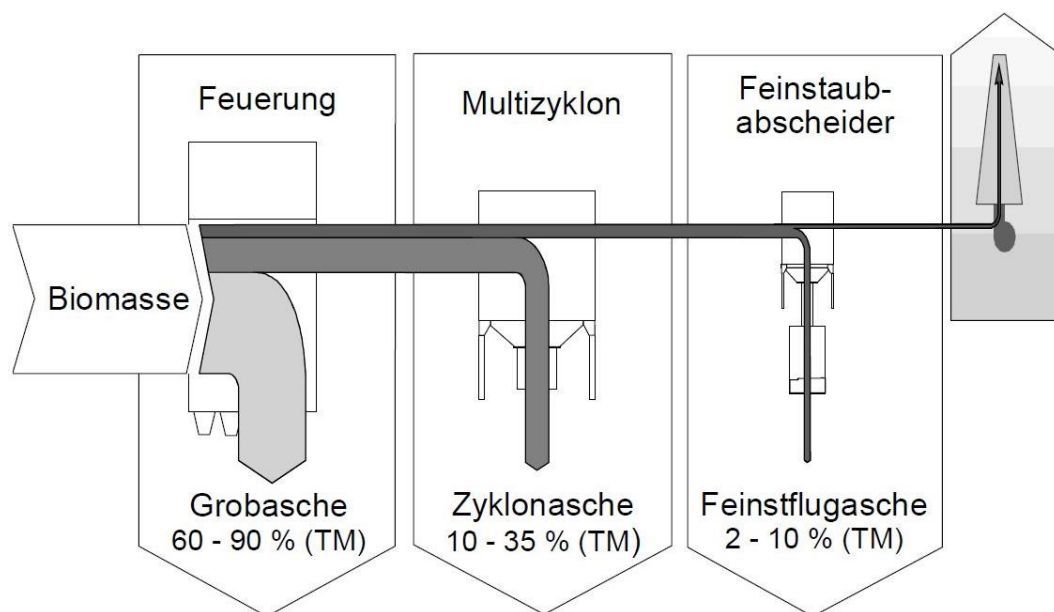


Abbildung 5: Anfallende Aschefraktionen mit Gewichtsanteilen am Gesamtaschenanfall (entnommen aus (Oberberger, 1997))

In Tabelle 2 sind zum Vergleich die Anteile der Aschefraktionen an der Trockenmasse der Gesamtasche für unterschiedliche Brennstoffe aufgeführt. Je nach Feuerungsart und der Brennstoffqualität kann der tatsächliche Ascheanfall jedoch stark abweichen.

Tabelle 2: Anteile der Aschefraktionen an der Trockenmasse der Gesamtasche für unterschiedliche Brennstoffe (entnommen aus (Oberberger, 1997))

[% der TM]	Rinde	Hackgut	Sägespäne	Stroh- & Getreidepflanzen
Grobasche	65 - 85	60 - 90	20 - 30	80 - 90
Zyklonasche	10 - 25	10 - 30	50 - 70	2 - 5
Feinstflugasche	2 - 10	2 - 10	10 - 20	5 - 15

Die Korngrößen der Aschen verringern sich von grob nach fein und hängen vom eingesetzten Brennstoff, dem Brennstoffaschegehalt und dem Anteil mineralischer Brennstoffverunreinigungen ab. In der Grobasche ist die Korngröße vom Anteil versinterter

oder verschlackter Partikel abhängig. Die Korngröße der Zyklon- und Feinstflugasche hängt von der verwendeten Staubabscheidetechnologie ab. Ein Korngrößenmaximum der Flugaschen liegt im Submikronbereich bei etwa 0,1-0,6 μm , das zweite Korngrößenmaximum liegt bei 10-150 μm . (Kaltschmitt, et al., 2009)

Untersuchungen verschiedener Brennstoffe hinsichtlich der Korngrößenverteilung in den Aschefractionen ergaben, dass in der Grobasche ein breites Spektrum zu erwarten ist. Dies liegt daran, dass es durch die Brennstoffzusammensetzung und den verwendeten Feuerungstyp zur Verschlackung der Partikel kommen kann. Die Teilchendichte in den Aschefractionen sind unabhängig vom Brennstoff und nimmt von grob nach fein ab. In Tabelle 3 sind die zu erwartenden Korngrößen und die mittlere Teilchendichte aufgeführt. (Oberberger, et al., 1995)

Tabelle 3: Korngrößenverteilung der Aschefractionen (entnommen aus (Oberberger, et al., 1995))

Aschefraktion	Teilchengröße [μm]	Mittlere Teilchendichte [kg/m^3]
<u>Rindenfeuerung</u>		
Grobasche	30 – 100.000	2.860
Zyklonasche	3 – 200	2.590
Feinstflugasche	0,3 – 10	2.515
<u>Sägespänefeuerung</u>		
Grobasche	10 – 30.000	3.021
Zyklonasche	2 – 100	2.575
Feinstflugasche	0,2 – 5	2.420
<u>Hackgutfeuerung</u>		
Grobasche	15 – 50.000	2.866
Zyklonasche	2 – 160	2.682
Feinstflugasche	-	-

4.5.2 Nähr-und Schadstoffe

Die Nährstoff- und Schadstoffgehalte der Aschen hängen wesentlich vom eingesetzten Brennstoff ab. Sämtliche anorganische Stoffe, ausgenommen Stickstoff, finden sich in der Asche wieder. In Tabelle 4 sind die durchschnittlichen Nährstoffkonzentrationen in den Aschefractionen verschiedener Brennstoffe aufgeführt. Stroh dient exemplarisch für halmgutartige Brennstoffe. Bei Wirbelschichtfeuerung können die Werte durch das eingetragene Bettmaterial, meist Quarzsand (SiO_2), abweichen. Das wesentliche aschenbildende Element ist Calcium, welches der Hauptbestandteil der Holzaschen ist und eine bodenverbessernde Wirkung aufweist. Wird eine Anlage mit Wirbelschichtfeuerung betrieben, werden die Konzentrationen der Nährstoffe durch das eingetragene Bettmaterial durch den Verdünnungseffekt geringer ausfallen. Bei Strohaschen sind die aufgeführ-

ten Nährstoffwerte geringer, da Silicium der Hauptbestandteil ist. (Oberberger, 1997), (Kaltschmitt, et al., 2009)

Tabelle 4: Durchschnittliche Nährstoffgehalte in den Aschefractionen verschiedener Brennstoffe (entnommen aus (Oberberger, 1997))

Nährstoff [% der TM]	Grobasche			Zyklonasche			Feinstflugasche		
	Holz	Altholz	Stroh	Holz	Altholz	Stroh	Holz	Altholz	Stroh
CaO	41,4	31,1	7,8	35,2	28,5	5,9	32,2	16,7	1,2
MgO	6,0	2,8	4,3	4,4	3,0	3,4	3,6	0,5	0,7
K ₂ O	6,4	2,3	14,3	6,8	2,7	11,6	14,8	7,7	48,0
P ₂ O ₅	2,6	0,9	2,2	2,5	1,4	1,9	2,8	0,4	1,1
Na ₂ O	0,7	1,1	0,4	0,6	1,1	0,3	0,8	3,3	0,5

Es ist zu erkennen, dass die Nährstoffgehalte in Altholzaschen im Vergleich zu naturbelassenem Holz deutlich geringer sind. Die geringen Nährstoffgehalte der Altholzaschen können darauf zurückgeführt werden, dass in der Grundgesamtheit der Brennstoffe eine höhere Bandbreite an Inhaltsstoffen vorhanden ist und dadurch der Anteil der betrachteten Nährstoffe im Gesamtbezug kleiner wird. (Schneichel, 2015)

In den Aschen nimmt der Gehalt der meisten Schwermetalle von grob nach fein deutlich zu, da leichtflüchtige Verbindungen (zum Beispiel Arsen, Cadmium, Quecksilber, Blei, Zink) bei der Verbrennung gasförmig werden und durch die Abkühlung der Rauchgase an die Flugasche kondensieren. Die schwerflüchtigen Verbindungen (zum Beispiel Chrom, Kupfer) verbleiben in der Grobasche. In der Flugasche befinden sich zudem noch PAK und PCDD/PCDF. (Bayrisches Landesamt für Umwelt, 2009)

Tabelle 5 gibt einen Überblick über die Schwermetallgehalte in den drei Aschefractionen verschiedener Brennstoffe. Die Schwermetallgehalte in naturbelassenem Holz resultieren aus der Aufnahme über den Boden während des Wachstums.

Tabelle 5: Schwermetallgehalte in den Aschefractionen verschiedener Brennstoffe (entnommen aus (Oberberger, 1997))

Schwermetall [mg/kg TM]	Grobasche			Zyklonasche			Feinstflugasche		
	Holz	Altholz	Stroh	Holz	Altholz	Stroh	Holz	Altholz	Stroh
Cu	165	6.914	17	143	15.667	26	389	164.000	44
Zn	433	1.234	75	1.870	437	172	12.981	422	520
As	4,1	17	< 5,0	6,7	59	< 5,0	37,4	104	22,0
Ni	66	179	4	59,6	167	< 2,5	63,4	74	< 2,5
Cr	326	466	135,5	159	1.415	17,5	231	404	6,8
Pb	13,6	2.144	5,1	57,6	8.383	21,5	1.053	50.000	80
Cd	1,2	20	0,2	21,6	70	1,8	80,7	456	5,2
Hg	0,01	< 0,5	< 0,1	0,04	0,7	< 0,1	1,5	< 0,5	0,7

Anmerkung: Grenzwertüberschreitung nach DüMV rot hinterlegt

In Tabelle 6 sind die aktuellen Grenzwerte für Schadstoffe in Düngemitteln nach der Düngemittelverordnung aufgeführt. Vergleicht man die Werte aus Tabelle 5 mit den Grenzwerten aus Tabelle 6 wird ersichtlich, dass Altholzaschen die Grenzwerte überwiegend nicht einhalten können und den Vorgaben der DüMV nicht entsprechen. Ebenso ist zu erkennen, dass in der Feinstflugasche ebenfalls einige Grenzwerte überschritten werden und die Vorgaben der Düngemittelverordnung nicht einzuhalten sind.

Tabelle 6: Grenzwerte für Schadstoffe in Düngemitteln nach der Düngemittelverordnung (entnommen aus (Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz, 2012))

Schadstoff	Kennzeichnung ab ... [mg/kg TM]	Toleranz [%]	Grenzwert [mg/kg TM]	Grenzwert Brennraumaschen für Forststandorte [mg/kg TM]
Cu	0,05 % der TM	20	*	*
Zn	0,1 % der TM	20	*	*
As	20	50	40	60
Ni	40	50	80	120
Cr (gesamt)	300	50	-	-
Cr IV	1,2	50	2	**
Pb	100	50	150	225
Cd	1,0	50	1,5	2,25
Cd (für Dünger ab 5 % P ₂ O ₅)	20 mg P ₂ O ₅ /kg	50	50 mg P ₂ O ₅ /kg	75 mg P ₂ O ₅ /kg
Hg	0,5	50	1,0	1,5

* Grenzwerte nach Anlage 1, Abschnitt 4.1.1 DüMV:

Kupfermindestgehalt von 0,02 % der TM, Kupferhöchstgehalt von 0,09 % der TM beziehungsweise 0,2 % der TM bei Rückführung auf forstliche Flächen;

Zinkmindestgehalt von 0,02 % der TM, Zinkhöchstgehalt von 0,5 % der TM

** „Brennraumaschen von naturbelassenem Holz sind vom Cr-IV-Grenzwert ausgenommen, wenn durch deutliche Kennzeichnung auf ihre ausschließliche Rückführung auf forstliche Standorte hingewiesen wird“ (Anhang 2, Tabelle 1.4 DüMV)

Die Anreicherung der Schwermetalle in der Asche bereitet Probleme hinsichtlich der Verwertung der Aschen. Im Gegensatz zu den Nährstoffen sollen die Schwermetalle nicht wieder in den Stoffkreislauf gelangen. Um dies zu verhindern, müssen der Feuer-raum und die Luftführung so gestaltet werden, dass die Schwermetallanreicherung hauptsächlich in der Feinstflugasche erfolgt und die Grobasche entlastet wird. (Flaig, et al., 1998)

Da die Feinstflugasche das größte Schwermetallbindungspotential hat, muss diese beseitigt und darf nicht verwertet werden. Damit die Nährstoffverluste aus den Aschen jedoch nicht zu groß werden, sollten Biomasseverbrennungsanlagen eine Feinststaub-

abscheidung verwenden, um die drei Aschefractionen optimal separieren zu können. (Oberberger, 1997)

Die Verwertung oder Beseitigung der Aschen wird im Folgenden ausführlich erläutert.

4.5.3 Ascheverwertung und -beseitigung

Durch die in den Aschen enthaltenen Nährstoffe liegt eine Ausbringung als Düngemittel in der Land- und Forstwirtschaft nahe. Nach §3 Absatz 1 und 3 des Kreislaufwirtschaftsgesetzes (KrWG) sind Aschen Abfälle, derer sich ihr Besitzer entledigt, entledigen will oder entledigen muss. Zudem sind Aschen Abfälle, da der Hauptzweck der Biomasseverbrennungsanlagen die Produktion von Energie ist und es sich um Reststoffe dieser Energiebereitstellung handelt. Somit gilt der Grundsatz „Verwertung vor Beseitigung“ nach §7 Absatz 2 KrWG, wobei die Verwertung ordnungsgemäß und schadlos und die Beseitigung gemeinwohlverträglich erfolgen muss (§3, Absatz 4). (Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz, 2012)

Die verschiedenen Aschefractionen werden in Abfallschlüssel eingestuft, der in der Abfallverzeichnis-Verordnung (AVV) festgelegt ist (Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz, 2012):

- Rostasche: 10 01 01: Rost- und Kesselasche, Schlacken und Kesselstaub mit Ausnahme von Kesselstaub, der unter 10 01 04 fällt
- Zyklonasche: 10 01 03: Filterstäube aus Torffeuerung und Feuerung mit (unbehandeltem) Holz
- Feinstflugasche: 10 01 18*: Abfälle aus der Abgasbehandlung, die gefährliche Stoffe enthalten
10 01 19: Abfälle aus der Abgasbehandlung mit Ausnahme derjenigen, die unter 10 01 05, 10 01 07 und 10 01 18 fallen

Um die Feinstflugasche einem der beiden Abfallschlüssel zuordnen zu können, muss diese auf ihre Inhaltsstoffe analysiert werden. Liegen keine Daten zu den Inhaltstoffen vor, muss die Feinstflugasche mit dem Abfallschlüssel 10 01 18* gekennzeichnet werden und gilt demnach als gefährlicher Abfall, der „nach §42 und §43 KrWG der Register- und Nachweispflicht unterliegt“. (Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz, 2012), (Bayrisches Landesamt für Umwelt, 2009) Der Erzeuger der Aschen ist verpflich-

tet, die Aschefraktionen getrennt voneinander zu erfassen und dem entsprechenden Abfallschlüssel zuzuordnen. Daneben kann der Erzeuger im Rahmen der gesetzlichen Vorgaben eigenständig über Verwertung oder Beseitigung der Aschen entscheiden. Die Aschen werden von einigen Brennstofflieferanten zurück genommen, diese müssen jedoch eine Genehmigung zur Annahme, Lagerung und Behandlung der Aschen besitzen. (Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V. - Verwertung, 2013)

Derzeit gibt es für die Verwertung von Aschen verschiedene Möglichkeiten. In geringem Maße wird sie industriell als Zuschlagstoff in der Zementindustrie sowie im Straßen- und Wegebau aber auch als Bergeversatz eingesetzt. Ein weiterer Teil wird auch als „*Sekundärrohstoff mit düngender und bodenverbessernder Wirkung*“ in Land- und Forstwirtschaft sowie im Landschaftsbau verwertet. Im Straßen- und Wegebau kann vor allem verschlackte Asche eingesetzt werden, da sie zu einer „*guten Abbindung des feuchten Materials am Boden beiträgt*“. Im Landschaftsbau können die Aschen durch den hohen Calciumgehalt als Kalkersatz bei der Verdichtung von Böden verwertet werden. Eine weitere Verwertungsmöglichkeit im Landschaftsbau stellt die Rekultivierung von Deponien und Bergbauminen dar, bei der die Aschen in einer Mischung mit Klärschlamm als Abdichtung genutzt werden. Hier müssen die Grenzwerte der Deponieverordnung eingehalten werden. (Kaltschmitt, et al., 2009)

Asche, die in Land- und Forstwirtschaft als Düngemittel verwendet wird, muss nach der Düngemittelverordnung (DüMV) einem zugelassenen Düngemitteltyp entsprechen. Gemäß der DüMV ist in Deutschland die Verwendung der „*Asche aus der letzten filternden Einheit im Rauchgasweg*“ als Düngemittel nicht erlaubt. Feinstflugasche darf daher nach der DüMV in keinem Fall verwertet, sondern nur beseitigt werden. Je nach Rauchgasreinigungsanlage ist somit die Verwendung der Zyklonasche als Düngemittel zulässig. (Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz, 2012)

Des Weiteren sieht die DüMV nur Aschen aus der Verbrennung von naturbelassenem Holz vor, die nach der Düngemittel-Probenahme- und Analysenverordnung (DüM-ProbV) untersucht werden und die vorgeschriebenen Nähr- und Schadstoffgrenzwerte beziehungsweise –mindestgehalte einhalten (siehe hierzu Tabelle 6, Seite 26). Im Rahmen der immissionsschutzrechtlichen Genehmigung der Biomasseverbrennungsanlagen kann die zuständige Behörde Anforderungen an die Verwertung beziehungsweise Besei-

tigung der Asche stellen. Um möglichst hochwertige Dünger zu erhalten, sollen die Aschen nicht vermischt werden. Grobasche kann nach der DüMV als Kalk- oder Kaliumdünger verwertet werden und „zu maximal 30 % dem Düngemitteltyp „Kohlensaurer Kalk“ zugegeben werden“ (Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz, 2012). Um die Asche dem Düngemitteltyp „Kalkdünger aus der Verbrennung pflanzlicher Stoffe“ zuzuordnen, muss diese einen Mindestgehalt von 30 % CaO aufweisen. Wie in Tabelle 4 auf Seite 25 zu sehen erfüllen die Holzaschen diese Vorgabe.

