



UMSETZUNG DER KLIMAVERTRÄGLICHEN BIOMASSE-VERWERTUNG (LAUB UND MÄHGUT) IN BERLIN

Kurzfassung



EUROPÄISCHE UNION

Europäischer Fonds für
regionale Entwicklung

Senatsverwaltung
für Umwelt, Verkehr
und Klimaschutz

BERLIN





UMSETZUNG DER KLIMAVERTRÄGLICHEN BIOMASSE-VERWERTUNG (LAUB UND MÄHGUT) IN BERLIN

KURZFASSUNG

ERSTELLT FÜR:

**Senatsverwaltung für Umwelt, Verkehr und Klimaschutz
Brückenstraße. 6
10179 Berlin**

ERSTELLT VON:

ICU - INGENIEURCONSULTING UMWELT UND BAU

Dr. Wiegel, März und Partner Ingenieure
Wexstraße 21
10715 Berlin



IN KOOPERATION MIT:

u.e.c. Berlin / Oetjen-Dehne und Partner
Umwelt- und Energie Consult GmbH
Levetzowstraße 10a, 10555 Berlin

Das Vorhaben „Umsetzung einer klimaverträglichen Biomasseverwertung“ (Projektlaufzeit: 02/2017 bis 04/2020) wird im Berliner Programm für Nachhaltige Entwicklung (BENE) gefördert aus Mitteln des Europäischen Fonds für Regionale Entwicklung und des Landes Berlin (Förderkennzeichen 1161-B5-O)



EUROPÄISCHE UNION
Europäischer Fonds für
regionale Entwicklung

BERLIN, DEN 05.10.2021

INHALT

INHALT	I
TABELLENVERZEICHNIS	II
ABBILDUNGSVERZEICHNIS	II
1 VERANLASSUNG	1
2 ABFALLAUFKOMMEN UND TREIBHAUSGAS (THG) - WIRKUNGEN	1
3 BISHERIGE OPTIONEN DER HÖHERWERTIGEN VERWERTUNG	2
4 BESCHREIBUNG DES AUFBEREITUNGSVERFAHRENS FÜR GRAS/LAUB	3
5 QUALITÄT DER BRENNSTOFFE	5
6 GROßTECHNISCHE VERBRENNUNGSVERSUCHE	6
6.1 BTB GmbH / HKW Schöneweide	6
6.2 Fernheizwerk Neukölln GmbH / FHW Neukölln	7
6.3 Vattenfall Europe Wärme AG / HKW Moabit	7
6.4 Fazit zu den Verbrennungs-Großversuchen	8
7 KOSTENBETRACHTUNG	9
8 ERZIELBARE KLIMAGAS- UND RESSOURCENEINSPARUNG ..	10
9 AUSTAUSCH MIT DEM CARBOTIP-PROJEKT	11
10 ZUSAMMENFASSUNG / WEITERE ARBEITSSCHRITTE	12

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Übersicht Rohstoffmengen, spezifische THG Wirkungen der IST-Verwertung und stoffliche Qualitäten	2
Tabelle 2 Brennstoffanalysen von Gras- und Laub-Brennstoff im Vergleich zu DIN 17225-6.....	5
Tabelle 3 Übersicht der Verbrennungsversuche	6
Tabelle 4 Übersicht über die Betriebskosten einer Demonstrationsanlage	9

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Verfahrensschritte des florafuel-Verfahrens (Diagramm: florafuel).....	3
Abbildung 2 Massen-/Energiebilanz je 1 Mg Input Grünrest (Diagramm: ICU)	4
Abbildungen 3 Aufbereitungszustände Pellet, Taler (Bild links: ICU), Brikett (Bild rechts: florafuel)	5
Abbildung 4 Beladung Schiff, Zustand Brennstoff in der Schute (Bilder: Vattenfall)	8
Abbildung 5 THG - Wirkung der Grünrest-Aufbereitung (Grafik: ICU)	10
Abbildung 6 Karbonisierung von Pflanzenresten (Bild: R. Wagner/FU-Berlin)	11

1 Veranlassung

In dem im Juni 2021 vom Berliner Abgeordnetenhaus beschlossenen Abfallwirtschaftskonzept 2020 bis 2030 werden in Abschnitt 6.1.2.4 Treibhausgas Emissionen aus der bisherigen Einfachkompostierung von Laub und Grasschnitt angesprochen und zum Fazit geführt: „Die Behandlung von Berliner Grasschnitt- und Laubabfällen in solchen Einfachkompostierungsanlagen ist daher bis Ende 2022 zu beenden“. Auch das Berliner Energie- und Klimaschutzprogramm des Landes Berlin fordert, diese Abfälle vollständig einer höherwertigen Verwertung zuzuführen, um weitere Klimagasentlastungen für das Land Berlin zu erzielen. Die bei den öffentlichen Berliner Einrichtungen und Unternehmen anfallenden Mengen an krautigen Grünresten betragen rd. 117.000 Mg/a, davon entfallen auf Mähgut und Laub mit etwa 103.000 Mg/a rd. 88%, den restlichen Betrag bilden Straßenbegleitgrün und Laubsäcke der Berliner Stadtreinigung (BSR). Derzeit werden diese Mengen in einfachen, offenen Kompostierungsanlagen mit hohen Emissionen an Treibhausgasen wie Methan und Lachgas im Land Brandenburg entsorgt. Die Gesamtklimabelastung dieses Entsorgungsweges, auch unter Berücksichtigung der Klimaentlastungen durch den erzeugten Kompost, liegt bei rd. 8.800 Mg CO₂-Äq/a, auf Laub und Mähgut entfallen davon rd. 7.600 Mg CO₂-Äq/a.

Für die höherwertige, klimaentlastende Verwertung der genannten Abfälle wurden bislang die Vergärung, die direkte Verbrennung, die Aufbereitung in Hausmüll-Behandlungsanlagen und die Hydrothermale Karbonisierung (HTC) untersucht. Teils aus verfahrenstechnischen, teils aus Kostengründen konnte sich bislang keines dieser Verfahren durchsetzen.

Im vorliegenden Forschungsvorhaben wurde der Weg untersucht, die Grünreste über ein mechanisches Pressverfahren zu Brennstoff aufzubereiten und diesen dann in bestehenden Kraftwerken als Kohleersatz einzusetzen. Dazu wurden in einer bereits bestehenden Aufbereitungsanlage der Firma florafuel AG für Laub und Gras in der Nähe von München ausreichende Mengen an Brennstoff produziert und für großtechnische Verbrennungsversuche in Berlin eingesetzt werden.

