

Entsorgung Holzasche

Holzasche heute – Eigenschaften und Entsorgung



Verfasser

Thomas Pohl

Verantwortlich

Prof. Dr. Rainer Bunge

Institut für Umwelt- und Verfahrenstechnik
Oberseestrasse 10, 8640 Rapperswil
Tel: 055 222 48 60

Datum: 8. November 2017

Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU)
z.Hd. der Begleitgruppe zur Vollzugshilfe Entsorgung Holzasche

Zusammenfassung

Der vorliegende Bericht wurde vom Bundesamt für Umwelt BAFU zur Unterstützung der „Begleitgruppe zur Vollzugshilfe Entsorgung Holzasche“ in Auftrag gegeben. Ziel des Berichts ist eine Zusammenfassung und übersichtliche Darstellung der Kernaussagen der Unterlagen, die den Autoren von dieser Begleitgruppe zur Verfügung gestellt wurden.

Die Nutzung von Biomasse zur Energieerzeugung ist wohl die älteste vom Menschen verwendete Energieform. Bis ins 19. Jahrhundert waren Holzbrennstoffe der Hauptlieferant für Wärme in Form von Holzfeuer. Aufgrund des geringeren Heizwertes und des damit verbundenen höheren Aufwandes wurden die Holzbrennstoffe in der Phase der Industrialisierung durch fossile Energieträger verdrängt. Durch die zunehmende Relevanz klimaschädlicher Emissionen in der öffentlichen Diskussion gewann die Nutzung von Holzbrennstoffen zur Wärme- und Stromerzeugung in den letzten Jahren jedoch wieder an Bedeutung [1]. Verholzte biogene Festbrennstoffe werden entsprechend ihrer Herkunft in Holzkategorien unterteilt. Es wird zwischen naturbelassenem Holz (Waldholz), Restholz (unbehandelte Reste, z.B. aus Sägereien und Schreinereien) und Altholz (z.B. Möbel und Baustellenabfälle) unterschieden. Im Jahr 2015 wurden gemäss Holzenergiestatistik Schweiz [2] rund 4.92 Mio. m³ Energieholz genutzt. Gemäss Holzenergie Schweiz fielen im selben Jahr rund 72'000 t Holzasche an [3].

Für die Entsorgung von Holzasche gibt es zwei grundsätzliche Wege, die Deponierung oder die Verwertung. Denn Holzaschen sind einerseits Abfall, insbesondere wegen der darin enthaltenen Schwermetalle. Die im Holz nur in sehr niedriger Konzentration vorliegenden Schwermetalle sind in der Asche stark angereichert und liegen z.T. in leicht wasserlöslichen chemischen Verbindungen vor. Zusätzlich entstehen bei der Verbrennung neue Schadstoffe, die ebenfalls in der Asche angereichert werden, z.B. das aus dem im Wesentlichen unschädlichen Chrom(III) im Zuge der Verbrennung entstehende sehr schädliche Chrom(VI). Andererseits enthält die Holzasche Wertstoffe und weist gute hydraulische Abbindeigenschaften auf, weshalb punkto Verwertung zahlreiche Ideen bestehen, z.B. als Baustoff („Ragazer Erdbeton“, Zementzuschlagstoff), Flussmittel zur Herstellung von Schmelzen, als Winterstreuungsmittel oder zur Bodenverbesserung.

Gemäss TVA durfte Holzasche noch in Inertstoffdeponien verbracht werden. Mit Einführung der VVEA ist dieser Weg jedoch nicht mehr möglich. Dies bewirkte bei verschiedenen Interessenträgern eine gewisse Verunsicherung. Es soll nun eine Übergangsfrist geschaffen werden, in der die Ablagerung von Holzaschen auf Deponien B (vergleichbar mit der früheren Inertstoffdeponie) und E durch das BAFU toleriert wird. Längerfristig soll die Ablagerung auf Deponien D ermöglicht werden, was allerdings eine Gesetzesänderung erfordert. Das BAFU geht davon aus, dass die dort abgelagerten KVA-Schlacken hinreichend viel Eisen(II) enthalten, um eine Reduktion des aus Holzasche eingetragenen Chromats zu gewährleisten.

Ziel des vorliegenden Berichts ist die Zusammenfassung und Auswertung einer grösseren Anzahl von Literaturquellen, welche die Holzascheproblematik – mit Fokus auf die Schweiz – beleuchten.



Inhalt

Zusammenfassung.....	i
1 Ausgangslage.....	1
2 Grundlagen.....	2
2.1 Zahlen und Fakten.....	2
2.2 Gesetzliche Regelung.....	7
3 Entsorgungswege heute.....	11
4 Problematik Entsorgung Holzasche	13
4.1 Schwermetall- und TOC-Gehalt	13
4.2 Staubbildung und Handling	13
4.3 Kantonal unterschiedliche Handhabung.....	13
4.4 Stand der Technik.....	13
5 Lösungsansätze	15
5.1 Schwermetall- und TOC-Gehalt	15
5.2 Staubbildung und Handling	16
5.3 Alternative Entsorgungs- und Nutzungsmöglichkeiten	16
6 Fazit	22
7 Literatur.....	23
8 Abbildungen	26
9 Tabellen	27
10 Anhang	28
10.1 Definition Holzbrennstoffe LRV	28
10.2 Feuerungssysteme	28
10.3 Brennstoffes angepasst. Automatische Holzfeuerungen >50 kW	31
10.4 Einfluss Elementgehalt des Festbrennstoffs	32



**Begriffe und Abkürzungen****Legende aller verwendeten Begriffe und Abkürzungen, z.B.**

VVEA	Verordnung über die Vermeidung und die Entsorgung von Abfällen
Naturbelassenes Holz	Auch Frischholz genannt → Waldholz mit anhaftender Rinde, bspw. in Form von Scheiter, Reisig, Zapfen und Hackschnitzel, sowie Schwarten, Spreissel, Sägemehl aus Sägereien und bindemittelfreie Holzbriketts (LRV, Anhang 5 Ziffer 31)
Frischholz	Auch naturbelassenes Holz genannt, siehe Definition oben.
Restholz	Holz aus der Holzverarbeitenden Industrie und dem Holzverarbeitenden Gewerbe, soweit das Holz nicht druckimprägniert oder halogenorganisch beschichtet ist.
Altholz	Definition gemäss Luftreinhalteverordnung (LRV) Ziffer 31)2) a: Altholz aus Gebäudeabbrüchen, Umbauten oder Renovation, Restholz von Baustellen, Altholz aus Verpackungen einschliesslich Paletten und alte Holzmöbel, sowie Gemische davon mit Holzbrennstoffen nach Absatz 1.
Aschengemische	Gemische aus Rost-, Bett-, Zyklon- und Flugasche
Grobasche	Umfasst sowohl Rost- als auch Bettasche. Rostasche fällt im Rost einer Feuerungsanlage an. Bettasche fällt im Wirbelbett einer Wirbelschichtfeuerung oder Wurfgeschwebefeuerung an.
Feinasche	Asche, die in den Rauchgasen mitgeführt wird und im Zykonabscheider anfällt. Wird auch Zyklonasche genannt.
Feinstasche	Aschen, die in Elektro- oder Gewebefiltern oder als Kondensatschlamm in Rauchgaskondensationsanlagen anfallen, auch Filter- oder Feinstflugasche genannt.
HHKW	Holzheizkraftwerk
KVA	Kehrichtverbrennungsanlage
NE	Nichteisen-Metalle: Aluminium, Kupfer, Zink und Stainless-Steel
FE	Eisenmetalle

1 Ausgangslage

Der vorliegende Bericht wurde vom Bundesamt für Umwelt BAFU zur Unterstützung der „Begleitgruppe zur Vollzugshilfe Entsorgung Holzasche“ in Auftrag gegeben. Ziel des Berichts ist eine Zusammenfassung und übersichtliche Darstellung der Kernaussagen der Unterlagen, die den Autoren von dieser Begleitgruppe zur Verfügung gestellt wurden.

Im Rahmen der Energiewende soll der Ausbau der Kapazität an Biomassefeuerungen gefördert werden. Allerdings entsteht bei der Verbrennung eine geringe Menge Rückstand, die Holzasche.

Einerseits ist diese Asche als Abfall zu deklarieren, insbesondere wegen der darin enthaltenen Schwermetalle. Die im Holz nur in sehr niedriger Konzentration vorliegenden Schwermetalle sind in der Asche stark angereichert und liegen z.T. in leicht wasserlöslichen chemischen Verbindungen vor. Zusätzlich entstehen bei der Verbrennung neue Schadstoffe, die ebenfalls in der Asche angereichert werden, z.B. das aus dem im Wesentlichen unschädlichen Chrom(III) im Zuge der Verbrennung entstehende Chrom(VI).

Andererseits enthält die Holzasche Wertstoffe wie z.B. Kalium, Calcium und Phosphor. Ausserdem besteht die Möglichkeit die Asche aufgrund ihrer hydraulischen Abbindeigenschaften als gebundenen Baustoff zu verwerten.

Mit Einführung der VVEA ist die kostengünstige Ablagerung der Holzasche auf Inerstoffdeponien (Deponietyp B in der VVEA) jedoch nicht mehr möglich. Dies bewirkte bei verschiedenen Interessenträgern eine gewisse Unsicherheit und führte zu Diskussionen. Das BAFU möchte daher die relevanten Informationen zum Thema in einem kurzen Bericht zusammenfassen lassen.

Insbesondere soll der Fokus auf folgende Aspekte gelegt werden:

- Wissen und Information zur Holzascheentsorgung in der Schweiz zusammentragen mit Blick ins benachbarte Ausland
- Zusammentragen von chemischen und physikalischen Eigenschaften von Holzaschen
- Entsorgungswege inkl. Behandlungsarten der Holzasche in der Praxis aufzeigen
- Alternative Entsorgungs- und Verwertungsmöglichkeiten aufzeigen und beurteilen

2 Grundlagen

2.1 Zahlen und Fakten

Die Nutzung von Biomasse zur Energieerzeugung ist wohl die älteste, vom Menschen verwendete Energieform. Bis ins 19. Jahrhundert waren Holzbrennstoffe der Hauptlieferant für Wärme in Form von Holzfeuer. Aufgrund des geringeren Heizwertes und des damit verbundenen höheren Aufwandes wurden die Holzbrennstoffe in der Phase der Industrialisierung durch fossile Energieträger verdrängt. Durch die zunehmende Relevanz klimaschädlicher Emissionen in der öffentlichen Diskussion, gewann die Nutzung von Holzbrennstoffen zur Wärme- und Stromerzeugung in den letzten Jahren jedoch wieder an Bedeutung [1].

Verholzte biogene Festbrennstoffe werden entsprechend ihrer Herkunft in Holzkategorien unterteilt, siehe Abb. 2-1. Die dazugehörige gesetzliche Definition findet sich in der Schweizer Luftreinhalteverordnung (LRV). In der LRV wird zwischen Holz- und Nicht-Holzbrennstoffen unterschieden, wobei naturbelassenes Holz sowie Restholz als Holzbrennstoffe, Altholz und problematische Holzabfälle als Nicht-Holzbrennstoffe gelten (siehe dazu auch Abb. 10-1 im Anhang).