Düngemittel, die Holzasche enthalten, dürfen nur in staubgebundener oder granulierter Form abgegeben werden. Hier bestimmt Anlage 2 Tabelle 7.3.16 DüMV, dass dies nur der Fall ist, wenn der Siebdurchgang bei 0,1 mm maximal 0,2 %, bei 0,05 mm maximal 0,05 % und bei 0,01 mm maximal 0,005 % beträgt. Weiterhin können Düngemittel aus Holzaschen nur dann abgegeben werden, wenn sie vollständig und ordnungsgemäß gekennzeichnet sind. Die Aschen müssen in einem streufähigen Zustand sein und mit den üblichen Techniken zu Düngung verarbeitet werden können. (Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz, 2012)

Die Rückführung der Asche auf forstliche Flächen ist nur möglich, wenn mit dieser „Maßnahme ein Nährstoffmangel behoben oder die Bodenfruchtbarkeit erhalten oder wiederhergestellt werden“ kann. Bis zu 30 % Asche aus Waldrestholz können in diesem Zuge bei einer Bodenschutzkalkung zugegeben werden, dabei dürfen die Grenzwerte aus Tabelle 6 bis maximal 50 % überschritten werden. Eine reine Ertragsdüngung ist nicht erlaubt. (Bayrisches Landesamt für Umwelt, 2009), (Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V. - Verwertung, 2013)

Die Aschen können zudem zusammen mit Bioabfällen verwertet werden. Grobaschen dürfen nach Anhang 1 Nr. 2 BioAbfV den Bioabfällen beigefügt werden, wobei die Zugabe während oder nach der Behandlung erfolgen kann. Wird die Asche nach der Behandlung zum Beispiel Komposten oder Gärprodukten zugegeben, handelt es sich um ein Gemisch nach §5 BioAbfV. Diese Gemische sind ein „organisch-mineralisches Düngemittel“ im Sinne von Anlage 1 Abschnitt 3.2 DüMV. Wird dieses nun auf land- und forstwirtschaftlichen Flächen verwertet, müssen die Bestimmungen der Bioabfallverordnung (BioAbfV) eingehalten werden. (Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V. - Verwertung, 2013)

Ist dagegen auf Grund von Schadstoffgehalten eine Beseitigung der Aschen erforderlich, erfolgt diese auf Deponien. Die Deponierung muss den Vorgaben der Deponieverordnung (DepV) entsprechen, die Zuordnungswerte des Anhangs 3 der DepV müssen eingehalten werden. Grobaschen können meist auf Deponien der Klasse I oder II beseitigt werden. Flugaschen hingegen sind meist so stark mit Schadstoffen belastet, dass sie nach der DepV nur in Deponien der Klasse IV Untertage beseitigt werden können. (Bayrisches Landesamt für Umwelt, 2009)

4.5.4 Qualitätssicherung der Aschen

Um die Qualität von Holzasche zu sichern, haben die Bundesgütegemeinschaft Kompost (BGK) und die Bundesgütegemeinschaft Holzasche (BGH) eine Qualitätssicherung für Holzaschen eingeführt. Mitglieder der BGH können ihre Holzaschen mit dem „RAL-Gütezeichen“ der RAL-Gütesicherung Dünger auszeichnen lassen. Damit sind die Holzaschen als Ausgangsstoff für Düngemittel oder als Düngemittel nach DüMV qualifiziert.

Im Rahmen der RAL-Gütesicherung sind zulässige Brennstoffe und Holzaschen, Qualitätsanforderungen und Eigen- und Fremdüberwachung definiert.

Als zulässige Brennstoffe werden naturbelassenes Holz, Waldrestholz, Landschaftspflegeholz sowie Rinde, Holzpellets, Holz aus Kurzumtriebsplantagen und sonstiges naturbelassenes Holz anerkannt. Aschen von Altholz und Brennstoffen, die *„mehr als nur unerheblich mit Schadstoffen kontaminiert wurden“*, werden nicht anerkannt. Zulässige Holzaschen sind Rost- und Kesselaschen sowie Filteraschen, wobei die Asche der letzten filternden Einheit analog zur DüMV nicht verwendet werden darf.

An die Aschen werden einige Qualitätsanforderungen gestellt. Dies sind Anforderungen zur Eignung, Zulässigkeit und Annahme der Brennstoffe sowie an die Zulässigkeit bestimmter Aschen. Daneben wird ein internes Qualitätsmanagement gefordert. Zudem muss eine fachkundige Probenahme und Untersuchung der Asche gewährleistet werden, Probenehmer und Gütesicherungsbeauftragte müssen geschult sein.

Um die Gütesicherung zu gewährleisten werden Eigen- und Fremdüberwachungen durchgeführt. Zur Eigenüberwachung muss ein Qualitätsmanagementsystem mit Kontrollpunkten in die Anlage eingegliedert sowie interne Proben genommen und Leitparameteruntersuchungen durch anerkannte Prüflabore durchgeführt werden. Außerdem

werden dem Betreiber Pflichten der Dokumentation und Beweissicherung übertragen. Zur Fremdüberwachung gehören regelmäßige unabhängige Prüfungen, sogenannte Audits. Dabei werden Begutachtungen durch anerkannte Prüfer vor Ort durchgeführt und externe Proben für Kontrolluntersuchungen vorgenommen. Die Holzaschen werden durch anerkannte Prüflabore untersucht.

Nach Anerkennung der Asche erhält der Gütezeichenbenutzer ein Zertifikat, in dem die Asche deklariert ist und sachgerechte Hinweise zum Umgang und zur Anwendung aufgeführt sind. Die Inhaltsstoffe und Eigenschaften der Asche sowie Übereinstimmungen mit Gesetzen und Regelwerken werden aufgeführt, sodass der Betreiber der Anlage beziehungsweise der Erzeuger der Asche einen umfassenden Nachweis und Überblick über die Eigenschaften der Asche hat.

(Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V. - QS, 2013)

5 Erneuerbare Energien - Situation in Hessen

Aktuell (September 2014) werden etwa 11 % des hessischen Stromverbrauchs durch Erneuerbare Energien gedeckt (Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie e.V. (DGS), 2014). Im Rahmen des Wandels der Energiepolitik in Deutschland soll auch im Bundesland Hessen langfristig die Energieversorgung im Sinne der Nachhaltigkeit vollständig auf Erneuerbare Energien umgestellt werden. Im Jahr 2010 wurde daher eine Biomassopotentialstudie veröffentlicht, die den derzeitigen Stand (2008) der Biomassenutzung und die verbleibenden Potentiale, vor allem die der Bioenergie, analysiert und darstellt (Witzenhausen-Institut GmbH; Pöyry Environment GmbH, 2010). Aufbauend auf diese Studie wurde der „Biomasseaktionsplan 2020 des Landes Hessen“ zur energetischen Nutzung erstellt. Dieser legt fest, dass bis zum Jahr 2020 etwa 20 % des hessischen Endenergieverbrauchs (ohne Verkehr) aus Erneuerbaren Energien abgedeckt werden sollen und stellt dar, wie dies erreicht werden kann und welche Maßnahmen dazu beitragen (Hessisches Ministerium für Umwelt, Energie, Landwirtschaft und Verbraucherschutz, 2011).

In Hessen wird aus den in Abbildung 6 aufgeführten Erneuerbaren Energien Strom erzeugt. Den größten Anteil daran haben Windkraft und Photovoltaik, gefolgt von den Bioenergieträgern Biogas, biogener Anteil des Abfalls und feste Biomasse. Der biogene Abfallanteil ist der im Restmüll enthaltene organische Abfall tierischer oder pflanzlicher Herkunft, der von Mikroorganismen abgebaut werden kann. (Witzenhausen-Institut GmbH; Pöyry Environment GmbH, 2010)

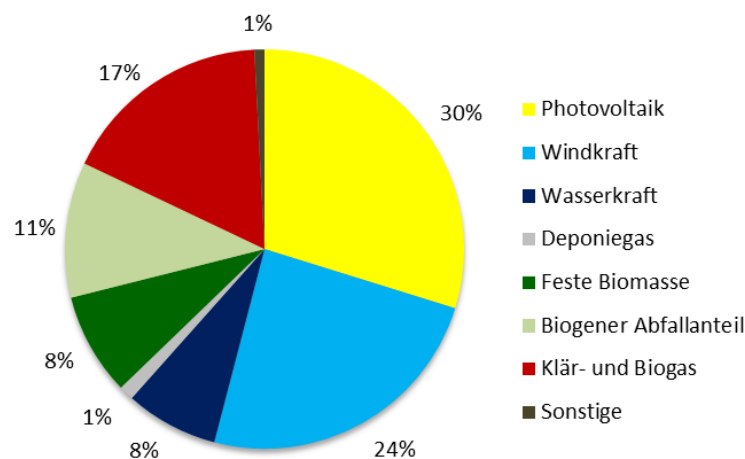


Abbildung 6: Anteile der Erneuerbaren Energien an der Stromerzeugung 2012 (Hessisches Statistisches Landesamt, 2015)

Abbildung 6 zeigt die Anteile der Erneuerbaren Energien an der Stromerzeugung im Jahr 2012. Es wurden 1.262 GWh mit Hilfe von Photovoltaik, 1.028 GWh Strom durch Windkraftanlagen, 319 GWh aus Wasserkraft und 51 GWh aus Deponiegas erzeugt. Die feste Biomasse trug 351 GWh zur Stromerzeugung bei, aus dem biogenen Anteil des Abfalls wurden 465 GWh produziert. Klär- und Biogas erzeugten 725 GWh Strom, die sonstigen Energieträger, zu denen flüssige Biomasse zählt, trugen 35 GWh bei. (Hessisches Statistisches Landesamt, 2015)

In Abbildung 7 ist die Entwicklung der Stromerzeugung aus Erneuerbaren Energien in Hessen seit dem Jahr 2001 dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Stromerzeugung aus Photovoltaik und Biogas seit 2003 stark zugenommen hat. Dies steht in Zusammenhang mit der Förderung durch das EEG, da Strom aus Photovoltaik und Biogas subventioniert wird und durch die EEG-Novelle 2004 ein Biomasse-Bonus existiert. (Weiland, 2008), (Quaschnig, 2011)

Auch der Ausbau der Windkraft nimmt kontinuierlich zu. Die Stromerzeugung aus Wasserkraft nimmt gegenüber 2001 jedoch ab. Durch die Gegebenheiten in Hessen wird der Anteil der Wasserkraft an der Stromerzeugung in diesem Bereich bleiben und sich nicht weiter erhöhen, bestehende Anlagen können jedoch in ihrer Effizienz gesteigert werden (Hessisches Ministerium für Wirtschaft, Energie, Verkehr und Landesentwicklung). Aufgrund der gesetzten Ziele im Biomasseaktionsplan 2020 ist anzunehmen, dass die in Abbildung 7 erkennbaren Tendenzen bestehen bleiben.

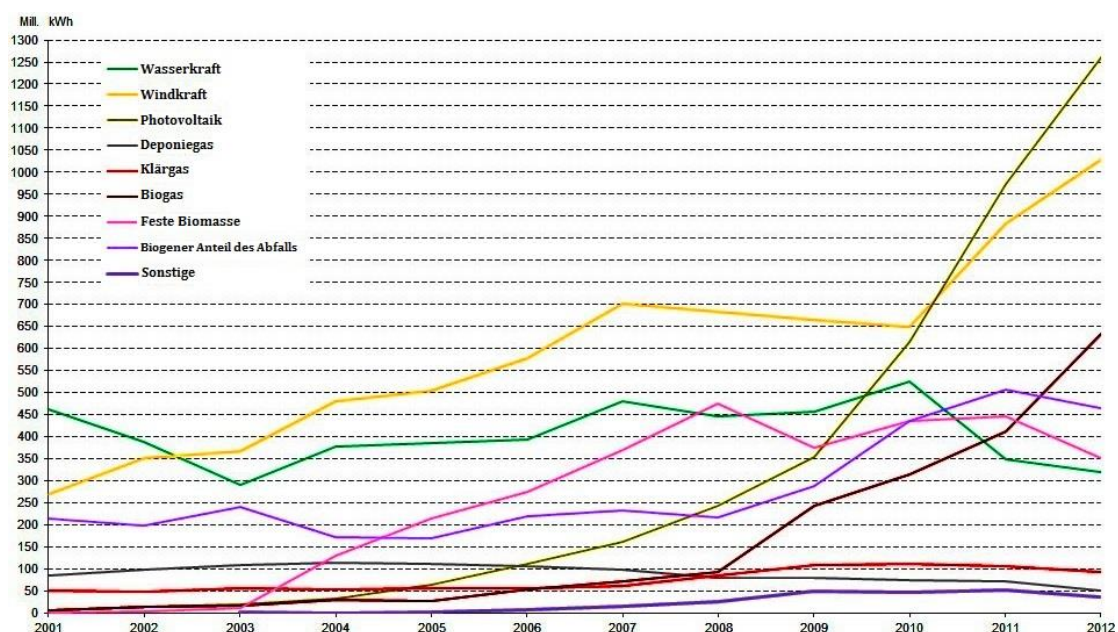


Abbildung 7: Stromerzeugung aus erneuerbaren Energieträgern 2001 bis 2012 (entnommen aus (Hessisches Statistisches Landesamt, 2015))

In Abbildung 8 ist der aus Biomasse erzeugte Strom mit den Anteilen der festen Biomasse grafisch dargestellt.

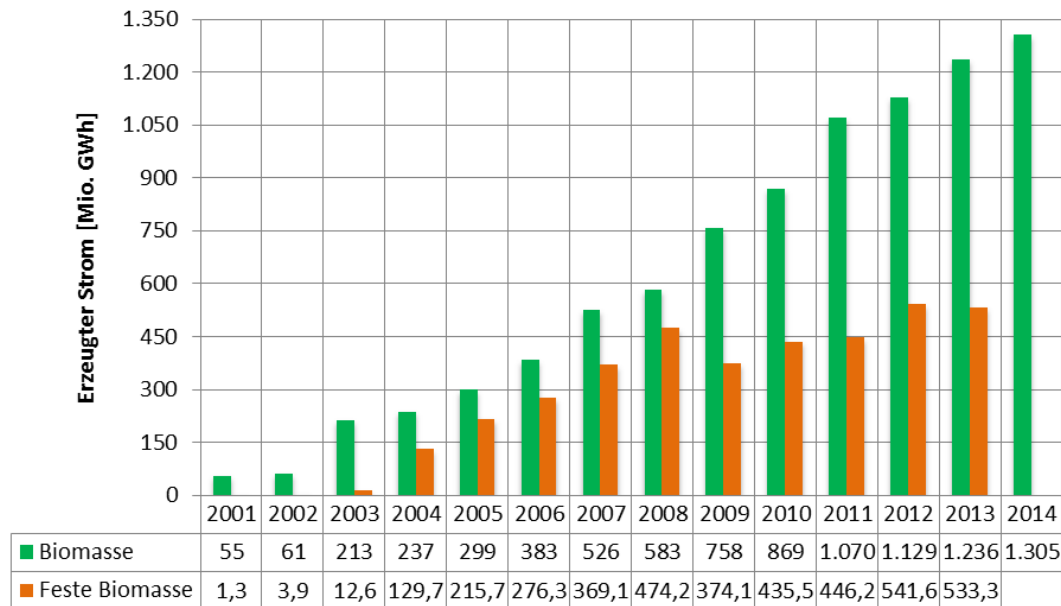


Abbildung 8: Erzeugter Strom aus Biomasse und fester Biomasse in Hessen von 2001 bis 2014 (entnommen aus (Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie e.V. (DGS), 2014), (Hessisches Statistisches Landesamt, 2015))

Auch hier wird die steigende Tendenz der Biomasse deutlich sichtbar. Der Anteil der festen Biomasse am gesamten erzeugten Biomassestrom überwiegt dabei die flüssige und gasförmige Biomasse. (Hessisches Statistisches Landesamt, 2015)

5.1 Ergebnisse der Biomassepotentialstudie

Nachfolgend werden die Inhalte und Erkenntnisse der Biomassepotentialstudie, basierend auf Daten aus dem Jahr 2008, dargestellt. Eine aktuellere Version der Datenerhebung liegt derzeit nicht vor. (Witzenhausen-Institut GmbH; Pöyry Environment GmbH, 2010)

Von 2004 bis 2008 stieg die Nutzung der Erneuerbaren Energien um 60 % an, der Anteil der Erneuerbaren Energien am Endenergieverbrauch (ohne Verkehr) stieg von 3,7 % auf 6,1 %. Im Jahr 2008 machte die Biomassenutzung mit 80 % bereits den Hauptteil der regenerativen Energien in Hessen aus. Es wurden 40 % des regenerativen Stroms, 95 % der regenerativen Wärme und 100 % der regenerativen Kraftstoffe durch Bioenergie bereitgestellt, insgesamt wurden 6.950 GWh aus Bioenergie erzeugt. Bis 2020 sollen etwa 10 % des hessischen Endenergiebedarfs (ohne Verkehr) durch Bioenergie zur Verfügung gestellt werden.

Die biogenen Festbrennstoffe (BFBS) erzeugten im Jahr 2008 etwa 5.700 GWh Energie. 8 % davon dienten der Erzeugung von Strom. Die erzeugte Wärme (rund 5.235 GWh) stammt zu 60 % aus privaten Haushalten und zu 40 % aus Heizwerken oder Heizkraftwerken. Waldholz lieferte etwa 1.400 GWh, 1.500 GWh wurden aus Altholz und dem biogenen Abfallanteil gewonnen und 2.200 GWh stammen von sonstigen Energiehölzern (aus anderen Bundesländern importierte Festbrennstoffe, Industrierestholz, Landschaftspflegeholz oder ähnliches).

An der Endenergieerzeugung aus Erneuerbaren Energien sind biogene Rohstoffe zu 62,8 % an der Wärmebereitstellung und zu 10,5 % an der Strombereitstellung beteiligt. Der Anteil der Biokraftstoffe beträgt 7,7 %, darauf folgen Wind- und Wasserkraft mit 7,9 % beziehungsweise 5,2 %. Einen geringeren Anteil haben die Solarthermie (2,5 %), die Geothermie (1,2 %) und Photovoltaik (2,1 %). Abbildung 10 auf Seite 37 zeigt den Anteil der verschiedenen biogenen Festbrennstoffe an der Endenergiebereitstellung in Hessen 2008 bezogen auf die Energiemenge in GWh/a. Es ist zu erkennen, dass die zuvor beschriebenen BFBS Waldholz, Altholz und der biogene Abfallanteil den größten Anteil an der Endenergieerzeugung neben den sonstigen Energiehölzern besitzen. Die restlichen, vor allem halmgutartigen Festbrennstoffe, tragen einen geringen Teil zur Endenergiebereitstellung bei. Stroh als Brennstoff wird dagegen in Hessen nahezu nicht genutzt.