Die hier zusammengefassten Ergebnisse des Projektes betreffen:

- Mengen an Mähgut und Laub in Berlin,
- Bewertung der bestehenden Aufbereitungs- und Verwertungsanlagen in Berlin,
- Beschreibung und Massen/Energiebilanz des Aufbereitungsverfahrens
- Qualitätsanforderungen, Durchführung und Auswertung von großtechnischen Verbrennungsversuchen in geeigneten thermischen Anlagen in Berlin,
- Darstellung der erzielbaren Klimagas- und Ressourceneinsparungen im Land Berlin,
- Zusammenfassung und weitere Arbeitsschritte.

2 Abfallaufkommen und Treibhausgas (THG) -Wirkungen

Die betrachteten Stoffströme sind:

- **Laub** - als Straßenlaub der BSR sowie Grünflächenlaub insbesondere der Bezirke,
- **Grasschnitt** - überwiegend als **Mähgut**, nachrangig **Straßenbegleitgrün** der BSR,
- **Laubsackinhalte** - organische Gartenabfälle des BSR-Sacksammelsystems.

Diese Grünreste werden derzeit fast ausschließlich kompostiert. Der Energiegehalt geht dabei verloren, und durch die klimawirksamen Emissionen, die durch die Kompostgutschriften nur anteilig neutralisiert werden, resultieren netto verschiedene hohe Treibhausgasbelastungen.

Tabelle 1 fasst die Mengen, spezifischen und summierten CO₂-Äq-Belastungen sowie stoffliche/energetische Orientierungswerte der beiden Abfallarten zusammen.

Tabelle 1 Übersicht Rohstoffmengen, spezifische THG Wirkungen der IST-Verwertung und stoffliche Qualitäten

	Einheit	Laub / Stra- ßenlaub	Mähgut	Laubsäcke	Straßenbegleit- grün BSR	Summe/Mittel	Summe/Mittel Laub + Mähgut
Menge 2018	Mg/a	58.928*	43.600	6.639*	7.792*	116.959	102.528
IST CO₂-Äq-Belastung	kg/Mg IST	52	101	44	101	73	73
	Mg/a IST	3.064	4.389	292	787	8.532	7.479
Heizwert	MJ/Mg FS	3.800	2.200	4.700	2.200		
TS	% FS	30%	25%	45%	25%		
oTS	% TS	60%	85%	65%	85%		
C fossil	% FS	0%	0%	0,2%	0%		

* Veränderungen gegenüber älteren Angaben, da aktuellere Entsorgungsbilanz für das Jahr 2018 der BSR vorliegt

Da das in diesem Bericht hauptsächlich diskutierte Aufbereitungsverfahren bislang ausschließlich Erfahrungen mit *Laub und Mähgut* gesammelt hat, wird in den nachfolgenden Kapiteln und speziell in der THG-Bewertung auf diese beiden Fraktionen fokussiert. Die jährliche THG-Gesamtbelastung durch die derzeitige Verwertung liegt für diese beiden Fraktionen bei **7.479 Mg CO₂-Äq**.

3 Bisherige Optionen der höherwertigen Verwertung

Die Kompostierung stellt derzeit die IST-Verwertung dar, die wie oben angegeben netto eine THG-Belastung aufweist. Alternativ können die Stoffströme Grasschnitt und Laub einer höherwertigen Verwertung zugeführt werden, indem sie vergoren oder entweder im Rohzustand oder nach Aufbereitung verbrannt werden. Für die direkte Verbrennung kommen grundsätzlich sowohl Abfallverbrennungsanlagen als auch Biomasse-Heizkraftwerke in Betracht. Alternativ ist eine Aufbereitung zu Brennstoff möglich, dies wurde für die Hausmüll-Aufbereitungsanlagen zur Brennstofferzeugung (MPS, MBS) in Versuchen erprobt, daneben über die hydrothermale Karbonisierung (HTC).

Die oben beschriebenen, zur klimaentlastenden Verwertung von Grünresten zunächst geeignet erscheinenden Verfahren stießen zusammengefasst auf folgende Hemmnisse:

- Die Co-Vergärung in NawaRo-Anlagen ist aus verfahrenstechnischen Gründen nicht einsetzbar, da Laub keine nennenswerte Gasbildung zeigt und das Mähgut wegen seiner Heterogenität aus Gründen der biologischen Betriebssicherheit unerwünscht ist.
- In Anlagen der Hausmüllbehandlung stehen der Mitverarbeitung insbesondere Kostengründe entgegen, aufgrund der höherpreisig verfügbaren Hausmüllmengen,
- Bei der HTC sind die Abwasserproblematik und das Energiemanagement derzeit noch nicht zufriedenstellend gelöst.

Diese kritischen Betrachtungen stellen nicht in Frage, dass in den o.g. Verfahrensbereichen weitere Einsatzmöglichkeiten erschlossen werden können. Auch bei optimistischen Annahmen werden diese allerdings nicht im Entferntesten eine Gesamtkapazität erreichen, die dem

Mengenaufkommen von über 100.000 Mg/a gerecht werden könnte. Insofern ist die Suche nach weiteren Alternativen geboten.

4 Beschreibung des Aufbereitungsverfahrens für Gras/Laub

Der Fokus der Untersuchungen in diesem Projekt lag auf den Brennstoffen des sog. „Pressverfahrens“. Darunter wird die Aufbereitung von Grünresten unter Einsatz von mechanischer und thermischer Energie zur Reduzierung des Feuchtegehalts sowie zur Verpressung und somit zur Energiedichteerhöhung verstanden. Integriert im Prozess werden lösliche Salze und Inertstoffe abgetrennt. Das Verfahren wird insofern als aussichtsreich angesehen, da – im Gegensatz zum HTC-Verfahren – die thermische Neubildung biologisch nicht oder nur schwer abbaubarer Abwasserkomponenten umgeht. Die Rückgewinnung von Prozessenergie in der Aufbereitung entfällt ebenfalls, da das Verfahren bis zur mechanischen Entwässerung „kalt“, d.h. bei Umgebungstemperatur arbeitet.

Die in den Verbrennungs-Großversuchen eingesetzten Brennstoffe wurden in einer Pilotanlage der florafuel AG in Grasbrunn (bei München) produziert, die eingesetzten Abfallstoffe sind nach saisonalem Anfall Laub und Mähgut.