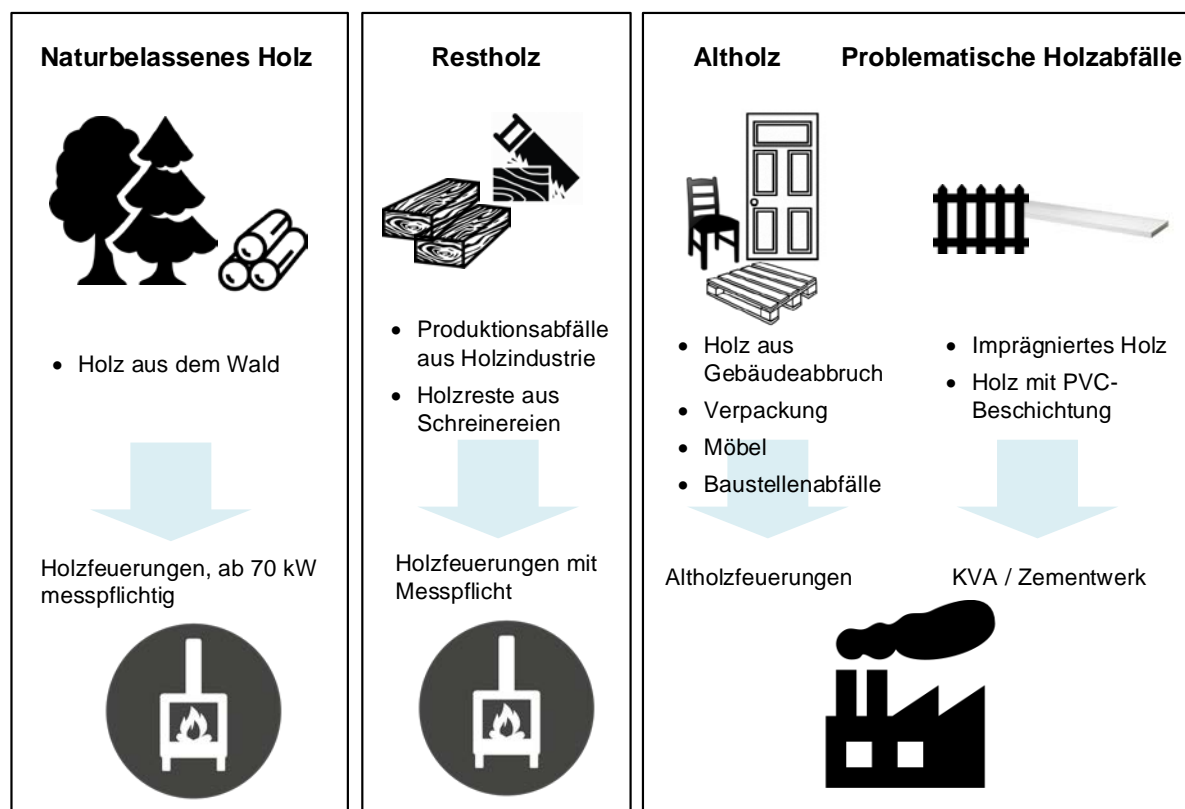


Abb. 2-1: Klassifikation Holz- / Nicht-Holzbrennstoffe gemäss der gesetzlichen Grundlage der Luftreinhalteverordnung.

Gemäss Holzenergiestatistik vom Bundesamt für Energie (BFE) wurden im Jahr 2015 insgesamt 4.92 Mio. m³ Holz energetisch genutzt (Waldholz) resp. thermisch verwertet (Alt- und Restholz), siehe Abb. 2-2. Rund die Hälfte des im Jahr 2015 verbrannten Holzes stammt aus naturbelassenem Waldholz. Die andere Hälfte setzt sich aus Rest- und Altholz zusammen. 47% des Altholzes wurden in einer Altholzfeuerungsanlage, 42% in einer KVA und 11% in einem Zementwerk thermisch verwertet.

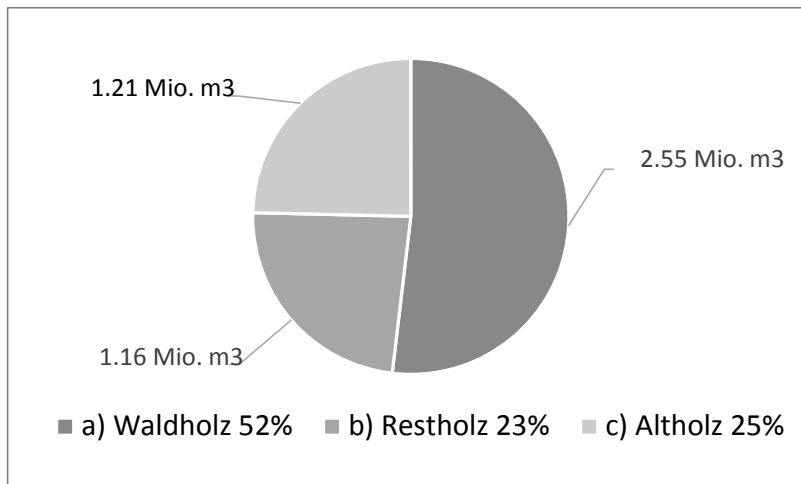


Abb. 2-2: Energetisch genutzte und thermisch verwertete Holzmengen im Jahr 2015. Rund die Hälfte des verbrannten Holzes bestand aus naturbelassenem Waldholz. Die andere Hälfte setzt sich beinahe hälftig aus Rest- und Altholz zusammen [2] [4].



Abb. 2-3: a) Naturbelassenes Waldholz, b) Restholz und c) Altholz (Abbildungen aus [1])

Die in Abb. 2-2 erwähnten Holzmengen werden mittels unterschiedlicher Feuerungstechnik energetisch genutzt resp. thermisch verwertet. Abb. 2-4 stellt eine Übersicht der Feuerungstechnik dar. Tab. 2-1 zeigt den je Feuerungstechnik typischen Leistungsbereich auf. Holzfeuerungsanlagen werden gemäss Leistung in drei Klassen eingeteilt [5]:

- Kleinere Anlage: <70 kW
- Mittlere Anlage: 70-500 kW
- Grössere Anlage: >500 kW

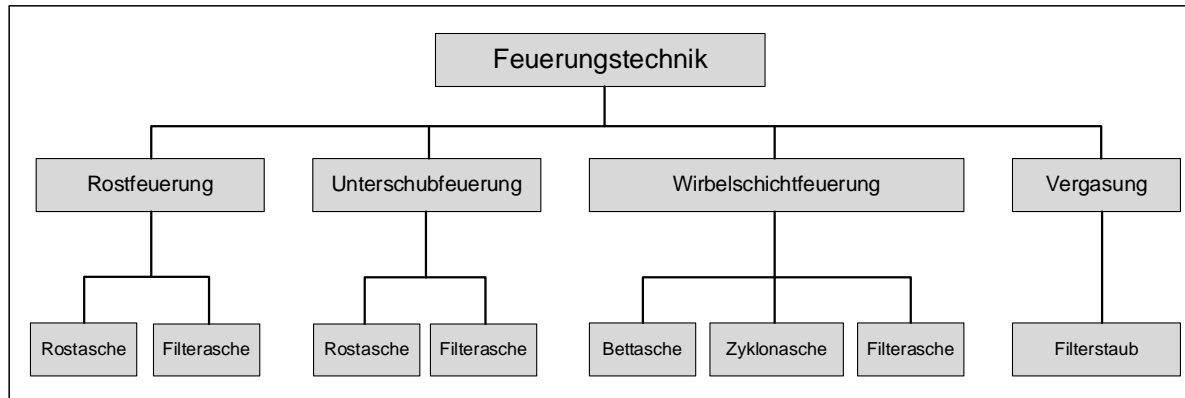


Abb. 2-4: Übersicht der verschiedenen Feuerungssystemen und verschiedenen Aschefraktionen [1]. Eine detaillierte Beschreibung der jeweiligen Feuerungstechnik befindet sich im Anhang des Berichts, siehe Kap.10.2.

Tab. 2-1: Typische Leistungsbereiche der oben genannten Feuerungstechniken

Typ	Typischer Leistungsbereich
Rostfeuerung	10 kW – 50 MW
Unterschubfeuerung	100 kW – 20 MW
Wirbelschichtfeuerung	5 MW – 100 MW

Im Jahr 2015 wurden gemäss Holzenergiestatistik Schweiz [2] rund 4.92 Mio. m³ Holz in Feuerungsanlagen verbrannt. Gemäss Holzenergie Schweiz fielen in demselben Jahr rund 72'000 t Holzasche an [3]. Der Ascheanteil variiert jedoch stark je nach Art des Holzes, das verbrannt wird:

- Sauberes und naturbelassenes Holz verursacht weniger Ascheanfall
- Wenn viel Rinde verbrannt wird, ist der Ascheanfall höher
- Für Altholz kann der Ascheanfall höher sein

Schlussendlich ist der Elementgehalt des Festbrennstoffes entscheidend für die Aschebildung. Der Einfluss einzelner chemischer Elemente auf die Verbrennung ist im Anhang in Tab. 10-1 aufgeführt. Die stoffliche Zusammensetzung resp. der Schadstoffgehalt ist neben der Qualität des Brennstoffes vom Verbrennungsprozess, der Feuerungskonstruktion und der Abscheidetemperatur abhängig [1].

Abb. 2-5 zeigt den Ascheanfall des Jahres 2015 aufgegliedert nach Anlagenkategorie gemäss Schweizer Holzenergiestatistik. Man sieht, dass gut die Hälfte des jährlichen Ascheanfalls von grösseren, automatischen Feuerungen stammt. In Abb. 2-6 ist der jährliche Ascheanfall von automatischen Feuerungsanlagen >50 kW nach Aschekategorie aufgeteilt. Die aufgeführte

Menge von rund 52'000 t/a entspricht der Summe der Anlagenkategorie „Automatische Feuerung“ und „Spezialfeuerung“ aus Abb. 2-5.

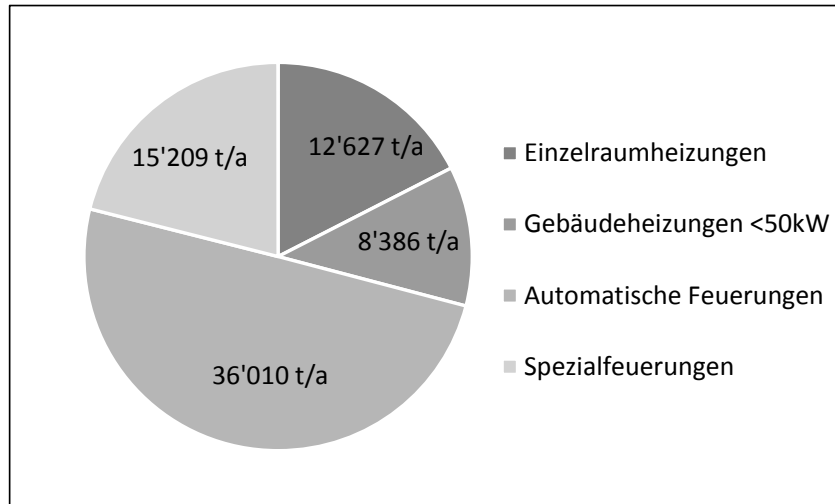


Abb. 2-5: Jährlicher Ascheanfall gegliedert in Anlagenkategorien gemäss Schweizer Holzenergiestatistik [2] [6].

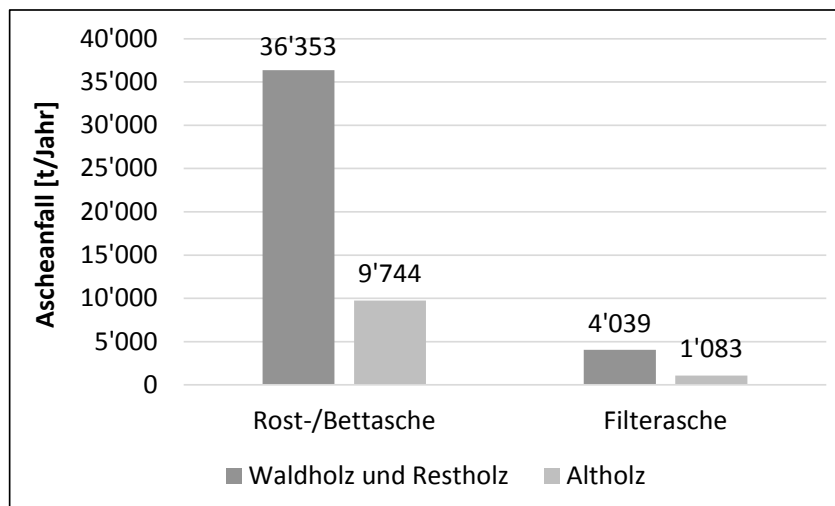


Abb. 2-6: Jährlicher Ascheanfall von automatischen Feuerungen >50kW nach Aschekategorie [6].

Typischerweise fällt als Output einer Holzfeuerung 1-5 Gew.-% des Holzinputs als Holzasche an (stark abhängig von der Holzart). Gemäss einschlägiger Fachliteratur kann mit einem mittleren Ascheanfall von 2 Gew.-% gerechnet werden [7] [8] [9] [10]. Abb. 2-7 zeigt eine schematische Darstellung der verschiedenen Aschearten und deren Entstehungsort im System. Geht man von den 72'000 t Holzasche/a aus, macht das 40'000 – 65'000 t/a Grobasche (Rost-

und Bettasche), 7'000 – 25'000 t/a Feinasche (Zyklonasche) und 1'000 – 7'000 t/a Feinstasche (Filterasche). Dies deckt sich sehr schön mit den Zahlen von Holzenergie Schweiz aus Abb. 2-5 und Abb. 2-6.

Folgendes Beispiel verleiht ein besseres Verständnis über den Ascheoutput einer Holzfeuerungsanlage:

Ausgangslage: Mehrfamilienhaus mit einer 50 kW Holzfeuerung, die 1'200 Betriebsstunden pro Jahr aufweist.

