

Verbund-Schlussbericht

Zuwendungsempfänger:	Förderkennzeichen:
Verbund IRRMa	033L239
Vorhabenbezeichnung:	
REGION.innovativ – IRRMa: Entwicklung und Anwendung eines Interkommunalen Reststoff- und RecyclingManagementsystems	
Laufzeit des Vorhabens: 01.10.2021 – 31.12.2024	
Berichtszeitraum: 10/21 – 12/24	

Inhalt

1. Aufzählung der wichtigsten wissenschaftlich- technische Ergebnisse und anderer wesentlicher Ergebnisse.....	3
AP 1 Bestandsaufnahme Anfall und Entsorgungs- / Verwertungswege inkl. Bestandsanlagen für organische Reststoffe in den Kommunen sowie Zielparmetrierung.	3
AP 2 Analytische Auffüllung des Datenbestandes.....	6
AP 3 Entwicklung Softwaretool zur Datenerfassung und interkommunalen Kommunikation	24
AP 4 Konzeptionelle und experimentelle Entwicklung angepasster Verwertungstechnologien unter Beachtung Ergebnisse AP1 und AP2.....	27
AP 5 Überführung ausgewählter Technologieansätze in den technischen Maßstab zur Überprüfung der Machbarkeit und zur Erfassung technischer und wirtschaftlicher Parameter.....	46
AP 6 Stakeholderanalyse und -management, Risikobewertung.....	64
AP 7 Konzeption von Schulungs- und Weiterbildungsangeboten.....	66
AP 8 Implementierung Softwaretool IRRMa in den praktischen Betrieb der Kommunen und Testanwendung	72
AP 9 Entwurf für Umsetzung in Jena und SHK	72
AP 10 Veröffentlichungen, Berichte, Projekttreffen	79
2. Die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	81
3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten.....	81
4. Verwertbarkeit der Ergebnisse	82
5. Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen	82
6. Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen.....	83

Abkürzungsverzeichnis:

BGA	Biogasanlage
EEG	Erneuerbare Energien Gesetz
IKTS	Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien und Systeme (Projektpartner)
KSJ	Kommunalservice Jena (Projektpartner)
LAV	Technische Dienste GmbH & Co. KG (Projektpartner)
MFPA	Materialforschungs- und -prüfanstalt an der Bauhaus-Universität Weimar (Projektpartner)
OS	Originalsubstrat (Frischmasse)
RAG	Regionale Aktionsgruppe Saale-Holzland e.V. (Projektpartner)
RBI	Robert Boyle Institut e.V. (Projektpartner)
S&F	Datentechnik GmbH & Co. KG (Projektpartner)
SHK	Saale-Holzlandkreis (Projektpartner)
GIS	Geoinformationssystem
örE	öffentlich-rechtlicher Entsorgungsträger

1. Aufzählung der wichtigsten wissenschaftlich- technische Ergebnisse und anderer wesentlicher Ergebnisse

AP 1 Bestandsaufnahme Anfall und Entsorgungs- / Verwertungswege inkl. Bestandsanlagen für organische Reststoffe in den Kommunen sowie Zielparmetrierung

Das erste Arbeitspaket beinhaltete die Erfassung der Datengrundlage, im Speziellen die Zusammenstellung kommunaler Daten aus der Region. Angesprochen wurden alle Betroffenen, welche in irgendeiner Form mit organischen Reststoffen „in Berührung“ kommen: Kommunen, Verwerter/ Recycling sowie Logistik. Nicht zuletzt fallen bei Bürgern, Gewerbe und Landwirtschaft ebenfalls entsprechende Fraktionen an. Über die „Stakeholder“ wurde eine fortlaufend ergänzte Übersicht (Datenbank) erstellt (Abbildung 1), die in ein Geoinformationssystem (GIS) überführt wurde. Zur Datenbank wurden dann Stoffstromwerte und Verwertungssysteme ergänzt werden, welche im GIS in eine übersichtliche Darstellung der Beteiligten und Ströme mündete.

Akteure	Name	Strasse	PLZ	Ort	Ansprechpartner	Tel	Fax	Email	Verwertungswege
Verwaltungsgemeinschaft	VG Dornburg-Camburg	Rathausstraße 1	07774	Dornburg-Camburg	Herr Krumbholz			c.krumbholz@vg-dornburg-camburg.de	
	VG Südliches Saaleetal	Bahnhofstraße 23	07768	Kahla	Frau Voigt Frau Weber	036424 59160			
	VG Hügelland-Täler	Pfarrwinkel 10	07646	Tröbnitz	VG-Vorsitzender: Michael Kallus	036428 64811		vorsitzender@huegelland-taeler.de	
	VG Hermsdorf	Am Alten Versuchsfeld	07629	Hermsdorf	Frau Möbius	036601 577-10		info@vg-hermsdorf.de	
	VG Heidefeld-Elstertal-Schkölen	Flemmigstr.	07613	Crossen	Herr Bierbrauer				
	Altenberga								
	Bad Klosterlausnitz	Markt 3	07639	Bad Klosterlausnitz	Bürgermeisterin Klotz Frau Acker Bauhof	036601 5710 036601 57128 036601 57133		info@bad-klosterlausnitz.de hauptamt@bad-klosterlausnitz.de bauhof@bad-klosterlausnitz.de	
	Bilbra								
	Bobbeck								
	Bollberg								
	Bremsnitz								
	Bucha								
Stadt	Bürgel	Am Markt 1	07616	Bürgel	Bgm Johann Waschnewski			buergenmeister@stadt-buerigel.de	
	Bauhof Bürgel	Eisenberger Straß	07616	Bürgel	Bauhof Herr Ferry Götz	+49 (0) 36692 / 49 112		bauhof@stadt-buerigel.de	
	Crossen an der Elster	Flemmigstr.	07613	Crossen	Bgm. Uwe Berndt	+49 171 2785018		buergenmeister@crossen.de	
Stadt	Dornburg-Camburg	Rathausstraße 1	07774	Dornburg-Camburg	Bgm. Dorothea Storch	036421 - 71010		d.storch@vg-dornburg-camburg.de	
	Eichenberg								
	Eineborn								
Stadt	Eisenberg	Markt 27	07607	Eisenberg	Frau Dässler Herr Schmook (Hauptamtleiter)	036691/ 73 423		hauptamt@rathaus-eisenberg.de h.schmook@rathaus-eisenberg.de g.dassler@rathaus-eisenberg.de	
	Frauenprießnitz								
	Freienorla								
	Geisenhain								
	Gneus								
	Golmsdorf								
	Gösen								
	Graßtschen b. Bürgel								
	Großböckedra								
	Großbeuterdorf								
	Großlobichau								
	Großpörschütz								
	Gumperda								

Abbildung 1: Screenshot (Ausschnitt) Stakeholder

Für die Datenerfassung bzw. Datensammlung wurden vorhandene Angaben der Projektpartner Jena (KSJ), SHK und RAG genutzt und zusammengeführt. Das Mengengerüst organischer Reststoffe, Herkunft und derzeitige Verwertungswege sind in eine Stoffstromdatenbank (Abbildung 2) überführt, welche als Grundlage zur Prüfung und Unterteilung des vorhandenen Datenbestandes nach verschiedenen Qualitätskriterien dient (z.B. Bioabfall gute Qualität und Bioabfall schlechte Qualität und Herkunft (Gebietsstruktur)).

IRRMa							
12.11.2021 Workshop Stoffströme (online)							
Charakterisierung von Sammlung, Verwertung und Datenerfassung							
Stoffstrom (Art, Name)	Firma/Kommune	Herkunftsgebiet? (z.B. Siedlungsstruktur)	Sammelsystem?	Mischung mit anderen Reststoffen?	Abgabe- bzw. Annahmestort? Und Möglichkeit der Homogenisierung?	bisherige Verwertung? (+ Aufbereitung)	vorhandene Daten?
Bioabfall (inkl. Speiseabfälle)	KSJ	95% privat, 5% Gewerbe	braune Tonne, Pressmüllfahrzeug			Geht zu GEMES (Vergärung, Kompost)	Mengen
Grünschnitt (50), Gras (50)	KSJ		Bringsystem, 2 Wertstoffhöfe			Geht zu GEMES (Vergärung, Kompost)	Mengen
Gras (80), Grünschnitt (20)	KSJ	WG's und Friedhöfe	Absetz-, Abrollcontainer 2 - 33 m³			Geht zu GEMES (Vergärung, Kompost)	Mengen
Gras (80), Grünschnitt (20)	KSJ	städt. Grünanlagen und Spielplätze	Müllpressfahrzeug, Unimog mit Mäh- u. Absaugeinrichtung, Kleintransporter			Geht zu GEMES (Vergärung, Kompost)	Mengen
Speiseabfälle, gewerblich	KSJ					--> Bernd Bioenergy (BGA)	
Bioabfall	GEMES	Jena, kommunale Sammlung und Privatanlieferung	LKW, Privatanlieferung				
Grünschnitt	GEMES		gewerbliche Lieferungen			Waage?	
Sieb- und Rechenrückstände	GEMES	KA Hermsdorf	LKW			Kompost --> Zukunft? Störstoffanteil? --> thermische Verwertung?	
Boden und Steine	GEMES		LKW, Privatanlieferung				
Sieüberlauf (Kompostierung)	GEMES						
Klärschlamm	GEMES						
Gemischte Grünabfälle	SHK	private Haushalte, ländlich	Container als Bringsystem	eine komplette Mischung	5 Stellen	geht an Entsorgungsfirmen (Veolia --> wahrsch. Kompostierung)	Mengen
Speiseabfälle	SHK	private Haushalte, z.T. in der Nähe von Wohnsiedlungen	Tonnen als Bringsystem		Kahla, Hermsdorf	--> Bernd Bioenergy (wahrsch. BGA)	
Weihnachtsbäume	SHK					Sammlung durch Veolia	
Astschnitte,...		0					

Abbildung 2: Screenshot (Ausschnitt) Stoffstromtabelle IRRMa

In mehreren Online-Arbeitsgesprächen und direkten Interviews mit kommunalen Vertretern wurden Daten ergänzt und Stoffstromverfahrensweisen eruiert. Dies wurde fortwährend weitergeführt durch den Projektpartner SHK.

Die Verarbeitung der Daten stellt perspektivisch die Grundlage der Logistik- und Verwertungskonzeption dar. Die rechtlichen Rahmenbedingungen zur softwarebasierten interkommunalen Zusammenarbeit und gemeinsamen Verwertung wurden recherchiert und eine Übersicht der rechtlichen Grundlagen und Zusammenhänge zur weiteren fachlichen und juristischen Prüfung erstellt (siehe dazu auch AP 6. Stakeholderanalyse).

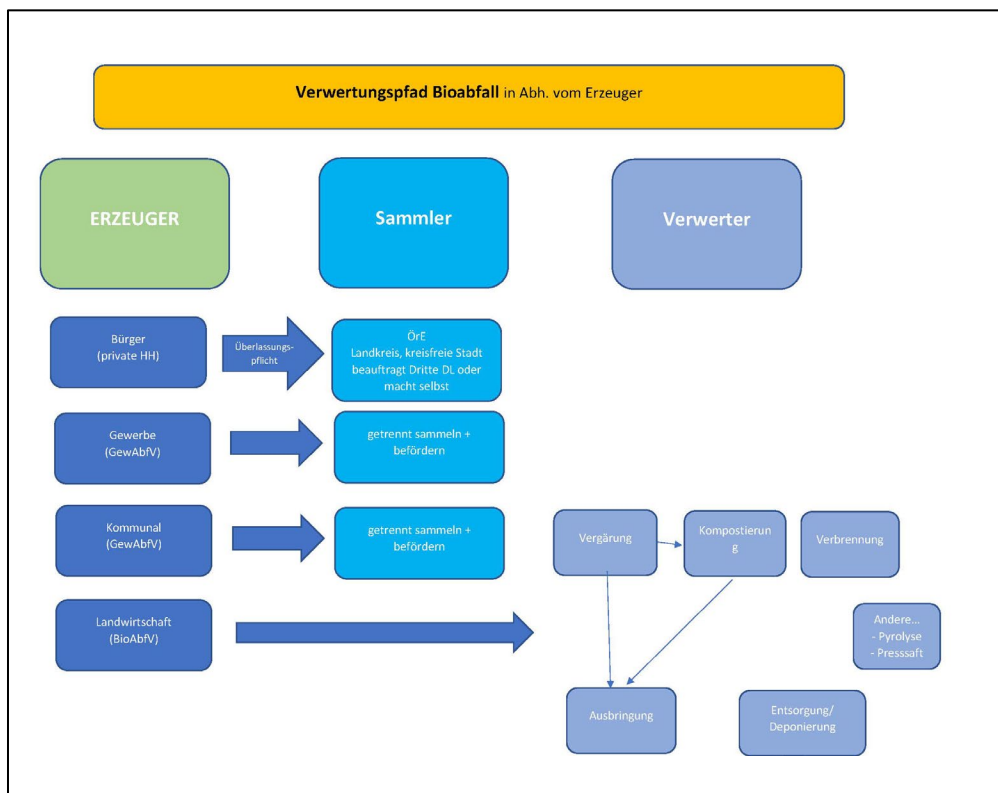


Abbildung 3: Verwertungspfad Bioabfall

Die größten Mengen der biogenen Abfälle und Reststoffe in der betrachteten Region werden derzeit durch den Projektpartner GEMES verarbeitet. Die Abbildung 3 zeigt Verwertungspfade des Bioabfalls vom Erzeuger zum Verwerter. Die Hauptroute der Verwertung stellt hierbei die Kompostierung dar. Geringe Mengen werden im Vorfeld der Kompostierung noch einer energetischen Nutzung in der Abfallvergärungsanlage Saalfeld zugeführt. Die große Anzahl an vorhandenen landwirtschaftlichen Biogasanlagen nutzt keine organischen Reststoffe aus Kommunen oder privaten Grundstücken, da dies rechtlich nicht geklärt bzw. erlaubt ist. (hierzu Verweis auf AP 4 – Energiepotential – rechtliche Prüfung und Empfehlung)

In vereinzelt Kommunen erfolgt eine Eigenkompostierung (mit nicht optimalen Bedingungen) sowie die Abgabe auf eigenen Liegenschaften in der Ortsumgebung. Im Saale-Holzland-Kreis wird ein hoher Anteil der privaten Bioabfälle und Reststoffe „offiziell“ in der privaten Eigenkompostierung verwertet. Die Recherchen des IRRMa-Verbundes konnten jedoch auch zahlreiche wilde Ablagerungsflächen identifizieren (Abbildung 4). Diese befinden sich grundsätzlich auf Flurstücken der Gemeinden, zumeist aber öffentlich zugänglich und teils mit wassergefährdendem abgelegtem Material. Dies lässt eine illegitime Ablagerung vermuten. Ausführliche Unterlagen zur Recherche liegen beim Projektpartner SHK vor. Außerdem ist nur unzureichend bekannt, wieviel Biomasse über Restmülltonnen entsorgt wird. Inwiefern die Stichproben der regelmäßigen Abfalluntersuchungen stichhaltig sind, ist fraglich, da Untersuchungen in vergleichbaren ländlich geprägten Landkreisen ein anderes Bild wiedergeben.