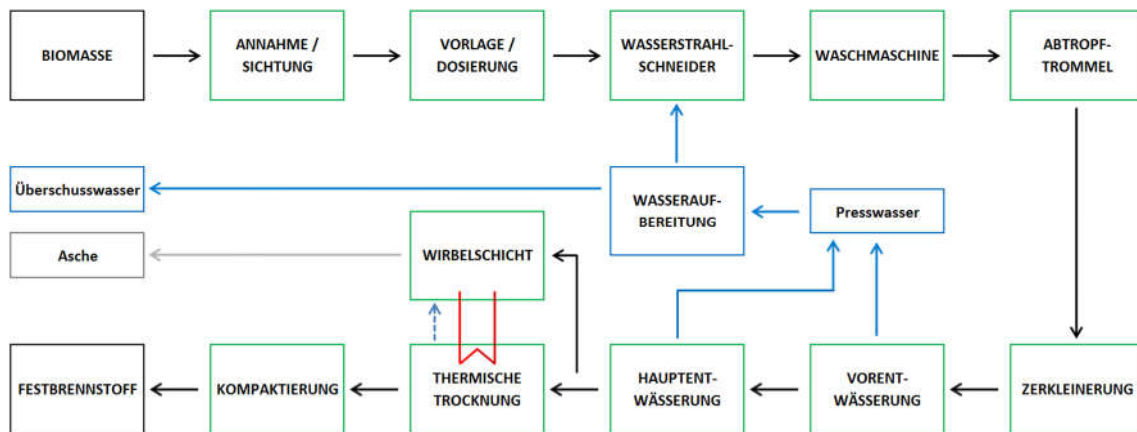


Abbildung 1 Verfahrensschritte des florafuel-Verfahrens (Diagramm: florafuel)

Zunächst wird das rohfeuchte Laub/Gras in einen Vorlagebehälter eingebracht und über eine Trogschnecke der Aufbereitungsanlage zudosiert. Das Laub/Gras wird durch eine Wasserstrahleinheit zerkleinert.

Das zerkleinerte Rohgut wird nachfolgend gewaschen und dabei von Sand/Inertstoffen (als Sinkstoffe) befreit.

Über den intensiven Aufschluss in der wässrigen Phase wird der Gehalt an Salzen im Brennstoff vermindert: bei Chlor um 90 % und für Kalium um 80% gegenüber der Input-TS. Das Korrosionsrisiko wird durch den Chlorausgang minimiert, der Ascheschmelzpunkt wird durch den Kaliumentzug auf deutlich über 1.000 °C erhöht.

Es folgt eine Absiebung zur Abtrennung des Waschwassers, gefolgt von einer Nachzerkleinerung, durch die das Material über Schneckenpressen besser entwässerbar wird. Nach der mechanischen Entwässerung liegen die Wassergehalte bei 40-47%.

Im Mittel der beiden Stoffströme an Gras und Laub ergibt sich eine mengenspezifische **Massen-/Energiebilanz** je Mg Input gemäß nachfolgender Übersicht.

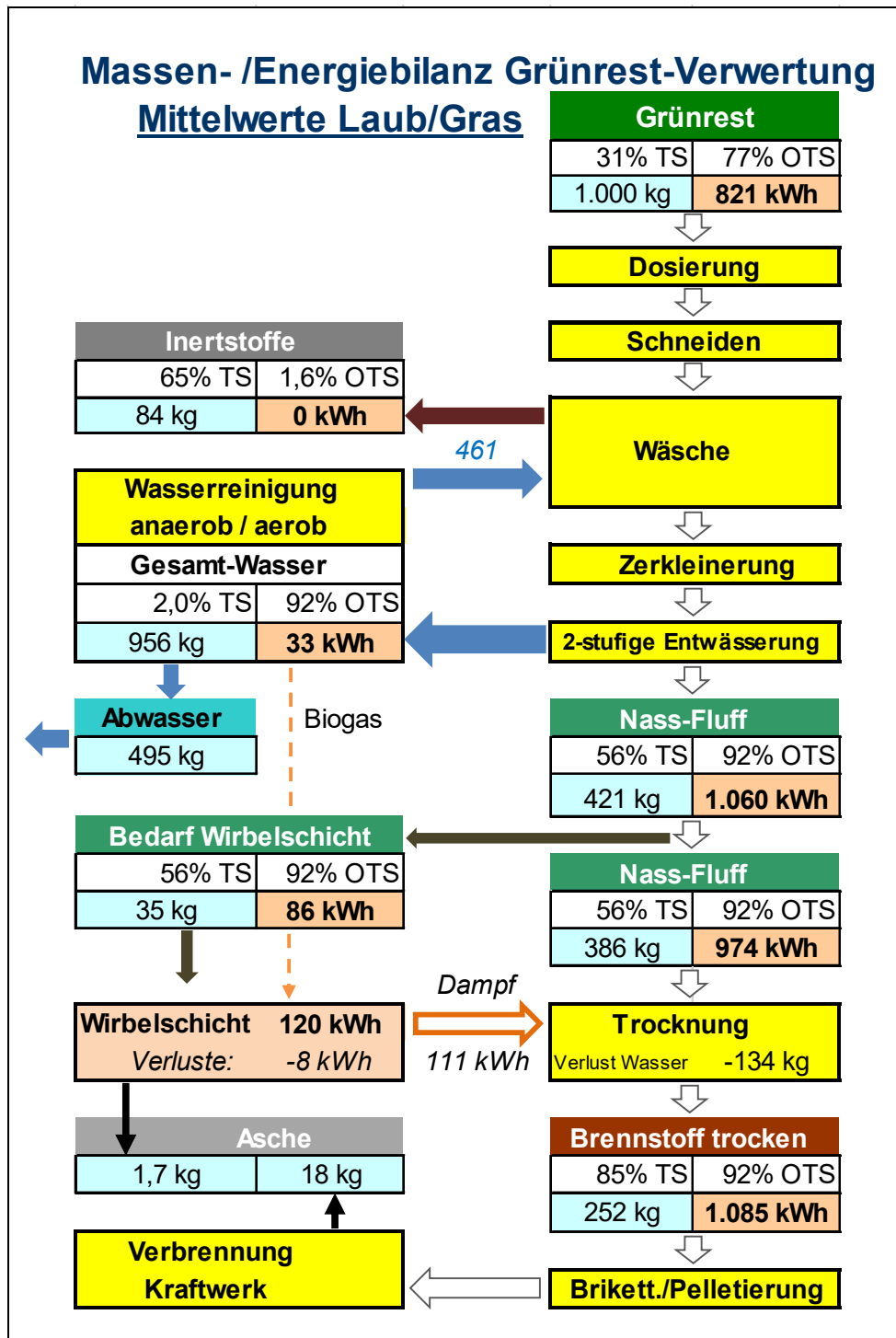


Abbildung 2 Massen-/Energiebilanz je 1 Mg Input Grünrest (Diagramm: ICU)

Danach werden vom Input rd. 65 % als Wasser über Entwässerung und Trocknung abgetrennt, rd. 10 % entfallen als Inertstoffe und Material zur anlageninternen Energieerzeugung, rd. 25% vom Input verbleiben als Brennstoff.