- $50 \text{ kW} \times 1'200 \text{ h} = 60'000 \text{ kWh}$
- Mittlerer Heizwert von Holz (bei 20% Feuchte) $\rightarrow 4.2 \text{ kWh/kg}$
- Holzverbrauch $\rightarrow 60'000 \text{ kWh}$ dividiert durch $4.2 \text{ kWh/kg} = 12 \text{ Tonnen Holz}$
- 2 Gew.-% Ascheanfall \rightarrow rund 240 kg Asche/a¹ (Ca. 15 60L-Kehrriechsäcke pro Jahr)

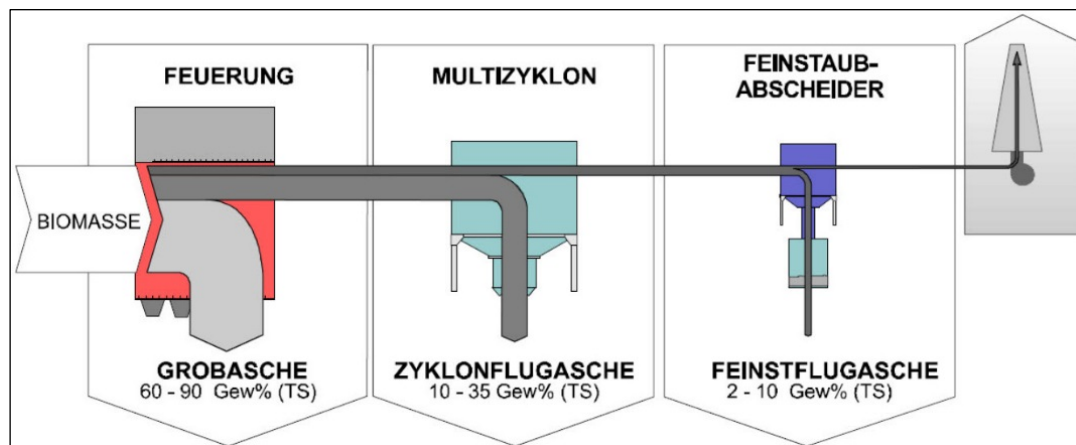


Abb. 2-7: Schematische Darstellung der verschiedenen Aschenarten und deren Entstehungsort im System [11].

¹ Man könnte es auch folgendermassen rechnen: Holzverbrauch für eine 50 kW Pellet-Heizung gemäss BFE Holzenergiestatistik 2015 [2]: $20 \text{ m}^3/\text{a}$ mit einer Dichte von $0.6 \text{ t/m}^3 \rightarrow 12 \text{ t/a}$ und 2 Gew.-% Asche = 240 kg/a

2.2 Gesetzliche Regelung

Seit dem 1. Januar 2016 ist die VVEA [12] in Kraft und hat die alten Regelungen der TVA [13] abgelöst. Der grösste Unterschied zur TVA sind die neu definierten Deponietypen. Folgende Deponietypen sind in der VVEA beschrieben:

- Typ A für Abfälle gemäss Anhang 5 Ziffer 1
- Typ B für Abfälle gemäss Anhang 5 Ziffer 2
- Typ C für Abfälle gemäss Anhang 5 Ziffer 3
- Typ D für Abfälle gemäss Anhang 5 Ziffer 4
- Typ E für Abfälle gemäss Anhang 5 Ziffer 5

Werden die alten Deponietypen der TVA mit den neuen Deponietypen der VVEA verglichen, so entspricht im Wesentlichen die Inertstoffdeponie dem Typ B, die Reststoffdeponie dem Typ C, das Schlackenkompartiment der Reaktordeponie dem Typ D und die Reaktordeponie dem Typ E. Eine wichtige Änderung in der VVEA im Vergleich zur TVA ist folgende: Gemäss TVA durfte Holzasche noch in Inertstoffdeponien verbracht werden. Im Anhang 1 war geregelt, welche Abfälle auf den entsprechenden Deponietypen abgelagert werden durften. Für die Holzaschen bedeutete dies, dass Bett- und Rostaschen aus der Verbrennung von naturbelassenem Holz aus Sägereien auf Inertstoffdeponien abgelagert werden durften, wenn der Anteil höchstens 5 Gewichtsprozente an der jährlich abgelagerten Menge an Abfällen auf der Inertstoffdeponie ausmachte (TVA Anhang 1 Ziffer 11). Dies wurde so interpretiert, dass Bett- und Rostaschen von naturbelassenem Holz ohne Analyse (Positivliste) auf der Inertstoffdeponie abgelagert werden durften. Dies galt aber nicht für Filteraschen aus naturbelassenem Holz [5] [13].

Mit Einführung der VVEA ist die Ablagerung auf Deponie B nicht mehr ohne Einschränkungen möglich. Die Aschen aus Holzfeuerungen müssen seit dem 1. Januar 2016 gemäss der VVEA auf folgenden Deponietypen abgelagert werden:

Auf Deponien Typ B, wenn sie die Anforderungen der VVEA nach Anhang 5 Ziffer 2.3 einhalten. Dabei dürfen die Gesamtgehalte nach Buchstabe b nicht überschritten werden. Die Werte für Chrom (VI) wie auch für Blei, Chrom gesamt und Kupfer sind wesentlich tiefer als für den Deponietyp D. Es ist unwahrscheinlich, dass typische Bett- und Rostaschen diese Werte einhalten können, für die Filteraschen ist es praktisch ausgeschlossen [5].

Die Deponie Typ C ist gemäss BAFU die eigentliche Senke für Schwermetalle. Filteraschen sollen daher möglichst auf diesem Deponietyp abgelagert werden, da sie hohe Metallgehalte aufweisen und die Organikgehalte tief sind. Damit Holzaschen auf Typ C abgelagert werden dürfen, müssen sie die Anforderungen nach Anhang 5 Ziffer 3 einhalten. Ziffer 3.1 listet die möglichen Abfälle für diesen Deponietyp auf, wobei nach Buchstabe e andere metallhaltige, anorganische und schwerlösliche Abfälle, sofern die Metalle vorgängig zurückgewonnen wurden, auf Typ C zugelassen sind. Wenn es nicht möglich ist die Metalle vorgängig zurückzugewinnen, gelte der Buchstabe e trotzdem als erfüllt (mündliche Mitteilung Dr. Kaarina

Schenk/BAFU). Somit ist es möglich, die Filteraschen auf Typ C zu entsorgen, wenn sie die weiteren Anforderungen nach Ziffer 3.2 bis 3.5 erfüllen. Dabei sind insbesondere die Grenzwerte nach Ziffer 3.2 Buchstabe d einzuhalten. Diese müssen mittels zweier Eluat-Tests nachgewiesen werden. Gerade Chrom (VI) ist aber sehr gut wasserlöslich. Ohne eine Vorbehandlung können typische Holz-Filteraschen die Vorgaben für den Deponietyp C nicht erfüllen [5].

Auf dem Deponietyp D können Holzaschen teilweise direkt abgelagert werden, da sie im Anhang 5 Ziffer 4.1 aufgeführt sind. Dies sind einerseits sauer gewaschene Filteraschen (Buchstabe e und sauer gewaschene Aschen aus der thermischen Behandlung von Holz mit einem Gehalt von höchstens 20'000 mg TOC pro kg. Sind die Aschen nicht vorbehandelt (sauer gewaschen), müssen sie die Anforderungen der Ziffer 4.4 einhalten. Dabei dürfen die Gesamtgehalte der dort aufgeführten Grenzwerte nicht überschritten werden [5].

Können die Grenzwerte für den Deponietyp D nicht eingehalten werden, kommt der Deponietyp E in Frage. Die im Anhang 5 Ziffer 5.2 aufgeführten Grenzwerte für die Gesamtgehalte sind für den TOC weniger streng als für den Deponietyp C. So dürfen hier Aschen mit einem TOC-Gehalt von höchstens 50'000 mg/kg abgelagert werden (also 5%). Gemäss der VVEA können sauer gewaschene Filteraschen direkt, und sauer gewaschene Bett- und Rostaschen, welche einen TOC Gehalt von 20'000 mg/kg nicht überschreiten, ohne weitere Analysen, auf dem Deponietyp D abgelagert werden. Für alle weiteren Deponietypen, respektive ohne Vorbehandlung, ist mit Analysen nachzuweisen, dass die Aschen die Anforderungen des jeweiligen Deponietyps erfüllen. Können aufgrund der Gehalte die Anforderungen nicht eingehalten werden, kommt allenfalls die Untertagedeponie im benachbarten Ausland als Entsorgungsort in Frage. Die Kantone können zudem mit Zustimmung des BAFU in Einzelfällen die Ablagerung von Aschen, welche die Anforderungen nach Anhang 5 Ziffer 5.2 nicht erfüllen, trotzdem für die Ablagerung auf dem Deponietyp E zulassen, wenn eine andere Entsorgung als die Ablagerung technisch nicht machbar ist (Anhang 5 Ziffer 5.3, Ausnahmeregelung).

Zusammengefasst sollen die Aschen gemäss den neuen Regelungen der VVEA folgendermassen entsorgt werden:

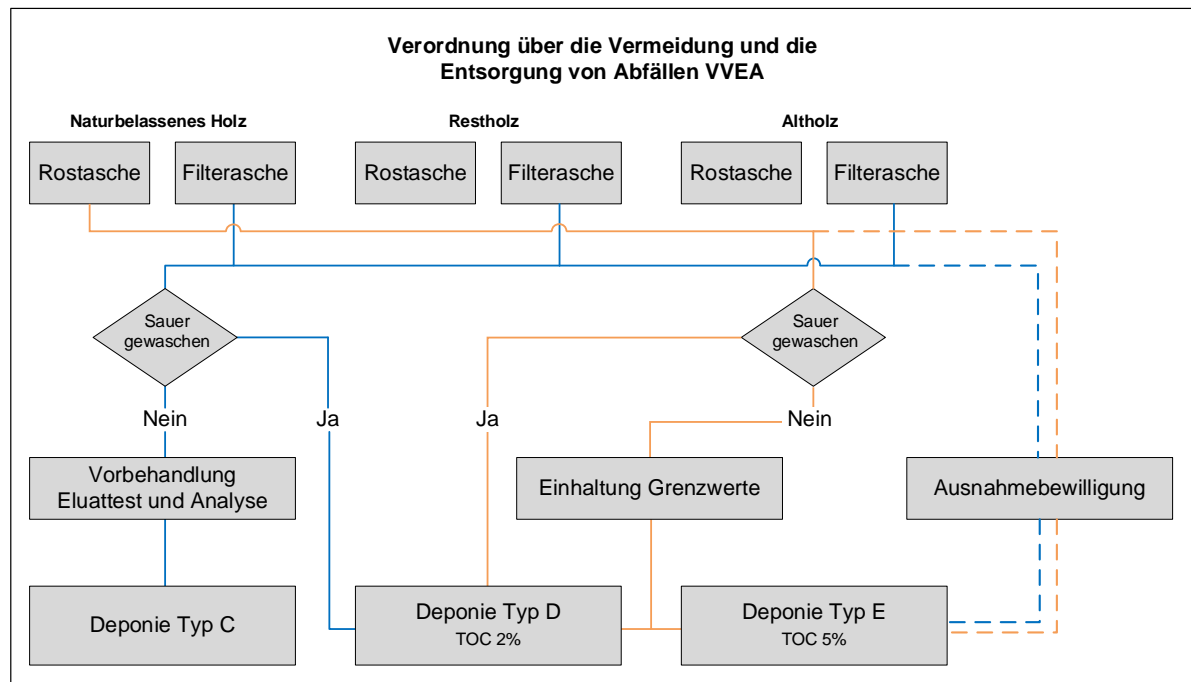


Abb. 2-8: Schema Holzascheentsorgung nach VVEA, Zusammenfassung der Hauptentsorgungswege: Wenn Rost- und Filteraschen sauer gewaschen wurden, können sie in Deponie Typ D abgelagert werden. Für eine Ablagerung ohne Vorbehandlung müssen Rost- und Filteraschen die jeweiligen Grenzwerte einhalten. In Ausnahmefällen kann trotz des Nichterfüllens der Anforderungen der Deponie Typ E eine Ablagerung genehmigt werden [5].

Die VVEA zeigt zwar Wege auf, wie Holzasche entsorgt werden kann, jedoch sind diese nicht auf alle Holzaschen anwendbar.

- Insbesondere relevant ist der Anhang 5 Abs. 4(f) der VVEA. Gemäss 4.1f dürfen „sauer gewaschene Aschen aus der thermischen Behandlung von Holz...“ im Deponietyp D abgelagert werden. Gemeint sind vermutlich Filteraschen, also feinkörnige hoch belastete Aschen, die mittels „saurer Wäsche“ behandelt wurden. Dies in Analogie zu den Filteraschen aus KVA, die vermutlich in 4.1e gemeint sind.
- Weiterhin relevant ist Anhang 5 Abs. 4.4. Hieraus geht folgendes hervor: „Aschen aus der thermischen Behandlung von Holz und Klärschlamm und nicht brennbares, mineralisches Kugelfangmaterial dürfen auf Deponien oder Kompartimenten des Typs D abgelagert werden, wenn sie die folgenden Grenzwerte (Gesamtgehalte) nicht überschreiten...“. Dieser Passus bezieht sich allgemein auf Aschen, also Zyklon- und Filteraschen sowie Bett- und Rostaschen.