Betrachtet man nun die Struktur der Strombereitstellung aus Erneuerbaren Energien in Hessen, dann tragen die BFBS 11 % und der biogene Abfallanteil 9 % zur Strombereitstellung bei. Mit Hilfe von Biogas werden 14 % des Stroms erzeugt. Wasserkraft (20 %) und Windkraft (30 %) stellen hier den größten Anteil.

Bei der Wärmebereitstellung sind die BFBS (Haushalt) mit 53,3 %, die BFBS (Industrie) mit 10,3 % und die BFBS (HKW/HW) mit 18,0 % beteiligt. Der Anteil des biogenen Abfallanteils beträgt 10,8 %. Die bereitgestellte Wärme wird also zu einem Großteil aus biogenen Festbrennstoffen gewonnen, Solarthermie (3,2 %), Geothermie (1,8 %) und die biogenen Gase (2,7 %) tragen nur einen geringen Anteil zur Wärmeerzeugung bei. In Abbildung 9 sind die genannten Zahlen grafisch dargestellt und die großen Anteile der Bioenergie an der Strom- und Wärmebereitstellung in Hessen 2008 werden verdeutlicht.

Im Vergleich mit den aktuelleren Zahlen der Stromerzeugung aus 2012 (siehe Abbildung 6) wird deutlich, dass sich die Anteile ein wenig geändert haben. Vor allem Photovoltaik hat bei der Strombereitstellung zugenommen (auf 30 %), während der Anteil der Wasserkraft durch den Ausbau der anderen Erneuerbaren Energien und die damit gestiegene Gesamtleistung etwas zurückgegangen ist (auf 8 %). Der Anteil von Klär- und Biogas ist hingegen gleichgeblieben, während der Anteil des biogenen Abfalls ein wenig zugenommen hat (auf 11 %).

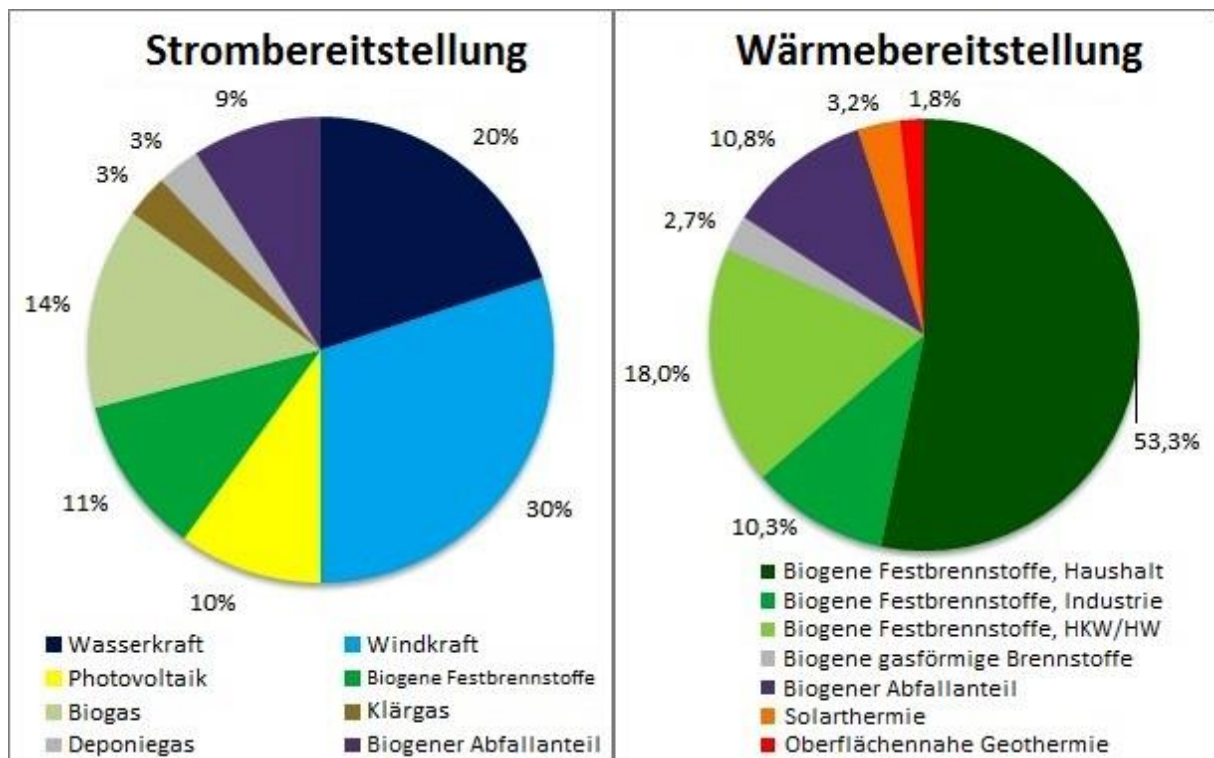


Abbildung 9: Anteile der BFBS an der Strom- und Wärmebereitstellung in Hessen 2008 (entnommen aus (Witzenhausen-Institut GmbH; Pöyry Environment GmbH, 2010))

Um das Gesamtpotential der Bioenergie ermitteln zu können, müssen die zu betrachtenden Potentiale ausgewählt werden. Man unterscheidet theoretisches, technisches und wirtschaftliches Potential. Das theoretische Potential stellt das regenerative Energiepotential dar, welches innerhalb eines bestimmten Zeitraums in einer gegebenen Region physikalisch nutzbar ist. Es wird durch die gegebenen physikalischen Nutzungsgrenzen bestimmt und ist die Obergrenze des realisierbaren Beitrags zur Energiebereitstellung. Als technisches Potential wird der Teil des theoretischen Potentials beschrieben, der unter Berücksichtigung der technischen Möglichkeiten nutzbar ist. Die gegebenen strukturellen und ökologischen Begrenzungen und die gesetzlichen Vorgaben werden bei diesem Potential berücksichtigt. Unter dem wirtschaftlichen Potential wird der Teil des

technischen Potentials verstanden, der unter wirtschaftlich sinnvollen Grenzen erschlossen werden kann. Je nach Rahmenvorgaben und Grenzkosten variiert das wirtschaftliche Potential. (Witzenhausen-Institut GmbH; Pöyry Environment GmbH, 2010)

Das in der Biomassepotentialstudie betrachtete Potential ist das technisch-ökologische Potential, da es geringen zeitlichen Schwankungen unterworfen ist. Das verbleibende Potential der biogenen Festbrennstoffe in Hessen wird auf etwa 4.300 GWh/a geschätzt. Es ergibt sich somit ein Gesamtpotential von etwa 10.000 GWh/a, von dem mit 5.700 GWh/a bereits ungefähr 60 % genutzt werden (Stand 2008). Abbildung 10 zeigt grafisch die genutzten und verbleibenden Potentiale der verschiedenen BFBS.

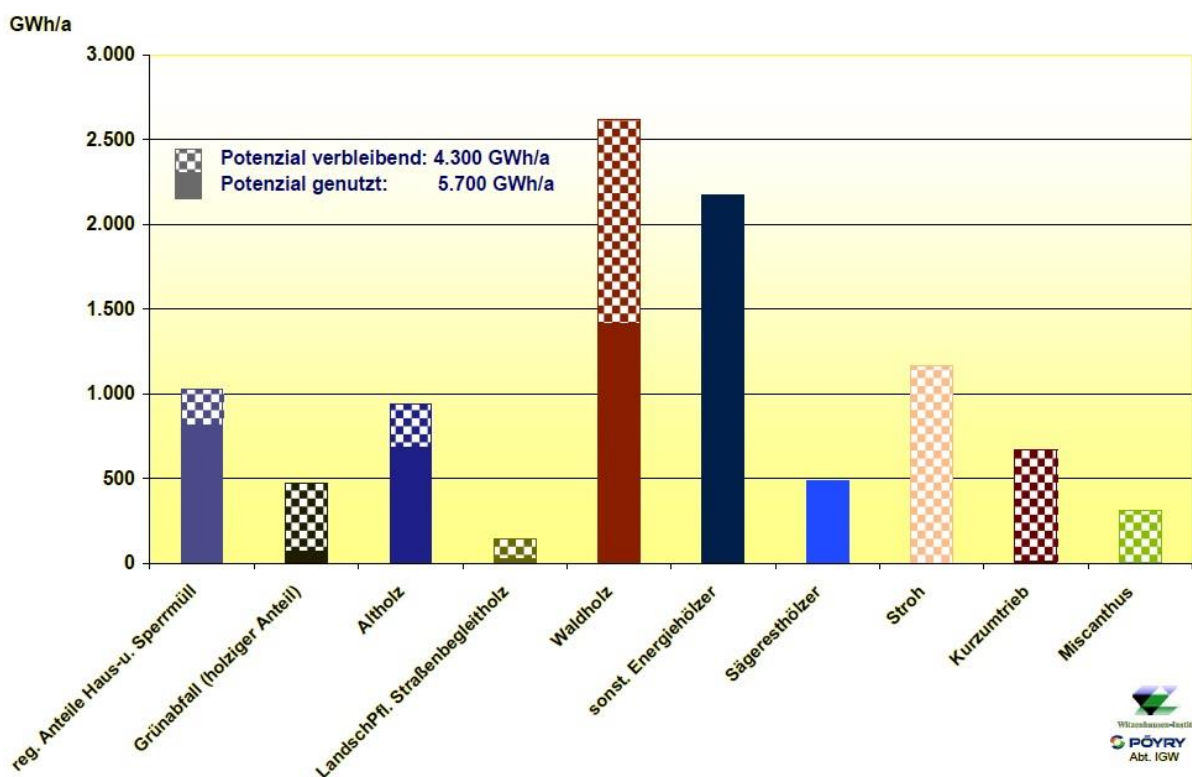


Abbildung 10: Genutztes und verbleibendes Potential der biogenen Festbrennstoffe bei der Endenergiebereitstellung in Hessen 2008 (entnommen aus (Witzenhausen-Institut GmbH; Pöyry Environment GmbH, 2010))

Es ist zu erkennen, dass die halmgutartige Biomasse, vor allem Stroh und Miscanthus, in Hessen bisher nahezu ungenutzt ist und ein großes Potential bietet. Damit dieses Potential genutzt werden kann, sind einige technische Entwicklungen notwendig. Um das Potential aus dem Kurzumtrieb zu nutzen, müssen in Hessen zunächst geeignete Rahmenbedingungen geschaffen werden. Der Anbau der schnell wachsenden Hölzer wird bislang nur zögerlich umgesetzt, da der Markt derzeit keine gesicherten Abnahmeverträge für die Landwirte bietet. Im Bereich des Altholzes und der regenerativen Anteile

von Haus- und Sperrmüll müssen die technischen Bedingungen gesteigert werden, um die verbleibenden Potentiale ausnutzen zu können. Der überwiegende Teil des Rest- und Sperrmülls wird in Hessen in Müllheizkraftwerken (50 %) und Ersatzbrennstoffkraftwerken (20 %) thermisch verwertet, wobei der Energieertrag (angegeben in %) den biogenen Anteilen dieser Abfälle zugerechnet wird. Um die Potentiale des Grünabfalls und des Landschaftspflege- und Straßenbegleitholzes auszuschöpfen, müssen die bestehenden Anlagen an die technischen Anforderungen angepasst und die Sammlung der Abfälle optimiert werden.

In Hessen waren im Jahr 2008 etwa 330 Holzheizwerke und 10 Holzheizkraftwerke in Betrieb. Davon befinden sich drei große Altholzkraftwerke im Rhein-Main-Gebiet, die eine thermische Leistung von 144 MW und eine elektrische Leistung von 34,5 MW haben. Die thermische Leistung wird jedoch nicht vollständig genutzt, da nicht alle Anlagen über eine Kraft-Wärme-Kopplung verfügen. Der Schwerpunkt liegt dabei auf der thermischen Verwertung von Altholz. Aufgrund der beschränkten Menge an Altholz werden jedoch immer mehr Anlagen errichtet, die Nachwachsende Rohstoffe oder Landschaftspflegeholz und Verkehrswegebegleitholz verbrennen.

Der überwiegende Anteil der Anlagen hat eine Feuerungsleistung < 1 MW und dient hauptsächlich zur Versorgung von Gewerbebetrieben oder Nutzungsgemeinschaften wie zum Beispiel Bioenergiedörfern. Anlagen mit einer Feuerungsleistung > 1 MW sind meist Industrieanlagen, die Strom und Prozesswärme erzeugen und produktionseigene Reste oder Altholz verwerten (Stand 2008).

Der industriellen Biomassenutzung steht die Scheitholznutzung in privaten Haushalten gegenüber. Da diese Daten nicht erfasst werden, wurden in der Biomassepotentialstudie Daten der Schornsteinfeger zu Rate gezogen. So wird davon ausgegangen, dass pro Jahr etwa 2.800 GWh Wärme durch private Haushalte erzeugt werden.

Betrachtet man die Nutzung der BFBS inklusive dem regenerativen Anteil des Restmülls werden pro Jahr in privaten Haushalten etwa 3.000 GWh Wärme erzeugt, dazu kommen etwa 2.200 GWh Wärme und 450 GWh Strom aus Biomasseverbrennungsanlagen. Insgesamt ergeben sich so 5.700 GWh/a Energie aus BFBS inklusive regenerativem Anteil des Restmülls als genutztes Potential, dem 4.300 GWh/a an ungenutztem Potential gegenüber stehen (siehe Abbildung 10).

6 Befragung der Biomasseverbrennungsanlagen in Hessen

Das Ziel der Befragung ist es, einen Überblick über die anfallende Aschemenge und deren Entsorgungswege im Bundesland Hessen zu erhalten. Weiterhin soll mit der Befragung die aktuelle Situation zum Thema Phosphorrückgewinnung und der Phosphorgehalt verschiedener Biomasseaschen erfasst werden. Befragt wurden hierzu Anlagen, die mit Hilfe des „LänderInformationssystem für Anlagen“ (LIS-A) im Rahmen des „Emissionskataster Industrie 2012 nach 11. BImSchV“ ermittelt werden konnten und keinen Anspruch auf Geheimhaltung angegeben hatten (Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie, 2015). Die im LIS-A enthaltenen Daten wurden nach der Brennstoffart (Holz) gefiltert und nach der Brennstoffmenge pro Jahr sortiert. Neben der Recherche mit LIS-A wurde eine Onlinerecherche zu Standorten von Biomasseverbrennungsanlagen durchgeführt.

Die Befragung der Anlagen erfolgte mit Hilfe eines Fragebogens (siehe Anhang A). Neben allgemeinen Daten zur Betriebsstätte und zum Brennstoff werden der Ascheanfall und die Entsorgungswege der Asche erfragt. Weiterhin beinhaltet der Fragebogen Fragen zu bestehenden Verfahren beziehungsweise Bestrebungen zur Phosphorrückgewinnung. Das Ergebnis soll Aufschluss darüber bringen, wie Biomasseaschen derzeit in Hessen entsorgt werden und welches Potential zur Phosphorrückgewinnung vorhanden ist.

6.1 Befragte Anlagen

Die Auswertung des „Emissionskatasters Industrie 2012 nach 11. BImSchV“ ergab, dass 2012 in Hessen 43 genehmigungsbedürftige Anlagen¹ Holz als Brennstoff verwenden (Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie, 2015). Zwei dieser Anlagen werden nicht betrachtet, da es sich um Müllheizkraftwerke handelt, die Holz lediglich mitverbrennen. Zu den verbliebenen 41 Anlagen kommen drei Anlagen hinzu, die seit 2012 in Betrieb gegangen sind sowie eine Anlage, die nicht im Emissionskataster aufgeführt ist. Somit kommen 45 Anlagen infrage, in der nachfolgenden Tabelle 7 sind diese nach der eingesetzten Brennstoffmenge in t/a aufgeführt. Eine Anlage ist aufgrund fehlender Informationen über die Brennstoffmenge nicht enthalten.

¹ Nur Anlagen, die im LIS-A keine Geheimhaltung der Daten fordern

Tabelle 7: Anzahl der hessischen Biomasse(heiz)kraftwerke nach 11. BImSchV und deren gesamte Brennstoffmenge (Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie, 2015)

Brennstoffmenge je Anlage [t/a]	Anzahl Anlagen	Befragt	Gesamtbrennstoffmenge [t/a]
< 1.000	4	1	2.400
> 1.000 - < 5.000	18	4	43.160
> 5.000 - < 10.000	8	-	59.300
> 10.000 - < 40.000	6	6	133.000
> 40.000 - < 100.00	6	6	393.500
> 100.000	2	2	259.150
Summe	44	20	890.510

Befragt wurden alle Anlagen, die eine Brennstoffmenge von mehr als 10.000 t/a umsetzen. Weiterhin wurden zum Teil kleinere Anlagen, die in einem Anlagenverbund betrieben werden oder zu einem Bioenergieort gehören, ausgewählt. Anlagen, die nur der Verwertung eigener Produktionsreste dienen oder die lediglich ein Gebäude beheizen, werden bei einer Brennstoffmenge < 10.000 t/a nicht betrachtet. Daher wurde keine Anlage aus dem Bereich > 5.000 t/a - < 10.000 t/a befragt.

6.2 Auswertung der Befragung

Insgesamt wurden 17 Anlagenbetreiber befragt, die teilweise mehrere Anlagen in Betrieb haben. Nach der Recherche wurde von 20 betriebenen Anlagen ausgegangen. Der Rücklauf betrug 8 Fragebogen mit 9 Anlagen. 3 Betreiber beteiligten sich nicht an der Umfrage, ein Betreiber konnte aufgrund zu geringer Betriebszeit noch keine Angaben machen. Der Rücklauf der Fragebogen beträgt somit 47 %, die nachfolgenden Ergebnisse beziehen sich nur auf den Rücklauf und stellen keine Hochrechnung dar.