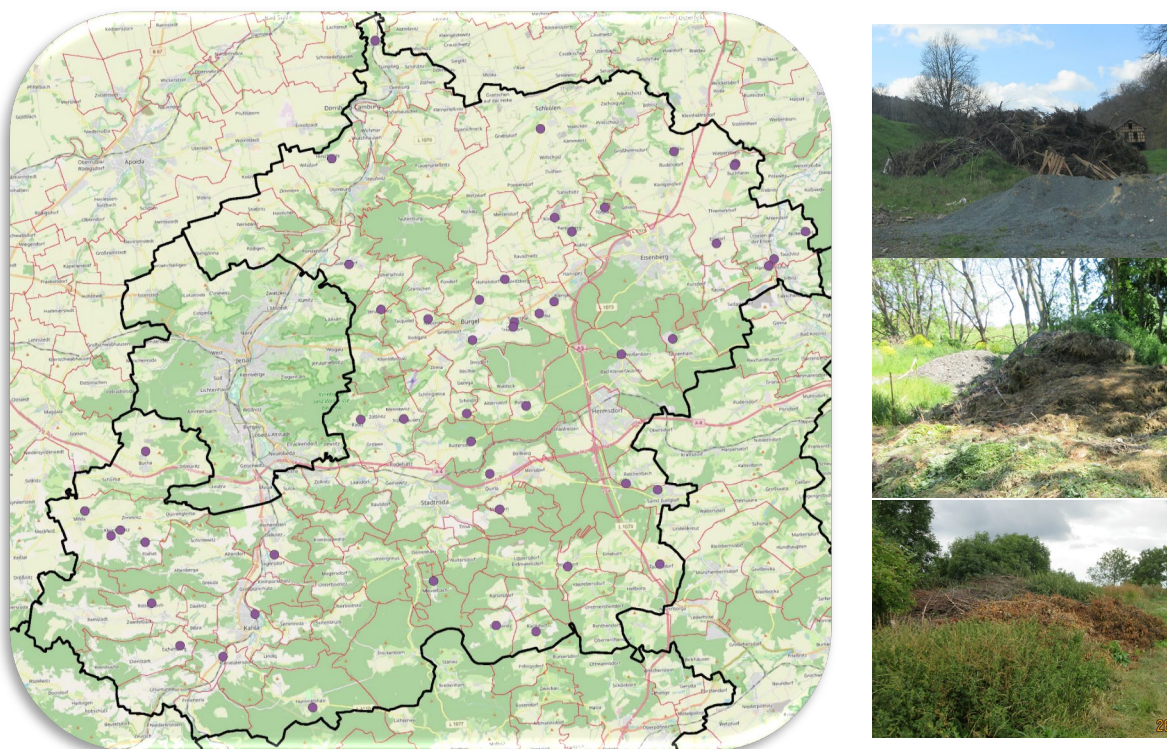


Abbildung 4: Punkte zeigen die wilden Deponien in den Kommunen (Recherche IRRMa)

Die in Jena oder im Saale-Holzland-Kreis gesammelten sowie die von GEMES angenommenen Reststoffe sind in Abbildung 5 dargestellt. Der Mengenunterschied zwischen Sammlung und Annahme resultiert daraus, dass GEMES auch aus anderen Gebieten Reststoffe annimmt und zusätzliche Stoffströme von privaten Kunden direkt angeliefert werden.

Die größte Fraktion stellen Bioabfälle (BA) aus der braunen Tonne aus Jena dar. Im Saale-Holzland-Kreis werden keine braunen Tonnen gestellt, weshalb mit Ausnahme kleinster Mengen an offenen Sammelstellen kein privater Bioabfall erfasst wird. Lediglich 2.380 Tonnen Grünabfall wurde an den wenigen bestehenden Sammelstellen abgegeben. Dies entspricht etwa 28 kg pro Einwohner und Jahr im SHK und liegt damit deutlich unterhalb des bundesdeutschen Durchschnittes von 60 kg/(EW*a). Die

Stadt Jena kommt auf über 80 kg Bioabfall und zusätzlich noch 50 kg Grünabfall pro Einwohner und Jahr. Diese Erfassungsquote stellt einen sehr guten Wert dar der auch bundesweit vergleichbar ist. Dieser Wert sollte ein Vorbild für den ländlich geprägten SHK darstellen. Selbst wenn ein gewisser Anteil der privaten Reststoffpotenziale sinnvollerweise auf dem eigenen Kompost verwertet werden, sollte genügend Potenzial für eine weitergehende Erfassung, Nutzung und Wertschöpfung vorhanden sein.

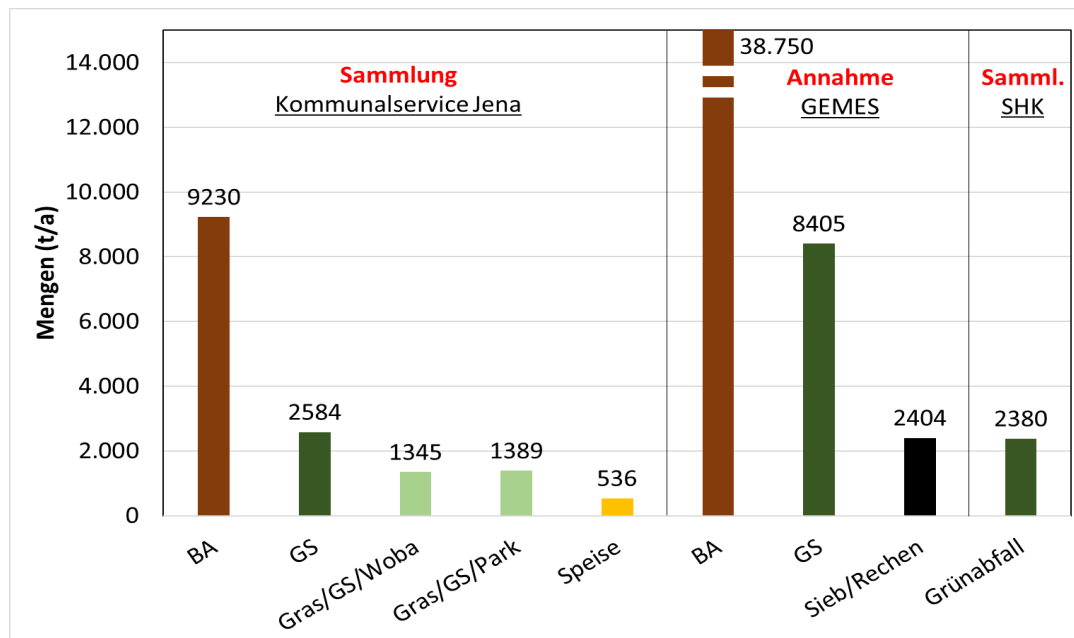


Abbildung 5: Stoffstrommengen bei den IRRMa-Projektpartnern (BA...Bioabfall, GS...Grünschnitt)

Kleinere Mengen an Reststoffen aus der Lebensmittelindustrie werden teilweise als Futtermittel bzw. Dünger/Bodenverbesserer in der Landwirtschaft verwertet.

Nach der Datenerhebung wurden deutliche Lücken im Datenbestand und Datenmanagement identifiziert. Hier wurden Ideen und Konzeption erarbeitet und umgesetzt, um diese Datenlücken zu schließen und zu ergänzen. Einerseits durch Befragung der Kommunen bzw. Kommunalvertreter und weitere Stakeholder sowie vereinzelt auch Projektexterne Vertreter. Auch durch Anwenderworkshop und Daten-Erfassung im Prozess beispielsweise durch die IRRMa-App (Browser-basierte Erfassungsmaske) wurde die Datengrundlage verbessert.

Die IRRMa-Datenerfassungs-App bildete auch die Vorstufe des Softwaretools. Das Lastenheft zur Entwicklung der Software ist auf Basis von gemeinsamen Workshops und einem virtuellen Planspiel entwickelt und erstellt worden. Diese flossen in die Entwicklung in AP 3.

AP 2 Analytische Auffüllung des Datenbestandes

Die statistischen Daten wurden um regionalbezogene Daten ergänzt und mit den Analysen aus den Probenahmen aufgefüllt. Diese werden nachfolgend erläutert.

Unter Federführung des Fraunhofer IKTS wurde gemeinsam mit den Partnern die Probenahmepläne für eine regelmäßige Beprobung von relevanten Stoffströmen und bestehender Verwertungstechnologien entwickelt und fortgeschrieben (Abbildung 6). Der Fokus der Beprobung und Analysen richtete sich nach identifizierten Datenlücken sowie nach der beabsichtigten stofflichen oder energetischen Verwertung. Die Beprobungen erfolgten quartalsweise, um eventuelle Schwankungen in den Eigenschaften im jahreszeitlichen Verlauf zu erfassen. Die einzelnen Beprobungen fanden im Januar, Mai, September und November 2022 statt. Außerdem wurden anlassbezogen weitere Einzelproben von saisonalen oder speziellen Stoffströmen (Reststoffe aus der Fruchtverarbeitung, Bierherstellung, Pferdemit vom Reiterhof Burgau etc.) zusammengetragen und analytisch bewertet.

	Stoffstrom (Art, Name)	Firma/Kommune	Maßnahmen für repräsentative Probenahme	Wer?	Anzahl Probenahme (PN)	Start	Proben Anzahl/ Menge für IKTS	Proben Anzahl/ Menge für RBI	Proben Anzahl/ Menge für ...?	Analytik IKTS	Analytik RBI
✓	Bioabfall (braune Tonne) - Charge mit schlechter Qualität	KSJ/GEMES	Getrennte Sammlung + Schreddern	GEMES (KSJ liefert an)	1 x Quartal	Sep 22	2 x 10 L Eimer	3x 10 L Eimer		TR, oTR, Störstoffe, Schüttdichte, gelöste Stoffe (Wassereluat): pH, LF, Kat- und Anionen, TC, TOC, Biogasertrag	Wertstortrennung, Aufschlussspektroskopie, Analyse der Flüssigphase (pH-Wert, CSB, organ. Säuren, Mikroskopie, Biogaspotential), Charakterisierung Lagerfähigkeit, stoffliches
✓	Bioabfall (braune Tonne) - Charge mit guter Qualität	KSJ/GEMES	Getrennte Sammlung + Schreddern	GEMES (KSJ liefert an)	1 x Quartal	Sep 22	2 x 10 L Eimer	3x 10 L Eimer		TR, oTR, Störstoffe, Schüttdichte, gelöste Stoffe (Wassereluat): pH, LF, Kat- und Anionen, TC, TOC, Biogasertrag	Wertstortrennung, Aufschlussspektroskopie, Analyse der Flüssigphase (pH-Wert, CSB, organ. Säuren, Mikroskopie, Biogaspotential), Charakterisierung Lagerfähigkeit, stoffliches
✓	Kompost-Substrat aus Bioabfall	GEMES	5 Teilproben von verschiedenen Stellen vereinen	GEMES	1 x Quartal	Sep 22	1 x 10L Eimer			TR, oTR, Störstoffe, Schüttdichte, gelöste Stoffe (Wassereluat): pH, LF, Kat- und Anionen, Wasserhaltevermögen, Pflanzversuch	
✓	Grünschnitt/Äste (bzw. Grünschnitt (50), Gras (50))	KSJ/GEMES	Schreddern	GEMES	1 x Quartal	Sep 22	1 x 10 L Eimer	100 L Sack bzw. Kübel		TR, oTR, Störstoffe, Schüttdichte, gelöste Stoffe (Wassereluat): pH, LF, Kat- und Anionen	Stoffanalyse, Biogaspotenzialermittlung, Analyse des stofflichen Nutzungspotential
✓	Kompost-Substrat aus Grünschnitt	GEMES	5 Teilproben von verschiedenen Stellen vereinen	GEMES	1 x Quartal	Sep 22	1 x 10L Eimer			TR, oTR, Störstoffe, Schüttdichte, gelöste Stoffe (Wassereluat): pH, LF, Kat- und Anionen, Wasserhaltevermögen, Pflanzversuch	
✓	Sickerwasser Schöngleina	GEMES	Mo, Mi und Fr jeweils eine Probe nehmen (nicht vermischen) = 3 Einzelproben	GEMES	1 x Quartal	Sep 22	je 1 x 1L (Flasche)	1x 10 L Eimer		CSB, gelöste Nährstoffe, pH, LF, Biogasertrag	Analytik Säuregehalt und Versäuerungspotential (qualitativ/quantitativ)
✓	Gärrest Saalfeld	GEMES	bitte direkt bei Öffnung der Fermenter entnehmen	GEMES	1 x Quartal	Sep 22	1 x 10 L Eimer	3x 10 L Eimer			Analyse des stofflichen Nutzungspotential
✓	Kompost-Substrat aus Gärrest Saalfeld	GEMES	5 Teilproben von verschiedenen Stellen vereinen	GEMES	1 x Quartal	Sep 22	1 x 10L Eimer			TR, oTR, Störstoffe, Schüttdichte, gelöste Stoffe (Wassereluat): pH, LF, Kat- und Anionen, Wasserhaltevermögen, Pflanzversuch	

Abbildung 6: Probenahmeplan zur Erfassung der möglichen Stoffströme

Hauptsächlich bei KSJ und GEMES wurden zur Probenahme die speziellen Sammeltouren koordiniert. Die Bioabfälle aus den verschiedenen Sammelrouten wurden separiert, dokumentiert und einige Teilmengen den analytischen Untersuchungen bei IKTS und RBI zugeführt.

Bei der analytischen Untersuchung haben sich die Forschungspartner jeweils auf spezielle Fraktionen und Parameter konzentriert. RBI hat sich beispielsweise auf Proben gemischten Bioabfalls zur energetischen und stofflichen Untersuchung konzentriert. Für ausgewählte Anlagen erfolgte durch IKTS eine analytische Bewertung der Input- und Output-Stoffströme mit wesentlichem Fokus auf stoffliche Verwertungswege wie Fasern, Dünger etc.

Für die **Bioabfälle** (hier die Braune Tonne in der Stadt Jena) wurde bereits von Anfang an ein Konzept der qualitätsorientierten Sammlung mitgedacht und realisiert, welches eigentlich erst im AP 4 geplant war. Der Projektpartner KSJ erstellte dafür zwei entsprechende Sammelrouten. Eine Route verlief durch mehrheitlich mit Einfamilienhäusern und kleineren Wohneinheiten besetzte Gebiete, welche aus der Erfahrung heraus eher geringe Störstoffanteile enthalten („gute Charge“). Eine zweite Route umfasste vor allem Großwohnraumeinheiten, wie Hochhäuser und andere Plattenbauten, deren anonymere Struktur eine höhere Quote an Fehlwürfen erwarten ließ („schlechte Charge“).

Die Bioabfälle aus den verschiedenen Sammelrouten wurden separat beim Projektpartner GEMES abgeladen, fotografisch dokumentiert und grob vorzerkleinert, um repräsentative Teilmengen für die analytische Untersuchung zu erhalten. Beim Fraunhofer IKTS wurden diese Proben über ein Kompostsieb in eine Fein- und Grobfraktion aufgeteilt. Die Grobfraktion (> 35 mm) wurde händisch in Störstoffe sowie Garten/Grünschnitt- und Küchenfraktion sortiert. Die Feinfraktion (der Siebdurchgang < 35 mm) war für eine weitere händische Sortierung zu fein und homogen, weshalb diese Fraktion im Ganzen analysiert wurde. Abbildung 7 und Abbildung 8 zeigen beispielhaft für die Probennahme im Mai 2022 die Aufbereitung und Sortierung der Proben.

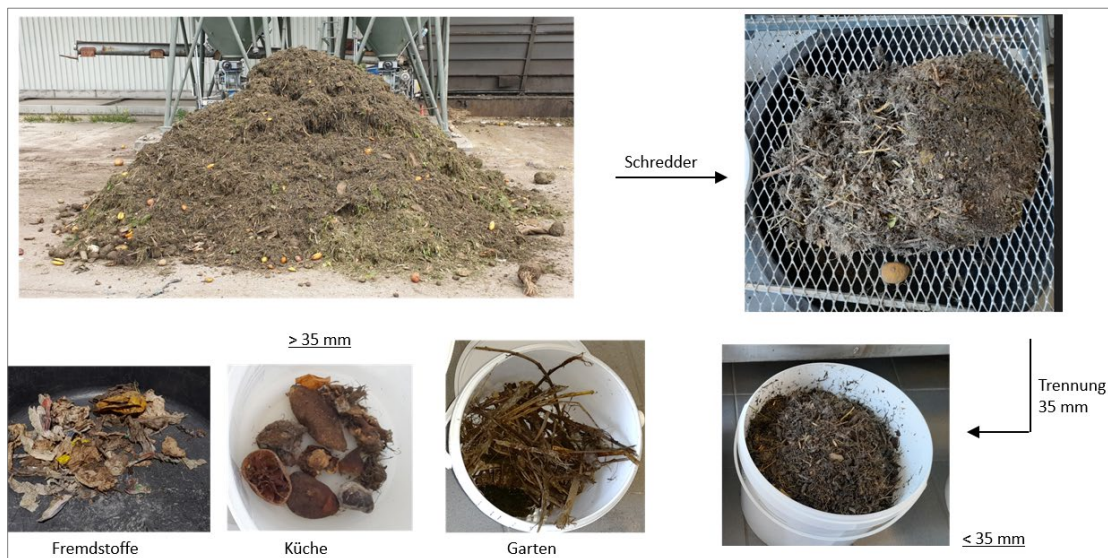


Abbildung 7: Aufbereitung und Sortierung der Bioabfallprobe (gute Charge) – Beispiel Mai



Abbildung 8: Aufbereitung und Sortierung der Bioabfallprobe (schlechte Charge) – Beispiel Mai

Neben der Aufbereitungsmethodik ist in den Abbildungen auch der optische Unterschied im Störstoffgehalt in der Ausgangsprobe für die „gute Charge“ und die „schlechte Charge“ aus den verschiedenen Sammelrouten sehr gut zu erkennen. Dieser Unterschied zeigte sich über das ganze Jahr hinweg. Die Störstoffgehalte aus der Fraktion $> 35\text{ mm}$ betrugen für die „gute Charge“ etwa 1 Ma-% bezogen auf die Gesamtprobe. Für die „schlechte Charge“ wurden Störstoffanteile zwischen 3 und 7 Ma-% detektiert. Als Störstoffe wurden hauptsächlich Kunststoffe identifiziert. Für eine weitergehende stoffliche Verwertung wäre damit die getrennt gesammelte „gute Charge“ attraktiver als das Material aus den Großwohneinheiten. Darüber hinaus müssten noch weitere Maßnahmen zur Verbesserung der Qualität erfolgen (vgl. Aktivitäten KSJ – Informationskampagne AP 4, Tabelle 4).