Das Überschusswasser aus Siebung und Abpressung wird über eine installierte Anaerob/Aerob-Abwasserreinigung soweit gereinigt, dass es sowohl als Kreislaufwasser für den Wasserstrahlschneider genutzt werden kann als auch für das Überschusswasser die Allgemeinen Einleitbedingungen der Berliner Wasserbetriebe erfüllt.

Der entwässerte Faserstoff wird über ein eigenentwickeltes Trocknersystem auf einen TS - Gehalt von ca. 85 % getrocknet. Zur Bereitstellung der Trocknungswärme dient eine verfahrenseigene kleine Wirbelschichtfeuerung. Nach Austrag aus dem Trockner wird das Fasergut zur Pelletierung / Brikettierung übergeben. Als Output sind verschiedene Brennstoffausführungen realisierbar: Pellet, Taler und Brikett.



Abbildungen 3 Aufbereitungszustände Pellet, Taler (Bild links: ICU), Brikett (Bild rechts: florafuel)

5 Qualität der Brennstoffe

Die Pellets können in ihren Abmaßen denen von Holzpellets gleichgesetzt werden und halten die für Holzpellets geltenden Anforderungen der DIN EN 14961-6 ein:

Tabelle 2 Brennstoffanalysen von Gras- und Laub-Brennstoff im Vergleich zu DIN 17225-6

Auszug aus DIN 17225-6				Bio-Brennstoff	
Eigenschaftsklasse	Einheit	Klasse A	Klasse B	Gras	Laub
Wassergehalt	% FM	≤ 12,0	≤ 15,0	11,5	12,3
Aschegehalt	% TS	≤ 6	≤ 10	6,9	12,2
Heizwert	MJ/kg	≥ 14,5	≥ 14,5	15,6	15,5
Stickstoff	% TS	≤ 1,5	≤ 2,0	1,21	1,3
Schwefel	% TS	≤ 0,20	≤ 0,30	0,12	0,16
Chlor	% TS	≤ 0,10	≤ 0,30	0,057	0,062
Arsen	mg/kg	≤ 1	≤ 1	0,41	< 1
Cadmium	mg/kg	≤ 0,5	≤ 0,5	0,1	0,2
Chrom	mg/kg	≤ 50	≤ 50	8,3	11,0
Kupfer	mg/kg	≤ 20	≤ 20	13,0	28,9
Blei	mg/kg	≤ 10	≤ 10	5,30	9,58
Quecksilber	mg/kg	≤ 0,1	≤ 0,1	0,021	< 0,07
Nickel	mg/kg	≤ 10	≤ 10	2,77	4,03
Zink	mg/kg	≤ 100	≤ 100	67,0	91,4
Asche-Erweichungspunkt	°C	anzugeben		1.150	>1.000

Von den beteiligten Berliner Energieversorgungsunternehmen wurde diese chemisch-analytische Beschaffenheit als zufriedenstellend für die Versuchsdurchführung eingestuft.

6 Großtechnische Verbrennungsversuche

Erstes Ziel beim Einsatz von Biobrennstoffen ist der Ersatz von klimabelastender Kohle, von der jährlich in Berlin rd. 2,8 Mio. Mg eingesetzt werden. Insofern wurden die Versuche mit Grünrest-Brennstoffen in (Stein)Kohle-betriebenen Heizkraftwerken durchgeführt, die mit der hauptsächlich verwendeten Wanderrost- und Wirbelschichtkesseltechnologie ausgestattet sind.

Das Hauptziel der Verbrennungs- bzw. Förder-Versuche bestand darin, die technische Eignung der Brennstoffe für die jeweiligen Feuerungsanlagen zu untersuchen bzw. nachzuweisen. Außerdem sollten die Versuche Erkenntnisse in folgenden Bereichen liefern:

- Eignung der Förder-, Transport- und Rauchgasreinigungstechnik,
- Verbrennungsverhalten, thermische Leistung sowie Ausbrandverhalten,
- Zusammensetzung der anfallenden Rückstände (Schlacke und Flugasche),
- Messung der nach TA-Luft bzw. BImSchV vorgegebenen Schadgaskomponenten mind. im Reingas, soweit technisch interessierend auch im Rohgas.

Die Übersicht der Versuche und die zentralen verbrennungstechnischen Ergebnisse zeigt die nachfolgende Tabelle.

Tabelle 3 Übersicht der Verbrennungsversuche

Kraftwerk	Feuerung	Material	Menge	Ergebnis
HKW Schöneweide 2017	Wanderrost	Taler	40 Mg	In 1:1 Mischung mit Holzpellets gut verbrennbar
HKW Schöneweide 2019 Langzeitversuch	Wanderroste	Taler	120	Versuch wg. offenem Standortkonzept zunächst abgesagt
FHW Neukölln 2018	Wanderrost	Pellets	20	Bei ungemischten Pellets Probleme in der Verbrennung
HKW Moabit 2017	Wirbelschicht	Taler	65	Verbrennung unproblematisch, hohe Staubentwicklung im Bunker
HKW Moabit 2019	Wirbelschicht	Pellets	13	Staubentwicklung deutlich reduziert, aber noch zu hoch

6.1 BTB GmbH / HKW Schöneweide

Der für den Versuch eingesetzte-Dampferzeuger 2 (DE2) des HKW Schöneweide hat eine Feuerungswärmeleistung von rd. 25 MW_{th} mit einem Steinkohledurchsatz von rd. 3 Mg/h.

Die Konfektionierungsform "Taler" hatte sich nach Vorversuchen als am aussichtsreichsten erwiesen. Von diesen wurden von der florafuel AG insgesamt 40 Mg für den Großversuch produziert und in Bigbags nach Berlin zum HKW Schöneweide transportiert.