Die befragten Anlagen haben zusammen eine Feuerungsleistung von 256,5 MW. Der Durchsatz beträgt insgesamt 634.000 t/a. Mit einer elektrischen Leistung von insgesamt 56,47 MW und einer thermischen Leistung von insgesamt 87 MW werden pro Jahr durch die befragten Kraftwerke 374,35 GWh Strom und 435,5 GWh Wärme erzeugt. Die überwiegende Feuerungsart ist der Vorschubrost (45 %), gefolgt von Wander- und Drehrostfeuerung (je 22 %). Ein Anlagenbetreiber machte keine nähere Angabe zur Feuerungsart.

Die eingesetzten Brennstoffe der befragten Biomasseverbrennungsanlagen sind vielfältig. In Abbildung 11 ist zu erkennen, dass der Anteil der unbehandelten Hölzer deutlich

überwiegt. NaWaRo-Hölzer und Holzrinde werden zum größten Teil (insgesamt 39 %) als Brennstoff eingesetzt, dicht gefolgt von Waldrestholz, Landschaftspflegeholz und Gartenabfälle/Grünschnitt (je 11 %). Altholz hat mit 17 % ebenfalls einen großen Anteil an dem Brennstoffdurchsatz. In Hessen werden die Kategorien AI-AIV verbrannt, wobei lediglich ein Kraftwerk AIV-Hölzer verbrennt. Neben den klassischen Hölzern werden auch biogene Abfälle aus der Papierindustrie und der Siebüberlauf aus der Biokompostierung verbrannt. Die Hölzer werden in den Biomasseverbrennungsanlagen in Form von Hackschnitzeln verbrannt, um eine gleichmäßige Beschickung und Brennstoffqualität zu erreichen.

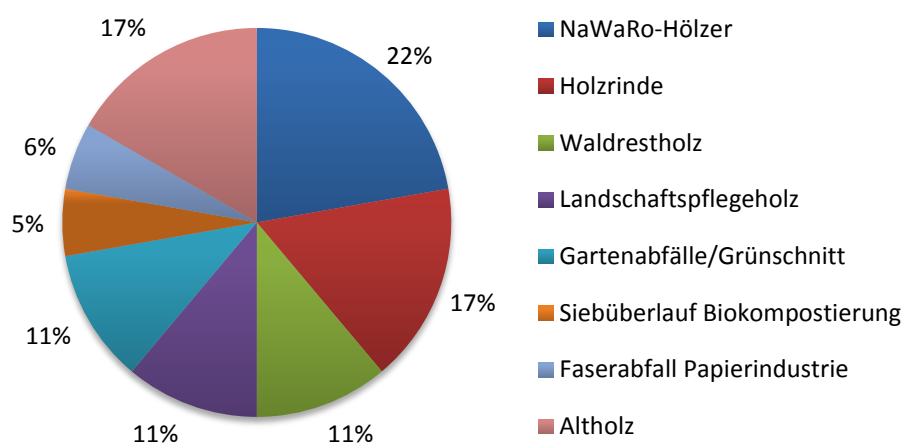


Abbildung 11: Brennstoffinput der befragten Anlagen (Gesamtinput: 634.000 t/a)

Die in Abbildung 11 aufgeführten Brennstoffe beziehen die Biomasseverbrennungsanlagen aus drei verschiedenen Quellen: Zum einen erfolgt der Bezug von Brennstofflieferanten, zum anderen aus regionaler Entsorgung. Eine weitere Quelle ist der Produktionsabfall aus holzbe- und verarbeitenden Betrieben. Abbildung 12 zeigt die prozentuale Verteilung der Herkunft der Brennstoffe.

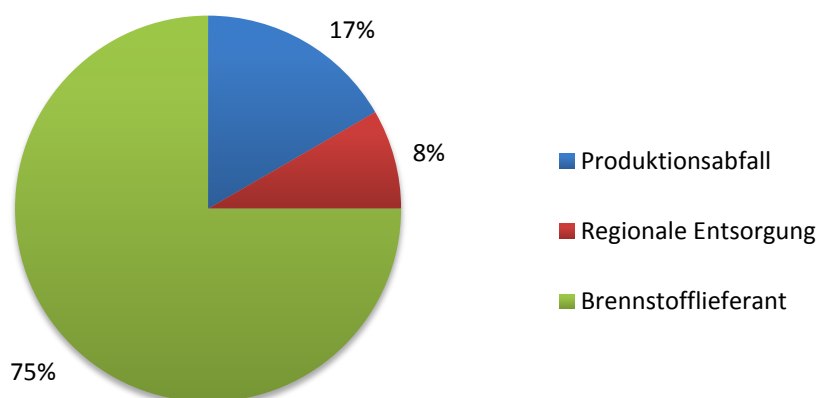


Abbildung 12: Herkunft der Brennstoffe

Bei dem Betrieb eines Kraftwerks und dem Bezug der Brennstoffe müssen Maßnahmen zur Qualitätssicherung durchgeführt werden. Diese können ganz unterschiedlicher Art sein. Zum einen kann der Betrieb nach EEG oder BGK zertifiziert sein und so Qualitätssicherungsmaßnahmen vorgeschrieben bekommen. Daneben werden auch Inputkontrollen (zum Beispiel visuelle Überprüfung, Überprüfung AVV) und Beprobungen sowie Analysen der Brennstoffe durchgeführt. Einige Betreiber haben ein internes Qualitätssicherungssystem und führen ein Einsatzstofftagebuch. Andere Betreiber führen nicht nur den Betrieb der Biomasseverbrennungsanlage, sondern sind zusätzlich ein Entsorgungsfachbetrieb und haben über diesen Betriebszweig ein Qualitätssicherungssystem. In Tabelle 8 sind die verschiedenen, bei der Befragung angegebenen Qualitätssicherungsmaßnahmen mit der Häufigkeit ihrer Nennung aufgeführt. Dabei sind seitens der Betreiber Mehrfachnennungen möglich. Neben den angegebenen Maßnahmen können weitere Maßnahmen zur Qualitätssicherung durchgeführt werden.

Tabelle 8: Qualitätssicherungsmaßnahmen der 9 befragten Anlagen

Qualitätssicherungsmaßnahme	Anzahl der Nennung
Beprobung/Analyse der Aschen	4
Zertifizierung nach EEG	3
Inputkontrolle [z.B. AVV, visuelle Kontrolle]	3
Entsorgungsfachbetrieb	2
Interne QS-Maßnahmen	2
Einsatzstofftagebuch	1
Zertifizierung nach BGK	1

Die befragten Anlagen haben einen Rostascheanfall von insgesamt 43.790 t/a. Für diese Aschen wurden in der Befragung fünf verschiedene Entsorgungswege genannt. Je nach Inhaltsstoffen der Aschen werden die Entsorgungswege durch gesetzliche Rahmenbedingungen vorgegeben (siehe Kapitel 4.5.3). In Abbildung 13 sind die genannten Entsorgungswege mit prozentualer Verteilung dargestellt. Die Angaben beziehen sich auf den Gesamt-Rostasche-Anfall der befragten Anlagen von 43.790 t/a.

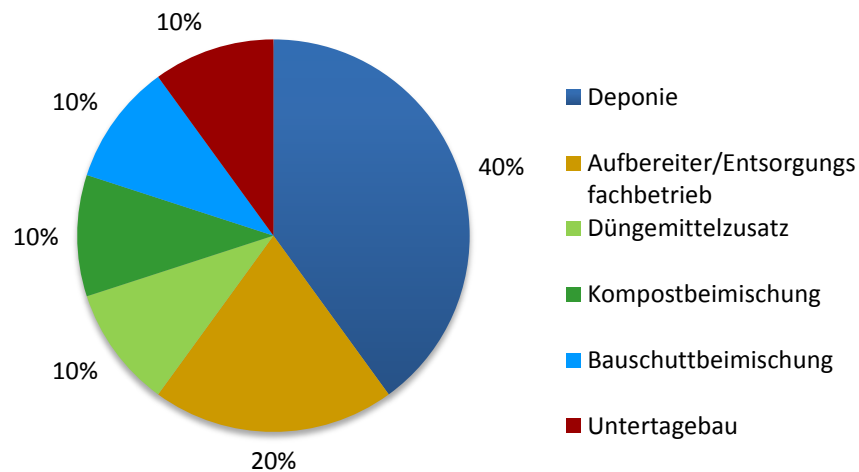


Abbildung 13: Angegebene Entsorgungswege der Rostaschen

40 % der anfallenden Rostaschen werden deponiert. Die Nachfrage bei einigen Betreibern ergab, dass zum Teil Probleme mit den Inhaltsstoffen der Asche vorliegen und die Aschen daher deponiert werden müssen. Einige Betreiber deponieren jedoch die Aschen, da andere Verwertungswege derzeit noch nicht wirtschaftlich sind oder ein geeigneter Aufbereiter oder Abnehmer für die Aschen fehlt. Hier liegt großes Optimierungspotential, damit die vorhandenen Möglichkeiten der Ascheverwertung besser ausgeschöpft werden und das Potential der Aschen nicht ungenutzt verloren geht. Neben der Beseitigung auf der Deponie werden 20 % der Rostaschen an einen Aufbereiter oder Entsorgungsfachbetrieb weiter gegeben. Wie die Aschen dort behandelt oder verwertet werden und ob eine Nutzung der enthaltenen Nährstoffe erfolgt, war leider nicht zu ermitteln. Jeweils 10 % der Rostaschen werden in den Untertagebau gegeben oder als Bauschuttbeimischung verwendet. Lediglich 20 % der Rostaschen werden derzeit als Düngemittelzusatz oder Kompostbeimischung verwertet, sodass die Nährstoffe auf Flächen zurückgeführt und Stoffkreisläufe geschlossen werden. Hier sollten Möglichkeiten gefunden werden, den Anteil der verwerteten Aschen im Sinne der Kreislaufführung und des Ressourcenschutzes zu steigern und den Anteil der „verlorenen“ Aschen deutlich zu verringern.

Der durchschnittliche Phosphorgehalt der Rostaschen der befragten Anlagen liegt bei 1,26 % P_2O_5 (\cong 0,55 % P). Die Werte schwanken zwischen 1 % P_2O_5 und 1,6 % P_2O_5 , leider konnten nicht alle Anlagenbetreiber diese Frage beantworten. Als Brennstoff werden in diesen Anlagen hauptsächlich NaWaRo-Hölzer verwendet.

Neben dem Rostascheanfall wurde noch der Flugascheanfall ermittelt. Dieser beträgt pro Jahr 10.910 t. Erwartungsgemäß werden die Flugaschen zu 70 % auf Deponien entsorgt und zu 30 % im Untertagebau als Verfüllungsmaterial verwendet. Aufgrund der hohen Schadstoffbelastung in der Flugasche, kommt diese nicht für die Phosphorrückgewinnung in Betracht.

Als Ergebnis der Befragung kann festgehalten werden, dass an hessischen Biomasseverbrennungsanlagen der Bereich „Phosphorrückgewinnung“ bisher noch kein Thema ist. Keiner der Betreiber hat sich bisher mit der Möglichkeit einer solchen Rückgewinnung aus der Asche der Biomasseverbrennungsanlagen beschäftigt oder strebt diese an. Lediglich einem Betreiber war die Rückgewinnung von Phosphor bezogen auf den Bereich Abwasser/Klärschlamm ein Begriff.

Einige Betreiber sind sich dem Potential ihrer Asche nicht bewusst. Hier ist die Asche nur Abfall, der entsorgt werden muss. Andere hingegen nutzen das Potential ihrer Asche als Düngemittel- beziehungsweise Kompostzusatz oder arbeiten an Möglichkeiten, wie die Asche sinnvoll genutzt werden kann und nicht auf einer Deponie „verloren“ geht. Hierzu gibt es bereits Bestrebungen seitens einiger Anlagenbetreiber, größere Aschelagerstätten zu errichten, damit Landwirte bei saisonalem Bedarf entsprechende Mengen der Asche zur Düngung der Felder nutzen können.

7 Ermittlung der Phosphorgehalte von Biomasseverbrennungsaschen

Um das Phosphorpotential zu ermitteln, wird der Phosphorgehalt von Biomasseaschen im Labor bestimmt. Untersucht werden hierzu die Aschen aus zwei verschiedenen Biomasseverbrennungsanlagen, die unterschiedliche Brennstoffe verwenden. Die Analyse weiterer Biomasseverbrennungsaschen war gewünscht, leider wurden keine weiteren Proben von den Anlagenbetreibern zur Verfügung gestellt. Als Vergleich wird zudem die Asche einer Hausfeuerung untersucht, welche mit naturbelassenem Holz befeuert wird und ein Einfamilienhaus anteilig beheizt.

Die Asche eines Biomasseheizkraftwerkes entsteht durch die Verbrennung von Altholz der Kategorien AII – AIII (BMHKW B). Das andere Biomassekraftwerk verbrennt kein Altholz sondern nur naturbelassene Biomasse, zum Beispiel waldfisches Restholz, Baum- und Grünschnitt und Schnittgut aus der Landschaftspflege (BMKW C).

7.1 Probenahme

Da die Probenahme einen erheblichen Einfluss auf die Ergebnisse einer Untersuchung haben kann, muss eine repräsentative Probe gewonnen werden.

Als Grundlage für die Probenahme dient die LAGA PN 98: „Richtlinie für das Vorgehen bei physikalischen, chemischen und biologischen Untersuchungen im Zusammenhang mit der Verwertung/Beseitigung von Abfällen“. Diese Richtlinie der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) enthält „Grundregeln für die Entnahme von Proben aus festen und stichfesten Abfällen sowie abgelagerten Materialien“. Eine repräsentative Probe ist hier als eine Probe definiert, *„deren Eigenschaften weitestgehend den Durchschnittseigenschaften der Grundmenge des Prüfguts entsprechen“*.

(LAGA - Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall, 2002)

Die Beprobung wurde als „allgemeine Abfallbeprobung“ durchgeführt, deren Ziel die Bestimmung des durchschnittlichen Stoffgehalts ist und mit der Grundgesamtheiten bezüglich ihrer Menge und Zusammensetzung charakterisiert werden.

Zunächst ist die Homogenität des zu beprobenden Materials zu überprüfen, Asche wird durch Sichtkontrolle als homogenes Material betrachtet. Anschließend erfolgt die Volu-

men- oder Massenbestimmung anhand derer die Anzahl der zu entnehmenden Misch- und Sammelproben festgelegt wird. Mit Hilfe der Formel

$$\text{Masse der Grundmenge [t]} = (\text{Schütt -})\text{Dichte} \left[\frac{\text{t}}{\text{m}^3} \right] * \text{Volumen [m}^3\text{]}$$

und der angegebenen Schüttdichte für Holzasche ($0,5 \text{ t/m}^3$) kann das benötigte Volumen an Asche berechnet werden. Um $0,5 \text{ kg}$ Asche für die Analyse zu erhalten, muss 1 dm^3 Asche als Probe genommen werden.

Aus Tabelle 2 der LAGA PN 98 wird nun die Mindestanzahl an Einzel-, Misch- und Sammelproben entnommen. Bis 30 m^3 müssen acht Einzel- und zwei Mischproben genommen werden. Eine Mischprobe besteht dabei aus vier Einzelproben. Um nun vor Ort die Mischprobe zur Laborprobe vorzubereiten, müssen auf einer geeigneten Unterlage die Einzelproben vereint und durch intensives Vermischen homogenisiert werden. Anschließend kann die Probe verjüngt werden, um die benötigte Probemenge zu erhalten. Diese Verjüngung kann durch fraktioniertes Schaufeln, durch Aufkegeln und Vierteln mittels Probenkreuz, durch Teilen mittels Probenstecher oder mit Hilfe eines Riffeltellers/Rotationsteilers erfolgen. Das Mindestvolumen der Einzelproben in Abhängigkeit von der Korngröße kann aus Tabelle 3 der LAGA PN 98 entnommen werden, für diese Arbeit wurden $0,5 \text{ l}$ angenommen.

In Abbildung 14 sind die Mischproben der Aschen zu sehen. Die Unterschiede der Aschen sind deutlich zu erkennen: Die Asche der Hausfeuerung ist sehr fein und weist lediglich einige unverbrannte Holzstücke auf, während die Asche des BMKW C sehr grobkörnig ist und Fremdstoffe sowie große Schlackebrocken enthalten sind. Die Asche des BMHKW B ist ebenfalls sehr grobkörnig, enthält Verunreinigungen wie Nägel und ebenfalls große Schlackebrocken.



Abbildung 14: Aufnahmen der verjüngten Proben der zu analysierenden Asche

7.2 Analyse der Aschen

In Anlehnung an die DIN EN ISO 6878 „Bestimmung von Phosphor – Photometrisches Verfahren mittels Ammoniummolybdat“ und dem darin enthaltenen Punkt 6 „Bestimmung von hydrolysierbarem Phosphat und Orthophosphat“ wird der Phosphorgehalt der Aschen untersucht. Die Phosphorbestimmung erfolgt photometrisch mittels Hach-Lange-Schnelltests.

7.2.1 Reagenzien und Geräte

In den beschriebenen Analysen werden folgende Reagenzien und Geräte verwendet:

- Schwefelsäure (H_2SO_4) 5N, $c(\text{H}_2\text{SO}_4) = 2,5 \text{ mol/l}$
- Natronlauge (NaOH) 2N, $c(\text{NaOH}) = 2 \text{ mol/l}$
- destilliertes Wasser ($\text{H}_2\text{O}_{\text{dest.}}$)
- Hach-Lange Küvettentests
 - LCK 350: Messbereich 2-20 mg $\text{PO}_4\text{-P/l}$
 - LCK 349: Messbereich 0,05-1,5 mg $\text{PO}_4\text{-P/l}$
 - Reagenz B: 16 % H_2SO_4
 - DosiCap® C enthält Natriummetaborat
 - Analysenküvette enthält H_2SO_4
- Photometer Hach-Lange DR 5000
- 100 ml Erlenmeyerkolben und Messkolben
- 15 ml Gewindgläschen
- Heizplatte
- Uhrengläser
- Eppendorf-Pipetten
- Einweg-Spritzen 2 ml von Braun
- Rotilabo-Spritzenfilter aus Polyvinylidenfluorid (PVDF), 0,45 μm , 33 mm Außendurchmesser

7.2.2 Berechnung der Einwaage

Um im Messbereich des LCK 350-Schnelltests zu liegen, muss die Einwaage genau berechnet werden. Es wird angenommen, dass der P-Gehalt der Aschen etwa 1 % P_2O_5 beträgt. Dies entspricht 0,4363 % reinem P, ermittelt aus dem Verhältnis zwischen der molaren Masse von P ($M = 30,97 \text{ g/mol}$, zweifach zu nehmen) und der molaren Masse von P_2O_5 ($M = 141,93 \text{ g/mol}$).