Die Hinweise auf Holzaschen in 4.1f und 4.4 beziehen sich aber in jedem Fall vermutlich nicht auf Holzaschen aus der Verbrennung von Frischholz (naturbelassenes Waldholz). Frischholz

wird zwecks Energiegewinnung verbrannt. Es ist daher kein Abfall, der „thermisch behandelt“ wird, denn die Bezeichnung „thermische Behandlung“ in 4.1f und 4.4 weist in Richtung Altholzverbrennung, also Abfallbehandlung (Art. 10). Wären in diesen Absätzen Aschen aus der Frischholzverbrennung gemeint, wäre nicht von „thermischer Behandlung“, sondern von „energetischer Verwertung“ die Rede. Abs. 4.1f betrifft also Filteraschen aus der Alt- oder Restholzverbrennung und 4.4 betrifft alle Holzaschen aus der Alt- oder Restholzverbrennung.

Wenn Bettasche aus der Holzverbrennung als „Schlacke aus Anlagen in denen Siedlungsabfälle oder Abfälle vergleichbarer Zusammensetzung...“ interpretiert wird, dann kann zu ihrer Entsorgung der Abs. 4.3 des Anhangs 5 der VVEA herangezogen werden.

Offen bleibt gemäss VVEA also, was mit den Aschen aus der Frischholzverbrennung geschehen soll (Abb. 2-9 links).

Ablagerung auf Deponie Typ D gemäss VVEA Anhang 5			Ablagerung auf Deponie Typ E gemäss VVEA Anhang 5		
	Bettasche «Schlacke»	Filterasche		Bettasche	Filterasche
Frischholz	4.3		Frischholz	5.3	
Altholz «thermische Abfallbehandlung»	4.4	4.1f	Altholz		

Abb. 2-9: (links) Wirkungsbereiche VVEA Anhang 5 Abs. 4. (rechts) VVEA Anhang 5 Abs. 5.3.

3 Entsorgungswege heute

Die Datengrundlage bezüglich aktueller Massenströme von Rost-, Bett- und Filteraschen aus Holzfeuerungen in der Schweiz ist sehr dürftig. Die einzige Datenquelle stellt die FNHW-Masterarbeit von Roland Zürcher [5] dar, welche die Stoffflüsse von Holzaschen aus dem Jahr 2015 des Kantons Bern bilanzierte. Dabei wurde zwischen einem Massenflussdiagramm für kleine Anlagen (<70 kW) und einem Massenflussdiagramm für mittlere und grosse Holzfeuerungsanlagen (>70 kW) siehe Abb. 3-1 und Abb. 3-2 differenziert. Es gilt zu beachten, dass die Daten in Form von Befragungen und Umfragen erhoben wurden, wobei nicht alle Flüsse eindeutig einem Entsorgungsweg zugeordnet werden konnten und daher auch Annahmen in die Massenflussanalysen einflossen [5].

Zudem wurde auch Holzasche direkt, also ohne Vorbehandlung, als Düngemittel in der Landwirtschaft eingesetzt. Dieser Entsorgungsweg ist jedoch nicht gesetzeskonform, da die Holzaschen in den allermeisten Fällen die Grenzwerte für Schwermetalle der DüMV (Düngemittelverordnung) und der ChemRRV (Chemikalien-Risikoreduktionsverordnung) nicht einhalten. Nicht erfasst wurden die relativ grossen Mengen an Filterstäuben aus den Papierfabriken, welche in einem Zementwerk verwertet wurden (rund 40'000 t im Jahr 2015 [5] [14]). Wichtig ist auch, dass sich die Daten auf das Jahr 2015 bezogen, als die VVEA und die damit verbundene Neubezeichnung der Deponietypen noch nicht in Kraft trat.

Zusammenfassend kann man feststellen, dass schweizweit praktisch keine Massenflussdaten vorliegen. Im Jahr 2015, also vor Inkrafttreten der VVEA, wurden im Kanton Bern anfallende Holzaschen von mittleren bis grösseren Feuerungsanlagen überwiegend deponiert. Währenddessen angefallene Holzasche von kleineren Anlagen des Kantons Bern zum grössten Teil in einer KVA entsorgt wurden. Ob die Massenströme repräsentativ für die Schweiz sind, kann an dieser Stelle nicht gesagt werden. Denn obschon der Kanton Bern gemäss der Holzenergiestatistik 2015 [2] am meisten Anlagen und damit auch die höchste installierte Holzfeuerungsleistung der Schweiz besitzt (siehe dazu im Anhang Abb. 10-2), wird die gesetzliche Handhabung der Entsorgung von Holzasche in anderen Kantonen voneinander divergieren. Folglich würde sich ein anderes Bild in der Massenflussanalyse ergeben, weshalb eine fundierte schweizweite Datengrundlage wünschenswert wäre.

Holzasche-Stoffflüsse 2015 aus mittleren und grossen Anlagen (Kt. Bern)

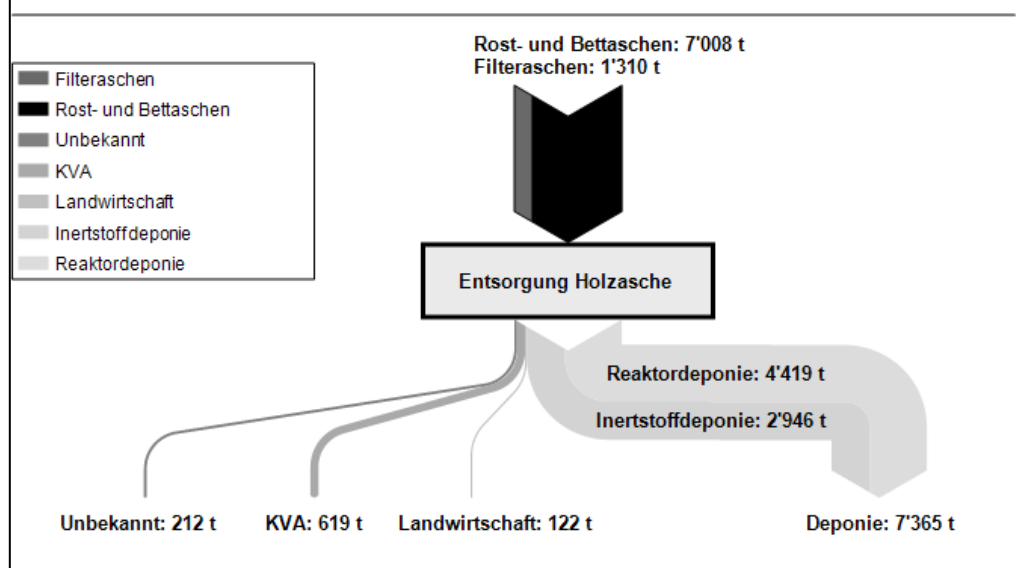


Abb. 3-1: Stoffflussanalyse der Entsorgung von Holzaschen von mittleren bis grossen Feuerungsanlagen im Kanton Bern. Die Daten stammen aus dem Jahr 2015 [5].

Holzasche-Stoffflüsse 2015 aus kleinen Anlagen (Kt. Bern)

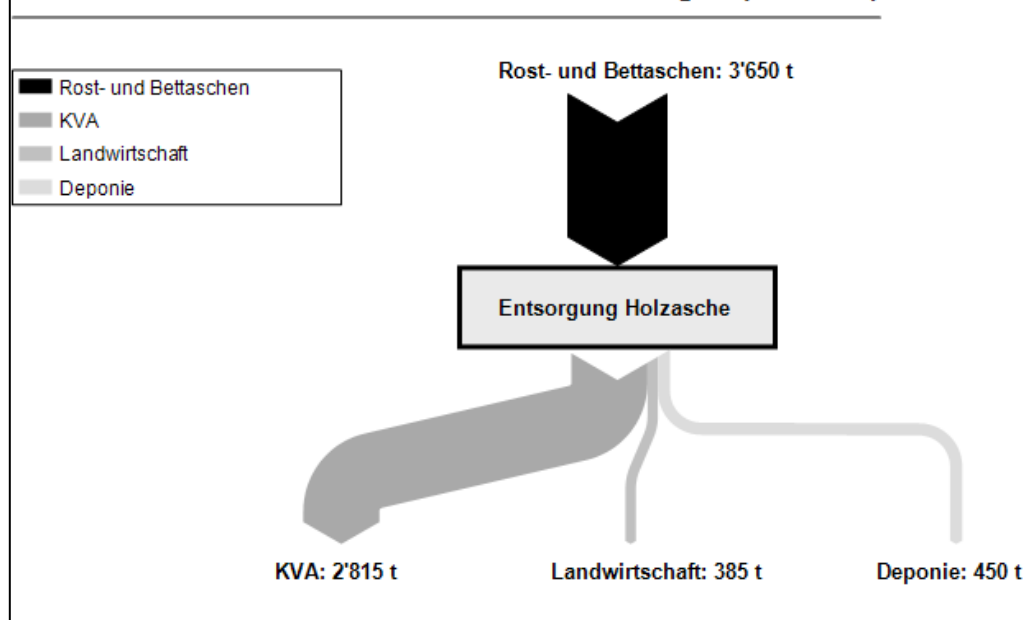


Abb. 3-2: Stoffflussanalyse der Entsorgung von Holzaschen von kleineren Feuerungsanlagen im Kanton Bern. Die Daten stammen aus dem Jahr 2015 [5].

4 Problematik Entsorgung Holzasche

4.1 Schwermetall- und TOC-Gehalt

Diverse Analysen von Holzaschen aus unterschiedlichen Holzfeuerungsanlagen haben gezeigt, dass in den meisten Fällen die Anforderung an Schwermetallgrenzwerte für die Ablagerung in Deponie Typ C, D und E nicht eingehalten werden können. Es sind insbesondere folgende Elemente: Cr(VI), Pb, Cd, Zn, Sb, Ni und Cu. Häufig weisen auch Aschen aus naturbelassenem Holz zu hohe Schwermetallwerte auf [1] [15]. In der Regel sind jedoch Holzaschen aus Altholzfeuerungen stärker belastet. Insbesondere zeigten Analysen, dass Filteraschen tendenziell höhere Schwermetallgehalte als Bett- und Rostaschen aufweisen. Neben den zu hohen Schwermetallkonzentrationen wird in der einschlägigen Literatur auch die nicht Einhaltung der in der VVEA vorgeschriebenen TOC-Grenzwerten erwähnt [16] [17].

4.2 Staubbildung und Handling

Das Handling von Holzasche kann aufgrund der Staubbildung, besonders beim Um- und Entlad, Probleme verursachen. In Deponien kann die Staubbildung beim Abladen von Holzaschen zur Gefährdung der Chauffeure, des Deponie-Personals und „Dritter“ führen. Wird Holzasche via Container im KVA-Bunker angeliefert, führt das zu massiven Staubproblemen und zur Gefährdung der Betriebssicherheit, da der Kranführer den Bunker nicht mehr einsehen kann. Deshalb hat der Verband der Betreiber Schweizerischer Abfallverwertungsanlagen (VBSA) dazu eine Stellungnahme verfasst, in der vorgeschrieben wird, dass Holzasche nur noch abgepackt in Kehrriechsäcken oder Bigbags angenommen wird [18].

4.3 Kantonal unterschiedliche Handhabung

In den Stellungnahmen von BKW und Holzenergie Schweiz zur Entsorgung von Holzaschen wird auch erwähnt, dass die unterschiedliche Handhabung im kantonalen Vollzug im Umgang mit Holzaschen, die Entsorgungssituation erschwert. Einige kantonale Umweltämter stellen Anforderungen über die der VVEA hinaus [16] [19].