Zur Absicherung hielt der Kraftwerksbetreiber zusätzlich eine Menge von rd. 40 Mg Holzpellets vor, um diesen bekannt funktionssicheren Brennstoff im Bedarfsfall zuzumischen.

Bei anfangs 100% Grastaler-Einsatz konnte allerdings die für die Zündung notwendige Hitze aus den Grastalern nicht ausreichend entwickelt werden, das Feuer riss ab. Daher wurde auf eine 50/50 Mischung mit Holzpellets umgestellt. Im Zeitraum dieser konstant gehaltenen Mischungsverbrennung wurden die Grenzwerte der TA Luft überwiegend deutlich unterschritten, bei NO_x mit geringer Unterschreitung eingehalten.

Daraus ist festzuhalten, dass eine Mischung des Brennstoffs mit praxiserprobten Holzpellets eine stabile Feuerung erreichen lässt und die Emissionsgrenzwerte eingehalten werden können. Die BTB wollte daraufhin zunächst in einem weiteren, größeren Dauerversuch die aussichtsreiche Verbrennung des Biobrennstoffs in Mischung mit Steinkohle erproben. Aufgrund von internen Standortstrategien wurde dieser Versuch im Sommer 2019 kurzfristig abgesagt. Derzeit erarbeitet das Unternehmen ein neues Dekarbonisierungskonzept, in dem sich zukünftig nach Aussage der BTB erneut verschiedene Optionen für die Verwertung von Grünrestbrennstoffen ergeben könnten. Weitere Abstimmungen sind geplant.

6.2 Fernheizwerk Neukölln GmbH / FHW Neukölln

Im FHW Neukölln sollte wie analog zu dem Versuch der BTB GmbH die Eignung des Grünrestbrennstoffes in der Wanderrosttechnologie erprobt werden. Der Steinkohledurchsatz liegt hier bei 2,5 Mg/h, der von Holzpellets bei rd. 3,6 Mg/h.

Es wurde vorab auf die Ergebnisse der Versuche bei BTB mit dem technisch ähnlichen Wanderrostsystem hingewiesen, wonach sich eine Monoverbrennung der Grünrestpellets als feuerungstechnisch problematisch erwies. Eine Mischverbrennung mit Holzpellets war im FHW Neukölln jedoch nicht machbar. Daher wurden im Versuch zu 100% Graspellets verbrannt.

Fördertechnisch und hinsichtlich staubbildendem Feinanteil waren die Gras-Pellets (GP) gut geeignet. Bei der zunächst beibehaltenen Einstellung der Feuerung auf Holzpellet (HP)-Betrieb ergaben sich folgende Effekte

- Absinken der Feuerraum-Temperatur von rd. 750°C auf 500° C
- Absinken der Nutzwärmeproduktion von rd. 18 auf unter 10 MW,
- Anstieg der O₂-Konzentration im Rauchgas auf 12- 13%,
- NO_x-Konzentration im Bereich von 500-550 mg/m³.

Trotz Einregelung von Luftzufuhr, Rezirkulationsluft und Rostvorschub waren die Verbrennungsbedingungen nicht zufriedenstellend zu verbessern. Es bestätigte sich somit, dass eine Verbrennung von 100% - Biobrennstoff auf dem Wanderrost nicht durchführbar ist - ein mit 50% Holzpellets vorgemischtem Biobrennstoff erscheint dem Betreiber möglich.

6.3 Vattenfall Europe Wärme AG / HKW Moabit

Das Kraftwerk Moabit besteht aus einer zweilinigen Wirbelschichtfeuerungsanlage mit einer thermischen Gesamtleistung von 240 MW_{th}. Eingesetzt werden können variable Anteile an Steinkohle, Holz hackschnitzeln und Holzpellets.

Für den Verbrennungsversuch wurde die Biomasse-Mitverbrennungslinie „Holz II“ gewählt, eine Brennstoffzufuhr kann hier ausschließlich per Schiffsentladung erfolgen. Im Dezember 2017 wurden rd. 65 Mg Grastaler per LKW im Westhafen angeliefert, dort abgekippt und per Greifer in eine Schute verladen. Anschließend wurde der Brennstoff nach Schiffsentladung in das Biomasse-Zwischenlager eingefördert.

Der Block A befand sich vor Versuchsbeginn in einem 100 % Steinkohlebetrieb. In Abständen von jeweils 10 bis 20 min wurde die Förderleistung an Biobrennstoff gestuft erhöht, bis 34 % der Feuerungswärmeleistung mit einem Durchsatz von rd. 45 m³/h an Biobrennstoff erreicht waren und dann konstant gehalten wurden. In diesem Zeitabschnitt wurden die begleitenden Emissionsmessungen durchgeführt. Es konnten sämtliche Schadgas-Grenzwerte problemlos eingehalten werden.



Abbildung 4 Beladung Schiff, Zustand Brennstoff in der Schute (Bilder: Vattenfall)

Das mehrmalige Umschlagen und der Transport der Grastaler bis in den Vorlagebehälter im Kesselhaus A (Greifereinsatz, Abwürfe, Förderschnecken etc.) führte durch eine starke mechanische Belastung zu einem signifikant steigenden Feinanteil. Es kam zu einer überproportionalen **Staubentwicklung** entlang des gesamten Transportweges und im Bunker.

Daher wurden von der florafuel-AG für einen weiteren Versuch die die deutlich abriebfesteren Pellets mit einem Außendurchmesser von ca. 18 mm produziert. Mit rd. 13 Mg dieses Brennstoffs führte Vattenfall dann Ende 2019 einen weiteren Förderversuch im HKW Moabit durch, bei dem eine deutlich niedrigere, aber noch relevante Staubbildung beobachtet wurde.