Damit der Messbereich der Schnelltests ausgeschöpft werden kann, wird als Soll-Konzentration $c_{\text{soll}} = 10 \text{ mg PO}_4\text{-P/l}$ angenommen. Da 100 ml Lösung angesetzt werden, müssen in der Einwaage 1 mg $\text{PO}_4\text{-P}$ ($\cong 0,4363 \text{ \% P}$) enthalten sein:

$$\text{Einwaage} = \frac{1 \text{ mg}}{0,004363} = 229,0 \text{ mg}$$

Um das Einwiegen zu erleichtern, wird als Soll-Einwaage 250 mg vorgegeben.

7.2.3 Durchführung

Die nassen Proben werden zunächst mit einem Sieb der Lochweite 2,2 mm in Grob- und Feinfraktion getrennt. Die separierten Proben werden für 21 h bei 105 °C im Trockenschrank getrocknet und anschließend im Exikator abgekühlt. Um den Einfluss der Korngröße zu bestimmen, wird zusätzlich zu der unbehandelten 2,2 mm-Fraktion der Kraftwerke eine Teilprobe dieser Fraktion zu einem feinen Pulver gemörsert.

Weiterhin wird eine gemischte nasse Probe zunächst getrocknet, um den Phosphorgehalt in den größeren Stücken der Asche zu berücksichtigen. Die groben und feineren Aschestücke werden nach dem Trocknen zusammen gemörsert und anschließend auf 2,2 mm gesiebt. Der Siebdurchlauf wird nochmals gemörsert.

Die Asche wird gemäß der Vorgabe aus 7.2.2 in einen 100 ml Erlenmeyerkolben eingewogen. Anschließend gibt man 40 ml Wasser hinzu und senkt den pH-Wert der Lösung durch Zugabe von H_2SO_4 (etwa 4 ml) auf einen pH-Wert < 1 ab. Die angesäuerte Lösung wird etwa 30 min bei 250 °C auf der Heizplatte schwach sieden gelassen, wobei die Kolben mit einem Uhrglas abgedeckt werden. Nachdem die Lösung abgekühlt ist, wird der pH-Wert mittels Natronlauge auf pH 3-10 eingestellt, hier ist etwa die 2,5-fache Menge der zugegebenen Schwefelsäure notwendig.

Die neutralisierte Lösung wird in einen 100 ml Messkolben überführt, die Aschepartikel verbleiben im Erlenmeyerkolben zurück. Der Messkolben wird mit $\text{H}_2\text{O}_{\text{dest.}}$ bis zur Marke aufgefüllt und gut geschüttelt.

Um Matrixeffekte erkennen zu können, werden in Vergleichsproben die doppelte Menge an Asche (etwa 500 mg) eingewogen und wie zuvor beschrieben behandelt.

Ein Teil der Messlösung wird in ein 15 ml Gewindgläschen überführt. Mittels einer Einwegspritze werden etwa 3 ml dieser Probe entnommen und mit dem Spritzenfilter

filtriert. Um verbliebene Flüssigkeit im Filter zu verhindern, wird die Spritze mit Luft aufgezogen und die Flüssigkeit aus dem Spritzenfilter heraus gedrückt.

Um den Einfluss von Ascheresten in der Lösung bei der Neutralisation zu untersuchen, werden 500 mg der Proben wie zuvor beschrieben vorbereitet und gekocht. Nach Abkühlen der Probe werden 10 ml der Lösung mit Aschepartikeln in ein Zentrifugenröhrchen gegeben. In ein Becherglas gibt man weitere 8 ml der Lösung mit Aschepartikeln. Die Probe im Zentrifugenröhrchen wird 5 Minuten bei 40.000 Umdrehungen zentrifugiert. Anschließend werden 8 ml der zentrifugierten Probe aus dem oberen Teil des Zentrifugenröhrchens pipettiert und in ein Becherglas gegeben. Hierbei ist darauf zu achten, dass keine Aschepartikel in der pipettierten Lösung vorhanden sind. Nun neutralisiert und filtriert man die zentrifugierte Probe und die Vergleichsprobe im Becherglas wie zuvor beschrieben. Um das Messergebnis zu berechnen, ist es bei dieser Versuchsvariante nötig, die leeren Bechergläser, die Bechergläser nach Zugabe der Probe und nach Zugabe der Natronlauge zu wiegen. Zudem muss der leere Erlenmeyerkolben, der Erlenmeyerkolben mit der Asche, nach der Hydrolyse und nach Entnahme der Proben gewogen werden.

Die gefilterten Proben werden gemäß der Arbeitsanweisung der Hach-Lange-Küvettentests bearbeitet. Bei Verwendung des LCK 350 werden 0,4 ml der Probe in die Küvette pipettiert und 0,5 ml des Reagenz B zugegeben. Man verschließt die Küvette mit einem DosiCap® C, schüttelt und lässt die Küvette anschließend 10 Minuten stehen. Nach Ablauf der 10 Minuten wird die Küvette in das Photometer gestellt. Durch den auf der Küvette befindlichen Barcode erkennt das Photometer automatisch die notwendige Wellenlänge von 850 nm. Eine Kalibrierung ist nicht notwendig, da diese im Photometer hinterlegt ist und durch den Barcode erkannt wird. Liegt das Messergebnis unterhalb des Messbereichs, wird der LCK 349 verwendet. Hier werden 2,0 ml der Probe in die Küvette pipettiert und 0,2 ml des Reagenz B hinzugegeben. Anschließend wird die Küvette mit einem DosiCap® C verschlossen und geschüttelt. Nach 10 Minuten wird mit dem Photometer gemessen.

7.3 Ergebnisse der Phosphorbestimmung

In den folgenden Kapiteln werden die Messergebnisse dargestellt und interpretiert. In Anhang B sind die Messergebnisse sowie die Berechnung des Phosphorgehalts ausführlich erläutert. Damit die Übersichtlichkeit bestehen bleibt, werden nachfolgend nur ausgewählte Daten dargestellt.

Um die untersuchten Proben besser voneinander unterscheiden zu können, wird eine Kurzbezeichnung eingeführt. Der Großbuchstabe (H, B, C) steht für die untersuchte Probe. Die Kleinbuchstaben dienen als Abkürzung für die Probenvorbereitung: s = gesiebt (2,2 mm), m = gemörsert, z = zentrifugiert. Die dreistellige Zahl steht für die Einwaage, die letzte Ziffer ist eine fortlaufende Nummerierung der jeweiligen Probencharge.

7.3.1 BMHKW B

Die Probe B entstammt aus einem Biomasseheizkraftwerk, welches hauptsächlich Sperrabfallholz und Altholz der Kategorien AII-III verbrennt. In der nachfolgenden Tabelle 9 sind die photometrischen Messergebnisse und die Berechnungsergebnisse des Phosphorgehalts aufgeführt. Dieser wird in Prozent und in mg P/g Asche angegeben, wodurch eine bessere Darstellung der Ergebnisse möglich ist.

Tabelle 9: Übersicht der Messergebnisse und des P-Gehalts der Probe B

Kurzbezeichnung	Messergebnis [mg PO ₄ -P/l]	P-Gehalt [%]	P-Gehalt [mg P/g Asche]
B s250 1	1,42	0,055	0,550
B s250 2	2,56	0,100	1,000
B sm500 1	0,208	0,004	0,041
B sm500 2	0,179	0,003	0,035
B sm500 3	< 0,05	0,001	0,010
B sm250 4	0,813	0,032	0,316
B sm250 5	1,54	0,060	0,598
B msm500 1	0,057	0,001	0,011
B msm500 2	< 0,05	0,001	0,010
B msm250 3	0,799	0,030	0,304
B msm250 4	1,19	0,046	0,463
B msm500 5	0,354	0,0035	0,035
B msm500z 6	0,076	0,0008	0,008

Anmerkung: s = gesiebt (2,2 mm); m = gemörsert; z = zentrifugiert; 250/500 = Einwaage [mg]; 1-6 = Bestimmung

Zur besseren Vergleichbarkeit werden die berechneten Ergebnisse des Phosphorgehalts in Abbildung 15 als Balkendiagramm dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass bei

den Proben mit der doppelten Einwaage von 500 mg wesentlich weniger Phosphor nachgewiesen werden konnte und zwei Messergebnisse sogar unter dem Messbereich des LCK 349 lagen (B sm500 3 und B msm 500 2). Auffällig ist, dass bei dreifacher Bestimmung der Probe „B sm500“ ebenfalls größere Abweichungen auftreten. Vergleicht man den Phosphorgehalt der Proben „B msm 500 5“ mit dem P-Gehalt der zentrifugierten Probe „B sms500z 6“ ist festzustellen, dass das Zentrifugieren keinen positiven Effekt auf die P-Bestimmung hat und sich eher negativ auf den P-Nachweis auswirkt.

Die starken Abweichungen der Phosphorgehalte aus den 250 mg und 500 mg-Proben können auf Störungen der Probenmatrix beruhen. Diese werden unter Punkt 7.4 genauer betrachtet.

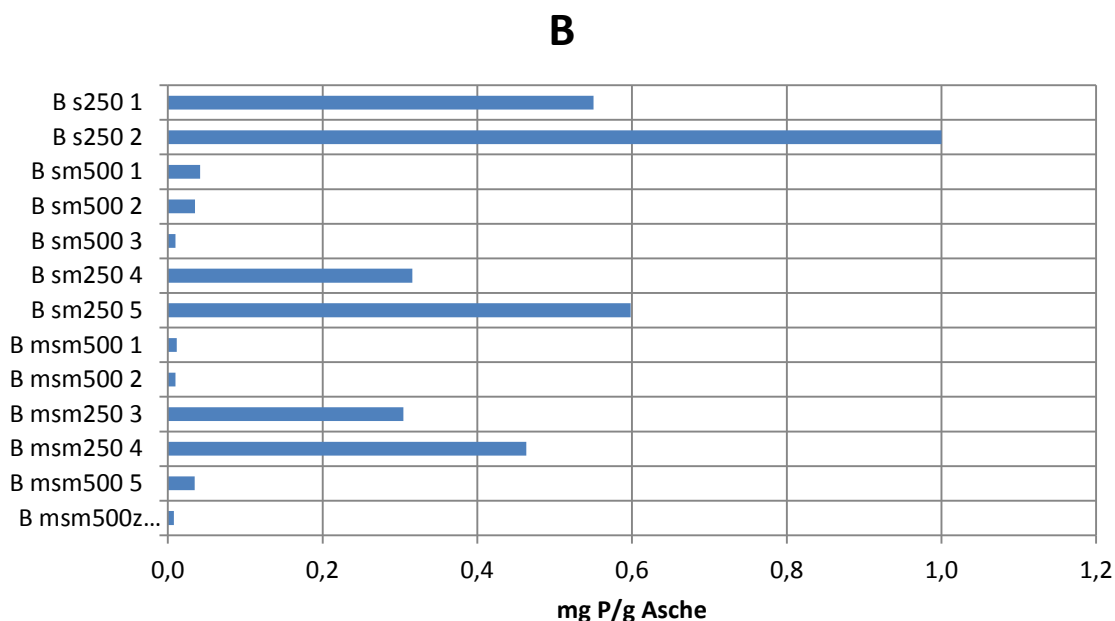


Abbildung 15: P-Gehalte der untersuchten Teilproben der Probe B in mg P/g Asche

Abbildung 16 veranschaulicht die Phosphorgehalte der 250 mg Einwaage. Auch hier sind Schwankungen der Messwerte zu erkennen, die jedoch auf Messfehler zurückgeführt werden können. Der Unterschied zwischen den gemörserten und den unbehandelten Proben kann dadurch erklärt werden, dass die Probe der Asche eine stärkere Inhomogenität als zuvor angenommen aufweist. Durch Mörsern der Probe werden auf der Inhomogenität der Probe beruhende Störeffekte ausgeschlossen oder verringert.

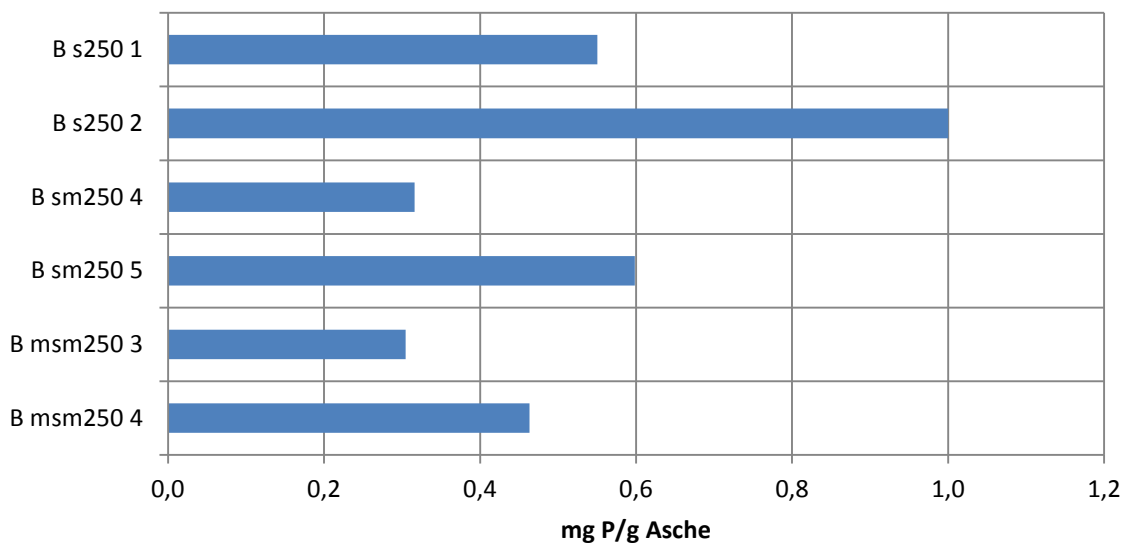
B - 250 mg

Abbildung 16: P-Gehalte der B-Probe bei einer Einwaage von 250 mg in mg P/g Asche

Um den durchschnittlichen P-Gehalt der Probe zu ermitteln, werden nur die Messergebnisse der gemörsterten Proben herangezogen. Bei Probe B liegt der durchschnittliche Phosphorgehalt in der Asche somit bei 0,042 % P bezogen auf die Trockensubstanz.

7.3.2 BMKW C

Die Probe C stammt aus einem Biomassekraftwerk, welches Landschaftspflegeholz, Gartenabfälle/Grünschnitt und Waldrestholz verbrennt. In Tabelle 10 sind die Messergebnisse sowie der berechnete Phosphorgehalt aufgeführt.

Tabelle 10: Übersicht der Messergebnisse und des P-Gehalts der Probe C

Kurzbezeichnung	Messergebnis [mg PO ₄ -P/l]	P-Gehalt [%]	P-Gehalt [mg P/g Asche]
C s250 1	0,354	0,013	0,133
C s250 2	0,895	0,036	0,359
C sm500 1	13,8	0,278	2,780
C sm500 2	13,6	0,270	2,702
C sm500 3	0,089	0,002	0,018
C sm250 4	6,36	0,248	2,483
C sm250 5	7,28	0,293	2,930
C msm500 1	0,963	0,019	0,191
C msm500 2	3,34	0,066	0,655
C msm250 3	8,02	0,311	3,113
C msm250 4	7,24	0,288	2,882
C msm500 5	15,2	0,154	1,536
C msm500z 6	17,0	0,175	1,754

Anmerkung: s = gesiebt (2,2 mm); m = gemörstert; z = zentrifugiert; 250/500 = Einwaage [mg]; 1-6 = Bestimmung

Abbildung 17 veranschaulicht die Ergebnisse der Phosphorbestimmung. Der positive Effekt des Mörserns auf die Phosphorbestimmung ist bei dieser Probe deutlich zu erkennen (siehe auch Abbildung 18). Während bei der Messung der unbehandelten Probe lediglich Phosphorgehalte von weniger als 0,1 % nachgewiesen werden konnten, liegen die Werte der gemörserten Proben nahezu vollständig über diesem Wert. Die Messergebnisse der gemörserten Fraktion liegen hier durchschnittlich um den Faktor 5 höher als die Messergebnisse der unbehandelten Fraktion.

Die Streuung der Phosphorgehalte einer Probe und vor allem die niedriger ausfallenden Messergebnisse bei doppelter Einwaage an Asche weisen darauf hin, dass die Phosphorbestimmung durch Störionen in der Probenmatrix sehr stark beeinträchtigt wird. Zum Beispiel zeigt die Dreifachbestimmung der Probe „C msm500“ Abweichungen bis zu Faktor 16 zwischen dem niedrigsten und dem höchsten gemessenen Wert. Ähnlich verhält es sich bei der Probe „C sm500“, die ermittelten Phosphorgehalte liegen im Bereich zwischen „unterhalb der Nachweisgrenze“ und über 2,5 mg P/g Asche (siehe Abbildung 17).

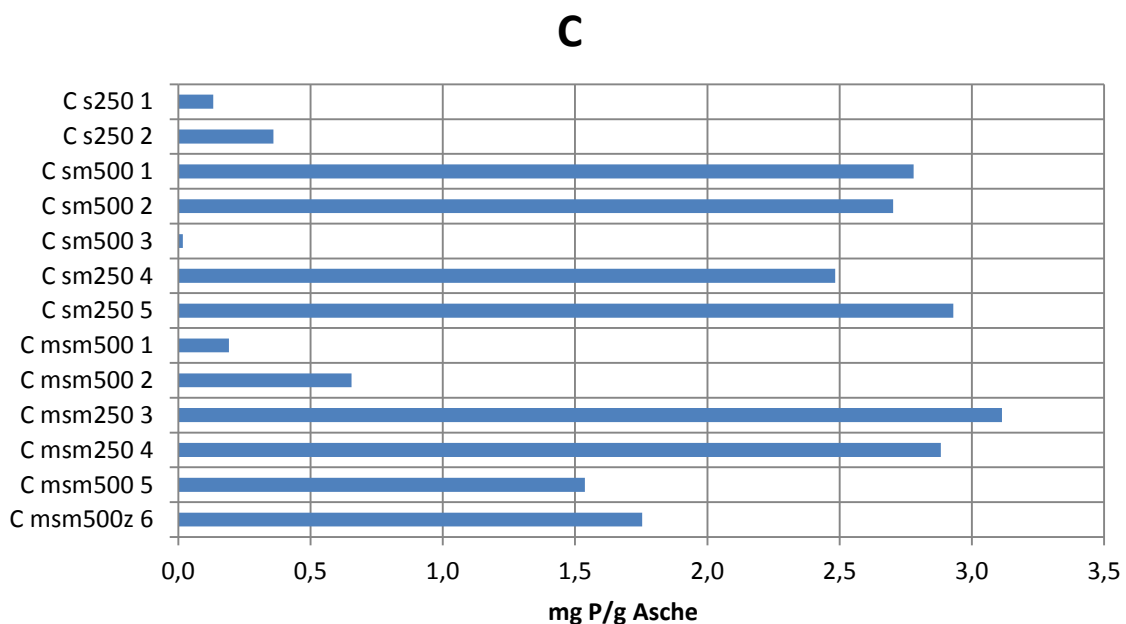


Abbildung 17: P-Gehalte der untersuchten Teilproben aus Probe C in mg P/g Asche

Mit der Probenmenge nehmen die Störeffekte zu, sodass für die Abschätzung der Phosphorgehalte nur die Proben mit 250 mg-Einwaage berücksichtigt werden. Gestützt wird diese Annahme auch durch die geringeren Abweichungen zwischen der gemörserten

und der ungemörserter Probe C. Die Ergebnisse der 250 mg-Proben sind in Abbildung 18 nochmals aufgeführt.