4.4 Stand der Technik

Ca. 1/3 der Schweizer KVA verfügen über eine saure Wäsche der Flugasche. Diese nehmen jedoch in der Regel nur selten Drittaschen an, da dies gemäss Anlagenbetreibern zu massiven Staubproblemen bei der Annahme, zu vermehrtem Anlageverschleiss und auch zu Problemen bei der Rauchgasreinigung führt (aufgrund höherer Schwermetallgehalte) [16]. Des Weiteren wird in der Branche moniert, dass die in der VVEA geforderte vorgängige Aufbereitung der Holzaschen nicht ohne weiteres möglich sei. Denn die Technik dazu sei momentan



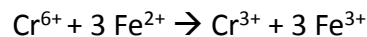
noch auf Laborerfolge begrenzt und nicht im Industriemassstab umzusetzen. Zudem seien die Verarbeitungskapazitäten nicht vorhanden und wirtschaftlich auch nicht tragbar. Gemäss Holzenergie Schweiz würden sich die Aufbereitungs- und Deponierungskosten auf rund 340 CHF/t (reine Aufbereitungskosten ca. 220 CHF/t, gestützt auf die Chromatbehandlungsanlage in BL) belaufen [3] [16] [19]. Im Gegensatz dazu schätzt eine Recyclingunternehmung die Kosten für eine Cr(VI)-Reduktion auf ca. 40 CHF/t (ohne Deponierung) [20].

Neben dem Stand der Technik ist die in der VVEA geforderte getrennte Entsorgung von Rost- und Filteraschen gemäss BKW und Holzenergie Schweiz eine grosse Herausforderung für die Betreiber von Holzfeuerungsanlagen. Denn dies führe zu höheren Investitionskosten bei Neuanlagen und zu Nachrüstinvestitionen bei bestehenden Anlagen in einer zu kurzen Übergangsfrist von 5 Jahren. Zudem führe dies zu höheren Logistikkosten aufgrund der kleineren spezifischen Mengen [16] [19].

5 Lösungsansätze

5.1 Schwermetall- und TOC-Gehalt

Schon früh wurde die Möglichkeit erkannt das problematische Chrom-VI zum unproblematischen Chrom-III zu reduzieren. 2001 wurde dazu ein Patent veröffentlicht in dem ein Verfahren zur Chromatreduktion in Holzaschen beschrieben wird [21]. Dabei gilt es aber zu befürchten, dass die im patentierten Verfahren verwendete Melasse zu Problemen mit der Einhaltung des TOC-Grenzwerts bei der Deponierung führen könnte. Ein spannenderer Ansatz präsentiert die Firma KRONOS ecochem indem Cr(VI) in Anwesenheit des Reduktionsmittels Eisensulfat zu Cr(III) reduziert wird. Dabei würde das eigens dafür verwendete Granulat (Ferrogranul 20) verwendet [22]. Die Reaktion würde wie folgt aussehen:



Bei diesem Ansatz hat sich gezeigt, dass die Korngrösse der zu reduzierenden Holzasche von grosser Bedeutung ist, d.h. sie müsste relativ fein gemahlen sein um erfolgreich mit dem Eisengranulat zu reagieren. Eisen kann auch in wässriger Lösung in Form von FeSO_4 mit der Holzasche vermengt werden. Ein fundamentales Problem ist hierbei die extrem langsame Eluierungskinetik von Cr(VI) aus porösen Partikeln, so wie sie auch in der Holzasche vorliegen. Wenn also die Holzasche mit einer wässrigen Lösung aus Fe(II) versetzt wird, dann reagiert dieses nur mit dem spontan wasserlöslichen Cr(VI), wobei das Cr(VI) zu Cr(III) reduziert wird und das Fe(II) zu Fe(III) oxidiert wird. Nicht reduziert wird hingegen das in porösen Partikeln eingebundene Cr(VI). Dieses diffundiert im Zuge der Behandlung nur sehr langsam aus den Partikeln heraus und muss dann durch eine wiederholte Zugabe von Fe(II) reduziert werden. Es nützt auch nicht viel bei der ersten reduzierenden Behandlung ein „Depot“ von Fe(II) in der feuchten Holzasche anzulegen, denn dieses oxidiert mit dem vorhandenen Luftsauerstoff zu Fe(III) und wird damit unbrauchbar für eine Reduktion von Cr(VI). Bei den in Holzasche typischerweise vorliegenden hohen Cr(VI)-Konzentrationen (gemessen am VVEA-Grenzwert Anhang 5 Abs. 4.4: 0.5 mg/kg) ist also nicht auszuschliessen, dass nach einer reduzierenden Behandlung mit Fe(II)-Lösung die Cr(VI) Konzentrationen in der behandelten Holzasche innert weniger Tage wieder deutlich ansteigen.

Die Reduktion kann grundsätzlich auch in situ erfolgen, also im Deponiekörper. Dies erfordert natürlich, dass in diesem reduzierende Redoxbedingungen vorliegen. Bei Deponien Typ E ist dies dann gegeben, wenn dort biologisch abbaubare Organika eingelagert sind, z.B. Strassensammelmateriale oder Brandschutt.

Auch in der Deponie D herrschen stark reduzierende Bedingungen. Hier liegen zwar in der Regel nur sehr geringe Konzentrationen an biologisch reaktivem Material vor (tiefer TOC), aber durch die Korrosion von Metallen (Fe, Al...) werden auf anorganische Weise reduzierende Bedingungen geschaffen (Wasserstofffreisetzung). Zwar wird durch die Aufbereitung der KVA-Schlacken ein grosser Teil der Metalle gewonnen, dies aber nur in den Korngrössen >2mm. Kleinere Metallstücke, die eine wesentlich grössere spezifische Oberfläche als grosse

Stücke haben, verbleiben in der aufbereiteten KVA-Schlacke. Insbesondere liegt in Deponien Typ D ein grosses Potenzial an Eisen vor, welches durch (aufbereitete) KVA-Schlacken eingetragen wurde. Dieses wird, zumindest teilweise, durch das Sickerwasser korrodiert und bildet Fe(II) welches für eine allfällige Chromatreduktion zur Verfügung steht. Im Gegensatz zu einer ex situ Behandlung liegt im Deponiekörper auch sehr langfristig eine reduzierende Atmosphäre vor, welche das gebildete Fe(II) „konserviert“ und vor der Oxidation mit Luftsauerstoff zu Fe(III) schützt. Dieser Ansatz wird auch durch zahlreiche einschlägige Literatur unterstützt [1] [15] [16].

Neben der Chromatreduktion wurde im Bericht von Geo Partner AG und Friedlipartner AG „Bett- und Rostaschen aus der Verbrennung von Altholz“ [15] die Extraktionsrate von Schwermetallen in der sauren Wäsche mit derjenigen von Flugaschen von KVA verglichen. Dabei konnte festgestellt werden, dass sich aus technischer Sicht die saure Wäsche sehr gut zur Schwermetallabreicherung eignet. Die Extraktionsraten von Schwermetallen wie Pb, Cd und Zn waren vergleichbar mit denjenigen der KVA-Flugaschen.

Bezüglich TOC wurde uns vom BAFU (Frau Dr. Kaarina Schenk, Projektleiterin Abteilung Abfall und Rohstoffe BAFU) mitgeteilt, dass im Rahmen der Vollzugshilfe die Definition „TOC400²“ aufgenommen wird. Das heisst, elementarer Kohlenstoff würde nun nicht mehr im TOC berücksichtigt, was die Einhaltung der TOC-Grenzwerte deutlich entschärft.

5.2 Staubbildung und Handling

Gemäss Stellungnahme VBSA (Verband der Betreiber Schweizer Abfallverwertungsanlagen) [18] nehmen KVA per Ende Februar 2017 keine grossen Monochargen gewerblicher Asche mehr an. Nur noch kleine Mengen abgefüllt in Kehrtrübsäcken oder Bigbags. Grössere Mengen Holzasche sollten zum Beispiel per Absaugwagen mit angepasster Abrollcontainer, welche die Holzasche leicht befeuchten, transportiert und in einer Deponie eingebaut werden. So minimiert sich die Staubbildung. Beim Befeuchten muss darauf geachtet werden, dass die Holzasche lediglich „erdfeucht“ gemacht wird, ansonsten kann es beim Entleeren des Containers zu Problemen führen. Wird die Holzasche zu stark befeuchtet besteht die Gefahr, dass sie hydraulisch abbindet und aushärtet.

5.3 Alternative Entsorgungs- und Nutzungsmöglichkeiten

Zusammenfassend existiert für Holzasche folgende alternative Nutzungsmöglichkeiten (Achtung, einige der aufgeführten Nutzungsmöglichkeiten stammen aus der Literatur und widerspiegeln nicht die Meinung des Verfassers):

- Kofferungsmaterial im Wege- und Strassenbau

² Organisch-gebundener Kohlenstoff, der bei 400°C freigesetzt wird. Der TOC400 ist neben dem ROC (restlicher oxidierbarer Kohlenstoff) ein Teil des TOC, des totalen organischen Kohlenstoffs [35].

- Schleif- und Strahlmittel
- Industrielle Verwertung, z.B. Neutralisation und Adsorption
- Füllstoff im Bergversatz (nur im Ausland)
- Winterstreumittel
- Einsatz als Bodenverbesserungs- oder Düngemittlersatzstoff
- Zuschlagstoff im Zement
- Zuschlagstoff in Bodenstabilisator
- Flussmittel zur Herstellung von Schmelzen
- Zugabe in den Faulturn von Kläranlagen

Nachfolgend werden die oben aufgelisteten alternativen Nutzungsmöglichkeiten erläutert und kurz diskutiert:

5.3.1 Kofferungsmaterial im Wege- und Strassenbau

Die Verwendung von Holzasche als Kofferungsmaterial im Wege- und Strassenbau kann ausserhalb von Wasserschutzgebieten und weiteren hydrogeologisch sensibler Gebiete sowie ausserhalb von Überschwemmungsgebieten in Frage kommen. Folgende Einsatzmöglichkeiten kämen für Holzaschen unter einer wasserundurchlässigen Deckschicht aus Asphalt oder Beton in Frage:

- Als ungebundene Tragschicht (Frostschuttschicht oder Schottertragschicht)
- Als gebundene Tragschicht (hydraulisch oder bituminös)
- Als Strassendamm / Unterbau

Bei allen Anwendungen ist beim Einbau analog zu sonstigen RC-Baustoffen mit definierten technischen Sicherungsmassnahmen ein Mindestabstand zwischen Schüttkörperbasis und höchstem zu erwartendem Grundwasserstand von einem Meter einzuhalten. Probleme bei dieser Nutzungsmöglichkeit stellen sicherlich der eigentliche Einbau/das Handling der Holzasche und die damit verbundene Staubbildung dar.

5.3.2 Schleif- und Strahlmittel

Da Holzaschen überwiegend aus mineralischen Bestandteilen, insbesondere Oxiden und Karbonaten diverser Metalle bestehen, könnte man möglicherweise die Holzasche so aufbereiten, dass man sie als Schleif- und Strahlmittel einsetzen kann. Schleif- und Strahlmittel zeichnen sich durch ihre Härte und Zähigkeit und der damit verbundenen abrasiven Wirkung aus. In der Praxis werden Korund, Zirkon, Siliziumcarbid, Bornitrid und Diamant als Schleif- und Strahlmittel verwendet. Bei der Substitution der genannten Mineralien durch aufbereitete Holzasche ergibt sich jedoch die Problematik der recht heterogenen Zusammensetzung und undefinierten Qualität. Denn die Härte des Schleif- und Strahlmittels ist direkt vom Reinheitsgrad abhängig. Die Zugabe von weiteren Metalloxiden würde höchstens die Zähigkeit, nicht aber die Härte resp. Sprödigkeit, erhöhen.

5.3.3 Industrielle Verwertung, z.B. Neutralisation und Adsorption

Da Holzasche als poröses Material eine grosse spezifische Oberfläche aufweist, könnte man sie möglicherweise anstelle von herkömmlichen Adsorptionsmittel (Aktivkohle, Kieselgel, Bentonit etc.) einsetzen. Des Weiteren sind Holzaschen stark alkalisch und weisen dadurch eine hohe Säureneutralisationskapazität auf, weshalb sie sich potenziell als Neutralisationsmittel eignen würden. Vermutlich steht dieser alternativen Nutzungsmöglichkeit die heterogene Zusammensetzung und teure vorgängige Aufbereitung der Holzasche im Wege. Zudem stellen die zu hohen Schwermetallgehalte bei industriellen Verwertungsmöglichkeiten dieser Art ebenfalls ein Problem dar. Denkbar wäre aber eine Neutralisation von säurehaltigen Abfällen vor deren Ablagerung auf Deponien.

5.3.4 Füllstoff im Bergversatz

Für den Einsatz als Bergversatzmaterial müssen die Aschen gewisse Kriterien erfüllen, um sicherzustellen, dass auch langfristig, z.B. bei eintretendem Grubenwasser, keine Umweltgefährdung besteht. Diese alternative Nutzungsmöglichkeit käme nur im benachbarten Ausland in Frage. Hierbei gilt zu beachten, dass das BAfu eine Ausfuhr von Holzasche für eine solche Entsorgung nicht notifizieren würde (mündliche Mitteilung von Dr. Kaarina Schenk), weshalb diese alternative Nutzungsmöglichkeit im Moment nicht in Frage kommt.