Da zeitnah ein Umbau des HKW Moabit ansteht, prüfte Vattenfall den Einsatz des Bio-Brennstoffes an anderen Standorten: HKW Reuter West und Biomassekraftwerk Märkisches Viertel, mit folgendem Ergebnis: Der Feinabrieb des Brennstoffs ist für die Anlage Märkisches Viertel zu hoch. Am prinzipiell geeigneten Steinkohlestandort Reuter West lassen große Fallhöhen auf der Kohlelinie höhere Staubbildungen erwarten, es ist daneben das Risiko einer Brandentwicklung im Bereich der Kohlemühlen zu bedenken (geringere Zündtemperatur der Grünrestbrennstoffe gegenüber der Kohle). Die avisierten Termine für die geplanten Verbrennungsversuche können aus verschiedenen Gründen (Corona, Instandsetzung/Revision) erst im Jahr 2022 stattfinden. Auf Grund der Erfahrungen und Risiko-Prognosen (Staubbildung und bei der Co-Vermahlung) wird die Option diskutiert, die Aufbereitung zu Grünrestbrennstoff nach dem Verfahrensschritt „Mechanische Entwässerung“ zu beenden und den sogenannten Nass-Fluff als Inputmaterial zu nutzen. Diese Option böte auch nach Vereinfachung der Aufbereitung (Wegfall von Trocknung, Kompaktieren), reduziertem Anlageninvest und Betriebskosten verschiedenste Vorteile.

6.4 Fazit zu den Verbrennungs-Großversuchen

Die Ergebnisse der Verbrennungs-Großversuche zeigen, dass sich die Bio-Brennstoffe in Mischung mit anderen Brennstoffen (Holzpellets beim Wanderrost, Steinkohle bei der Wirbelschicht) gut verbrennen lassen. Das Emissionsverhalten einer solchen Mischung erwies sich als unproblematisch. Bei Vattenfall ergaben sich im HKW Moabit keine Probleme in der *Verbrennung* als solcher. Die zunächst höhere Staubentwicklung konnte durch die geänderte Brennstoff-Konfektionierung zwar deutlich reduziert werden, bildet aber auch bei Einsatz in anderen Kraftwerken eine noch zu lösende Aufgabe.

Die weitere Prüfung – eben auch über möglichst bald durchzuführende weitere Versuche – als Grundlage einer zugesagten Dauerabnahme der Bio-Brennstoffe wird durch die EVU, gerade auch im Hinblick auf zukünftige Standortkonzepte (Kontext Kohleausstieg), fortgesetzt. Hier wurde auch die weniger aufwändige Aufbereitung „nur“ bis zum Verfahrensschritt Mechanische-Entwässerung (Nass-Fluff) thematisiert. Weitere Abstimmungen sind geplant.

7 Kostenbetrachtung

Die abgeschätzten jährlichen Betriebskosten für eine erste Demonstrationsanlage in Berlin sind in Tabelle 4 zusammen mit dem Kapitaldienst dargestellt.

Tabelle 4 Übersicht über die Betriebskosten einer Demonstrationsanlage

BETRIEBSKOSTEN- / ERLÖSRECHNUNG				12.343	Mg/a
Invest Maschinenteknik	2.903.166 €				
Invest Bau	300.000 €				
SUMME INVEST	3.203.166 €				
Parameter	Basiswert	€/a	€/Mg Input		
Kapitaldienst M+E-Technik	10 a, 2 %	319.348	25,87		
Kapitaldienst Bau	20 a, 2 %	18.000	1,46		
RWU M+E-Technik	5% v. Invest	136.449	11,05		
RWU Bau	1% v. Invest	3.000	0,24		
JAHRESKOSTEN				<i>spez. Kosten</i>	<i>Anteil v. Summe</i>
Summe Kapitaldienst	<i>Verteilung s.o.</i>	337.348	27,33		36%
Summe RWU	<i>Verteilung s.o.</i>	139.449	11,30		15%
Versicherung	1% v. Invest	32.032	2,60		3%
Pachtkosten	1.500 m ²	27.000	2,19	18,00 €/m ² ,a	3%
Personalbedarf	4,5 Pers.	225.000	18,23	50.000 €/P,a	24%
Stromkosten *)	62 kWh/Mg	106.980	8,67	0,14 €/kWh el	11%
Wärmekosten (Gas / Erdgas)	0 kWh/Mg	0	0,00	0,03 €/kWh th	0%
Diesel Radlader u.a. Transport	1,0 l/Mg	14.811	1,20	1,20 €/l	2%
Verladung/Transport Brennstoff	3.056 Mg/a	15.279	1,24	5,00 €/Mg	2%
Zus. Schlackeentsorgung	306 Mg/a	10.696	0,87	35,00 €/Mg	1%
Entsorgung Abwasser	0,53 m ³ /Mg	15.080	1,22	2,31 €/m ³	2%
Entsorgung Inertstoffe (Kompostierung)	0,07 Mg/Mg	21.304	1,73	25,00 €/Mg	2%
SUMME KAPITAL- UND BETRIEBSKOSTEN		944.978	76,56		100%
ERLÖSE				<i>spez. Erlöse</i>	<i>Anteil v. Erlösen</i>
<i>Energiebetrag Brennstoff</i>	<i>4,24 MWh/Mg</i>	<i>12.948</i>	<i>MWh/a</i>		
Erlöse Brennstoff	12.948 MWh/a	-388.455	-31,47	-30,00 €/MWh	54%
Erlöse Input	12.343 Mg/a	-333.257	-27,00	-27,00 €/Mg	46%
SUMME ERLÖSE		-721.712	-58,47		100%
SUMME KOSTEN ./. ERLÖSE		223.267	18,09	<i>Defizit</i>	

*) Stromkosten von erheblichen Einfluss 6ct/kWh Eigenstromkosten (Kraftwerk) bis 17 ct/kWh (Netzbezug)

Der Invest wurde seitens der florafuel-AG für die mechanisch-/elektrischen Anlagenkomponenten auf rd. 2.900.000 €, der Bauteil zunächst auf 300.000 € abgeschätzt. Der Gesamtinvestitionsbedarf beläuft sich somit auf rd. 3,2 Mio €.

In Summe ergeben sich zunächst Betriebskosten von rd. 940.000 € pro Jahr bzw. rd. 76,00 € pro Mg Eingangsmaterial.

Den im oberen Teil von Tabelle 4 genannten Kosten stehen unten die Erlöse durch die Annahme der Grünabfälle sowie die Erlöse durch den Verkauf des Brennstoffs entgegen. Die Annahmeerlöse der Grünreste sind orientiert an den Annahmeentgelten der Kompostierung mit 27 €/Mg angesetzt. Die Erlöse aus der Brennstoffveräußerung entsprechen orientierend dem Energie-Preis für Holzhackschnitzel von 30 €/MWh). Den Brennstofflerlös pro MWh im Bereich der *Holzhackschnitzel* anzusetzen ist gegenüber dem Bereich von *Holzpellets* (rd.40-50 €/MWh) sehr konservativ, da erlösreduzierend, zu bewerten. Die Erlöse werden - analog zu Holzbrennstoffen - im Gefolge der CO₂-Bepreisung/Lizenzkosten deutlich steigen, dies ist hier noch nicht berücksichtigt.