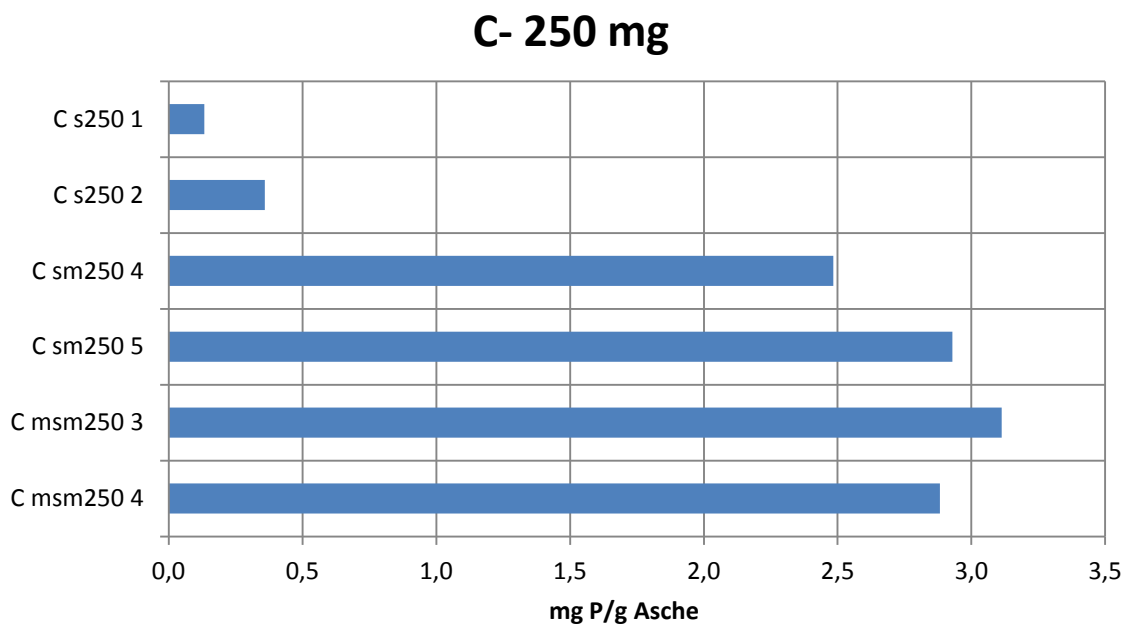


Abbildung 18: P-Gehalte der C-Probe bei einer Einwaage von 250 mg in mg P/g Asche

Um den durchschnittlichen Phosphorgehalt der Probe zu ermitteln und die Ergebnisse mit der Probe B vergleichen zu können, werden nur die Messergebnisse der gemörserter Proben herangezogen. Bei Probe C liegt der durchschnittliche Phosphorgehalt in der Asche somit bei 0,285 % P bezogen auf die Trockensubstanz.

7.3.3 Hausfeuerung

Die Probe H stammt aus einer Hausfeuerung, die mit Scheitholz aus heimischen Wäldern befeuert wird. In Tabelle 11 sind die Messergebnisse sowie der berechnete Phosphorgehalt aufgeführt.

Tabelle 11: Messergebnisse und berechneter Phosphorgehalt der Probe H

Kurzbezeichnung	Messergebnis [mg PO ₄ -P/l]	P-Gehalt [%]	P-Gehalt [mg P/g Asche]
H s250 1	51,8	2,047	20,474
H s250 2	53,4	2,136	21,360

In Abbildung 19 ist der Phosphorgehalt der Hausfeuerungsasche H in mg P/g Asche dargestellt. Da die Werte der Doppelbestimmung nur gering voneinander abweichen und zudem ein Verdünnen der Probe nötig war, um im Messbereich des Küvettentests LCK 350 zu liegen, wurde auf weitere Bestimmungen des P-Gehalts verzichtet.

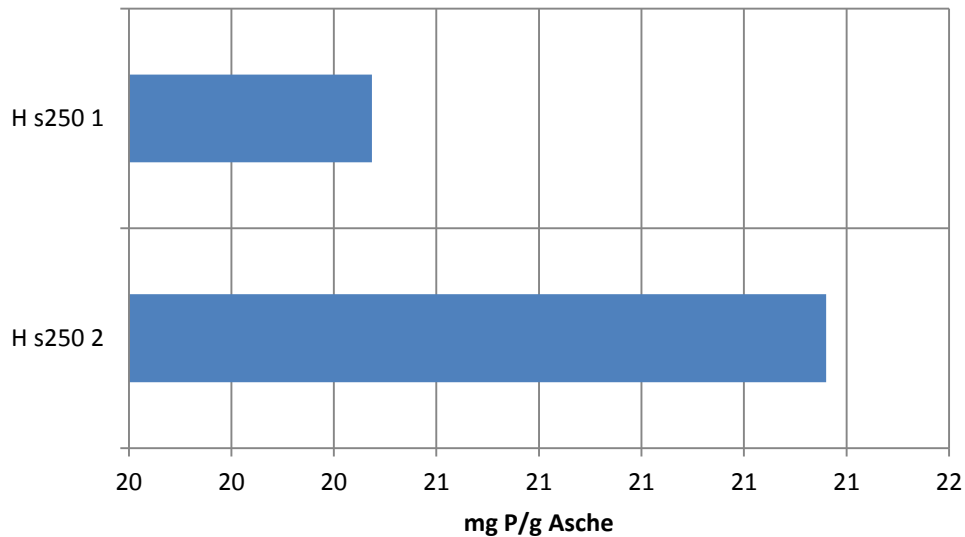


Abbildung 19: P-Anteil in der Hausfeuerungsasche in mg P/g Asche

Der gemittelte Phosphorgehalt liegt bei dieser Probe somit bei 2,09 % P und deutlich über den Phosphorgehalten der Proben B und C.

7.4 Auswertung und Diskussion der Messergebnisse

Vergleicht man den Phosphorgehalt der Hausfeuerung mit den Phosphorgehalten der Kraftwerke B und C fällt auf, dass die Abweichung um den Faktor 10 sehr hoch ist. Der pH-Wert der Probe C in wässriger Lösung lag mit pH=9 unter dem pH-Wert der Probe B in wässriger Lösung mit einem pH-Wert von 11. Wie stark die Analyse hierdurch beeinflusst wird, war nicht festzustellen. Es ist jedoch davon auszugehen, dass dieser Effekt durch die Ansäuerung auf pH < 1 und die anschließende Neutralisation auf pH 3-10 vernachlässigt werden kann.

Betrachtet man die Ergebnisse für die Probe „C s250“ ist zu erkennen, dass diese deutlich niedrigere Phosphorgehalte aufweist als die Vergleichsproben „C sm250“ oder „C msm250“. Dies kann dadurch erklärt werden, dass die Aschepartikel der unbehandelten Probe zu grob sind und keine vollständige Hydrolyse erfolgt. Durch das Mörsern der Probe konnte deutlich mehr Phosphor aus der Asche gelöst und anschließend nachgewiesen werden. Dies liegt vor allem daran, dass das Zerkleinern der Probe die spezifische Oberfläche der Probe erhöht und so die Nachweisreaktion besser ablaufen kann.

Vergleicht man die Ergebnisse der verschiedenen Einwaagen von 250 mg und 500 mg ist zu erkennen, dass der Phosphorgehalt trotz doppelter Menge an Probe nicht größer wird. Vielmehr werden geringere Phosphorgehalte gemessen. In Probe B ist dies wesentlich deutlicher festzustellen, als in Probe C. Ursache hierfür können andere Aschebestandteile sein, die den Schnelltest unterschiedlich stark stören. In der Arbeitsanweisung der Schnelltests sind mögliche Störionen und deren Konzentration angegeben, ab denen laut Testhersteller der Test verfälscht werden kann (Hach-Lange):

- Sulfat: 5.000 mg/l
- Chlorid: 2.000 mg/l
- Kalium, Natrium, Calcium: 1.000 mg/l
- Magnesium, Nitrat: 500 mg/l
- Kobalt, Eisen, Zink, Kupfer, Nickel, Blei, Iod, Cadmium, Zinn, Ammonium, Aluminium, Quecksilber, Siliciumdioxid: 50 mg/l
- Silber: 25 mg/l
- Chrom: 10 mg/l (Cr^{3+}) oder 5 mg/l (Cr^{6+})

Nachfolgend wird der Einfluss von Calciumoxid als aschebildendes Element (siehe Tabelle 4) betrachtet, welches etwa 40 % der Probe ausmacht:

Calciumoxid hat eine molare Masse von 56 g/mol, Calcium 40 g/mol. Somit sind 28 % der Probe reines Calcium ($40\% \cdot (40/56 \text{ g/mol})$). Bei einer Einwaage von 500 mg in 100 ml entspricht dies etwa 140 mg Calcium. Da die Störungen auf einen Liter der Probe bezogen sind, macht dies eine Masse von 1.400 mg Calcium pro Liter Probe. Somit ist die angegebene Konzentration überschritten und eine Verfälschung des Tests aufgrund zu hoher Calciumgehalte möglich.

In den Proben des Kraftwerks B waren zudem grobe grüne und orange Partikel enthalten. Diese Partikel können Chromoxid beziehungsweise Eisenoxid sein, wodurch eine Störung des Tests möglich ist. Da in Probe B deutlich mehr dieser Partikel aufzufinden sind als in Probe C, ist auch der Einfluss der Störungen bei der Analyse der Probe B stärker.

Eine weitere Ursache für den geringen P-Gehalt in der 500 mg-Probe kann die Ausfällung von Calciumphosphat sein, da sich die Konzentration an Calcium mit steigender

Einwaage bei gleichbleibendem Volumen der Lösung erhöht und somit das Löslichkeitsprodukt überschritten wird.

Eine Ursache für den Unterschied zwischen der Hausfeuerungsasche und der Asche der Kraftwerke könnte die Art des Ascheaustrags sein. Die Asche der Hausfeuerung fällt direkt in einen Aschekasten und wurde aus diesem als Probe entnommen. In den Kraftwerken findet jedoch eine Nassentaschung statt. Hier ist es möglich, dass Phosphat in das Wasser ausgewaschen wird und somit nicht in der Asche zur Verfügung steht. Diese Annahme müsste jedoch durch Analyse des Wassers überprüft werden. Eine weitere Ursache könnte die unterschiedliche Körnigkeit der Aschen sein. Zudem ist davon auszugehen, dass in der Asche der Hausfeuerung weniger Störstoffe enthalten sind.

Im Rahmen der vorliegenden Bachelorarbeit konnte keine auf die Besonderheiten der Ascheproben angepasste Analysenmethode, die alle möglichen Störeffekte der Aschematrix ausschließt, entwickelt werden. Daher können die erhaltenen Werte nur Anhaltspunkte zu den Phosphorgehalten und Aschen aus der Biomasseverbrennung geben. Die DIN EN ISO 6878 „Bestimmung von Phosphor – Photometrisches Verfahren mittels Ammoniummolybdat“ gibt einige Anhaltspunkte wie zum Beispiel einen Peroxodisulfataufschluss anstelle eines Schwefelsäureaufschlusses vor, mit denen die Störeffekte ausgeschlossen werden könnten.

8 Abschätzung des hessischen Phosphorpotentials

Nachfolgend wird eine Abschätzung des Phosphorpotentials für die Biomasseverbrennungsaschen in Hessen sowie für das gesamte hessische Phosphorpotential mit Verwendung der von HÖHNE abgeschätzten Potentiale gegeben.

8.1 Potential der Biomasseverbrennungsaschen

Die Befragung der Anlagenbetreiber ergab, dass in der Rostasche im Durchschnitt etwa 1,26 % P_2O_5 (\cong 0,55 % P) enthalten sind. Somit ist in den Rostaschen der befragten Anlagen ein Phosphorpotential von 552 t P_2O_5/a enthalten.

Um das Phosphorpotential aller Biomasseverbrennungsaschen in Hessen abzuschätzen, wird ein Phosphorgehalt von etwa 1,3 % P gewählt. Um die Anteile der eingesetzten Brennstoffe (siehe Abbildung 11) und die daraus resultierenden unterschiedlichen Phosphorgehalte in den Aschen zu berücksichtigen, wird dieser Wert unter Einbeziehung der im Labor bestimmten Phosphorgehalte und der Ergebnisse aus der Befragung als realistisch angesehen.

Anhand der Daten aus LIS-A konnte ermittelt werden, dass pro Jahr etwa 900.000 t Holz in hessischen Biomasseverbrennungsanlagen verbrannt werden (Stand 2012). Basierend auf den Ergebnissen der Befragung ergibt sich im Mittel, dass etwa 10 % des eingesetzten Brennstoffes als Rostasche verbleiben. Somit fallen pro Jahr etwa 90.000 t Rostasche in hessischen Biomasseverbrennungsanlagen, die im Emissionskataster Industrie nach 11. BImSchV aufgeführt sind, an. Damit kann das Phosphorpotential dieser hessischen Biomasseverbrennungsaschen mit etwa 2.680 t P_2O_5/a abgeschätzt werden.

In der nachfolgenden Tabelle 12 sind die Phosphorpotentiale der bekannten Rostaschenmenge aus der Befragung und der geschätzten Rostaschemenge der LIS-A-Anlagen aufgeführt, wobei das Phosphorpotential für die Phosphorgehalte aus der Befragung von 1,26 % P_2O_5 (\cong 0,55 % P) und für den gewählten Wert von 1,3 % P dargestellt werden. Zur besseren Vergleichbarkeit sind die Potentiale in Phosphat beziehungsweise Phosphoranteile umgerechnet. Da die Importmengen sowie der Verbrauch

an Phosphor in P_2O_5 angegeben sind, werden im Folgenden alle Mengenangaben auf P_2O_5 bezogen.

Tabelle 12: Phosphorpotentiale der bekannten und geschätzten Rostaschemenge

P - Gehalt [%]	P-Potential aus Befragung [t/a]	P-Potential aus LIS-A [t/a]
1,26 % P_2O_5	552 P_2O_5	1.122 P_2O_5
	241 P	490 P
Ca. 1,3 % P	569 P	1.170 P
	1.304 P_2O_5	2.680 P_2O_5

Anmerkung: $P_2O_5 * 0,4363 = P$
 $P * 2,2915 = P_2O_5$

8.2 Hessisches Phosphorgesamtpotential

Im Vergleich mit den von HÖHNE ermittelten Phosphorpotentialen in Hessen ist zu erkennen, dass die Biomasseverbrennungsaschen ein nicht zu vernachlässigendes Phosphorrückgewinnungspotential bieten. In Tabelle 13 sind die von HÖHNE abgeschätzten Phosphorpotentiale aufgeführt. Hinzu kommen die ermittelten Phosphorpotentiale der Biomasseverbrennungsaschen, sodass schließlich eine Abschätzung des Gesamtphosphorpotentials aus hessischen phosphorhaltigen Abfallströmen möglich ist.

Tabelle 13: P-Potentiale aus hessischen Abfallströmen (entnommen aus (Höhne, 2014))

Stoffstrom	P-Potential/a
Tierische Nebenprodukte	n.q.*
Bio- und Grünabfälle	ca. 4.000 t P_2O_5
Abwasser	ca. 2.521 – 4.010 t P_2O_5
Klärschlamm	ca. 7.562 t P_2O_5
Klärschlammmasche	ca. 5.041 t P_2O_5
Biomasseverbrennungsaschen	ca. 2.680 t P_2O_5
Summe	21.804 – 23.293 t P_2O_5

* n.q. = nicht quantifizierbar; für Hessen sind keine Mengenangaben bezüglich tierischer Nebenprodukte vorhanden

Jährlich werden zur Sicherstellung der ausgewogenen Ernährung einer einzelnen Person etwa 22,5 kg Rohphosphat in der Landwirtschaft benötigt. Der hessische Phosphorimport betrug 2008 etwa 13.500 t P beziehungsweise 30.935 t P_2O_5 und machte 26 % der nach Deutschland importierten Menge an Phosphor aus (ATZ Entwicklungszentrum; Technische Universität München, Lehrstuhl für Rohstoff- und Energietechnologie, 2011). Bei einer vollständigen Rückgewinnung der ermittelten Phosphorpotentiale in Hessen von etwa 22.000 t P_2O_5 könnte somit etwa 70 % des gesamten hessischen Phosphorbedarfs aus Sekundärrohstoffen gedeckt werden.

In einem Bericht der LAGA zur „Bewertung von Handlungsoptionen zur nachhaltigen Nutzung sekundärer Phosphorreserven“ werden die Biomasseverbrennungsaschen als relevanter Stoffstrom zur Phosphorrückgewinnung nicht ausführlich betrachtet. Lediglich ein kurzer Verweis auf die Biomasseverbrennungsaschen ist enthalten, wobei auf die in der Asche vorhandenen Schwermetalle hingewiesen wird. Die Arbeitsgemeinschaft tritt jedoch dafür ein, dass bei einer energetischen Verwertung holziger Grünabfälle wie zum Beispiel Baum- und Strauchschnitt auf *„eine Nutzung der Aschen zu Düngemittelzwecken oder Phosphor-Rückgewinnung geachtet werden“* sollte (LAGA - Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall, 2012). Diese Relevanz wird durch die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit auch verdeutlicht.