5.3.5 Winterstreumittel

Zur Verwendung von Holzaschen als Winterstreumittel kämen sicherlich nur Bett- und Rostaschen aus naturbelassenem Holz in Frage. Die Zyklon- und Filteraschen weisen eine zu feine Korngrösse auf und würden vermutlich auch zu starker Staubbildung beim Ausbringen durch den Winterdienst führen. Zudem würde die zu feinkörnige Filter- und Zyklonasche in den Schnee eingetreten werden und dadurch ihre Wirkung schnell verlieren. Die Bett- und Rostaschen müssten vorgängig aufbereitet und homogenisiert werden. Das Ausbringen von Holzaschen durch den Winterdienst kann aus unserer Sicht zu folgenden Problemen führen: 1. Staubbildung: Beim Ausbringen sowie auch durch verkehrsbedingtes Zermahlen des Streugutes würde Staub entstehen, der insbesondere für Passanten und Anwohner stark befahrener Strassen ein Gesundheitsrisiko darstellen könnte. 2. Schadstoffe können mit schmelzendem Schnee in den Boden und ins Grundwasser gelangen oder aber sie gelangen in die Kanalisation und können so in Vorfluter geraten und Gewässer verschmutzen. 3. Die Verwendung von Holzasche als Winterstreumittel würde zu starker Schmutzbildung bei Strassenverkehrsteilnehmern führen.

5.3.6 Einsatz als Bodenverbesserungs- oder Düngemittlersatzstoff

Wie in den Abb. 3-1 und Abb. 3-2 ersichtlich, wird heute ein kleiner Teil der angefallenen Holzaschen, meistens von kleineren Anlagen, als Düngemittlersatz in der Landwirtschaft verwendet. Dies ist jedoch gemäss der Düngemittelverordnung (DüMV) und ChemRRV (Chemikalien-Risikoreduktions-Verordnung) nicht erlaubt. Denn die Schwermetallgehalte können

die in der DüMV und ChemRRV geforderten Grenzwerte meistens nicht einhalten. In einer Studie der Forschungsanstalt Agroscope [23] wurde die Verwendung von Holzasche als Düngemittlersatz eingehend untersucht. Die Studie kam zu folgenden Schlussfolgerungen:

- Holzasche enthält wertvolle Bestandteile wie Calcium- Kalium- und Magnesiumoxide und auch Phosphate, welche für die Bodenverbesserung wertvoll wären (Fruchtbarkeit, Wasserspeicherungskapazität, gegen Bodenversauerung etc.). Dies wurde auch vom Amt für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten Wertingen [24] bestätigt (Nebenbemerkung: gemäss Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V. wird der Düngewert auf ca. 50 CHF/t geschätzt [25])
- Kurzfristig konnten keine Probleme bezüglich Bodenqualität, Grundwasser und Fauna festgestellt werden.
- Langfristig bleibt das Problem der Schwermetall-Toxizität jedoch bestehen, da ein grosser Teil der Schwermetalle wie Cu, Zn, Ni und Pb in potenziell mobiler Form vorliegen.

Ohne Vorbehandlung ist die Verwendung von Holzasche als Düngemittlersatz nicht möglich. Man könnte sich jedoch unter streng kontrollierten Bedingungen vorstellen, dass Düngemittelhersteller Holzasche aus naturbelassenem Holz als Ersatzstoff in der Produktion verwenden, denn die Hersteller müssen ihre Produkte regelmässig kontrollieren und entsprechend deklarieren. Eine solche Kreislaufschliessung wäre ganz im Sinne des Gedankens der Abfallvermeidung der VVEA. Ein Problem dieser alternativen Nutzungsmöglichkeit stellt die recht grosse Variation der Schwermetallgehalte in der Holzasche dar. Ein Düngemittelhersteller würde eine Konstanz im Input seines Herstellungsprozesses bevorzugen.

5.3.7 Zuschlagstoff im Zement

In der Zementindustrie wird bis anhin vorwiegend Flugasche aus Steinkohlekraftwerken als Zuschlagstoff im Zement verwendet (z.B. bei Jura Zement). Die Filteraschen aus den Papierfabriken werden ebenfalls in Zementwerken verwertet [5]. Gemäss der Aussage verschiedener Berichte über die Entsorgung von Holzaschen und den damit verbundenen Schwierigkeiten, ist die Verwendung von Holzasche als Zuschlagstoff in der Zementindustrie technisch machbar, würde jedoch aufgrund der zu hohen Schwermetallwerte in der Praxis nicht gemacht [15] [16] [17]. Diese Aussage wurde durch den von LafargeHolcim Mitte 2017 durchgeführten Holzasche Workshop relativiert, indem Zugeständnisse seitens Zementindustrie zur Verwendung von Holzaschen gemacht wurden. Denn die Zementindustrie wäre an einer Verwendung als Zuschlagstoff in ihrem Zement grundsätzlich nicht abgeneigt, es müssten allerdings gewisse Rahmenbedingungen erfüllt sein: Klare Klassifizierung der Holzasche sowie eine gebündelte Logistik, die über einen einheitlichen Ansprechpartner läuft. Zudem müsste der geforderte maximale Chloridgehalt eingehalten werden. Im Speziellen sollen sich aufgrund physikalischer Eigenschaften nur Zyklonaschen als Zuschlagstoff im Zement eignen. Elektrofilter-, Rost- und Bettaschen seien aufgrund der Schwermetall-, Phosphor-, Kalium-, und Salzgehalte resp. aufgrund der geringeren Kornstabilität weniger attraktiv.

5.3.8 Zuschlagstoff in Bodenstabilisator

Aus unserer Sicht wäre die Verwendung der Holzasche als Zuschlagstoff in Bodenstabilisator eine sinnvolle alternative Verwendungsmöglichkeit. Hierbei würde die Holzasche zusammen mit Kiesschlamm (ein Abfallstoff, der bei der Gewinnung von Kies und Sand anfällt) und Zement zu einem verkaufsfähigen Produkt verarbeitet. Herkömmlicherweise wird der Kiesschlamm mit Zement/Brannkalk vermengt und im Strassen- und Dammbau in Form von Erdbeton als Bodenstabilisator eingesetzt. Basierend auf einem KTI-Projekt („Bindemittel zur Bodenstabilisierung“) wurde gezeigt, dass Holzasche bis zu 50% des CO₂-intensiven und teuren Zements ersetzen kann, wobei das resultierende Produkt punkto Verarbeitbarkeit, Druckfestigkeit und Eluatqualität gleichwertig mit herkömmlichen Stabimischungen ist. Wirtschaftlich vorteilhaft ist das Verfahren dadurch, dass der kostenpflichtig zu entsorgende Kiesschlamm zu einem verkäuflichen Produkt aufgearbeitet wird, wobei zusätzlich noch ein teures Bindemittel (Zement) etwa zur Hälfte durch einen kostenpflichtig zu entsorgenden Abfall (Holzasche) substituiert wird. Da die Hälfte der Bindemittelmasse aus CO₂-neutraler Holzasche besteht, halbiert sich folglich die CO₂-Bilanz, wobei gleichzeitig wertvolles Deponievolumen gespart wird [26]. Nebenbemerkung: Dieses Verfahren ist in der Praxis bestens etabliert und wird heute z.B. von der Firma LOGBAU zur Herstellung von Erdbeton angewandt.

5.3.9 Flussmittel zur Herstellung von Schmelzen

Eine weitere alternative Nutzungsmöglichkeit besteht in der Verwendung der Holzasche als Flussmittel von Schmelzen, z.B. in der Glasproduktion. Dabei würde das in der Holzasche enthaltene Kaliumoxid die Schmelze heruntersetzen und somit als Flussmittel dienen.

5.3.10 Zugabe in den Faulturm von Kläranlagen

Ein Verfahren zur Reduzierung der erhöhten Chrom-VI-Gehalte zu Chrom-III könnte auch in der Zugabe von Holzaschen in den Faulturm von Kläranlagen bestehen. Im Faulturm findet eine anaerobe Fermentation statt. Durch die Bildung von Mercaptanen, Schwefelwasserstoff und Fe-II-Verbindungen herrschen reduzierende Bedingungen, die zum Abbau von Chrom-VI zu Chrom-III führen. Als problematisch könnte sich dabei allerdings die Toxizität hoher Chromatgehalte für die Mikroorganismen erweisen. Schädlichkeitsschwellen für E.coli und Methanbakterien liegen bei 0.7 bzw. 1.5 mg/L Cr(VI). In [27] wurden bereits Versuche mit Cr(VI)-Ausgangskonzentrationen in der Fermentationslösungen durchgeführt, welche die Schädlichkeitsschwelle überschritten. Trotzdem wurde die Cr(VI)-Konzentration innerhalb 7 Tage unter die Nachweisgrenze reduziert. Da in der Schweiz Klärschlämme verbrannt werden, wäre diese Entsorgungsmöglichkeit potenziell interessant [28].

5.3.11 Zusammenfassung alternativer Nutzungsmöglichkeiten

Eine Verwertung wird sich voraussichtlich vor allem auf Aschen aus naturbelassenem Holz und Restholz beschränken. Abb. 5-1 gibt eine Übersicht der möglichen Verwertungswege von Holzasche.

	Bett- / Rostasche	Filterasche
Frischholz	Baustoff, Winterstreumittel, Dünger, Flussmittel...	Erdbeton (LOGBAU) ...
Altholz	X	X

Abb. 5-1: Mögliche Verwertungswege für Holzaschen. Eine Verwertung wird sich voraussichtlich vor allem auf naturbelassenes Wald- und Restholz beschränken.

6 Fazit

Durch die Ablösung der TVA mit der VVEA entfiel die Möglichkeit Holzasche aus naturbelas- senem Holz kostengünstig auf Inertstoffdeponien (Deponietyp B) zu entsorgen. In der VVEA ist eine Ablagerung der Holzaschen auf Deponien Typ C, D und E vorgesehen, sofern Analysen die Einhaltung der jeweiligen Grenzwerte nachweisen. Diverse Analysen haben jedoch ge- zeigt, dass die Einhaltung der Grenzwerte, besonders für Filteraschen aber auch für Rost- und Bettaschen, häufig ohne eine relativ aufwändige Vorbehandlung nicht möglich ist. Nicht einmal Holzasche aus der Verbrennung von Frischholz, geschweige denn Asche aus der Alt- holzverbrennung, hält die in der VVEA geforderten Schwermetallgrenzwerte ohne entspre- chende Vorbehandlung ein. Nebst der Deponierung wurden im vorliegenden Bericht einige alternative Nutzungsmöglichkeiten aufgezeigt. Wir stellen zusammenfassend folgendes fest:

- Die alternativen Nutzungsmöglichkeiten der Holzasche als Kofferungsmaterial im Strassenbau, als Schleif- und Strahlmittel, als Düngemittlersatzstoff, als industrielles Neutralisations- oder Adsorptionsmittel sowie als Winterstreumittel sind aufgrund der Heterogenität, des Schwermetallgehalts, der geringen Menge oder aber aufgrund der zu starken Staubbildung nicht vielversprechend. Die Nutzung der Holzasche als Zuschlagstoff im Zement könnte hingegen weiterhin verfolgt werden, dadurch kann die Zementindustrie zumindest ein Teil des ökologisch aufwändig zu produzierenden Klinkers durch Zyklonaschen ersetzen. Als interessanten Ansatz betrachten wir auch die Verwendung der Holzaschen als Flussmittel z.B. in der Glasproduktion.
- Interessant erscheint uns auch die Entsorgung der Holzasche in den Faulturm einer Kläranlage, da es so zur Cr(VI)-Reduktion kommt und der Klärschlamm anschliessend verbrannt wird. Aus der Klärschlammasche wird aktuell ein Verfahren entwickelt und evaluiert, mit dem Phosphor aus der Klärschlammasche zurückgewonnen werden kann. Da die Holzasche Phosphor enthält, würde sich möglicherweise ein Synergieeff- fekt nutzenlassen.
- Sinnvoll erscheint uns die Nutzung der Holzasche als Bodenstabilisator, denn dadurch wird der teure und CO₂-intensive Primärbaustoff Zement durch einen kostenpflichtig zu entsorgenden und CO₂-neutralen Abfallstoff substituiert. Eine Win-Win-Situation für alle Beteiligten.