Aus Kosten und Erlösen ergibt sich derzeit ein Delta von rd. -215.000 € pro Jahr bzw. ein Defizit von rd. -18 € pro Mg Eingangsmaterial.

Diese aktuelle und langfristig sinkende finanzielle Unterdeckung kann künftig grundsätzlich bei Neuausschreibungen der Grünrestentsorgung *öffentlicher* Einrichtungen (z.B. BSR, Grünflächenämter) für eine höherwertige, klimaentlastende Behandlung von den Abfallproduzenten eingefordert werden, dies aber erst dann, wenn dieses Behandlungsangebot für alle Abfälle dieser Art tatsächlich existiert. Bei einer ersten Anlage muss das Annahmeentgelt durch öffentliche Förderung zunächst auf einem konkurrenzfähig niedrigen Wert gehalten werden, um die Versorgung der Anlage mit Grünabfällen zu sichern.

8 Erzielbare Klimagas- und Ressourceneinsparung

Für das geschilderte Verfahren der Grünrestaufbereitung lassen sich THG-Lastschriften für Strom-, Diesel und Wärmeverbrauch berechnen, dem gegenüber stehen die THG-Gutschriften aus der ersetzten Steinkohle. Es resultiert eine gemittelte THG-Entlastung von netto rd. 390 kg CO₂-Äq/Mg Grünrest-Input. Subtrahiert man die durch die derzeitige Kompostierung dann ausbleibende THG-Belastung von spezifisch 72 kg CO₂-Äq/Mg Input, erhöht sich die THG-Entlastung auf rd. -460 kg CO₂-Äq/Mg Input.

Abbildung 5 zeigt diese spezifischen THG-Wirkungen (Aufbereitung zu einem Brennstoff und Verwertung als Kohleersatz) gegenüber der IST-Situation (offene Kompostierung).

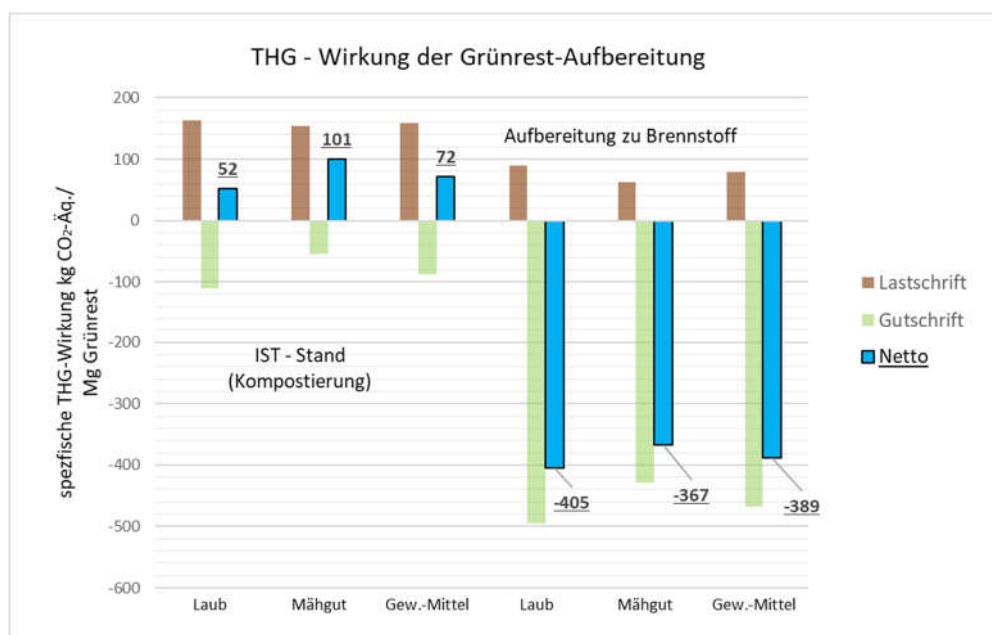


Abbildung 5 THG - Wirkung der Grünrest-Aufbereitung (Grafik: ICU)

Bei gleicher Behandlung der Gesamtmengen von rd. 102.000 Mg/a an Laub und Mähgut kann hochgerechnet eine THG-Entlastung von rd. **47.000 Mg CO₂-Äq/a** erzielt werden.

Die **Ressourcen-Entlastung** beträgt bei vollständiger Anwendung des Konzeptes auf die 102.000 Mg/a an Grünresten und den daraus erzeugbaren rd. 25.700 Mg Brennstoff zunächst eine Entlastung von rd. 110.000 MWh/a an fossiler Energie. Diese entspricht dem Ersatz von jährlich rd. 12.500 Mg Steinkohle.

Für die Grünrest-Aufbereitung weist die Betriebskostenkalkulation - wie in Kapitel 7 gezeigt - eine Unterdeckung von rd. 20 € pro Mg auf. Dies ist demnach der Kaufpreis für die mit dem Konzept erzielte Klimaentlastung. von rd. -460 kg CO₂-Äq pro Mg Input. Wird diese mit rd. 20 € pro Mg Mehrkosten erworben, resultiert ein spezifischer **Minderungspreis um 40 € pro Mg eingespartes CO₂**. Dies ist im Spektrum der sonst für diese Minderungsleistung aufgewendeten Beträge von rd. 90 -100 € pro Mg CO₂ ein sehr kostengünstiger Wert.

9 Austausch mit dem CarboTip-Projekt

Die Freie Universität Berlin (FU-Berlin) Fachbereich Geowissenschaften führt ein paralleles Projekt zur pyrolytischen Erzeugung von Pflanzenkohle (Biokohle) durch.

Für den Vergleich mit dem vorliegenden Forschungsprojekt ist dieses Konzept interessant, da die THG-Entlastung hier nicht durch den Kohleersatz bei der Energieerzeugung erzielt wird, sondern durch langfristig stabilen, in den Boden eingebundenen Kohlenstoff, plus dem Ersatz fossilen Erdgases durch das entstehende Pyrolysegas.