Prinzipiell spricht sich die LAGA für Rückgewinnungsquoten bei phosphorhaltigen Abfällen aus, wenn am Markt geeignete Rückgewinnungsverfahren zur Verfügung stehen. Entsprechende Verfahren sollten nach LAGA gefördert werden und potentielle Stoffströme wie Aschen bis zur Marktreife der Verfahren so gelagert werden, dass eine spätere Phosphorrückgewinnung möglich ist. (LAGA - Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall, 2012)

HÖHNE empfiehlt in seiner Arbeit, die Phosphorrückgewinnungsstrategie für Hessen auf die Bereiche Bioabfall und Abwasser zu konzentrieren. Im Bereich des Bioabfalls müsse der gut etablierte Verwertungsweg nur noch weiter ausgebaut werden, während für den Bereich des Abwassers und der Klärschlämme zeitnahe und strategische Handlungen erforderlich sind. Das genannte Potential der Bio- und Grünabfälle und der Biomasseverbrennung überschneidet sich nicht, da die energetische Verwertung der Bio- und Grünabfälle in der Arbeit von HÖHNE nicht berücksichtigt wurde. Nach HÖHNE gehen etwa 10 % der erfassten Bio- und Grünabfälle in die energetische Verwertung, was einen Phosphorpotential von etwa 175 t P₂O₅ entspricht. Dieses Phosphorpotential ist im Potential der Biomasseverbrennungsaschen enthalten.

Die Verfahren zur Phosphorrückgewinnung aus KSA erzielen Rückgewinnungsraten von bis zu 90 %. Zudem erfolgt bei diesen Verfahren überwiegend eine gezielte Schwermetallentfrachtung. Die Rückgewinnung von Phosphor aus Klärschlammaschen erfordert jedoch hohe Phosphorgehalte im Klärschlamm, sodass die P-Rückgewinnung aus Klärschlamm an Bedeutung verlieren würde. Positiv an einer Rückgewinnungsstrategie aus

KSA ist die Möglichkeit der Entwicklung eines zentralen Konzepts. Die Rückgewinnung von Phosphor bezieht sich dadurch nicht nur auf eine einzelne Anlage, sondern auf eine Klärschlammmonoverbrennungsanlage, in der der Klärschlamm mehrerer Kläranlagen behandelt wird. Weiterhin könne bei einem zentralen Konzept die thermische Behandlung der Klärschlämme in Verbindung mit anderen phosphorhaltigen Abfällen wie Tiermehl oder Biomasse erfolgen. (Höhne, 2014)

Bei der Ausarbeitung eines solchen zentralen Konzepts muss jedoch zunächst geprüft werden, ob eine Mischung der Stoffströme Klärschlammmasche, Tiermehl und Biomasseasche den Anforderungen der bekannten Phosphorrückgewinnungsverfahren genügt. Die Phosphorgehalte dieser Stoffströme sind sehr unterschiedlich: Klärschlammmasche enthält 5-10 % P_2O_5 , Tiermehl etwa 3-6 % P (\cong 7-14 % P_2O_5) und Biomasseverbrennungsasche rund 1,3 % P. Hinsichtlich der Rückgewinnungsmöglichkeit und der Rückgewinnungsquote sollte geprüft werden, ob Störstoffe und das höhere Volumen mit vermindertem Phosphorgehalt negative Auswirkungen auf die Verfahren haben. Da die von HÖHNE als positiv bewerteten Verfahren zur Phosphorrückgewinnung eine gezielte Schwermetallentfrachtung beinhalten, sollten die Schwermetallgehalte der Biomasseaschen unproblematisch sein.

9 Fazit und Ausblick

Das Ziel dieser Arbeit war, das Phosphorpotential in Biomasseverbrennungsaschen aus Hessen zu ermitteln und den aktuellen Stand der Entsorgungswege dieser darzustellen. Dazu wurden Betreiber von Biomasseverbrennungsanlagen befragt und der Phosphorgehalt verschiedener Biomasseverbrennungsaschen analytisch bestimmt.

Die Befragung der Betreiber von Biomasseverbrennungsanlagen ergab, dass das vorhandene Potential der Biomasseverbrennungsaschen zur Schließung von Stoffkreisläufen in Hessen nahezu ungenutzt bleibt. Trotz der vorhandenen Möglichkeiten zur Schließung der Nährstoffkreisläufe durch Ausbringung der Aschen auf Felder oder durch Beimischung zu Kompost beziehungsweise Düngemitteln werden lediglich 20 % der Aschen im Sinne der Kreislaufführung verwertet.

Die Ermittlung der Phosphorgehalte verschiedener Biomasseverbrennungsaschen ergab einen durchschnittlichen Phosphorgehalt von 1,3 % P. In Hessen liegt durch den geschätzten Rostascheanfall von etwa 90.000 t/a und dem ermittelten Phosphorgehalt von 1,3 % P ein theoretisches Phosphorpotential von 2.680 t P₂O₅ vor. Zusammen mit den von HÖHNE ermittelten Phosphorpotentialen liegt in Hessen ein Gesamtpotential von etwa 22.000 t P₂O₅ vor. Durch Rückgewinnung dieses Gesamtpotentials wäre es möglich, etwa 70 % des gesamten Phosphorbedarfs von Hessen aus Sekundärrohstoffen zu decken. Die durch die Probenmatrix bedingten Störungen der Phosphorbestimmung mit Hach-Lange Schnelltests konnten im Rahmen der Arbeit nicht ermittelt werden. Daher können die ermittelten Phosphorgehalte der Aschen und die daraus resultierende Potentialabschätzung fehlerbehaftet sein. Dennoch stellen diese Werte durch Berücksichtigung der Literaturwerte einen Anhaltspunkt für das in Hessen vorhandene Phosphorpotential der Biomasseverbrennungsaschen dar.

Um den Phosphorgehalt von Biomasseverbrennungsaschen verlässlicher zu bestimmen, müssen die in der Asche enthaltenen Schadstoffe bekannt sein. Liegen hierzu Daten vor, muss ein Analyseverfahren gewählt werden, das die Störungen der Schnelltests stärker berücksichtigt und die Asche vollständig analysiert.

Im Rahmen der Novellierung der Klärschlammverordnung und der geplanten Einführung einer verpflichtenden Phosphorrückgewinnung sollte eine nachhaltige Nutzung der

Aschen verpflichtend sein. Ist dies jedoch aufgrund unzureichender Wirtschaftlichkeit der bestehenden Verfahren noch nicht möglich, sollten die Aschen rückholbar gelagert werden, um eine Phosphorrückgewinnung zu einem späteren Zeitpunkt zu ermöglichen und die vorhandenen Potentiale optimal zu nutzen. Eine Alternative hierzu könnte vorerst die Nutzung der Aschen als Kompost- oder Düngemittelbeimischung sein, damit die Nährstoffkreisläufe geschlossen und die Ressourcen geschont werden. Für Besitzer einer Hausfeuerung, die über einen Komposthaufen im Garten verfügen, ist es lohnenswert, die Asche dorthin zu verbringen. So erhalten diese einen Terra Preta-ähnlichen Dünger, der über hohe Nährstoffgehalte verfügt und nachhaltig erzeugt wurde.

Im Hinblick auf die Ziele des hessischen Energiegipfels gilt es, zunächst die Strukturen der Verbrennung fester Biomasse in allen Regionen auszubauen und das ungenutzte Potential der festen Biomasse von rund 4.300 GWh/a auszuschöpfen. Hierdurch wird sich das Phosphorpotential der Biomasseverbrennungsaschen nochmals erhöhen und einen weiteren Beitrag zur Deckung des hessischen Phosphorbedarfs aus phosphorhaltigen Abfallströmen leisten.

Um die Rückgewinnung von Phosphor zu realisieren, sollte jedoch die Wertschöpfung der Ressourcen gesteigert werden. Die Dringlichkeit der Ressourcenschonung und der Rückgewinnung des Stoffes aus Sekundärrohstoffen muss mehr in den Fokus der Erzeuger dieser phosphorhaltigen Abfälle rücken. Ein positiver Schritt in diese neue Richtung kann die Einführung einer Pflicht zur Verwertung der Aschen sein, soweit es die Inhaltsstoffe zulassen. Aufgrund zurzeit noch fehlender wirtschaftlicher Verfahren zur Phosphorrückgewinnung sollten schnellstmöglich Konzepte zur separaten Lagerung der Aschen geschaffen werden, die die Rückgewinnung der Nährstoffe zu einem späteren Zeitpunkt gewährleisten. Weiterhin sollte ein zentrales Rückgewinnungskonzept angestrebt werden, um die Potentiale der Klärschlammaschen, der Tier- und Knochenmehle sowie der Biomasseverbrennungsaschen gemeinsam auszunutzen. Hierzu ist zu prüfen, inwieweit die bereits bestehenden Verfahren zur Phosphorrückgewinnung aus Klärschlammaschen dazu geeignet sind, Phosphor aus einer Mischung der verschiedenen Stoffströme zurückzugewinnen. Es muss verhindert werden, dass Phosphor als limitierter, aber essentieller Nährstoff durch unzureichende Potentialnutzung verloren geht.

Literaturverzeichnis

ATZ Entwicklungszentrum; Technische Universität München, Lehrstuhl für Rohstoff- und Energietechnologie. 2011. Ressourcenstrategie für Hessen unter besonderer Berücksichtigung von Sekundärrohstoffen. *Abschlussbericht*. [Online] 08. 2011. [Zitat vom: 28. 03. 2015.]

https://umweltministerium.hessen.de/sites/default/files/HMUELV/111819_abschlussbericht_ressourcenstrategie_hessen.pdf.

Bayrisches Landesamt für Umwelt. 2009. Merkblatt - Verwertung und Beseitigung von Holzaschen. [Online] 2009. [Zitat vom: 23. 02. 2015.]

http://www.bestellen.bayern.de/application/stmug_app000016?SID=1125757735&ACTIONxSESSxSHOWPIC%28BILDxKEY:lfu_abfall_00169,BILDxCLASS:Artikel,BILDxTYPE:PDF%29.

Bioenergie-dorf Oberrospe eG. Ein Prospekt Oberrospher Bürgerinnen und Bürger. [Online] [Zitat vom: 16. 02. 2015.] <http://www.bioenergie-dorf-oberrospe.de/images/wissenstransfer/flyer.pdf>.

Biomasse Rhein-Main GmbH. Biomassekraftwerk Wicker - Funktionsschema. [Online] [Zitat vom: 16. 02. 2015.] <http://www.bioma-gmbh.de/funktionsschema.html>.

BIOS Bioenergiesysteme GmbH. Strom aus Biomasse - ORC-Technik. [Online] [Zitat vom: 13. 02. 2015.] <http://www.bios-bioenergy.at/de/strom-aus-biomasse/orc-prozess.html>.

Bundsgütegemeinschaft Kompost e.V. - QS. 2013. Information - Qualitätssicherung von Aschen aus naturbelassenem Holz. [Online] 30. 07. 2013. [Zitat vom: 06. 03. 2015.] http://www.kompost.de/fileadmin/docs/Archiv/Thema_Position/5.3_Qualitaetssicherung_Holzasche.pdf.

Bundsgütegemeinschaft Kompost e.V. - Verwertung. 2013. Information - Verwertung von Holzaschen auf Flächen. [Online] 08. 03. 2013. [Zitat vom: 06. 03. 2015.] http://www.kompost.de/fileadmin/docs/Archiv/Thema_Position/5.3.2_Thema_Verwertung_von_Holzaschen_2013-final.pdf.

Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz. 2012. Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen (Kreislaufwirtschaftsgesetz - KrWG). [Online] 24. 02. 2012. [Zitat vom: 03. 03. 2015.] <http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/krwg/gesamt.pdf>.

—. **2002.** Verordnung über Anforderungen an die Verwertung und Beseitigung von Altholz (Altholzverordnung - AltholzV). [Online] 15. 08. 2002. [Zitat vom: 03. 03. 2015.] <http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/altholz/gesamt.pdf>.

- . **2012.** Verordnung über das Europäische Abfallverzeichnis (Abfallverzeichnis-Verordnung - AVV). [Online] 24. 02. 2012. [Zitat vom: 06. 03. 2015.] <http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/avv/gesamt.pdf?Dieser+Link+oeffnet+ein+externes+PDF-Dokument.>
- . **2012.** Verordnung über das Inverkehrbringen von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln (Düngemittelverordnung - DüMV). [Online] 05. 12. 2012. [Zitat vom: 06. 03. 2015.] http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/d_mv_2012/gesamt.pdf.
- . **2014.** Verordnung über die Erzeugung von Strom aus Biomasse (Biomasseverordnung - BiomasseV). [Online] 21. 07. 2014. [Zitat vom: 04. 02. 2015.] <http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/biomassev/gesamt.pdf>.
- C.A.R.M.E.N. e.V. - Biomasseheizkraftwerke.** Centrales Agrar-Rohstoff Marketing- und Energie-Netzwerk e.V. *Biogene Festbrennstoffe - Biomasseheizkraftwerke.* [Online] [Zitat vom: 13. 02. 2015.] <http://www.carmen-ev.de/biogene-festbrennstoffe/biomasseheizkraftwerke>.
- C.A.R.M.E.N. e.V. - Biomasseheizwerke.** Centrales Agrar-Rohstoff Marketing- und Energie-Netzwerk e.V. *Biogene Festbrennstoffe - Biomasseheizwerke.* [Online] [Zitat vom: 13. 02. 2015.] <http://www.carmen-ev.de/biogene-festbrennstoffe/biomasseheizwerke>.
- C.A.R.M.E.N. e.V. - ORC-Technik.** Centrales Agrar-Rohstoff Marketing- und Energie-Netzwerk e.V. *Biogene Festbrennstoffe - Biomasseheizkraftwerk - ORC-Technik.* [Online] [Zitat vom: 13. 02. 2015.] <http://www.carmen-ev.de/biogene-festbrennstoffe/biomasseheizkraftwerke/orc-technik>.
- Dannenberg, Marius, et al. 2012.** *Energien der Zukunft - Sonne, Wind, Wasser, Biomasse, Geothermie.* Darmstadt : Primus-Verlag, 2012.
- Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie e.V. (DGS). 2014.** EnergyMap.info. *Bundesland Hessen.* [Online] 24. 11. 2014. [Zitat vom: 14. 03. 2015.] <http://www.energymap.info/energieregionen/DE/105/113.html>.
- Erbrecht, Prof. Dr. Rüdiger, et al. 2007.** *Das große Tafelwerk interaktiv - ein Tabellen- und Formelwerk für den mathematisch-wissenschaftlichen Unterricht in den Sekundarstufen I und II.* Berlin : Cornelsen, 2007.
- ESWE BioEnergie GmbH.** Biomasseheizkraftwerk - Technische Daten. [Online] [Zitat vom: 16. 02. 2015.] <http://www.eswe-bioenergie.de/technische-daten/uebersicht/>.
- Flaig, Holger, Leuchtweis, Christian und Lüneburg, Ernst von. 1998.** *Biomasse - nachwachsende Energie: Potentiale - Technik - Kosten.* Renningen-Malmsheim : Expert Verlag, 1998. Bd. 539.

- Freudig, Doris, [Hrsg.]. 2003.** *Lexikon der Biologie*. Heidelberg : Spektrum Akademischer Verlag GmbH, 2003.
- Grünes, Jennifer, Xu, Anlin und Nelles, Michael. 2014.** Verwertung von Phosphor aus organischen Abfällen und Reststoffen. *Müll und Abfall - Fachzeitschrift für Abfall- und Ressourcenwirtschaft*. 2014, 6.
- Hach-Lange .** Arbeitsvorschrift LCK 350/ Phosphor gesamt / Phosphat ortho. [Online] [Zitat vom: 20. 03. 2015.]
- Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie. 2015.** *Emissionskataster Industrie 2012 nach 11. BImSchV; Betriebsstättenliste mit Anlagen, die ausgewählte Brennstoffe verbrennen*. Wiesbaden : Dagmar Cornelius, 2015.
- Hessisches Ministerium für Umwelt, Energie, Landwirtschaft und Verbraucherschutz. 2011.** Biomasseaktionsplan 2020 des Landes Hessen. *Energetische Nutzung*. [Online] 09. 09. 2011. [Zitat vom: 13. 03. 2015.]
https://umweltministerium.hessen.de/sites/default/files/media/hmuely/00035_459_biomasseaktionsplan_2020.pdf.
- Hessisches Ministerium für Wirtschaft, Energie, Verkehr und Landesentwicklung.** energieland.hessen.de. [Online] [Zitat vom: 12. 03. 2015.]
www.energieland.hessen.de/wasserkraft.
- Hessisches Statistisches Landesamt. 2015.** Industrie, Bau, Handwerk, Energie. [Online] 2015. [Zitat vom: 12. 03. 2015.] www.statistik-hessen.de/themenauswahl/industrie-bau-handwerk-energie/landesdaten/energieversorgung/grafik-stromerzeugung-aus-erneuerbaren-energetraegern/index.html.
- Höhne, Andreas. 2014.** Ressourcenschutz in der hessischen Abfallwirtschaft - Am Beispiel Phosphor. *Masterarbeit*. 2014.
- Kaltschmitt, Martin und Reinhardt, Guido A. 1997.** *Nachwachsende Energieträger: Grundlagen, Verfahren, ökologische Bilanzierung*. Wiesbaden : Vieweg, 1997.
- Kaltschmitt, Martin, Hartmann, Hans und Hofbauer, Hermann. 2009.** *Energie aus Biomasse: Grundlagen, Techniken und Verfahren*. 2. korr. Nachdruck 2009. Berlin Heidelberg : Springer-Verlag, 2009.
- Kelker, H., [Hrsg.]. 1979.** *Ullmanns Encyklopädie der technischen Chemie*. 4. neubearbeitete und erweiterte Auflage. Weinheim : Verlag Chemie, 1979. Bd. 18.
- LAGA - Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall. 2012.** Bewertung von Handlungsoptionen zur nachhaltigen Nutzung sekundärer Phosphorreserven. [Online] 31. 01. 2012. [Zitat vom: 27. 03. 2015.] http://www.laga-online.de/servlet/is/23875/Bericht_Phosphorr%C3%BCckgewinnung.pdf?command=downloadContent&filename=Bericht_Phosphorr%FCckgewinnung.pdf.