Aufgrund des geringen Masseanteils der Grobstoffe ($> 35\text{ mm}$) insgesamt (7 bis 17%) wird die Relevanz dieser Teilfraktionen als gering eingeschätzt. Im Vergleich dazu ist der Massenanteil der Feinfraktion $< 35\text{ mm}$ im Bioabfall deutlich höher, weshalb das Augenmerk bei den Analysen auf die Feinfraktion gelegt wurde. Im Folgenden sind ausgewählte Analysendaten dargestellt. Die Abkürzungen in den Abbildungen sind wie folgt zu lesen:

- Bg...Bioabfall gute Charge
- Bs...Bioabfall schlechte Charge
- G...Grünschnitt
- GR...Gärrest aus der Trockenfermentation GEMES
- Kb...Kompost aus Bioabfall
- Kg...Kompost aus Grünschnitt
- Kgr...Kompost aus Gärrest
- Zahlen 1...4 → Quartal der Beprobung

In Abbildung 9 sind die Gehalte an Trockenrückstand sowie dessen organischer Anteil dargestellt. Deutlich zu sehen ist die Abnahme des TR-Gehaltes im Bioabfall im Winterhalbjahr (Quartal 1 und 4) durch einen höheren Anteil an feuchten Küchenabfällen. Auch der Anteil der Organik ist in Herbst und Winter höher, da im Sommer auch viel Erdmaterial und evtl. Anteile von Straßenkehricht in den Bioabfall gelangen, wodurch höhere Anteile Anorganik hinzukommen. Potenziell sind demnach die Herbst- und Winterfraktion für eine Vergärung interessant.

Auch der **Grünschnitt** (inkl. Grasmahd) weist hohe Organikgehalte auf, welche potenziell energetisch als auch stofflich interessant wären. Aufgrund der Trockenheit und des hohen Ligningehaltes insbesondere bei der Strauch- und Astfraktionen kommt eine Nutzung im landwirtschaftlichen Biogasbereich nicht in Frage. Eine Verwendung als Brennstoff von diesen Teilfraktionen wäre interessant.

Mit Ausnahme des Gärrest GR1, welche sehr untypische Eigenschaften aufzeigte, waren die **Gärreste** deutlich feuchter (schlammiger) durch den biologischen Abbau von Feststoffen. Der Abbaugrad der Organik war vergleichsweise gering. Für eine Nachkompostierung wurde trotzdem 1/3 Grünschnitt beigemischt, um den TR-Gehalt anzuheben und genügend Organik für eine biologische Temperaturerhöhung zu erhalten.

Alle beprobten **Komposte** zeigten über das Jahr 2022 vergleichbare Eigenschaften und einen guten Organikabbau. Einzige Ausnahme war die Probe Kg3 mit einem sehr hohen TR-Gehalt, welcher möglicherweise auf eine trockene Witterung oder geschützte Randlage in der Kompostmiete hinweist.

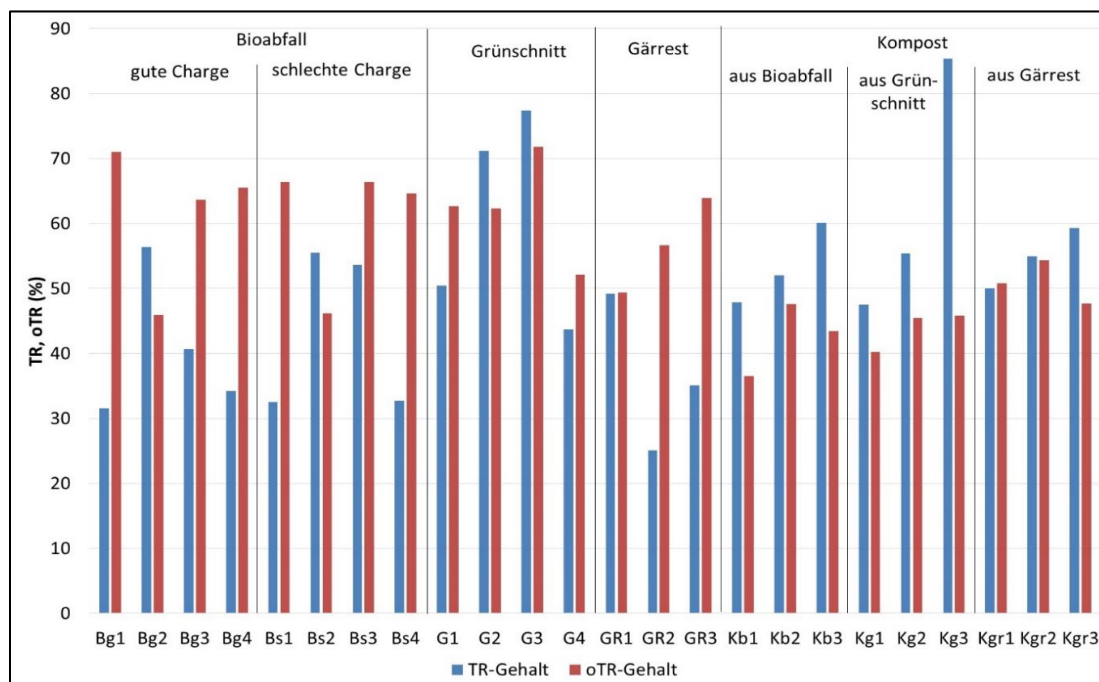


Abbildung 9: TR, oTR-Gehalte ausgewählter Proben

Ausgewählte düngerelevante und gelöste Nährstoffe sind in Abbildung 10 dargestellt.

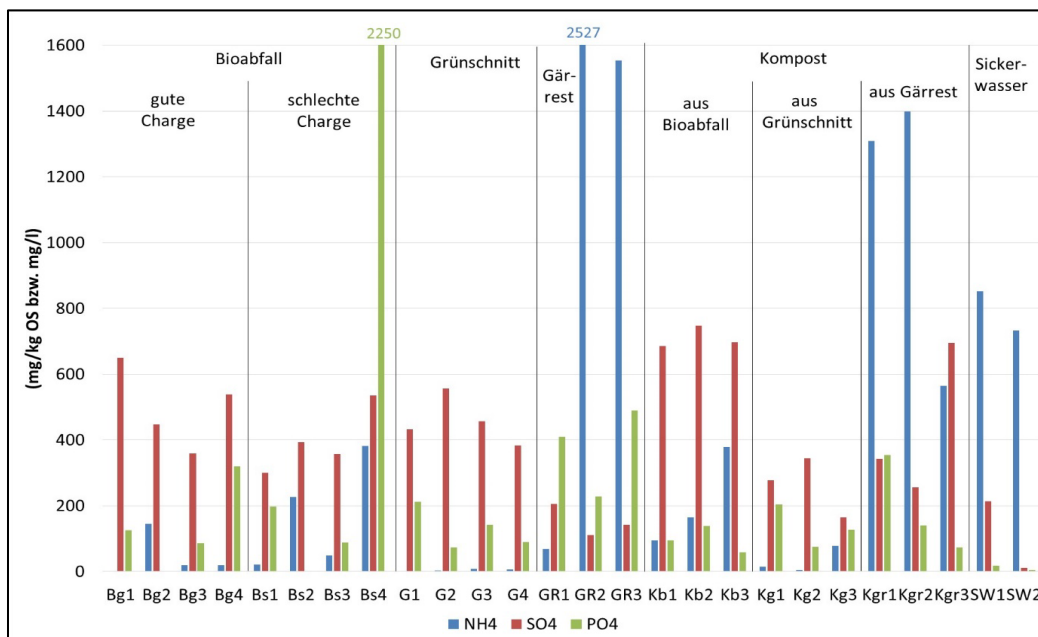


Abbildung 10: Ammonium-, Sulfat- und Phosphatgehalte für ausgewählte Proben

Ammonium findet sich erwartungsgemäß in den Gärresten wieder (Ausnahme GR1, siehe oben). Das Sickerwasser (SW) stellt mit den gemessenen Ammoniumgehalten auch eine potenzielle Quelle für eine Ammoniakstripping dar. Die hohen Ammoniumgehalte in den Gärrestkomposten sind untypisch und deuten auf eine schlechte Belüftung während der Kompostierung hin (evtl. zu feucht).

Als weiterer wichtiger Nährstoff kann Phosphat in verschiedenen Proben in ähnlichen Konzentrationen nachgewiesen werden, wie beispielsweise in entwässerten Klärschlämmen. Im Sinne einer Kreislaufnutzung wäre eine Rückgewinnung denkbar. Die sehr hohen Gehalte im Bioabfall Bs4 sind möglicherweise auf untypische Verunreinigungen zurückzuführen.

Auch Kalium, als wichtiger Pflanzendünger sowie Calcium und Magnesium wurde in den Proben gefunden (hier ohne Abbildung).

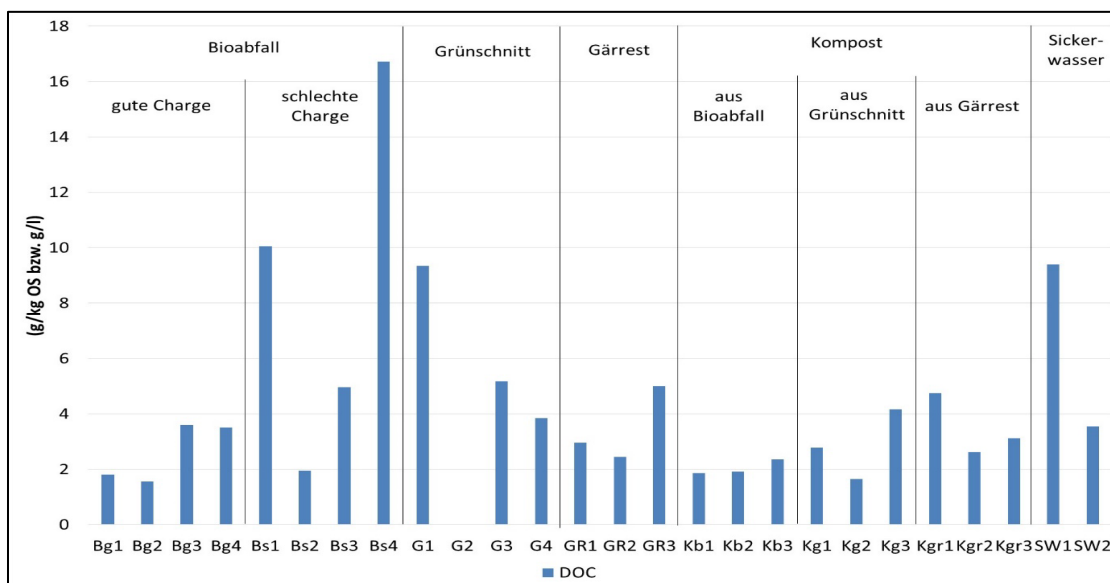


Abbildung 11: DOC-Werte für ausgewählte Proben

Die gelösten Kohlenstoffverbindungen (DOC in Abbildung 11) zeigen für die sauren Bioabfallproben und für das Sickerwasser einen guten Gehalt an schnell biologisch verfügbaren Substanzen an.

Dies spiegelt sich zum Teil auch in der gemessenen Biogasausbeute für die untersuchten Stoffsysteme wider (Abbildung 12).

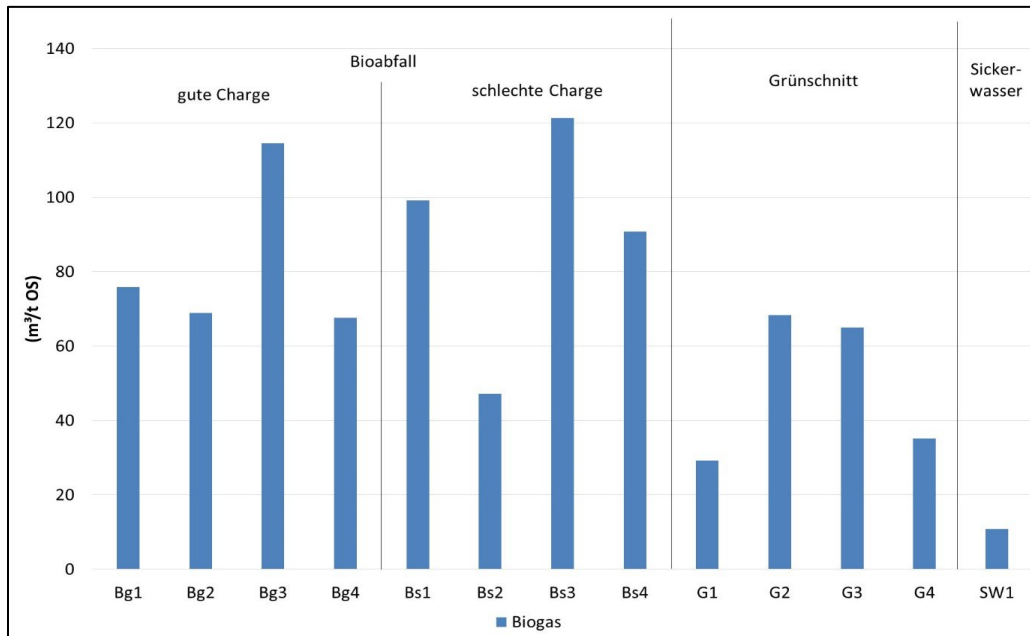


Abbildung 12: Biogasausbeute pro t Originalsubstrat (OS) für ausgewählte Proben

Generell liegen die Gasraten niedriger als z.B. beim Referenzsubstrat Maissilage (ca. 200 m³/t OS). Jedoch handelt es sich um Reststoffe, welche bereits bei der Sammlung und Lagerung Energieverluste erfahren und Teilfraktionen enthalten mit schwer abbaubaren Komponenten (z.B. Holz). Wie sich zeigt, sind beim Bioabfall tendenziell die Herbst- und Winterfraktionen sowie beim Grünschnitt die Sommerfraktionen (weniger verholzt) für eine Vergärung interessant.

Weitere analysierte Reststoffströme

Neben diesen Reststoffströmen, welche kontinuierlich über das ganze Jahr anfallen und bereits stofflich (Kompostierung) und energetisch (teilweise Vergärung) genutzt werden, wurden im Projekt **weitere Reststoffströme** recherchiert, angefragt und zum Teil beprobt. Darunter fanden sich saisonal anfallende Stoffströme wie Obsttrester aus der Herstellung von Säften und Wein, welche nur im Herbst in einem relativ kleinen Zeitfenster anfallen. Einen weiteren relevanten und saisonalen Stoffstrom, welcher von Frühjahr bis Herbst anfällt, stellt die Grasmahd dar. Die Mengen an Grasmahd sind insgesamt als erheblich anzusehen, fallen aber räumlich an sehr unterschiedlichen Stellen in unterschiedlicher Qualität an. Weitere Stoffströme, welche im Projekt näher betrachtet wurden, sind Pferdemit und Biertreber, welche das ganze Jahr über anfallen. Die Thematik Pferdemit wurde von dem Reitsportzentrum Jena an IRRMa herangetragen, welchen adhoc die energetische Verwertung der Mistreststoffe seitens eines Abnehmers gekündigt wurde. Nutzungsoptionen wurden anhand der durchgeführten Analysen eruiert. Abbildung 13 und Abbildung 14 zeigen die beschriebenen Stoffströme.