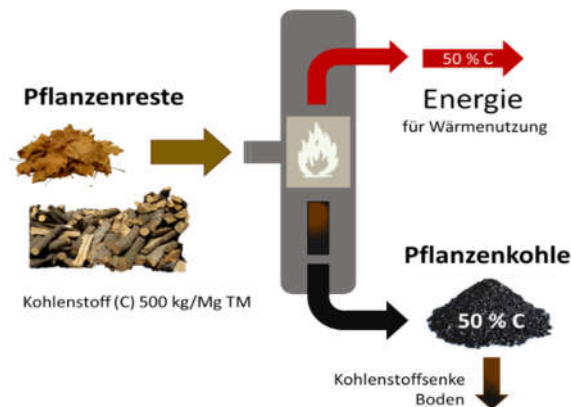


Abbildung 6 Karbonisierung von Pflanzenresten (Bild: R. Wagner/FU-Berlin)

Im Ergebnis zeigte sich, dass das Biokohleverfahren ebenfalls eine gegenüber der derzeitigen Kompostierung erhebliche THG-Entlastung bereitstellt, diese mit rd. -275 kg CO₂-Äq/Mg Grünrest jedoch niedriger liegt als bei Nutzung des Brennstoffs als Steinkohleersatz (mit -460 kg CO₂-Äq/Mg). Dies resultiert daraus, dass nach Literatur und aktueller Bilanzierungspraxis der in der Biokohle gebundene Kohlenstoff „nur“ zu 80% als langfristig gebunden angerechnet *und* als Gutschrift des Pyrolysegases nur das weniger klimabelastende Erdgas angesetzt werden kann. Demgegenüber wird sich nach Kostenansätzen der FU die Erlössituation der Produkte (insbesondere der Biokohle) günstiger darstellen als bei der rein energetischen Verwertung, so dass auf für das Biokohle-Verfahren letztlich CO₂-Vermeidungskosten von ebenfalls nur rd. 40 €/Mg entstehen.

Auf Basis dieser Erkenntnisse sollen *beide* Konzepte weiter verfolgt werden und unterstreichen damit den Sinn einer ersten Grünrest-Aufbereitungsanlage in Berlin, die den Rohstoff für beide Konzepte bereitstellen kann.

10 Zusammenfassung / Weitere Arbeitsschritte

Ziel des Projektes ist, gemäß dem Abfallwirtschaftskonzept Berlins eine klimaentlastende energetische Verwertung an Laub und Mähgut zu erreichen.

Mengen: In Berlin fallen im Jahr rd. 102.000 Mg an Laub (rd. 58.000 Mg) und Mähgut (rd. 44.000 Mg), die derzeit vollständig unter Klimabelastung kompostiert werden.

Verwertung: Bislang untersuchten höherwertige Verwertungsverfahren warfen entweder verfahrenstechnische Probleme auf (Vergärung, HTC) oder zeigen zu hohe Behandlungskosten (alle Hausmüll-Verwertungsanlagen). Insofern wurde im Projekt das technische Konzept verfolgt, aus Laub und Mähgut einen Brennstoff mit hohem Energiegehalt herzustellen, was die Abtrennung von Inertstoffen, Trocknung und Verpressung zu Briketts/Pellets erfordert. Dies ist technisch mit dem Aufbereitungsverfahren der florafuel AG leistbar. Im Fokus des Projektes standen Verbrennungs-Großversuche mit eben diesem Brennstoff.

Aufbereitungsverfahren/Brennstoffqualitäten: Das Aufbereitungsverfahren kann im Mittel aus einer Tonne Laub oder Gras rd. 250 kg eines Bio-Brennstoffes herstellen, der hinsichtlich Schadstoffgehalt und Heizwert die Anforderungen der Kraftwerke erfüllt.

Verbrennungsversuche: Im Mischbetrieb mit anderen Brennstoffen verliefen die Verbrennungsversuche sowohl technisch wie auch emissionsseitig zufriedenstellend. Zur Zusage einer *Dauerabnahme* des Brennstoffes werden seitens der EVU Vattenfall und BTB die Einsatzoptionen - auch im Kontext der laufenden Kraftwerksumstellungen - weiter geprüft.

THG-Wirkungen: Durch die Umlenkung aus der Kompostierung in diese energetische Verwertung kann eine spezifische THG-Reduzierung von rd. -460 kg CO₂-Äq/Mg erreicht werden. Für die Gesamtmenge von rd. 106.000 Mg Laub und Mähgut wäre damit eine jährliche THG-Entlastung von rd. -47.000 Mg CO₂-Äq erzielbar. Das im Vergleich mitbilanzierte Verfahren zur pyrolytischen Biokohle-Herstellung erzielt ebenfalls eine hohe THG-Entlastung.

Kosten: Eine erste Prognose schätzt den nötigen Investitionsbedarf einer Anlage mit einem jährlichen Grünrestinput von rd. 12.000 Mg auf etwa 3,3 Mio. €. Den durch Kapitaldienst und Betriebskosten verursachten Behandlungskosten von rd. 76 €/Mg Eingangsmaterial stehen Erlöse aus Annahmegebühren und Brennstoffveräußerung von rd. 58 €/Mg Eingangsmaterial gegenüber. Diese Unterdeckung von rd. 20 €/Mg Grünrest müsste bei einer ersten Anlage über eine öffentliche Förderung auf den Invest ausgeglichen werden. Der spezifische Preis für die THG-Minderung liegt mit dem Konzept im Bereich von 40 €/Mg CO₂-Äq und damit im unteren Bereich alternativer Reduktionsmaßnahmen.

Weitere Arbeitsschritte: Angesichts des hohen THG-Entlastungspotenzials durch die Aufbereitung von Laub und Mähgut soll eine erste Demonstrationsanlage mit rd. 12.000 Mg/a Input in Berlin realisiert werden. Als nächste Schritte dazu sind vorgesehen:

- Nach derzeit noch fortdauernden hausinternen Prüfungen seitens der EVU **Erklärung zur dauerhaften Abnahme des erzeugten Brennstoffs** ab Fertigstellung der Aufbereitung (2023/24),
- Fortsetzung der **Gespräche mit den Interessenten an Errichtung und Betrieb** der Anlage - diese Gespräche sollen umgehend fortgesetzt bzw. erweitert werden, um darüber auch den bestgeeigneten **Standort** der Demonstrationsanlage herauszufinden und nachfolgend die konkreten Planungsschritte einzuleiten.

Berlin, 05.10.2021 ICU Partner-Ingenieure Dr.-Ing Ulrich Wiegel / M. Sc. Paul Sanders