7 Literatur

- [1] C. Wirz, K. Frank und D. Schmid, „Qualität von Rückständen aus der thermischen Behandlung von Holzbrennstoffen und Altholz im automatischen Holzfeuerungen und in der Holzvergasung - Ermittlung des Stands der Technik sowie relevanter Einflussgrößen,“ Hochschule für Technik Rapperswil HSR, Institut für Umwelt- und Verfahrenstechnik UMTEC, Rapperswil, 2012.
- [2] Bundesamt für Energie BFE, „Schweizerische Holzenergiestatistik - Erhebung für das Jahr 2015,“ Bundesamt für Energie BFE, Bern, 2016.
- [3] A. Keel, „Holzaschen auf Deponien - Vortrag an der dritten Deponietagung VBSA,“ Holzenergie Schweiz, Fisibach, 2017.
- [4] Bundesamt für Umwelt BAFU, „Jahrbuch Wald und Holz 2016,“ Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern, 2017.
- [5] R. Zürcher, „Entsorgung von Aschen und Filterstäuben aus Holzfeuerungen im Kanton Bern - Masterarbeit im Rahmen des MAS Umwelttechnik und -management,“ Fachhochschule Nordwestschweiz Hochschule für Life Sciences FHNW, Muttenz, 2016.
- [6] A. Keel, „Holzaschen auf Deponien - 3. Nationale Deponietagung VBSA,“ Holzenergie Schweiz, Fisibach, 2017.
- [7] O. Ingwald, „Aschen aus Biomassefeuerungen - Zusammensetzung und Verwertung, Institut für Verfahrenstechnik Technische Universität Graz,“ VDI Verlag GmbH, Düsseldorf, 1997.
- [8] J. Schlegel, „Potenzialanalyse von Pflanzenasche im Neckar-Odenwald-Kreis zur Verwertung in Düngern,“ Hochschule für Forstwirtschaft Rottenburg HFR, Rottenburg, 2017.
- [9] D. Kuptz und H. Hartmann, „Qualität aus Bayern - Physikalische Eigenschaften von Waldhackschnitzeln nach DIN EN ISO 17225,“ Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft LWF, Freising, 2014.
- [10] D. Kuptz und H. Hartmann, „Qualität von Holzhackschnitzeln in Bayern - Gehalte ausgewählter Elemente, Heizwert und Aschegehalt,“ Technologie- und Förderzentrum (TFZ) im Kompetenzbereich für Nachwachsende Rohstoffe, Straubing, 2016.
- [11] O. Ingwald, „Nutzung fester Biomasse in Verbrennungsanlagen unter besonderer Berücksichtigung des Verhaltens aschebildender Elemente, Schriftenreihe "Thermische Biomassennutzung", Band 1,“ Technische Universität Graz, Graz, 1997.



- [12] Der Schweizerische Bundesrat, „Verordnung über die Vermeidung und die Entsorgung von Abfällen (Abfallverordnung VVEA),“ Der Schweizerische Bundesrat, Bern, 2016.
- [13] Der Schweizerische Bundesrat, „Technische Verordnung über Abfälle (TVA),“ Der Schweizerische Bundesrat, Bern, 1990.
- [14] Utzenstorf-Papier, „Umweltbericht 2016,“ Utzenstorf-Papier, Utzenstorf, 2016.
- [15] P. Plüss und S. Bruno, „Bett- und Rostaschen aus der Verbrennung von Altholz - Lösungsansätze bezüglich Entsorgung, Studie im Auftrag des Bundesamts für Umwelt BAFU und des Amts für Abfall, Wasser, Energie und Luft AWEL,“ GEO Partner AG und Friedlipartner AG, Zürich, 2016.
- [16] J. Spahr, „Entsorgung von Aschen aus der Verbrennung von Altholz und Waldholz,“ BKW AG und AEK Energie AG, Bern, 2016.
- [17] L. Roncarati und L. Zellweger, „Flugasche,“ Zellweger Ingenieurgesellschaft mbH, Thun, 2016.
- [18] R. Quartier, „Entsorgung von Holzaschen: Position des VBSA,“ Verband der Betreiber Schweizerischer Abfallverwertungsanlagen VBSA, Bern, 2017.
- [19] K. Imbach und A. Keel, „Entsorgung von Holzaschen - Stand der Dinge 2. Juli 2017,“ Holzenergie Schweiz, Zürich, 2017.
- [20] S. Eberhard, „E-Mail an Frau Kaarina Schenk vom BAFU,“ Eberhard AG, Regensdorf, 2017.
- [21] K. Pohlandt-Schwandt und R. Marutzky, „Verfahren zur Verringerung des löslichen Chromatgehalts von Holzaschen“. Deutschland Patent DE19750894 C2, 15 Februar 2001.
- [22] A. Schneider, „Reduktion von Cr(VI) in Holzasche durch Eisensulfat - KRONOS ecochem,“ Holzaschekongress, Filderstadt, 2017.
- [23] A. Maltas und S. Sinaj, „Holzasche: ein neuer Dünger für die Landwirtschaft,“ *Agrarforschung Schweiz*, Nr. 5, pp. 232-239, 2014.
- [24] S. Haase, „Kalkbedarf in der Landwirtschaft und die Möglichkeit der Deckung durch Holzasche (Vortragsunterlagen Holzaschekongress 2017),“ Amt für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten Wertingen, Filderstadt, 2017.
- [25] L. van Aaken, „Nährstoffbewertung von Holz- bzw. Pflanzenaschen - Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V.,“ Holzasche Kongress 2017, Leinfelden-Stetten, 2017.



- [26] R. Bunge, „Bindemittel zur Bodenstabilisierung (Factsheet),“ Hochschule für Technik Rapperswil, Institut für Umwelt- und Verfahrenstechnik UMTEC, Rapperswil, 2014.
- [27] M. Kolb, B. Franssen und T. Gschwind, „Zugabe von Asche aus Holzheizkraftwerken in den Faulturm von Kläranlagen,“ *EntsorgungsPraxis*, pp. 35-36, 1998.
- [28] O. Rentz, K. Gütling und U. Karl, „Erarbeitung der Grundlagen für das BVT-Merkblatt Grossfeuerungsanlagen im Rahmen des Informationsaustausches nach Art. 16(2) IVU-Richtlinie - Forschungsvorhaben im Auftrag des Umweltbundesamtes,“ Deutsch-Französisches Institut für Umweltforschung Universität Karlsruhe (TH), Karlsruhe, 2002.
- [29] OECD, „Municipal waste - OECD Statistics (database),“ OECD, 2015.
- [30] Bundesamt für Umwelt BAFU, „Abfallmengen und Recycling 2015 im Überblick,“ Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern, 2017.
- [31] P. Lienemann und W. Vock, „Elementgehalte in Holzaschen und Validierung der Holzaschenkontrolle,“ Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften, Institut für Chemie und Biologische Chemie, Wädenswil, 2013.
- [32] R. Bunge und M. Behl, „Bindemittel zur Bodenstabilisierung (UMTEC Factsheet),“ Hochschule für Technik Rapperswil HSR, Institut für Umwelt- und Verfahrenstechnik UMTEC, Rapperswil, 2014.
- [33] B. Gras und G. u. U. I. f. H. u. U. Hamburger Landesinstitut für Lebensmittelsicherheit, „Untersuchung von Holzaschen aus Kleinfeuerungsanlagen - Erkennen von Brennstoffmissbrauch,“ Freie und Hansestadt Hamburg, Behörde für Soziales, Familie, Gesundheit und Verbraucherschutz, Hamburg, 2006.
- [34] Bundesamt für Umwelt BAFU, „Sonderabfallstatistik 2015 - Im Inland behandelte Abfälle aus der Schweiz,“ Bundesamt für Umwelt BAFU, Abteilung Abfall und Rohstoffe, Bern, 2016.
- [35] Bachema, „TOC400 - neue DIN-Norm für die Gehaltsbestimmung von organischem Kohlenstoff,“ Bachema, Schlieren, 2016.
- [36] B. f. U. BAFU, „Erhebung Kehrrichtzusammensetzung 2012,“ Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern, 2012.

8 Abbildungen

Abb. 2-1:	Klassifikation Holz- / Nicht-Holzbrennstoffe gemäss LRV	2
Abb. 2-2:	Thermisch genutzte Holzmengen im Jahr 2015	3
Abb. 2-3:	Illustration Holz- und Nichtholzbrennstoffe.....	3
Abb. 2-4:	Übersicht der verschiedenen Feuerungssystemen.....	4
Abb. 2-5:	Jährlicher Ascheanfall gegliedert in Anlagenkategorien	5
Abb. 2-6:	Jährlicher Ascheanfall von automatischen Feuerungen >50kW	5
Abb. 2-7:	Schematische Darstellung der verschiedenen Aschenarten.....	6
Abb. 2-8:	Schema Holzascheentsorgung nach VVEA	9
Abb. 2-9:	Wirkungsbereiche VVEA Anhang 5.....	10
Abb. 3-1:	Stoffflussanalyse mittlere bis grosse Feuerungsanlagen im Kt. Bern	12
Abb. 3-2:	Stoffflussanalyse kleine Feuerungsanlagen im Kt. Bern	12
Abb. 5-1:	Mögliche Verwertungswege für Holzaschen.....	21
Abb. 10-1:	Definition der Holz- und Nichtholzbrennstoffe gemäss LRV.....	28
Abb. 10-2:	Kant. Verteilung der inst. Feuerungsleistung & des Anlagenbestands	31

9 Tabellen

Tab. 2-1: Typische Leistungsbereiche der oben genannten Feuerungstechniken	4
Tab. 10-1: Eigenschaften der Elementgehalte biogener Festbrennstoffe	32

10 Anhang

10.1 Definition Holzbrennstoffe LRV

Gemäss der Luftreinhalteverordnung LRV werden Holz- und Nichtholzbrennstoffe wie folgt definiert:

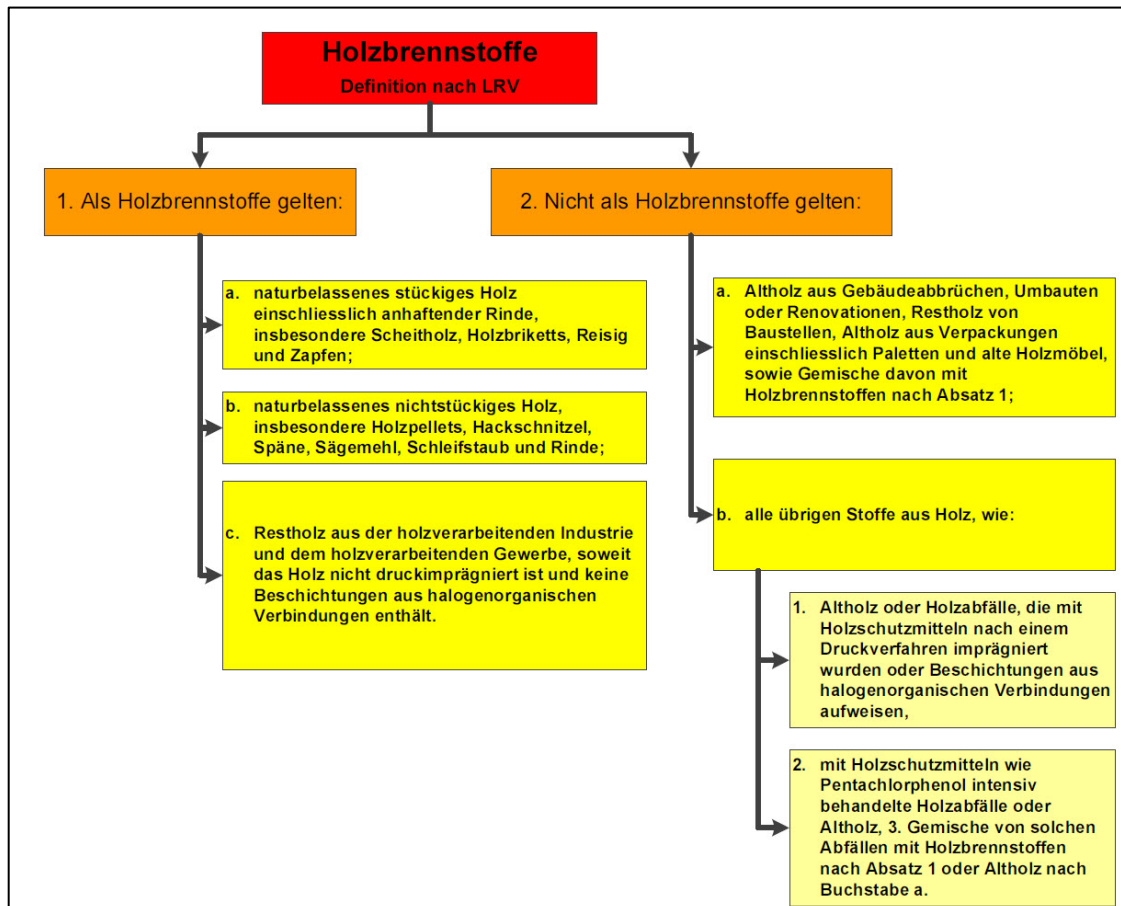


Abb. 10-1: Definition der Holz- und Nichtholzbrennstoffe gemäss LRV [1].