Abbildung 13: Apfeltrester, Traubentrester, Biertreber



Abbildung 14: Pferdemist, Grasmahd

Neben den gezeigten Stoffströmen wurden einmalig noch Laub sowie Hefetrub aus der Wein- und Sektherstellung als Spezialität beprobt. Mehrere Anfragen bei der Gemüseproduktion Schkölen GmbH für eine Beprobung von Tomatenresten wurden leider abgelehnt.

In Abbildung 15 sind die Gehalte an Trockenrückstand sowie dessen organischer Anteil dargestellt. Im Vergleich zu Bioabfall und Grünschnitt sind die hier betrachteten Proben tendenziell feuchter und weisen deutlich höhere Organikgehalte auf. Beides sind Eigenschaften, welche eine Nassaufbereitung für die stoffliche Nutzung sowie eine Nassvergärung für die energetische Nutzung nahelegen.

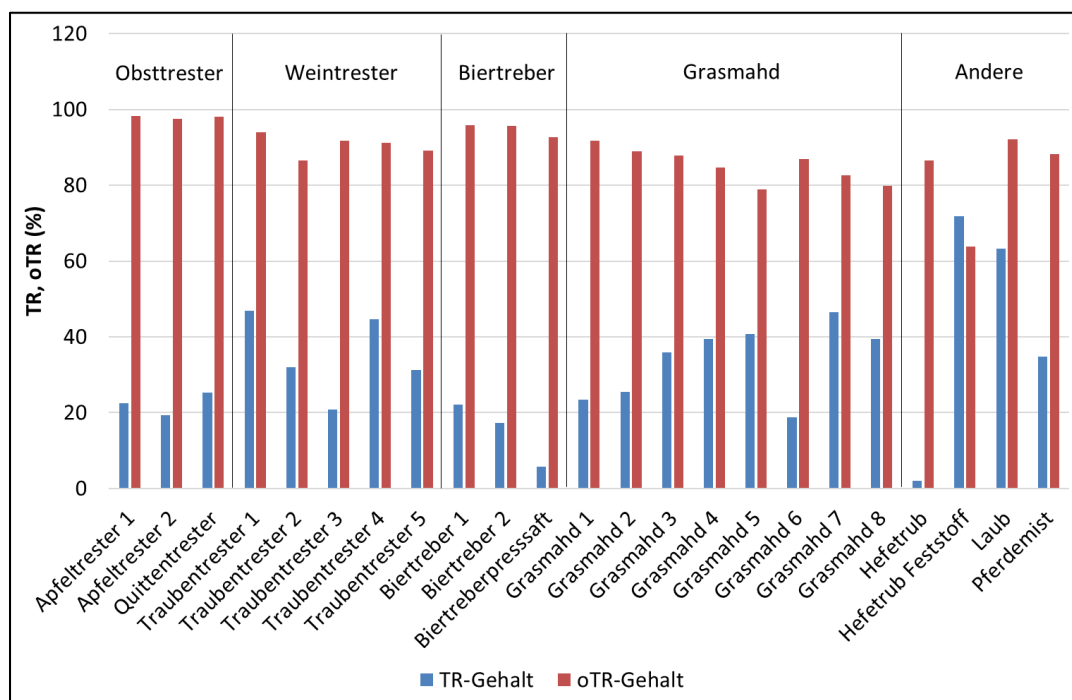


Abbildung 15: TR- und oTR-Gehalt für saisonale und alternative Reststoffe

In den Trebern und Trestern sind vergleichsweise geringe Gehalte an sofort verfügbaren Ionen. In den Grasschnitten 2 bis 8 sind höhere Werte für Ca, NH₄ und PO₄ zu verzeichnen, welche z.T. auch höher liegen als die Werte für Bioabfall oder Grünschnitt (Abbildung 16).

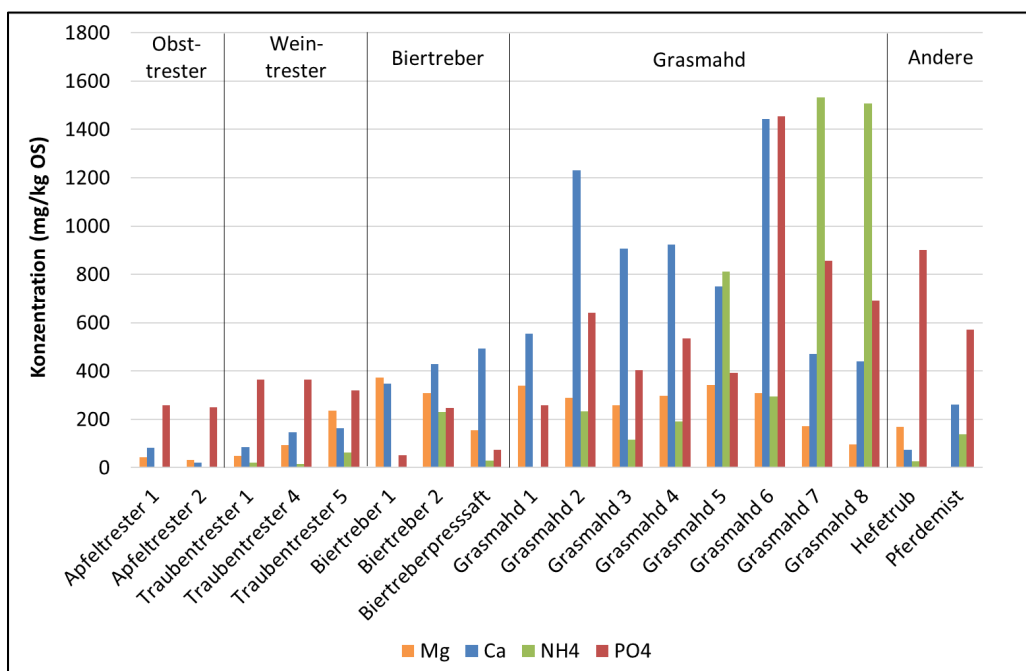


Abbildung 16: Gelöste Ionen (1) - für saisonale und alternative Reststoffe

Speziell Biertreber und Obsttrester sind arm an SO_4 , Cl^- und K . Die analysierten Weintrester und Grasmahd mit einem höheren Anteil an Zellwänden weisen höhere Gehalte an Kalium auf, welche leicht oberhalb der Werte für die Bioabfall und Grünschnittproben liegen.

Im Gegensatz zu den direkt verfügbaren und gelösten Ionen zeigen die Gesamtgehalte (inkl. im Feststoff gebundene Anteile) ein ausgeglicheneres Bild (Abbildung 17). Mit etwa 10 kg Stickstoff pro Tonne Frischsubstrat kann von einem relevanten Nährstoffpotenzial ausgegangen werden.

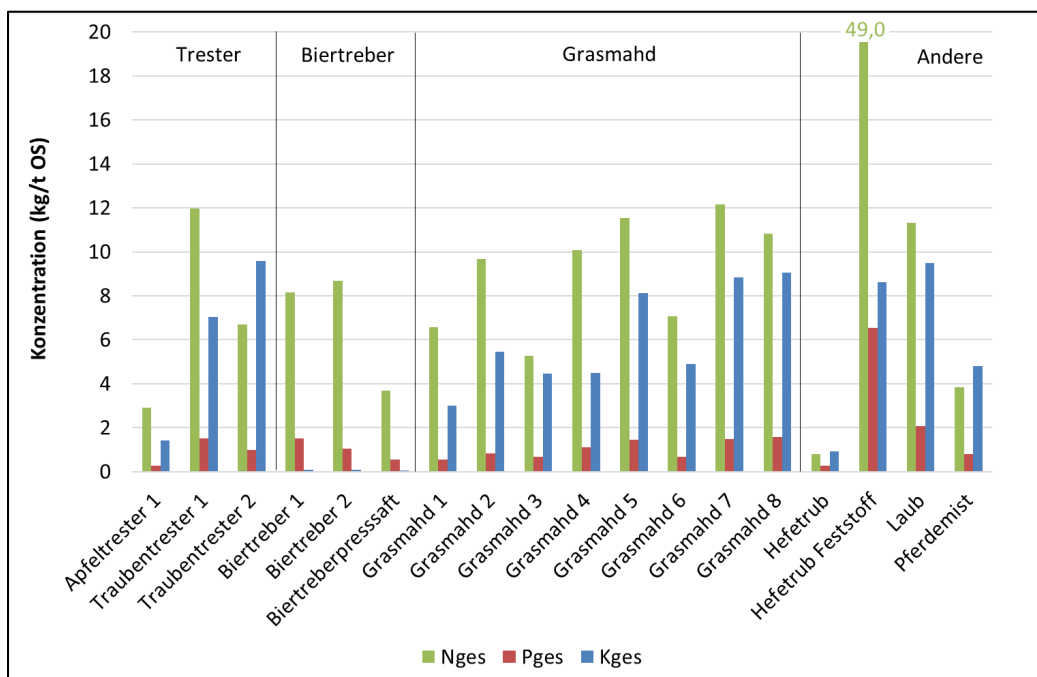


Abbildung 17: Gesamtgehalte an NPK für saisonale und alternative Reststoffe

Eine Ausnahme bildet der abgepresste Hefetrub aus der Sekt-Herstellung mit knapp 50 kg Stickstoff. Dieser besteht zu einem großen Anteil aus Hefen, welche ihrerseits aus Proteinen (Stickstoff) bestehen.

Das in Abbildung 18 dargestellte Gaspotenzial zeigt insbesondere für die Obsttrester, aber auch für Treber und Grasmahd ein gutes Gaspotenzial, welches höher liegt als bei Bioabfall und Grünschnitt. Wenn für die Obsttrester keine höherwertigere Verwertung (z.B. Bioethanol oder weitere Wertstoffe) in Frage kommt, wäre die Energetische Nutzung in Biogasanlagen eine sehr gute Variante.

Die Grasmahd sollte aufgrund der großen Anfallmenge und der prinzipiellen Möglichkeit einer Konservierung (Silierung) für eine verstärkte Verwendung in Biogasanlagen näher betrachtet werden. Hierfür sind Qualitätskontrollen sowie die Sicherstellung der Störstofffreiheit notwendig, um den Betrieb der Biogasanlagen abzusichern.

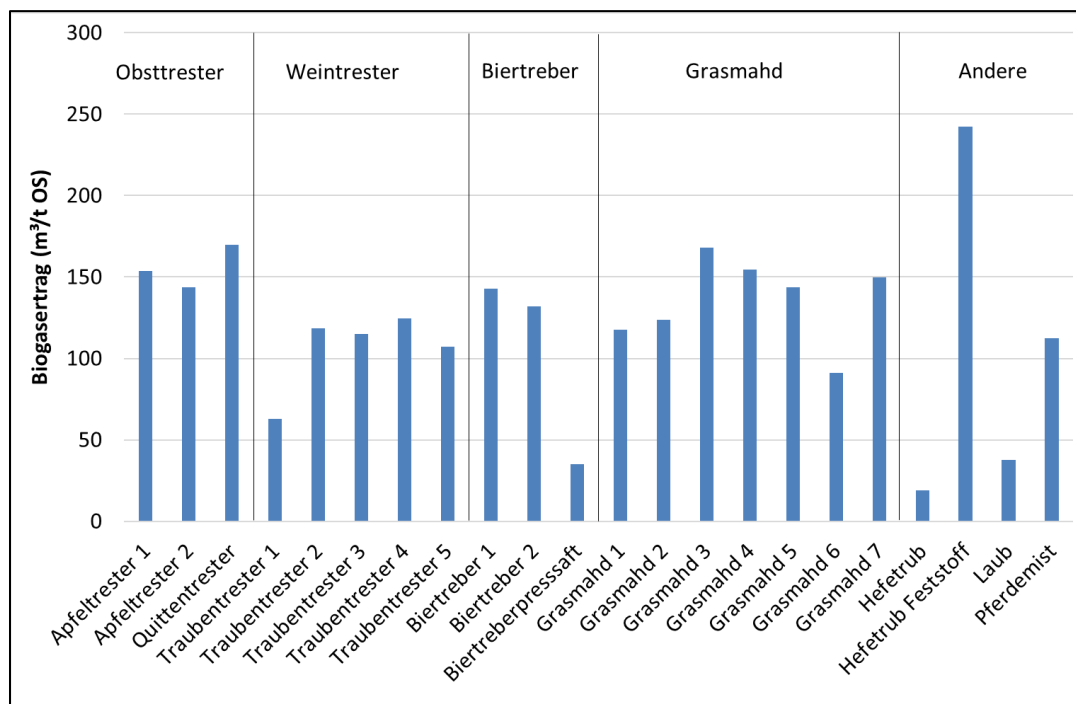


Abbildung 18: Biogasertrag für saisonale und alternative Reststoffe

Weitere Proben und Muster zur Analyse kamen aus der Verbrennung organischer Reststoffe. Diese werden derzeit aber nur sehr begrenzt alleine thermisch verwertet („Mono-Verbrennung“). In den meisten Fällen erfolgt eine Mitverbrennung, so zum Beispiel in Müllverbrennungsanlagen. Daraus resultierte im Rahmen dieses Projektes letztlich die Fokussierung der Untersuchungs- und Entwicklungsarbeit auf die 3 relevanten Typen von Verbrennungsaschen (Klärschlammaschen, Tiermehlaschen, Holzaschen). Diese 3 ausgewählten Typen von Verbrennungsaschen bilden jedoch bereits eine große chemisch-physikalische Variabilität ab, weshalb eine spätere Übertragung der erzielten Projektergebnisse auf weitere Aschetypen grundsätzlich möglich erscheint. Dies ist insofern für die angestrebte Verwertungsphase nach Projektende relevant, da erwartet wird, dass im Rahmen der höheren Anforderungen an Rückgewinnungsquoten und einer nachhaltigeren Nutzung von Reststoffen als einheimische Rohstoffquelle perspektivisch die Verwertungsketten stärker hinsichtlich der Kreislaufführung ausgerichtet werden und somit zukünftig weitere Typen von Verbrennungsaschen aus organischen Reststoffen anfallen werden.

Die beschafften Muster von Verbrennungsaschen wurden an der MFPA mittels Elementanalyse umfangreich chemisch analysiert und charakterisiert. Hierfür wurden die Verfahren Optische Emissionsspektrometrie (OES) und Massenspektrometrie (MS) verwendet. Die Proben wurden mit Königswasser, einem Gemisch aus Salz- und Salpetersäure, mittels Mikrowelle aufgeschlossen. Als Ergänzung wurden ebenfalls Analysen mittels Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA) und Röntgenbeugung (XRD) an nicht aufgeschlossenen Proben durchgeführt.

Die Interpretation der Analyseergebnisse und die Evaluierung hinsichtlich Nährstoffquelle erfolgten durch pontes pabuli. Aus der Bewertung der Analyseergebnisse resultierten grundlegende Aussagen in Bezug auf ihr charakteristisches Nähr- und Schadstoffspektrum. :

- Holz-, Klärschlamm- und Tiermehlaschen haben ein jeweils charakteristisches Nährstoff-, aber auch Schadstoffspektrum, welches Tabelle 1 beispielhaft für ausgewählte Muster vergleichend darstellt.
- Die Holzaschen können als relevante Nährstoffe insbesondere Kalium und Schwefel liefern, sind in ihrer Nährstoffzusammensetzung jedoch je nach Verbrennungsstandort extrem unterschiedlich. Zudem weisen Holzaschen erhebliche Mengen an Schwermetallen auf. Die in Tabelle 1 aufgeführten Beispiele von den Standorten Henningsdorf, Silbitz und Zwickau zeigen die grundsätzlich ermittelte Bandbreite.
- Klärschlamm- und insbesondere Tiermehlaschen liefern hauptsächlich Phosphat und nur sehr untergeordnet weitere Nährstoffkomponenten wie Kalium, Magnesium oder Schwefel. Im Vergleich zu Holzaschen ist der Schwermetallgehalt in Klärschlammaschen deutlich geringer, in Holzaschen nur minimal.