—. **2002.** *LAGA PN 98 - Richtlinie für das Vorgehen bei physikalischen, chemischen und biologischen Untersuchungen im Zusammenhang mit der Verwertung/Beseitigung von Abfällen.* s.l. : Erich Schmidt Verlag, 2002.

Mainova AG. 2009. Energie im Fokus: Biomasse. *Das Biomasse-Heizkraftwerk Frankfurt-Fechenheim.* [Online] 03. 2009. [Zitat vom: 16. 02. 2015.]

https://www.mainova.de/static/de-mainova/downloads/Biomasse_Mainova.pdf.

Montag, David Markus. 2008. Phosphorrückgewinnung bei der Abwasserreinigung - Entwicklung eines Verfahrens zur Integration in kommunale Kläranlagen. *Dissertation.* [Online] 02. 2008. [Zitat vom: 06. 02. 2015.] http://darwin.bth.rwth-aachen.de/opus3/volltexte/2008/2298/pdf/Montag_David.pdf.

Naturenergie Heidenrod GmbH. 2015. Energie-Technik. *Biomasse.* [Online] 2015. [Zitat vom: 16. 02. 2015.] <http://www.naturenergie-heidenrod.de/energie-technik/biomasse/>.

Obernberger, Ingwald. 1997. Aschen aus Biomassefeuerungen - Zusammensetzung und Verwertung. *VDI Bericht 1319, pp. 199-222, "Thermische Biomassenutzung - Technik und Realisierung".* [Online] 1997. [Zitat vom: 06. 03. 2015.] <http://www.bios-bioenergy.at/uploads/media/Paper-Obernberger-BiomasseaschenVerwertung-1997-05-20.pdf>.

Obernberger, Ingwald, Pölt, Peter und Panholzer, Franz. 1995. Charakterisierung von Holzaschen aus Biomassefernheizwerken. *II: Auftretende Verunreinigungen, Schütt- und Teilchendichten, Korngrößen und Oberflächenbeschaffenheit der einzelnen Aschefraktionen.* [Online] 1995. [Zitat vom: 23. 02. 2015.] http://download.springer.com/static/pdf/280/art%253A10.1007%252FBFB02938736.pdf?auth66=1423575695_67371a9ccc5938abb84093b413ff3492&ext=.pdf.

Pinnekamp, J., [Hrsg.]. 2014. 27. *Aachener Kolloquium Abfallwirtschaft 2014: Phosphor - nachhaltiger Umgang mit einem kritischen Rohstoff.* Aachen : Gesellschaft zur Förderung der Siedlungswasserwirtschaft an der RWTH Aachen e.V., 2014. Bd. 40.

Pinnekamp, J., et al. 2013. Stand und Perspektiven der Phosphorrückgewinnung aus Abwasser und Klärschlamm. *Sonderdruck aus KA - Korrespondenz Abwasser, Abfall.* 60. Jahrgang, 2013, Heft 10 und 11.

Quaschnig, Volker. 2011. Erneuerbare-energien-und-Klimaschutz.de, volker-quaschnig.de. *Vergütung für Strom aus Photovoltaikanlagen nach dem Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG).* [Online] 10. 2011. [Zitat vom: 12. 03. 2015.] www.volker-quaschnig.de/datserv/EEG-PV/index.php.

—. **2011.** *Regenerative Energiesysteme: Technologie - Berechnung - Simulation.* 7. Auflage. München : Hanser Verlag, 2011.

Sabo, Franjo. 2011. *Abluftreinigung - Manuskript zur Vorlesung.* 2011.

Schaum, Christian und Cornel, Peter. 2012. Klärschlamm: Phosphorressource der Zukunft? *Vortrag auf dem BWK-Bundeskongress 2012.* [Online] 20.-22. 09. 2012. [Zitat vom: 06. 03. 2015.] <http://www.bwk-bund.de/fileadmin/Dokumente/Veranstaltungen/Kongresse/2012/BWK-FF-1-Schaum-Kl%E4rschlamm.pdf>.

Schmitt, Bernhard. 2012. Struktur- und Genehmigungsdirektion Nord. *Rheinland-Pfalz.* [Online] 28. 02. 2012. [Zitat vom: 27. 02. 2015.] [http://www.dlr.rlp.de/internet/global/themen.nsf/28fd0aad703279efc12570050048c399/1e66a4cd5cccc0d9c12579bc003de8fb/\\$FILE/Miscantus_Feuerung_Schmitt.pdf](http://www.dlr.rlp.de/internet/global/themen.nsf/28fd0aad703279efc12570050048c399/1e66a4cd5cccc0d9c12579bc003de8fb/$FILE/Miscantus_Feuerung_Schmitt.pdf).

Schneichel, Hans-Walter. 2015. *Telefonat.* 10. 02. 2015.

Stadtwerke Düsseldorf AG. 2010. Beteiligungsbericht. [Online] 2010. [Zitat vom: 16. 02. 2015.] http://www.duesseldorf.de/finanzen/beteiligungsberichte/2010_pdf/beteiligungen/stw.pdf.

Stadtwerke Gießen AG. Dipl.-Ing. Reinhard Paul. *Fernwärme mit Holz.* [Online] [Zitat vom: 16. 02. 2015.] https://www.giessen.de/PDF/Heizen_mit_Holz_2_09_Fernw%C3%A4rme_mit_Holz_Vortragsdokument.PDF?ObjSvrID=684&ObjID=5199&ObjLa=1&Ext=PDF&WTR=1&_ts=1301584718.

Weiland, P. 2008. Biogas in Deutschland und die wichtigsten Neuregelungen im EEG. [Online] 11. 11. 2008. [Zitat vom: 12. 03. 2015.] www.nlt.de/pics/1_1226670573/VTWeiland.vTI.pdf.

Witzenhausen-Institut GmbH; Pöyry Environment GmbH. 2010. Biomassepotenzialstudie Hessen - Stand und Perspektiven der energetischen Biomassenutzung in Hessen. *Bericht und Materialband.* [Online] 2010. [Zitat vom: 11. 03. 2015.] https://umweltministerium.hessen.de/sites/default/files/media/hmuelv/kurzbericht_biomassepotenzialstudie.pdf.

Anhang

A Fragebogen für Biomasseverbrennungsanlagen

Fragebogen für Biomasseverbrennungsanlagen

Sollten mehrere Anlagen **in Hessen** vorhanden sein, geben Sie bitte die Daten für alle Anlagen an.

Bei Rückfragen:

E-Mail: celine.tiemann@hlug.hessen.de

1. Allgemein

Geben Sie bitte allgemeine Daten der Anlage an.

Name der Anlage	
Adresse der Anlage	
Ansprechpartner	
E-Mail/Telefon	
Betreiber der Anlage	
Betriebsaufnahme	

2. Brennstoff

Bitte beschreiben Sie den verwendeten Brennstoff/die verwendeten Brennstoffe so detailliert wie möglich.

Input der Anlage <ul style="list-style-type: none"> • Stoffliche Beschreibung • Abfallschlüssel nach AVV 	
Altholz welcher Kategorien nach AltholzV wird eingesetzt?	
Herkunft der Brennstoffe (z.B. eigene Produktion, Aufbereiter, Landschaftspflegematerial etc.)	
Durchsatz der Biomasse [t/a]	
Welche Maßnahmen zur Qualitätssicherung werden ergriffen? (z.B. Gütesiegel, Zertifikat, Sicherstellung der Altholzkategorien etc.)	

3. Technische Daten

Bitte geben Sie einen Überblick über die technischen Daten der Anlage.

Feuerungsleistung [MW]	
Art der Feuerung (z.B. ORC, Wirbelschicht, Rostart etc.)	
Elektrische Leistung [MW]	

Thermische Leistung [MW]	
Erzeugter Strom [kWh/a]	
Erzeugte Wärme [kWh/a]	

4. Asche

Durchschnittlicher Anfall an Rostasche [t/a]	
AVV der Rostasche	
Welche Entsorgungswege werden für die Rostasche genutzt? <ul style="list-style-type: none"> • Verwertung (Landbau, Landwirtschaft etc.) • Beseitigung (Deponie, Bergeversatz etc.) • Aufbereitung (Entsorger, Aufbereiter etc.) 	
Durchschnittliche Menge an Flugasche [t/a]	
AVV der Flugasche	
Welche Entsorgungswege werden für die Flugasche genutzt?	

Wurde die Asche bereits auf ihre Inhaltsstoffe analysiert?

Ja

Nein

➤ **Wenn ja**, wurden pflanzliche Nährstoffe bestimmt?

- Wie hoch ist der Phosphorgehalt der Asche?

5. Phosphorrückgewinnung

Gibt es bereits Ansätze zur Phosphorrückgewinnung aus der Asche?

Ja

Nein

- **Wenn ja**, welche?

Bestehen bereits Pläne, die eine Rückgewinnung von Phosphor aus der Asche betreffen?

Ja

Nein

- **Wenn ja**, welche?

Wissen sie von anderen Betrieben, die P-Rückgewinnung betreiben?

Name und Adresse des Betriebs	
-------------------------------	--

Vielen Dank für Ihre Mithilfe!

B Ergebnisse der Phosphorbestimmung

Der Phosphorgehalt der Proben in % der Trockensubstanz wird aus dem photometrischen Messergebnis mit Hilfe der Formel für den Massenanteil ω und der Formel für die Massenkonzentration β berechnet (Erbrecht, et al., 2007).

$$\omega = \frac{m(\text{Stoff})}{m(\text{Stoffgemisch})}$$

m: Masse

V: Volumen

$$\beta = \frac{m(\text{Stoff})}{V(\text{Lösung})}$$

Stellt man nun die Formel der Massenkonzentration nach $m(\text{Stoff})$ um und setzt diese in die Formel des Massenanteils ω ein, so ergibt sich:

$$\omega [\%] = \frac{\beta * V(\text{Lösung})}{m(\text{Stoffgemisch})} * 100$$

Das Volumen der Lösung beträgt bei allen Bestimmungen 100 ml. Die Massenkonzentration β ist das photometrische Messergebnis in mg/l, die Einwaage der Probe entspricht $m(\text{Stoffgemisch})$. Um den Phosphoranteil in Prozent zu erhalten, ist das Ergebnis noch mit 100 zu multiplizieren.

In den nachfolgenden Tabellen sind die Messergebnisse, die Berechnungsgrundlagen und die Ergebnisse der Berechnung aufgeführt. Folgende Angaben sind den Tabellen zu entnehmen:

- Asche: Untersuchte Asche
- Probe: Untersuchte Teilprobe
- Fraktion: Untersuchte Korngröße
- Probenvorbereitung: Bearbeitung der Teilprobe
- Datum: Untersuchungsdatum
- SOLL-Einwaage: Einzuwiegende Masse
- IST-Einwaage: Tatsächlich eingewogene Masse
- Säuremenge: Vor Hydrolyse zugegebene Menge Schwefelsäure

- Volumen: Definiertes Bezugsvolumen nach Hydrolyse
- Zentrifuge: Probe zentrifugiert ja/nein?
- Bestimmung: Bestimmungshäufigkeit der Teilproben
- Kurzbezeichnung: Enthält Asche, Fraktion und Probenvorbereitung
[s = 2,2 mm gesiebt, m = gemörsert, z= zentrifugiert],
SOLL-Einwaage und Bestimmung
- Extinktion: Photometrisch gemessene Konzentration
- P-Anteil: Berechneter P-Anteil in % und mg P/g Asche

Tabelle 14: Hausfeuerung – Übersicht der Daten und Messergebnisse

	Einheit		
Asche	-	H	
Probe	-	1	
Fraktion	mm	2,2	
Probenvorbereitung	-	-	
Datum	-	17.03.2015	
SOLL-Einwaage	mg	250	
IST-Einwaage	mg	253	250
Säuremenge	ml	4	
Volumen	l	0,1	
Zentrifuge	-	Nein	
Bestimmung	-	1	2
Kurzbezeichnung	-	H s250 1	H s250 2
Extinktion	mg/l	51,8	53,4
P-Anteil	%	2,04743083	2,136
	mg/g	20,4743083	21,36

Tabelle 15: BMHKW B - Übersicht der Daten und Messergebnisse

	Einheit							
Asche	-	B						
Probe	-	1			2			
Fraktion	mm	2,2			2,2			
Probenvorbereitung	-	-			gemörsert			
Datum	-	17.03.2015		18.03.2015		19.03.2015	20.03.2015	
SOLL-Einwaage	mg	250		500		500	250	
IST-Einwaage	mg	258	256	501,6	512,8	507,01	257,3	257,4
Säuremenge	ml	3		4		4	4	
Volumen	l	0,1		0,1		0,1	0,1	
Zentrifuge	-	Nein		Nein		Nein	Nein	
Bestimmung	-	1	2	1	2	3	4	5
Kurzbezeichnung	-	B s250 1	B s250 2	B sm500 1	B sm500 2	B sm500 3	B sm250 4	B sm250 5
Extinktion	mg/l	1,42	2,56	0,208	0,179	0,05	0,813	1,54
P-Anteil	%	0,055	0,100	0,004	0,003	0,001	0,032	0,060
	mg/g	0,550	1,000	0,041	0,035	0,010	0,316	0,598
	Einheit							
Asche	-	B						
Probe	-	3						
Fraktion	mm	Gemischt						
Probenvorbereitung	-	gemörsert, gesiebt 2,2, gemörsert						
Datum	-	19.03.2015			20.03.2015			
SOLL-Einwaage	mg	500		250		500		
IST-Einwaage	mg	500,37	504,87	262,5	256,8	Externe Berechnung		
Säuremenge	ml	4		4		1,6		
Volumen	l	0,1		0,1		-	-	
Zentrifuge	-	Nein		Nein		Nein	Ja	
Bestimmung	-	1	2	3	4	5	6	
Kurzbezeichnung	-	B msm500 1	B msm500 2	B msm250 3	B msm250 4	B msm500 5	B msm500z 6	
Extinktion	mg/l	0,057	0,05	0,799	1,19	0,354	0,076	
P-Anteil	%	0,001	0,001	0,030	0,046	Externe Berechnung		
	mg/g	0,011	0,010	0,304	0,463			

Tabelle 16: Massenbezogene Berechnung der Proben „B msm500 5“ und „B msm500z 6“

Einwaagen		Berechnung		
Einwaage Asche	501,12 mg		Vgl.	Zentri
EMK leer:	63,618 g	Masse nach Hydrolyse:	41,822	41,822 g
EMK mit Asche:	64,121 g	Masse Entnahme:	8,429	8,237 g
EMK nach Hydrolyse:	105,44 g	Masse nach NaOH:	9,844	9,826 g
EMK nach Entnahmen:	85,65 g	Gefundene c:	0,354	0,076 mg/l
		c nach Hydrolyse:	0,41343	0,09066 mg/l
BG Zentri:	46,201 g	Masse P:	0,01729	0,00379 mg
Zentri in BG:	8,237 g	ω (P):	0,000035	0,000008 %
BG mit Zentri:	54,413 g		0,03450	0,00757 mg/g
BG Zentri + NAOH:	56,027 g			
BG Vgl:	49,364 g			
Vgl in BG:	8,429 g			
BG mit Vgl:	57,694 g			
BG mit Vgl und NaOH:	59,208 g			

Tabelle 17: BMKW C – Übersicht der Daten und Messergebnisse

	Einheit							
Asche	-	C						
Probe	-	1			2			
Fraktion	mm	2,2			2,2			
Probenvorbereitung	-	-			gemörsert			
Datum	-	17.03.2015		18.03.2015		19.03.2015	20.03.2015	
SOLL-Einwaage	mg	250		500		500	250	
IST-Einwaage	mg	267	249	496,4	503,3	499,69	256,1	248,5
Säuremenge	ml	2		4		4	4	
Volumen	l	0,1		0,1		0,1	0,1	
Zentrifuge	-	Nein		Nein		Nein	Nein	
Bestimmung	-	1	2	1	2	3	4	5
Kurzbezeichnung	-	C s250 1	C s250 2	C sm500 1	C sm500 2	C sm500 3	C sm250 4	C sm250 5
Extinktion	mg/l	0,354	0,895	13,8	13,6	0,089	6,36	7,28
P-Anteil	%	0,013	0,036	0,278	0,270	0,002	0,248	0,293
	mg/g	0,133	0,359	2,780	2,702	0,018	2,483	2,930
	Einheit							
Asche	-	3						
Probe	-	3						
Fraktion	mm	Gemischt						
Probenvorbereitung	-	gemörsert, gesiebt 2,2, gemörsert						
Datum	-	19.03.2015			20.03.2015			
SOLL-Einwaage	mg	500		250		500		
IST-Einwaage	mg	503,76	509,91	257,62	251,2	Externe Berechnung		
Säuremenge	ml	4		4		1,6		
Volumen	l	0,1		0,1		-	-	
Zentrifuge	-	Nein		Nein		Nein	Ja	
Bestimmung	-	1	2	3	4	5	6	
Kurzbezeichnung	-	C msm500 1	C msm500 2	C msm250 3	C msm250 4	C msm500 5	C msm500z 6	
Extinktion	mg/l	0,963	3,34	8,02	7,24	15,2	17	
P-Anteil	%	0,019	0,066	0,311	0,288	Externe Berechnung		
	mg/g	0,191	0,655	3,113	2,882			

Tabelle 18: Massenbezogene Berechnung der Proben „C msm500 5“ und „C msm500z 6“

Einwaagen		Berechnung	
Einwaage Asche	500,3 mg		Vgl. Zentri
EMK leer:	64,273 g	Masse nach Hydrolyse:	43,187 43,187 g
EMK mit Asche:	64,771 g	Masse Entnahme:	8,327 8,131 g
EMK nach Hydrolyse:	107,46 g	Masse nach NaOH:	9,751 9,718 g
EMK nach Entnahmen:	88,468 g	Gefundene c:	15,2 17 mg/l
		c nach Hydrolyse:	17,80 20,32 mg/l
BG Zentri:	49,082 g	Masse P:	0,7687 0,8775 mg
Zentri in BG:	8,131 g	ω (P):	0,0015 0,0018 %
BG mit Zentri:	57,186 g		1,5365 1,7539 mg/g
BG Zentri + NaOH:	58,8 g		
BG Vgl:	47,933 g		
Vgl in BG:	8,327 g		
BG mit Vgl:	56,171 g		
BG mit Vgl und NaOH:	57,684 g		