10.2 Feuerungssysteme

10.2.1 Festbettfeuerungen

Zu den Festbettverbrennungssystemen gehören Unterschubfeuerungen und Rostfeuerungen. Die Brennstofftrocknung, die Vergasung und der Holzkohleausbrand erfolgt über die Primärluft, welche durch das Brennstoffbett geleitet wird. Die erzeugten brennbaren Gase werden nach Zufuhr der Sekundärluft ausgebrannt [1].

Vorteile der Festbettfeuerungstechniken [1]:

- Grosses Spektrum der Brennstoffgrösse (50 bis 300 mm)
- Geringe Betriebs- und Investitionskosten
- Abgas enthält wenig Staub
- Guter Ausbrand der Flugasche
- Verschlackungsanfälligkeit der Anlagen gering

Nachteile der Festbettfeuerungstechniken [1]:

- Problematisch ist unterschiedlich feuchtes Brenngut
- Ungeeignet für sehr feinkörnige Brennstoffe
- Verhältnismässig ungleichmässige Verbrennungsbedingungen
- Effiziente NO_x-Reduktion ohne spezifische Technologie nicht möglich

Unterschubfeuerung

Die Unterschubfeuerung ist die am häufigsten verwendete Feuerungstechnik für Holzbrennstoffe. Aus Kostengründen kommen Unterschubfeuerungen oft für kleinere Leistungen (100 kW – 2.5 MW) zum Einsatz. Bei Unterschubfeuerungen wird der Brennstoff von unten in den Feuerraum eingetragen. Dieses Verfahren wird besonders für feinkörnige Holzbrennstoffe verwendet. Aufgrund der schwierigen Aschenaustragung aus dem Feuerraum eignet sich die Unterschubfeuerung jedoch nur für sehr aschearme Brennstoffe. Aufgrund der begrenzten technischen Möglichkeiten der Brennstoffzufuhr über Förderschnecken ist die Kesselnennleistung von Unterschubfeuerungen nach oben hin begrenzt (bis 2.5 MW). Wird jedoch der für die Technologie geeignete Leistungsbereich nicht überschritten, sind die Investitionskosten niedriger als bei Rostfeuerungen [1].

Rostfeuerungen

Bei Rostfeuerungen lassen sich die Brennstoffe mit Hilfe eines Kolbens oder Schiebers in die Feuerung einschieben. In grösseren Holzfeuerungsanlagen (>70 kW) werden als Verbrennungsroste fast ausschliesslich Schrägroste mit beweglichen Roststäben eingesetzt. Mittels der beweglichen Roststäbe wird die Brennstoffschicht durch die verschiedenen Verbrennungszonen in die Ausbrandzone bewegt und brennt dabei aus. Die anfallende Verbrennungasche wird am hinteren Rostende in einem Trichter aufgefangen und in einen mit Wasser gefüllten Nassentascher geleitet [1].

Für eine vollständige Verbrennung ist es wichtig, dass der Brennstoff gleichmässig über die gesamte Breite des Rostes verteilt wird. So werden ungleichmässige Verbrennungsabläufe, die zu erhöhten NO_x- und CO-Emissionen führen können, vermieden. Rostfeuerungen werden mit Unterwind (Primärluft) betrieben. Die von unten zugeführte Luft wird zwischen den Roststäben zum Brennstoff geleitet. Die Luftmenge kann entlang der Rostzonen variiert werden. Dadurch bilden sich über die Rostlänge verschiedene

Verbrennungszonen aus. Am Anfang des Rostes wird vorgewärmte Verbrennungsluft zugeführt, wodurch der Brennstoff getrocknet und eine sichere Zündung gewährleistet wird. Darauf folgt die Hauptverbrennungszone, wo die grösste Luftmenge zugeführt wird. In der letzten Zone, der sogenannten Ausbrandzone, strömen nur noch geringe Luftmengen hinzu, die für einen vollständigen Ausbrand der Rückstände nötig sind. Die Luftmenge wird jeweils an die Brennstoffmenge und Feuchtigkeit des Holzes angepasst. Ebenso wird die Fördergeschwindigkeit an die Qualität des Brennstoffes angepasst [1].

10.2.2 Wirbelschichtfeuerung

Bei der Wirbelschichtfeuerung wird das Brennstoffgut über Düsen, die im sogenannten Anströmboden angebracht sind, deutlich stärker mit vorgewärmter Luft angeströmt als bei der Festbettfeuerung. Dadurch werden die Festbrennstoffe zusammen mit einem körnigen Inertstoff, dem Bettmaterial (meist ein Sand-Asche-Gemisch), aufgewirbelt. Die Teilchen werden so in einen Schwebeszustand (Fluidisierung) versetzt. Die freigesetzte Verbrennungswärme wird durch das Bettmaterial aufgenommen und es entsteht eine homogene Temperaturverteilung im gesamten Wirbelbett. Je nachdem mit welcher Geschwindigkeit die Anströmluft in das Feststoffbett geleitet wird, kann zwischen zwei verschiedenen Ausführungsformen der Wirbelschichtfeuerung unterschieden werden: stationäre und zirkulierende Wirbelschichtfeuerungen. Werden dem Feststoffbett Luftströme mit einer Geschwindigkeit zwischen 1 bis 2 m/s zugeführt, sodass das Gemisch aus Brennstoff und Bettmaterial in Schwebelage gehalten wird, spricht man von einer stationären Wirbelschichtfeuerung. Dabei findet die Entgasung und Vergasung des Brennstoffs und der Abbrand des festen Kohlenstoffs im Wirbelbett statt. Der grösste Teil der Asche wird als Flugasche in einer Entstaubungseinrichtung abgeschieden. Im Gegensatz dazu liegt bei der zirkulierenden Wirbelschichtfeuerung die Geschwindigkeit des zugeführten Gasstroms zwischen 4.5 und 7 m/s. Dadurch wird das Bettmaterial zusammen mit den Rauchgasen aus dem Feuerraum ausgetragen und über einen Zyklonabscheider geführt. Rauchgase werden im Zyklonabscheider von Feststoffpartikeln weitgehend getrennt. Bettmaterial und grobe Asche werden in den unteren Bereich des Feuerraumes zurückgeführt [1].

Vorteile der Festbettfeuerungstechniken [1]:

- Gleichzeitige Verbrennung verschiedener Brennstoffe mit stark unterschiedlichen Eigenschaften möglich
- Problemloses Verbrennen von Brennstoffen mit hohem Wasser- und Aschegehalt
- Vollständiger Ausbrand aufgrund homogener Betttemperaturen
- Effiziente NO_x-Reduktion durch Zugabe von Stufenluft (Sekundärluft) und tiefere Verbrennungstemperaturen
- Abrasive Wirkung der Partikel des Bettmaterials verhindern Verschlackungen an den Feuerraumwänden

Nachteile der Festbettfeuerungstechniken [1]:

- Hohe Betriebs- und Investitionskosten
- Rauchgas mit hoher Staubbelastung
- Verlust von Bettmaterial mit der Asche durch teilweisen Austrag von Bettmaterial

10.2.3 Vergasung

Bei der Holzvergasung wird Holz in einem Vergasungsreaktor zersetzt, indem es unter Luftmangel teilweise verbrannt wird. Die maximale Holzstückgrösse bei der Holzvergasung liegt bei 80 mm Länge. Der Vergasungsreaktor wird mit Holz beschickt. Innerhalb des Holvergaser sinkt das Holz kontinuierlich ab und durchläuft dabei Zonen der Trocknung, der Vergasung, der Oxidation und der Reduktion. Das dadurch entstehende Holzgas enthält brennbare Gasanteile von je etwa 20 % Wasserstoff und Kohlenmonoxid, sowie etwa 3 % Methan. Über eine Austragungsschnecke werden Asche und Holzkohle ausgeschieden, wobei die Kohle wieder dem Vergasungsreaktor zugeführt werden kann. Anschliessend durchläuft das Holzgas einen Zyklon, der die groben Partikel abtrennt.

10.3 Brennstoffes angepasst. Automatische Holzfeuerungen >50 kW

Gemäss der Schweizer Holzenergiestatistik führt der Kanton Bern die Rangliste der Anzahl automatischer Holzfeuerungen > 50 kW [2] an. Neben der installierten Leistung ist in Abb. 10-2 auch die Anzahl der vorhandenen Holzfeuerungen dargestellt.

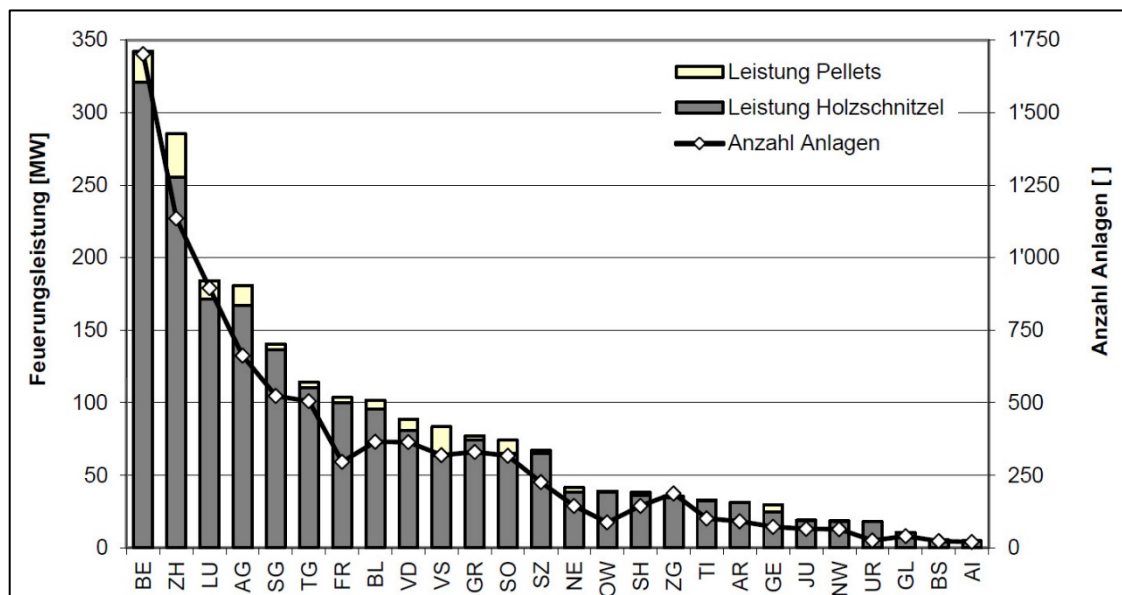


Abb. 10-2: Automatische Feuerungen > 50 kW, kantonale Verteilung der installierten Feuerungsleistung und des Anlagenbestands.

10.4 Einfluss Elementgehalt des Festbrennstoffs

In Tab. 10-1 ist der Einfluss der verschiedenen chemischen Elementen der Festbrennstoffe auf die Verbrennung aufgeführt. Man kann der Tabelle z.B. entnehmen, dass ein hoher Siliziumgehalt im Festbrennstoff zu einer erhöhten Aschebildung führt oder ein hoher Chlorgehalt in der Verbrennung erhöhte Emissionen von halogenorganischen Verbindungen verursacht.

Tab. 10-1: Qualitätsrelevante Eigenschaften der Elementgehalte biogener Festbrennstoffe [10]

Element	Einfluss auf die Verbrennung
Kohlenstoff (C), Wasserstoff (H), Sauerstoff (O)	Heizwert, Brennwert, Luftbedarf
Stickstoff (N)	NO _x - und N ₂ O-Emissionen
Schwefel (S)	SO _x -Emissionen, Hochtemperaturkorrosion, Partikelemissionen
Chlor (Cl)	Emissionen von HCl und halogenorganischen Verbindungen (z. B. bei PCDD/F-Bildung), Partikelemissionen
Kalium (K)	Ascheerweichungsverhalten, Hochtemperaturkorrosion, Partikelemissionen
Natrium (Na)	Partikelemissionen
Magnesium (Mg) & Kalzium (Ca)	Ascheerweichungsverhalten, Ascheeinbindung von Schadstoffen, Ascheverwertung, Partikelemissionen
Silizium (Si)	Aschegehalt, Ascheerweichungsverhalten
Schwermetalle ¹	Ascheverwertung, Schwermetallemissionen, z. T. katalytische Wirkung (z. B. bei PCDD/F-Bildung), Partikelemissionen

¹ Relevante Schwermetalle sind Arsen (As), Cadmium (Cd), Chrom (Cr), Kupfer (Cu), Quecksilber (Hg), Nickel (Ni), Blei (Pb), Vanadium (V), Zink (Zn)