Tabelle 1: Vergleich der chemischen Analyse von Holz-, Klärschlamm-, und Tiermehlasche

		Holzaschen			Tiermehl-Asche	Klärschlamm-asche		
		Henningsdorf Filterasche	Silbitz Filterasche	Zwickau Filterasche				
Al ₂ O ₃	[%]	0,72	3,74	4,50	0,25	13,28		
CaO	[%]	18,15	29,27	20,34	45,74	15,78		
Cl-	[%]	5,10	3,20	4,10	0,00	0,05		
Fe ₂ O ₃	[%]	7,02	3,32	2,23	1,03	8,52		
K ₂ O	[%]	30,00	2,32	7,17	3,93	1,31		
MgO	[%]	1,91	2,37	2,67	1,67	2,60		
MnO	[%]	0,43	0,25	0,68	1,87	0,13		
Na ₂ O	[%]	1,48	1,42	0,69	4,68	0,42		
P ₂ O ₅	[%]	2,31	0,85	3,07	37,62	15,05		
SO ₃	[%]	27,71	7,79	6,12	1,90	0,62		
SiO ₂	[%]	3,32	30,18	23,53	1,07	36,08		
Glühverlust	[%]	6,70	15,77	27,52		2,07		
zulässige Grenzwerte								
B	[mg/kg]	494	174	361	0,09			
Cd	[mg/kg]	59,65	39,59	23,73	0,001	1,77	0,0	50 mg/kg P ₂ O ₅
Cr ges.	[mg/kg]	73,9	165	51,7	0,143		300,0	Cr _{gesamt}
Cr VI	[mg/kg]	0	0	0			2,0	Cr-VI
Cu	[mg/kg]	192	411	131	0,669	644		
Ni	[mg/kg]	11,2	131,6	36,8	0,135	65	80,0	
Pb	[mg/kg]	483	2308	228	0,187	75,2	150,0	
As	[mg/kg]	18,5	68,7	41,9	0,005	14,3	40,0	
Hg	[mg/kg]	0,078	3,71	0,97	0,0001		1,0	
Zn	[mg/kg]	0,71	16552	4558	5,57	2443	-	
Tl	[mg/kg]	12,5	1,599	3,54	< 0,01		1,0	
Co	[mg/kg]	2,9	32,7	11,5	0,033		-	
U	[mg/kg]	0,2	1,9	1,36	0,02	7,03		

Durch die Untersuchung einer Vielzahl von Mustern der 3 aus unterschiedlichen Verbrennungsstandorten bezogenen Aschetypen konnte die typische Schwankungsbreite der Aschekonstitution gut eingeschätzt werden. Dies war notwendig, um die Prozessparameterfenster für das Verwertungsverfahren so einzustellen, dass eine möglichst große Breite von Verbrennungsaschen verarbeitet werden kann, dabei aber auch ein ausreichender Wirkungsgrad erzielt wird.

Untersuchungen des Löseverhaltens von Nährstoffen und Schadstoffen

Für die geplante Nutzung der Nährstoffe zur Düngung müssen diese zum einen so aus den Aschen aufbereitet werden, dass sie zur Pflanzenernährung wirksam sind. Zum anderen müssen die Schad-

stoffe möglichst weitestgehend von diesen Nährstoffen abgetrennt werden. Da die Holz-, Klärschlamm- und Tiermehlaschen eine grundsätzlich unterschiedliche chemische und mineralogische Konstitution aufweisen, wurde mit Vorversuchen zunächst das grundsätzliche Löseverhalten bei Einsatz unterschiedlicher Lösungsmittel in unterschiedlichen Konzentrationen untersucht. Daraus resultierend wurden jeweils geeignete Lösebedingungen erarbeitet, um die Nährstoffgewinnung bzw. Umwandlung in eine pflanzenverfügbare Form bei gleichzeitig selektiver Schwermetallabtrennung zu realisieren.

Beim Aschetyp „Holzasche“ ist entsprechend festgestellt, dass Kalium als Nährstoff bereits in Wasser unter geeigneten Lösebedingungen fast vollständig löslich ist. Wasser als Lösungsmittel wird dabei gegenüber dem Einsatz von Säuren grundsätzlich bevorzugt. Die Tabelle 2 zeigt, welche Schwermetalle zum Beispiel aus einer Probe bereits mit Wasser herausgelöst werden konnten.

Tabelle 2: Schwermetallkonzentration in Ausgangssache Standort Hennigsdorf

		Hennigsdorf Filterasche
B	[mg/kg]	494
Cd	[mg/kg]	59,65
Cr ges.	[mg/kg]	73,9
Cr VI	[mg/kg]	0
Cu	[mg/kg]	192
Ni	[mg/kg]	11,2
Pb	[mg/kg]	483
As	[mg/kg]	18,5
Hg	[mg/kg]	0,078
Zn	[mg/kg]	0,71
Tl	[mg/kg]	12,5
Co	[mg/kg]	2,9
U	[mg/kg]	0,2

Bei Holzaschen müssen insbesondere Cadmium, Blei und Thallium (-> Überschreitung der Grenzwerte der deutschen Düngemittelverordnung in Tabelle 2 rot markiert) vor der Nutzung des beinhaltenen Nährstoff Kalium möglichst selektiv abgetrennt werden. Durch das Lösen mit Wasser bei erhöhten Temperaturen wird Kalium fast vollständig gelöst, während Cadmium weitestgehend ungelöst bleibt. Die gelösten Schwermetalle Blei und Thallium können durch sulfidische Fällung selektiv vom Kalium ausgefällt werden. Damit ist eine Trennung der in fester Form vorliegenden Schwermetalle von dem gelösten Nährstoff Kalium durch Fest-/Flüssigtrennung möglich.

Beim Aschetyp „Tiermehl- und Klärschlammasche“ wird hingegen eine ausreichend hohe Konzentration von Mineralsäure benötigt, um das Phosphat als Nährstoff zunächst zu lösen. Bei diesem Löseprozess gehen

auch anteilig Schwermetalle mit in Lösung, wie folgende Abbildung 19 darstellt.

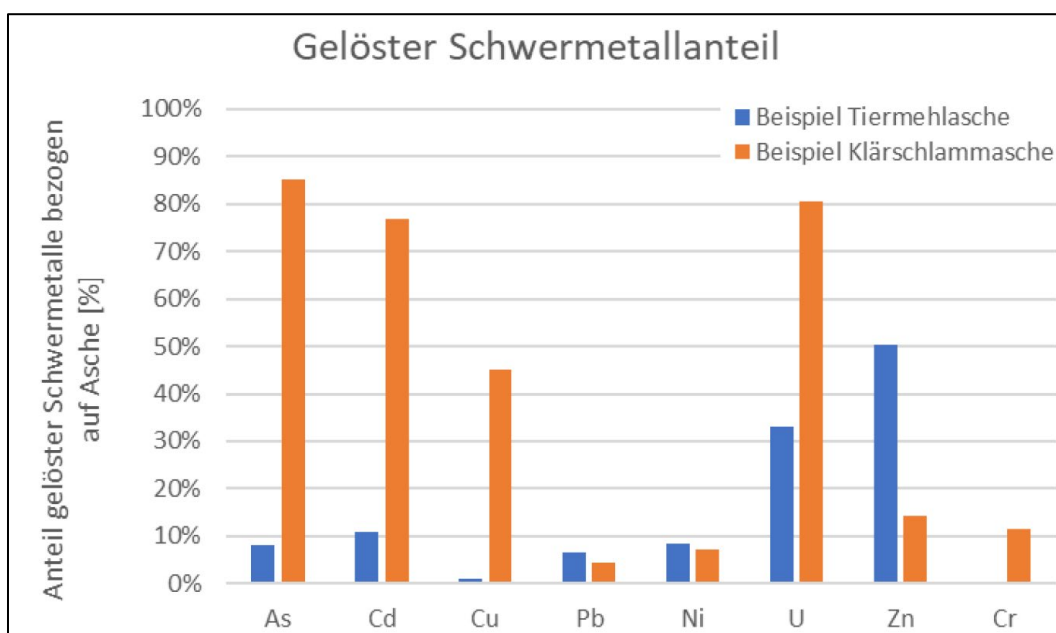


Abbildung 19: gelöster Anteil an Schwermetallen vergleichend bei Tiermehl- und Klärschlammaschen

Eine selektive Fällung der mitgelösten Schwermetalle vom Nährstoff Phosphat ist dabei deutlich schwerer als bei den wässrigen Lösungen aus der Holzasche. Grund dafür ist, dass die Aufschlusslösung sehr sauer ist (pH-Wert $\ll 1$), eine sulfidische Fällung zwar auch im sehr sauren Bereich erfolgen kann, jedoch bei höheren pH-Werten effizienter ist, dabei jedoch Phosphat ausfällt. In den durchgeführten, Fällungsversuchen erfolgte die Untersuchung des Einflusses des pH-Werts auf die sulfidischen Schwermetallfällung und die Phosphatfällung.

Die laborativen Untersuchungen zum Löseverhalten der Schwermetalle aus den beschafften Klärschlammasche-Mustern mit den möglichen Mineralsäuren (Phosphorsäure, Salpetersäure, Schwefelsäure und Salzsäure) wurden beim Projektpartner MFPA durchgeführt. Auf dieser Basis konnten von pontes pabuli kausale Zusammenhänge zwischen den untersuchten Löseparametern und dem gelösten Schwermetallanteil abgeleitet und darauf aufbauend eine effiziente Fällungsprozedur entwickelt werden. Die entwickelte sulfidische Fällungsprozedur wurde anschließend experimentell umfassend untersucht und wissenschaftlich-technisch bewertet. Im Ergebnis dieser experimentellen Untersuchungen konnte eine Fällungsprozedur für die untersuchten Klärschlammaschemuster evaluiert werden, die zu der notwendigen Schwermetallabreicherung führt. Dabei wurden die Parameter für diese Prozedur ermittelt, die als Vorgabe für die anstehende zur Übertragung in den (klein-)technischen Versuchsbetrieb notwendig waren.

Fest-/Flüssigtrennung zur Nährstoff-/Schadstofftrennung

Das ermittelte, sehr unterschiedliche Löseverhalten der verschiedenen Aschetypen erfordert eine typenspezifische Verfahrensabfolge, um die Nährstoffe aus der Asche in eine pflanzennutzbare und handelbare Anwendungsform zu überführen und dabei möglichst weitgehend von den Schwermetallbestandteilen abzutrennen. Verfahrenstechnisch spielt dabei die Fest-/Flüssigtrennung eine wesentliche Rolle. Mit orientierenden Voruntersuchungen wurde ermittelt, welche der Technologien zur Fest-/Flüssigtrennung sich jeweils für das ashespezifische System eignet.

In einer ersten Evaluierungsphase wurden nach der Auswertung verfügbarer Literaturdaten, der Befragung von Technologieexperten zu dieser Aufgabenstellung und der Bewertung der Informationen hinsichtlich Verfügbarkeit, technischen Reifegrad, technische Umsetzbarkeit und der Abschätzung der möglichen Wirtschaftlichkeit die folgenden Technologien als potenziell mögliche Ansätze für die Fest/Flüssig-Trennung hier im Projekt ausgewählt: Zentrifugen, Vakuumbandtrockner, Filterpressen.

Mit diesen Technologien wurden anhand der 3 Demonstrator-Aschetypen Eignungsuntersuchungen durchgeführt. Daraus lassen sich folgende Kernaussagen zusammenfassen:

- Zentrifugen, Vakuumbandtrockner und Filterpressen scheinen grundsätzlich für das Fest-Flüssig-System zur Trennung für die hier untersuchten Aschetypen geeignet.
- Vakuumbandtrockner und Filterpressen lieferten dabei in den durchgeführten Versuchen eine höhere Abtrennwirkung als Zentrifugen. Durch Filtration mittels Zentrifuge resultierte ein Filterkuchen – je nach Aschetypus mit einer Rest-feuchte von 45 bis 60 %. Je nach Prozesssteuerung (Zentrifugen-Geschwindigkeit, Verweilzeit) kann Einfluss auf den Anteil der verbleibenden Schwebepartikel in der Suspension genommen werden (Abbildung 22). Durch Zugabe von geeigneten Flockungsmitteln kann die Abtrennwirkung zwar etwas erhöht werden, die moderate Verbesserung stand jedoch nicht im Verhältnis zu den Kosten der Flockungshilfsmittel.

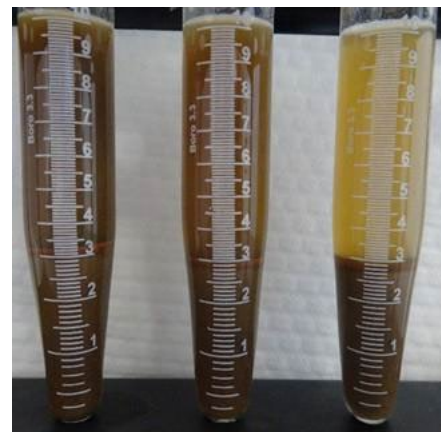


Abbildung 20: Abtrennwirkung in Abhängigkeit

- Der Vakuumbandtrockner ist eine in viele Produktionsprozesse eingeführte Technologie zur Fest-/Flüssig-Trennung von Stoffen. Grundsätzlich ist die Entwässerbarkeit für die untersuchten Systeme gut. Das heißt, es baut sich ein geeigneter Filterkuchen auf, der gut formstabil ist und das Filtrat kann abgetrennt werden (Abbildung 23). Das abgetrennte Prozesswasser weist einen gewissen Anteil von Schwebepartikeln auf. Dies ist insofern als unkritisch zu bewerten, da dieses Prozesswasser im Kreislauf geführt und nicht als Abwasser entsorgt wird. Ohne eine weitere Konditionierung der Suspensionssysteme wurden mittels Vakuumbandtrockner nur Restfeuchten von 40 bis 50 % erreicht. Eingeschätzt wird, dass im technischen Produktionsmaßstab Restfeuchten von ca. 40 % erreicht werden können.
- Mit Membranfilterpressen ließen sich alle erzeugten Suspensionen Holz-, Klärschlamm-, und Tiermehlasche gut filtrieren. Das ausgepresste Filtrat zeigte nur geringe Anteile an Schwebstoffen in der Anfangsphase (normaler Betriebszustand bis zum Aufbau des Filterkuchens), anschließend war das Filtrat verhältnismäßig klar. Es wurde durch Anlegen eines Pressdrucks von ca. 15 bar eine Restfeuchte von 30 – 40 % erreicht.
- Festzustellen gilt es dabei, dass die erheblichen Unterschiede hinsichtlich der chemisch-mineralogischen Konstitution und des Löseverhaltens bei der Fest-Flüssig-Trennung zwischen den untersuchten Aschetyphen nicht in der gleichen Ausprägung bestätigt wurden.



Abbildung 21: Beispiel für resultierenden Filterkuchen



Abbildung 22: Erzeugter Filterkuchen

Ableitungen der Verfahrensführung

Zur Erschließung der sehr unterschiedlichen Nährstoffpotentiale der verschiedenen Aschetyphen ist jeweils eine angepasste Prozessführung erforderlich, die im Rahmen dieses Projektes für die „Tiermehlasche“, „Klärschlamm-asche“ und „Holzasche“ aus den oben aufgeführten Voruntersuchungen abgeleitet wurde. Diese Prozessführung wurde dabei auf die Unterschiede im Löseverhalten, die Anforderungen zur Schadstofftrennung und den Nährstoffinhalt aschetypspezifisch angepasst und zunächst im laborativen Maßstab experimentell auf Machbarkeit und Wirksamkeit überprüft.

Holzaschen - Verfahrensweg

Die Holzaschen bieten als Nährstoffe insbesondere Kalium und Schwefel, beinhalten jedoch erhebliche Mengen an Schwermetallen. Für die Verarbeitung solcher Holzaschen wurde deshalb bereits das Konzept entwickelt, die Nährstoffe möglichst vollständig und die Schwermetalle möglichst nicht herauszulösen, das selektive Leaching. Aus diesem selektiven Leaching-Prozess resultiert eine nährstoffhaltige, weitgehend schwermetallfrei Lösung. Gemäß der ermittelten Parametermatrix zur Löslichkeit des Kaliums, der Löslichkeit der Schwermetalle und der Prozedur zur Abtrennung der relevanten Schwermetalle wurden Nährstofflösungen aus Beispiel-Holzaschen im Labormaßstab erzeugt. Diese Lösung kann

- entweder direkt bei der Kompostierung zur Bewässerung genutzt werden oder
- in ein lager- und transportstabile Nährstoffsubstrat überführt werden

Die direkte Verwendung bei der Kompostierung bildet grundsätzlich eine sehr wirtschaftliche und nachhaltige Variante ab, da keine weiteren Verarbeitungsschritte mit Energie- und Hilfsstoffeinsatz notwendig sind. Diese Variante bedingt jedoch eine mit der Kompostierung synchronisiertes Stoffstrommanagement und eine (direkte) räumliche Verbindung, die in dieser Weise nicht immer abgebildet werden kann. Deshalb und weil die Nährstofflösung aufgrund des hohen Flüssigkeitsanteils für Lagerung und Transport ungeeignet ist, ergab sich die Notwendigkeit einer alternativen Verarbeitung dieser Nährstofflösung zu einem (festen) Nährstoffsubstrat.

Die (Ein)Trocknung der Nährstofflösung ist ein technisch häufig angewandtes Verfahren zur Gewinnung von Nährstoffen aus Lösungen (z.B. Ammoniumsulfatlösung). Nachteilig ist jedoch der hohe Einsatz von Trocknungsenergie, der nur dann gerechtfertigt scheint, wenn dafür beispielsweise Abwärme genutzt werden kann. Im Labormaßstab wurden dennoch Muster durch Trocknung der erzeugten Nährstofflösung erzeugt, um daran die stoffliche Charakterisierung und eine Bewertung zur Eignung als Nährstoffprodukt durchzuführen.

Neben der (Ein)Trocknung können die Nährstoffe aus der Nährstofflösung, hier im Wesentlichen Kalium und Sulfat, auch mittels (Aus-)Fällungs- und Kristallisationsprozessen in eine festes Nährstoffsubstrat überführt werden. Zur Fällung von Kalium ergibt sich im Grunde nur die Möglichkeit zur Bildung von Kalium-Magnesium-Phosphat (KMgPO_4) als unlösliche Kaliumphase in Wasser. Sulfat als weiterer Nährstoff in der Lösung lässt sich hingegen allein durch Zugabe von Calcium gut ausfällen. Hierzu wurde eine Prozedur erarbeitet.

Mit einem laborativen Versuchsaufbau wurden systematisch Versuche zur Ausfällung/-kristallisation des Nährstoff Kaliums durch den Projektpartner MFPA im Labor durchgeführt. Auf Basis dieser Ergebnisse konnte eine 2-stufige Fällungsprozedur mit notwendigen Parameterfenstern ermittelt werden, die eine Fällung von Kalium und Sulfat aus der erhaltenen Nährstofflösung aus dem Leaching-Prozess von Holzaschen ermöglicht. Dabei wird zunächst Sulfat durch Zugabe von Calcium-Ionen (hier als Ca(OH)_2) quantitativ aus dem System gefällt. Anschließend erfolgt die Kalium-Auskristallisation zu Kalium-Magnesium-Phosphat durch gezielte Zugabe von Magnesium- und Phosphatinen (als Mg(OH)_2 und H_3PO_4) in einem definierten Fällungsbereich. Bei dieser Prozedur kann dabei das gefällte Calciumsulfat aus dem ersten Fällungsschritt separat durch eine Fest-/Flüssigtrennung ausgeschleust werden. Dadurch wird in einer zweiten Fest-/Flüssigtrennung nach K-Mg-P-Kristallisation ein Weitergehen des reines Kalium-Magnesium-Phosphat erhalten. Alternativ kann die erste Fest-/Flüssigtrennung auch entfallen, wobei dann ein Gemisch aus Calciumsulfat und Kalium-Magnesium-Phosphat resultiert. Die erhaltenen Fällungsprodukte wurden umfassend von der MFPA analysiert. Beide erhaltenen Nährstoffsubstrate, mit oder ohne Abtrennung von Calciumsulfat, waren brauchbare Düngekomponenten oder Nährstoffkomponenten zur Weiterverarbeitung in Düngerrezepturen.

Verfahrensweg für Klärschlammasche mit hoher Schwermetallbelastung

Für den Aschotypen „Klärschlammasche“ kann zur Nutzbarmachung der Nährstoffe und Abtrennung der Schwermetalle das bereits mit Projektantrag geplante Konzept des Pontes pabuli – Grundverfahren genutzt werden, wobei durch einen Säureaufschluss zunächst das schlechtlösliche und damit kaum pflanzenverfügbare Phosphat aus der Asche umgewandelt wird. Die Erkenntnisse aus den Untersuchungen zum Löseverhalten, zur Abtrennung der Schwermetalle und zur Fest-/Flüssigtrennung wurden zu einer ganzheitlichen Prozessführung im Kreislaufbetrieb zusammengeführt.

Häufig problematisch bei Klärschlammaschen ist der darin integrierte Anteil an Schwermetallen, der entsprechend im Prozess zumindest anteilig abzutrennen ist. Eine anteilige Schwermetallabtrennung ist im pontes pabuli – Verfahren möglich, indem die gelösten Schwermetalle im abgetrennten Prozesswasser für dessen Rückführung zum nächsten Lösebatch gefällt werden. Dabei liegen je nach Art und Konzentration der eingesetzten Mineralsäure die in der Klärschlammasche vorhandenen Schwermetalle in gelöster Form im Prozesswasser nach der Fest-/Flüssig-Trennung vor. Vor der Rückführung des abgetrennten Prozesswassers können die gelösten Schwermetalle durch sulfidische Fällung abgetrennt und so aus dem System ausgeschleust werden. Je nach Prozesssteuerung und insbesondere Art

und Konzentration der eingesetzten Mineralsäure kann der abgetrennte Anteil an Schwermetallen zielgenau eingestellt werden. Der ebenfalls aus der Fest-/Flüssigtrennung resultierende nährstoffreiche Filterkuchen enthält das aufgeschlossene Phosphat. Dieser Filterkuchen kann in dieser Form einem Bodensubstrat als Nährstoffdünger direkt zugemischt werden. Alternativ kann die Trocknung, Granulation und gegebenenfalls Konditionierung zu einem lagerstabilen Düngergranulat erfolgen. Folgende Abbildung 23 verdeutlicht den Prozessablauf.

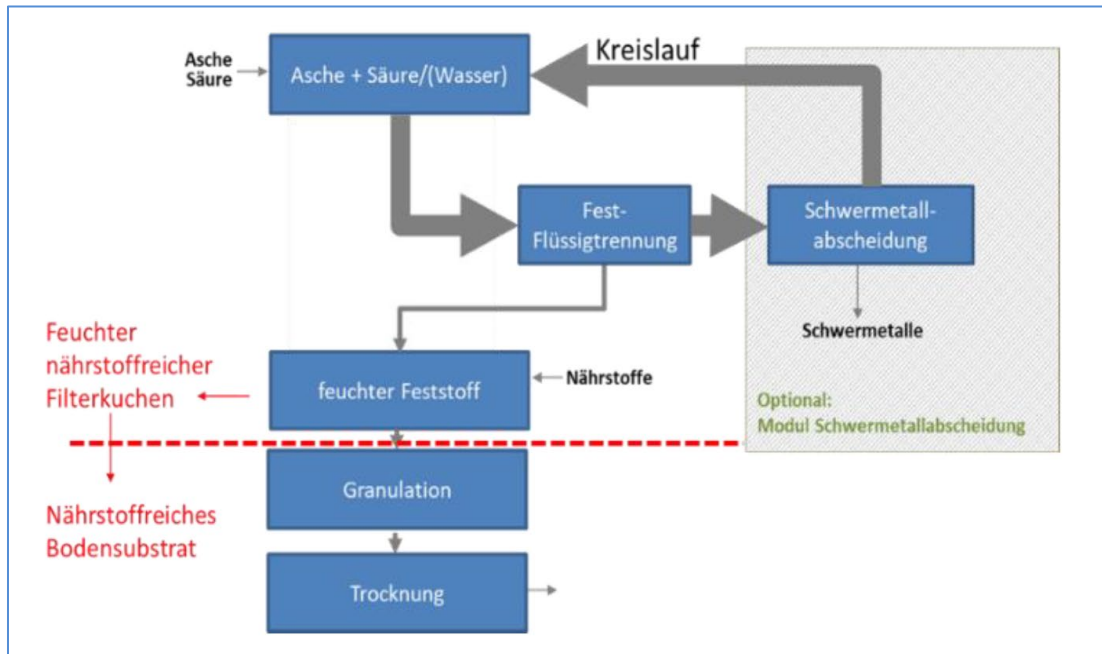


Abbildung 23: Verfahrenskonzept für „Tiermehlmasche“ und „Klärschlammmasche“

Die Wirksamkeit des so abgeleiteten Gesamtprozesses aus Löse- und Umwandlungsprozess in der Suspension, die anschließende Fest/Flüssigtrennung und die Rückführung der abgetrennten Lösung (Prozesswasser) mit Schwermetallabreicherung wurden jeweils über mehrere Zyklen an den beschafften Demonstratoraschen untersucht. Die praktische Durchführung der Versuche erfolgte beim Projektpartner MFPA nach Vorgaben und Auswertung durch pontes pabuli. Im Ergebnis dieser experimentellen Untersuchungen konnte eine Prozedur für die Verfahrensführung evaluiert werden, die zu einem hohem Aufschlussgrad des Phosphates (>>90 %) und der notwendigen Schwermetallabreicherung führte. Dabei wurden die Parameter für diese Prozedur ermittelt, die als Vorgabe für die Übertragung in den (klein-)technischen Versuchsbetrieb diente.

Verfahrensweg für Klärschlamm-/Tiermehlmasche mit geringer Schwermetallbelastung

Der oben dargestellte Verfahrensweg bietet eine prinzipielle Lösung für Tiermehl- und Klärschlammaschen, bei dem das Phosphat in eine besser lösliche Form überführt wird und bei Bedarf Schwermetalle abgereichert werden können. Für Tiermehl- oder Klärschlammaschen, die nur eine geringe Schwermetallkonzentration aufweisen, wurde alternativ der folgende, besonders wirtschaftliche Verfahrensweg entwickelt:

- Statt wie im pontes pabuli – Grundverfahren erfolgt der Säureaufschluss nicht in einem Suspensionssystem, sondern lediglich im erdfeuchten Zustand. Dazu werden die entsprechenden Anteile Asche mit Mineralsäure in einem Intensivmischer erdfeucht vermischt. Nach Einhalten einer Reaktionszeit kann dieses erdfeuchte Gemisch weiter konditioniert werden. So können beispielsweise der pH-Wert eingestellt oder bei Bedarf weitere Nährstoffkomponenten zugegeben werden.
- Dass die Aufschlussreaktion des Phosphates auch in solch einem erdfeuchten System realisiert werden kann, ist grundsätzlich bekannt. Aschetypspezifisch mussten jedoch die Verhältnisse

zwischen Asche und Säure sowie die notwendige Säurekonzentration ermittelt und exakt aufeinander abgestimmt werden, damit ein weitgehend vollständiger Aufschluss des Phosphates erfolgt, gleichzeitig der Prozess steuer- und handhabbar ist und ein erdfeuchtes Gemisch oder ein Granulat mit definierter Spezifikation resultieren.

Das (so konditionierte) erdfeuchte Reaktionsgemisch entspricht dem Filterkuchen aus dem pontes pabuli – Grundverfahren. Vorteil dieser Verfahrensvariante ist, dass dieses Reaktionsgemisch auf sehr einfache Weise erhalten wird, weshalb diese Verfahrensvariante erhebliche wirtschaftliche Vorteile hat. Jedoch besteht bei dieser Verfahrensvariante die Möglichkeit der Schwermetallabtrennung nicht. Diese Verfahrensvariante ist entsprechend nur für die Aschen geeignet, die eine geringe Schwermetallkonzentration aufweisen.

Durch den Projektpartner MFPA wurde durch experimentelle Untersuchungen dieser alternative Verfahrensweg im laborativen Maßstab untersucht. Dabei wurden umfangreiche Versuche zur Ermittlung des notwendigen Asche-Säureverhältnis sowie der erforderlichen Reaktionszeit für einen ausreichenden Phosphataufschluss mit Schwefelsäure, Salpetersäure und Phosphorsäure durchgeführt und die Reaktionsprodukte hinsichtlich ihrer Eigenschaften untersucht. Pontes pabuli begleitete die Versuche wissenschaftlich-technisch und leitete entsprechende Zusammenhänge zur Eingrenzung geeigneter Parameterfenster ab.

Aufnahme und Zusammenführung GIS-Daten für ausgewählte Sammelgebiete

Die dennoch eingeschränkte Datenlage machte es erforderlich, noch auf alternative Datenbeschaffung umzuschwenken. Im Rahmen einer GIS-Potentialanalyse wurde das theoretische Biomasse-Potential ermittelt. Diese GIS-Umgebung ist Grundlage, an die weitere thematische Karten-Layer anknüpfen werden:

1. Datenbestand der Technologien der Verwertung
2. Datenbestand organischer Reststoffströme (Mengen, Konzentration)
3. aktuelle Entsorgungswege einzelner/spezieller Fraktionen
4. Verwerter und Entsorger, Sammelstützpunkte/Recyclinghöfe
5. Entfernungsanalyse
6. Bewertung wirtschaftlicher Auswirkungen bspw. auf Gebührensatzung

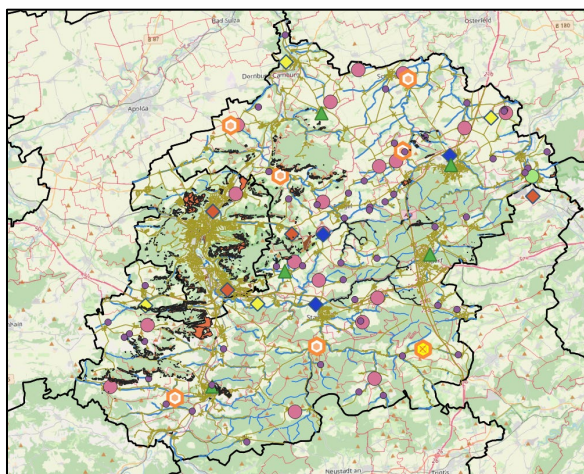


Abbildung 24: GIS Layer Flächen

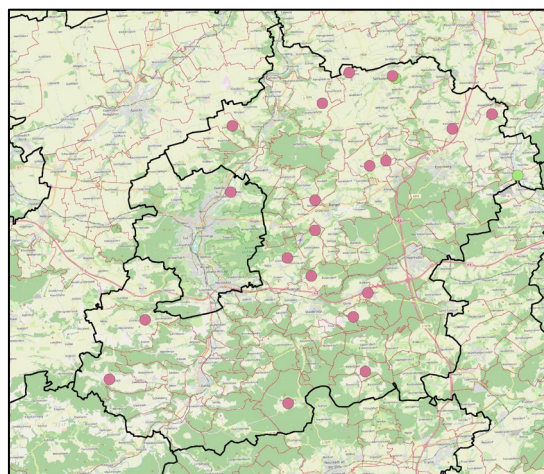


Abbildung 25: GIS Layer Verwertung

Ergebnisse der GIS-Analyse potenzielle Flächen und Mengen:

Tabelle 3: Summe der Flächen, Mahderträge und Annahmen zu Mahdaufkommen der unterschiedlichen Kategorien

	Naturschutzflächen	Flüsse (ohne Wald, 2. Ordnung)	Gemeinde Flächen	Straßen
Fläche [m²]	187.300	1.388.915	4.792.381	2.425.416
Länge [km]	-	347,2	-	404,2
Annahme Breite bzw. Menge	Frisch/Feuchtwiesen 3 t/ha*a (mittlerer Ertrag), Trocken/Halbtrockenrasen 2,5 t/ha*a	4m pro m Länge (2m pro Uferseite), 29% Kraut zu 1,75t, 20% Holz zu 6,5t, Gras 18% zu 2t, Schilf 25% zu 8t, Substr. Mix 8% zu 2,5t	2,94 t/ha*a (KSJ), 3,5 t/ha*a (MLUK Brandenburg); MW 3,22 t/ha*a	3t/ha*a mit 0,6ha pro km
Summe [tTM/a]	F= 14,73 ha	Holz = 153,48		
	44,19	Kraut = 49,34		
	T= 4,00 Ha	Gras = 50		
	10,00	Schilf = 277,78		
		Mix = 27,78		
Mahdgut [tTM/a]	54,19	377,13	1543,15	727,62
Summe [tTM/a]	2702,09			

Kommunale bewirtschaftete Flächen umfassen unter anderem Spielplätze, Parkanlagen, innerörtliches Straßenbegleit- und Verkehrsgrün. Die aus der Luftbilddauswertung für den Saale-Holzland-Kreis gewonnenen Daten sowie die vom KSJ tatsächlich ermittelten Werte zu kommunalen Grünflächen in Jena ergeben eine Gesamtfläche von rund 476 ha. Damit ergibt sich eine potentielle Menge von 1.543 Tonnen Trockenmasse pro Jahr (TM/a).

Als größte zusammenhängende Mahdfläche ist das Gelände des Sportflugplatzes Schöngleina mit einer Gesamtfläche von rund 50 ha zu nennen. Ebenso ergeben sich durch die weitläufigen Parkanlagen in Jena große Wiesenflächen, die mit Großgerät bewirtschaftet werden und somit eine zuverlässige Aufnahme und Abtransport des Mahdguts möglich ist. Weitere großflächige Gebiete bei denen das Mahdgut in vielen Fällen abgefahren werden muss, sind Flächen, die im Rahmen des Naturschutzes bewirtschaftet bzw. nach Maßnahmenplan unterhalten werden.

Für die Straßen im Untersuchungsgebiet ergeben sich unter Annahme von 0,6 ha Straßenbegleitgrün pro km Straße (außerorts) und einem jährlichen Aufkommen von 3 t/ ha*a eine Summe von 727,62 Tonnen TM/a.

Die Flüsse bzw. Gewässer 2. Ordnung haben im Saale-Holzland-Kreis und Jena eine Gesamtlänge von rund 632 km. Für die Berechnung der Mahdpotentiale wurden jedoch die Gewässer um die Abschnitte innerhalb geschlossener Ortschaften reduziert, sodass sich eine Länge von 547,45 km ergibt. Bei einer angenommenen Böschungs- bzw. Uferbreite von beidseitig zwei Metern, ergibt sich eine zu bewirtschaftende Uferfläche von 218,98 ha. Die potentiellen Erträge können mit einer Masse von 594,58 Tonnen TM/a (mit Wald) bzw. 377,13 Tonnen TM/a (ohne Wald) angenommen werden. Letzteres wurde für die Gesamtbilanz herangezogen.

Damit ergaben sich abseits der bereits erfassten Mengen und abseits von privaten Grundstücken ein Mengenpotenzial von 2.702 Tonnen Trockenmasse an Grasmahd oder ähnlichen Fraktionen, wie

Schilfgras (Abbildung 26). Letzteres zeigte aufgrund der hohen Trockenmassegehalte eine gute Ausbeute von über 300 m³ Biogas pro Tonne Frischmasse.

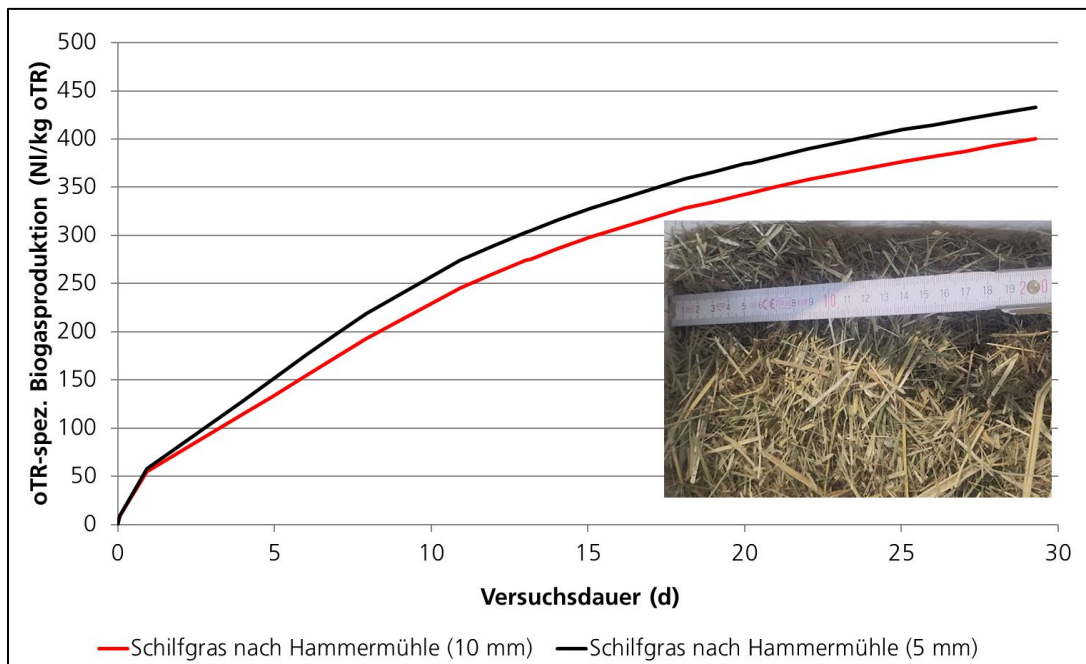


Abbildung 26: Biogasertragskurven von Schilfgras nach unterschiedlicher Zerkleinerung

AP 3 Entwicklung Softwaretool zur Datenerfassung und interkommunalen Kommunikation

Vor Erstellung des Lastenheftes, der Entwicklung und der Programmierung stand zunächst die Recherche und Kenntnis der regionalen und kommunalen Besonderheiten. Welche Daten sind in welcher Form und welchem Umfang vorhanden? In erster Linie wurde vorhandenes Datenmaterial ausgewertet und kommunale Vertreter aus u.a. Bauverwaltung interviewt.

Weiterhin wurden „Anwender“-Workshop im Mai und das Planspiel im August 2022 durchgeführt, um eine Übersicht der Input- und Output-Prozesse, zugehörige Beteiligte, notwendige Informationen und Austausch dieser zu erarbeiten (Abbildung 27).

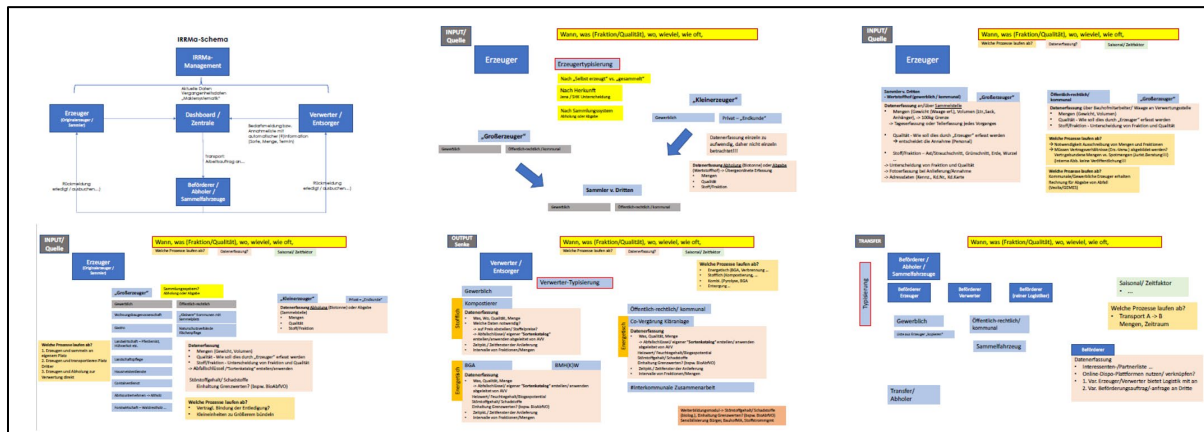


Abbildung 27: IRRMa-Übersicht Prozesse (komplette Übersicht siehe Anhang)

Die Entwicklung der Softwarelösung sollte so weit wie möglich auf vorhandene kommunale Softwareinfrastrukturen aufbauen. Bei der Analyse der im Einsatz befindlichen Softwareprodukte und dem Stand der Digitalisierung sowie im Verlauf des ersten Workshops zur Zieldefinition bzgl. der Prozesse und Technologie wurde jedoch deutlich, dass die vorhandenen Systeme

- keine Schnittstellen zueinander aufwiesen
- Schnittstellen häufig weder vorgesehen noch vorbereitet waren
- für den Einsatzzweck der Abbildung interkommunaler Zusammenarbeit nicht geeignet waren.

Für den Kernprozess der digitalen Erfassung von Abfallmengen und -sorten bei den Anfallstellen in den einzelnen Gemeinden war keine Software im Einsatz.

Diese Erkenntnisse führten zur Schlussfolgerung, dass für IRRMa ein separates System entwickelt werden muss, dass gleichwohl offen für Schnittstellen zu anderen Lösungen zu sein hat, um mittelfristig innerhalb der interkommunalen Zusammenarbeit für ein flexibles Datenmanagement zu sorgen.

Des Weiteren legten die Projektteilnehmer in der Planungsphase folgende Prämissen fest:

- Das Softwaretool muss den Anwendern über einen technisch einfachen Zugang zur Verfügung gestellt werden (ohne Installationsaufwand und technologische Hürden)
- Die Kernfunktionalität muss eine Übersicht der aktuell zu verwertenden Sorten und Mengen gewährleisten, auf die alle Beteiligten in Echtzeit zugreifen können
- Die Nutzerführung innerhalb der Prozesse muss eindeutig und fehlerintolerant sein
- Die Prozesse von der Erfassung bis zur Auftragsvergabe / Abholung sind abzubilden mit Ausnahme von Preisverhandlungen.

Aufgabe der Software: in einer klassischen Portal-Darstellung Angebot und Nachfrage zusammenzubringen. Insbesondere die Darstellung von Abfallmengen, die bis dato nirgendwo verzeichnet und im Auftragssinne „sichtbar“ waren, kann zu einer nicht nur besseren Verwertung führen – sondern überhaupt erst zu einer Verwertung.

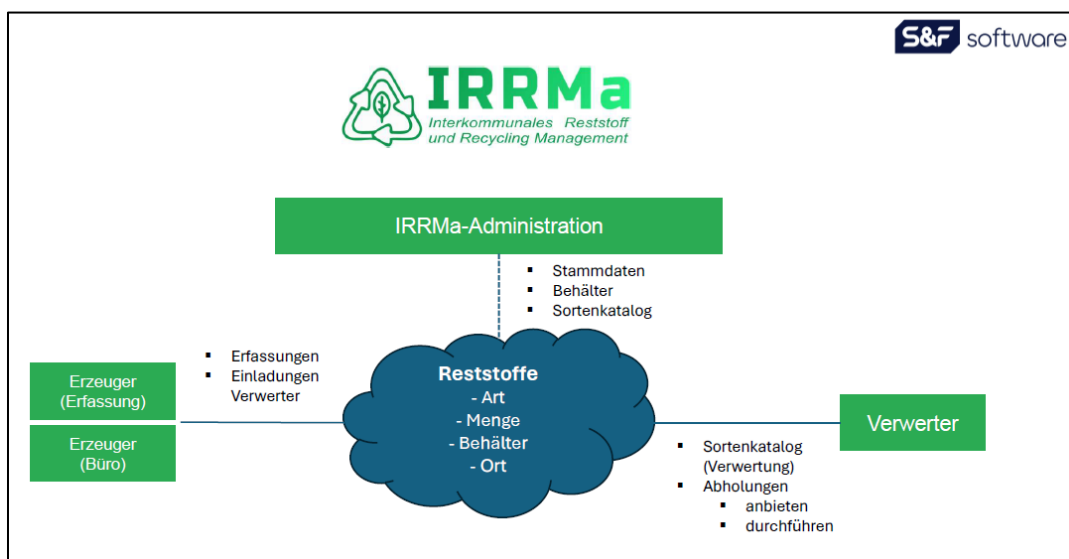


Abbildung 28: Darstellung der Teilnehmergruppen

Als Vorstufe der digitalen 'Reststoff-Transfer-Plattform' wurde zusätzlich ein Online-Datenerfassungsmaske (Abbildung 29) für die Kommunen erstellt. Diese wurde zunächst in mehreren Erfassungsorten bzw. Sammelstellen der Kommunen genutzt und so Daten ins System eingespielt. So kamen die Kommunalvertreter zunächst mit dem digitalen System „in Kontakt“ und spielten andererseits Daten zum Abgleich der GIS-Analysen und Datenauffüllung ein.

Softwaretool – Erfassungs-APP

Teilnehmer Test Erfassung:

- HeideLand
- Bürgel
- **Golmsdorf (15 von 18 Erfassungen)**
- Schkölen
- Kleineutersdorf
- Kahla
- Zollnitz
- Hainspitz

Ziele:

- Test Eingabesystem und Praktikabilität
- Weiterentwicklung
- Daten für Datenbank
- Erfassung der Mengen, Gebinde und Qualität
- Abbildung zeitlicher Verlauf

https://www.emos-system.de/irрма/erfassung_heidelberg.php

Erfassung

Erzeuger: Bauhof Stadtroda
Ortsteil:

Datum: 10. 07. 2023

Sorte:

Ablageplatz (Leistungsort):

Behältertyp:

Alternativ bitte eingeben:

Einheit:

Menge:

Möchten Sie ein Foto hinzufügen?

Bemerkungen:

Bitte korrekt bestätigen*:

Abbildung 29: IRRMa-Software Erfassungsmaske

Im Jahr 2022 wurde die Demo- bzw. Testvariante des eigentlichen Softwaretools eingeführt, um von den Projektpartnern sowie ausgewählten Teilnehmern im Praxiseinsatz ausgiebig getestet zu werden und Verbesserungen einzubringen. Die Prozesse wurden nach den Ergebnissen der Tests angepasst und erweitert.

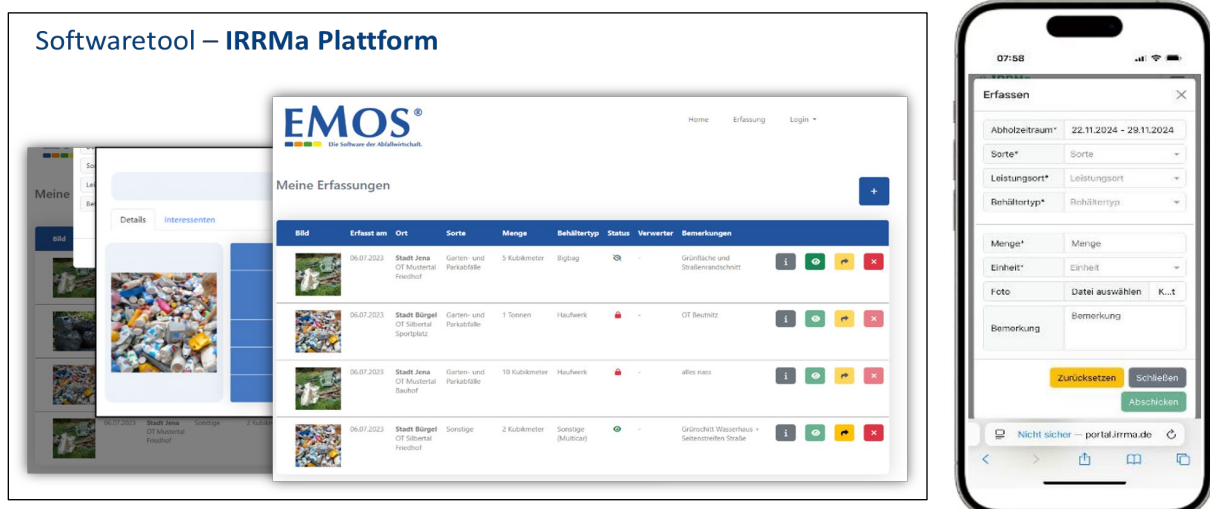


Abbildung 30: IRRMa Plattform als Webapp auf Laptop und Smartphone

Dies war vor allem aufgrund unzureichender Rückmeldungen von Seiten der potentiellen Nutzer (im Wesentlichen der Erzeuger) im Vorfeld nötig geworden. In einem zweiten Workshop hat sich das Projektteam zur Klärung weiterer Anforderungen und zum Test der Vorversion zu einem Zwischenschritt und einer etwas veränderten Herangehensweise entschieden, in dem die Erzeugerseite Echtdaten eintragen kann. Dies erfolgte mit Beginn der Vegetationsperiode ab dem Frühjahr 2023.

Die Erfahrungen aus der Erfassung und Erfordernisse anderer Projektteilnehmer flossen laufend in die Weiterentwicklung der Software ein. Zuletzt war zum Beispiel die kartographische Darstellung potentieller Verwerter und die Verwaltung von Sammelplätzen hinzugefügt worden.

Für den Erfolg des Praxisstarts der IRRMa-Reststoffe-APP ist den Projektpartnern bewusst, dass Anreize gesetzt werden müssen. Diese können einerseits finanzieller Art ausgestaltet sein. Alternative Anreize für Gemeinden (Erfassungen) könnten beispielsweise auch sein:

- Reduzierung von Wildanfallstellen (Kostenreduktion)
- Statistik zu angefallenen Mengen inkl. entsorgter Mengen von Wildanfallstellen (Digitalisierung: Ersatz von Zettel/Excel)
- Politische oder regulatorische Auflage (Landkreis / Landesregierung / gesetzliche Regelungen)
- Umweltaspekte
- Besseres Landschaftsbild

Auf Seiten der Verwerter wären die zusätzlichen Tonnagen zur Verwertung ein Anreiz, die Abfallmengen abzunehmen. (Sichtbarkeit von potenziellen Ressourcen)

Weitere Anwendungsbereiche und potentielle Nutzer wurden bereits eruiert, beispielsweise ergaben sich aussichtsreiche Gespräche im Verbund von Region.Innovativ und Kommunen.Innovativ und deren Projektkonsortien sowie über Projektpartnerschaften unserer Beteiligten im IRRMa.

Die Implementierung der Software in den regulären Betrieb der Kommunen ist insoweit vorbereitet. Bei der Überführung in die tägliche Nutzung fehlt es noch an einer ausreichenden Zahl von interessierten Verwertern. Dafür gilt es noch weiterhin Marketing für das digitale System zu betreiben. Die beteiligten Partner, insbesondere S&F übernimmt dies bei diversen Fachveranstaltungen und Messen. Alternative Anwendungsgebiete für die Software z. B. in anderen stofflichen Fraktionen sind durchaus keine Herausforderung, nur eine Umstellung der Parameter. Themen der Beachtung des Datenschutzes und der Datensouveränität wurden diskutiert und finden Beachtung im System.

AP 4 Konzeptionelle und experimentelle Entwicklung angepasster Verwertungstechnologien unter Beachtung Ergebnisse AP1 und AP2

Das Arbeitspaket beinhaltet die konzeptionelle und experimentelle Entwicklung angepasster Verwertungstechnologien in Abhängigkeit vom Anfall der organischen Reststoffe.

In Abstimmung mit den Projektpartnern wurden unterschiedliche Ansätze bzw. Konzepte getestet, wie zum Beispiel:

- Lageroptionen und Lagerverhalten von Substraten mit dem Fokus „Grasmahd“
- angepasste Logistik-Routenplanung
- Grasmahd-Separierung mit dem Einsatz in Biogasanlagen
- Papiertüten-Verteilung in Groß-Wohnsiedlungen zur Sensibilisierung der Bürger.

Eine labortechnische Ermittlung von Verfahrens- und Logistikanpassung in Folge geänderter Stoffeigenschaften in der Kompostierung, Fermentation und Verbrennung wurde durchgeführt.

Die Vielzahl von diskutierten Ansätzen für neuere Sammelkonzepte für die qualitätsorientierte Getrenntsammlung organischer Reststoffe sind in Tabelle 4 gefasst und wurden auf Umsetzungspotential geprüft und entsprechend zur Testung geführt.

Tabelle 4: Diskutierte Ansätze für neuere Sammelkonzepte für die qualitätsorientierte Getrenntsammlung org. Reststoffe

Vorschlag/Ideen	Beschreibung	Zielgruppe	Status
Sensibilisierung der Bevölkerung	- Informationskampagnen zur Vermeidung von Fehlwürfen - Ausgabe von Papiertüten (Alternative zu den Plastiktüten)	Private Haushalte	Umgesetzt durch KSJ, ausgewertet
Änderung der Tourenpläne	- Anpassung der Tourenpläne an die jeweilige Siedlungsstruktur (Getrennterfassung Einfamilienhaussiedlung, Mischsiedlungen, Großwohnanlagen) - Mit steigender Anzahl der Wohnungen pro Gebäude (Bevölkerungsdichte) steigen die Fehlwürfe sowie die Zusammensetzung - Geringe Bevölkerungsdichte: Fehlwürfe niedrig, Anteil Küchenabfälle gering (Sommermonate), große saisonale Schwankung der Zusammensetzung - Hohe Bevölkerungsdichte: Fehlwürfe sehr hoch, Anteil Küchenabfälle sehr hoch, keine saisonalen Schwankungen der Zusammensetzung	Private Haushalte	Umgesetzt durch KSJ
Stoffstromgetrennte Sammlung auf den Wertstoffhöfen	- Stoffstromgetrennte Erfassung auf den Wertstoffhöfe durch Aufstellung weiterer Container - Kontrolle und Einstufung der privaten Anlieferungen durch Personal - Anpassung der Erfassung an die saisonalen Schwankungen - o Frühjahr: Astschnitt, Unkraut mit viel Erdanteil, Grasmahd - o Sommer: Grasmahd, Astschnitt - o Herbst: Astschnitt, Grasmahd - o Winter: Weihnachtsbäume - Abholung und Verwertung der jeweiligen Container (Stoffströme) kann über das Softwaretool direkt durch das Personal erfolgen	Private Haushalte	Umgesetzt durch KSJ (Modellversuch an einem Wertstoffhof für Grasmahd)
Popup Sammelcontainer für private Haushalte	- Aufstellung von Sammelcontainer in ausgewählten Siedlungsstrukturen - o Ein- und Zweifamilienhaussiedlungen - o Großraumwohnanlagen mit Grünflächen (Zugangsbeschränkung für Hausmeister) - o Kleingartenanlagen - Aufstellung und Abholung angepasst an den saisonalen Anfall - o z.B. in Siedlungen alle 2 Wochen, Ankündigung über Amtsblatt oder Flyer - o Abgabe in den „Popup Container“ kostenlos - o Bioabfalltonnen der Haushalte kann kleiner und somit günstiger werden - Abholung und Verwertung erfolgt turnusmäßig - Keine Kontrolle, Fehlwürfe möglich	Private Haushalte	Konzeptionsphase

Vorschlag/Ideen	Beschreibung	Zielgruppe	Status
	- Auswirkung auf Entleerung Biotonne		
Popup Sammelcontainer für kommunale Hotspots (Parks, Sportplatz)	- Aufstellung von Sammelcontainer an kommunalen Hotspots - o Parks, Sportplätze, sonstige Grünflächen - o Kleineren Gemeinden im ländlichen Raum (hier erfolgt die Entsorgung/Verwertung organischer Reststoffe meist über wilde Ablagerplätze) - Aufstellung und Abholung angepasst an den saisonalen Anfall - Abholung und Verwertung der jeweiligen Container (Stoffströme) kann über das Softwaretool direkt durch das Personal erfolgen - Einweisung Personal erforderlich, Füllstandüberwachung mit direkter Einbindung in Software	Kommune	Abstimmung mit Gemeinden ... aufgrund des Aufwandes für Sammelplatzenerweiterung in den Kommunen hier keine Umsetzung
Einrichtung neuer Wertstoffhöfe	- Recherche hat gezeigt, dass die Dichte der Wertstoffhöfe zu gering ist - o Entfernungen teilweise zu groß - o Öffnungszeiten für Arbeitende Bevölkerung ungünstig - Weitere, vor allem in ländlichen Regionen, notwendig - Angepasste Öffnungszeiten, Personal kann zwischen mehreren Rotieren	Private Haushalte	Umgesetzt durch RAG, SHK, GEMES + 5 Kommunen
Sammelcontainer bei Agrarbetrieben	- Bei Workshops haben zwei Agrarbetriebe Interesse für einen Wertstoffhof gezeigt - Ziel: Nutzung der Biomasse für BGA - Diese Standorte können auch an einer stofflichen Verwertung über die APP teilnehmen	Private Haushalte, Kommunen	Ideenfindung, Abstimmung mit den Agrarbetrieben
Trennung Küchen- und Gartenabfälle in den Haushalten	- Aufstellung von 2 Biotonnen bei Ein- oder Zweifamilienhäusern mit Garten - o Mindestgröße Garten? - o Keine Eigene Kompostierung - o Reduzierung der Entsorgungskosten (Kosten fallen nur für die Küchenabfälle an) - o Teilnahme freiwillig? - Verwertungsweg kann saisonal angepasst werden	Private Haushalte	Ideenfindung

Im Fokus der **stofflichen Nutzung von ausgewählten Stoffströmen** stehen u.a. **Verbrennungsaschen**. Hier wurden die Stoffcharakteristika von Holzaschen und aufbereiteten Aschen untersucht, um Konzepte für Kompostierungsversuche vorzubereiten. Hierzu wurde beim Partner LAV neue Techniken für die Temperaturüberwachung angeschafft und getestet – damit konnten Kompostierungsversuche unter RAL-Bedingungen umgesetzt werden. Die Entwicklungen für den modellhaften Einsatz verschiedener Reststoffe (Pyrolyse-Produkte sog. Pflanzenkohle) als Spezialerden blieben in IRRMa in der konzeptionellen Phase, wurden aber fortlaufend mit den Projektpartnern abgesprochen und mit anderen Projektkonsortien (zu nennen sind CarboMass, Interpyro, THEBIOCHARSTORY etc.) abgestimmt. Perspektivisch können sich hier möglicherweise interessante Verknüpfungen der Forschungsvorhaben ergeben.

Aus der Vielzahl der verschiedenen untersuchten Reststoffströme hat sich auch der biogene Stoffstrom „kommunale Grasmahd“ als besonders interessant herausgestellt. Das Potenzial der in der Region technisch zu erfassenden Mengen ist gemäß der erstellten Studie hoch aber noch deutlich ausbaufähig. Bei der weitergehenden Aufbereitung sowie Verwertung ergeben sich interessante Nutzungsperspektiven im Bereich Nährstoffe, Energie und Faserrohstoff. Den Einfluss der Logistik (Lagerung, Transport) und Verarbeitung auf die Qualität der Rohstoffe wurden untersucht und Ableitungen für das weitere Vorgehen und Verwertung gezogen.

Für eine weitergehende Aufbereitung und Verwertung von separat gesammelter Grasmahd kristallisieren sich die folgenden drei Verwertungswege heraus: **Gewinnung von Nährstoffen, Energie und Faserstoffe**.

1. Nährstoffpotenzial: die enthaltenen Nährstoffe (N, P, ...) können als biologische Dünger für Kulturpflanzen gewonnen und genutzt werden

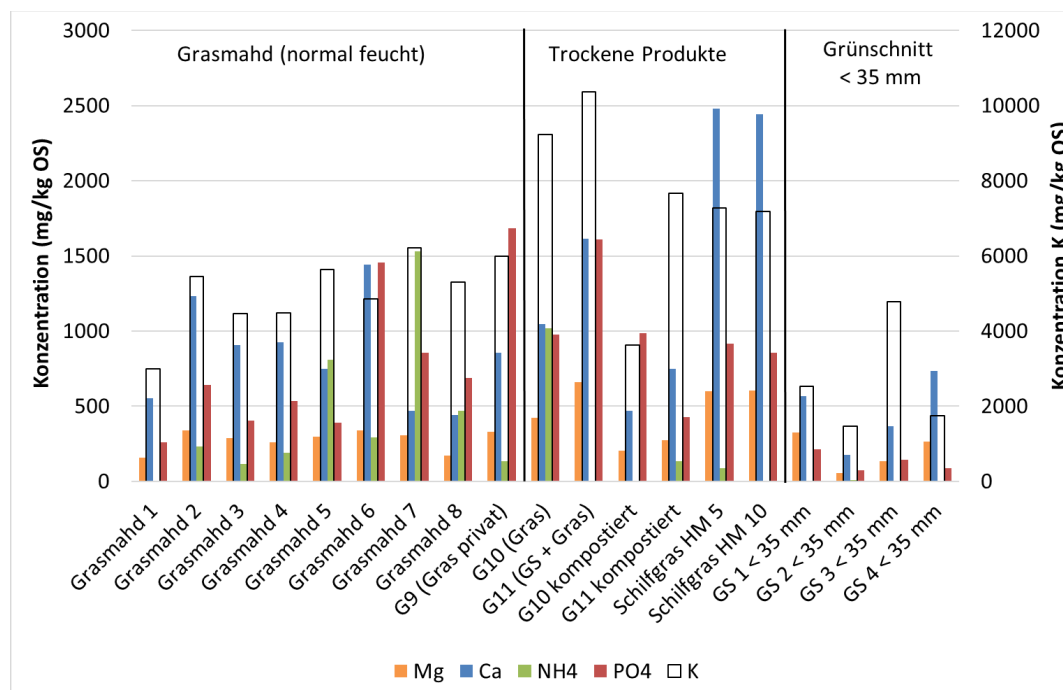


Abbildung 31: Frachten an gelösten Nährstoffen in den Substraten

Für die Erprobung der stofflichen Nutzung von ausgewählten Stoffströmen wurden bei **GEMES** eine Auswahl geeigneter Stoffströme getroffen. Es wurden zunächst Bioabfälle in guter und schlechter Qualität untersucht. Auch hier kam man zum Ergebnis, für spezialisierte Stoffströme sollen Grasmahd näher betrachtet werden.

Erster Kompostversuch mit konzeptioneller Erfassung anhand qualitätsorientierter Parameter mit Bioabfall unterschiedlicher Qualität bspw. in:

- Störstoffgehalt,
- Hygienisierung anhand Temperaturprotokoll,
- Nährstoffgehalt anhand monatlicher Analysen nach RAL-Zertifizierung,
- analytische Erfassung wichtiger Parameter durch Projektpartner,
- Personalaufwand, Technikeinsatz und –aufwand, Kostenermittlung



Abbildung 32: Kompostversuch 2023 GEMES

Ein weiterer Kompostversuch im kleineren Maßstab fand mit ausgewählten Stoffströmen und Zuschlagstoffen statt. Hier waren zu untersuchende Stoffströme Grasmahd und spezieller Grünabfall, je nach Anlieferung. Mögliche Zuschlagstoffe waren hier Phosphorasche aus der Klärschlamm-Monoverbrennung, Ästestoffe aus der Papierfabrik und weitere mineralische Komponenten.

Für die **Extraktion bzw. Gewinnung von Nährstoffen** aus der Grasmahd wurden 4 verschiedene Vorbehandlungsmethoden angewendet und untersucht:

1. Mechanische Vorzerkleinerung mittels Schneidmühle
2. Aerobe Vorrotte
3. Jauche-Ansatz mit Wasser
4. Silierung und mechanische Entwässerung

Die mechanische **Zerkleinerung** fand in einer Schneidmühle mit schnell rotierenden Messern statt (Abbildung 33). Ziel war der Aufschluss der Zellen und die Freisetzung von möglichst vielen Inhaltsstoffen.

Für die Untersuchung der Nährstofffreisetzung durch aerobe **Vorrotte** wurden die Proben aus den Lagerungsversuchen genutzt. Die Proben aus beiden Aufbereitungsschritten sowie die frischen unbehandelten Proben wurden definiert mit Wasser versetzt, um die gelösten Stoffe im Eluat bestimmen zu können.



Abbildung 33: Mechanische Zerkleinerung mittels Schneidmühle (2 x original und 2 x zerkleinert)

Die im Eluat freigesetzten Nährstoffe NH_4 , SO_4 und PO_4 bezogen auf die Frischmasse der jeweiligen Probe sind in Abbildung 34 dargestellt.

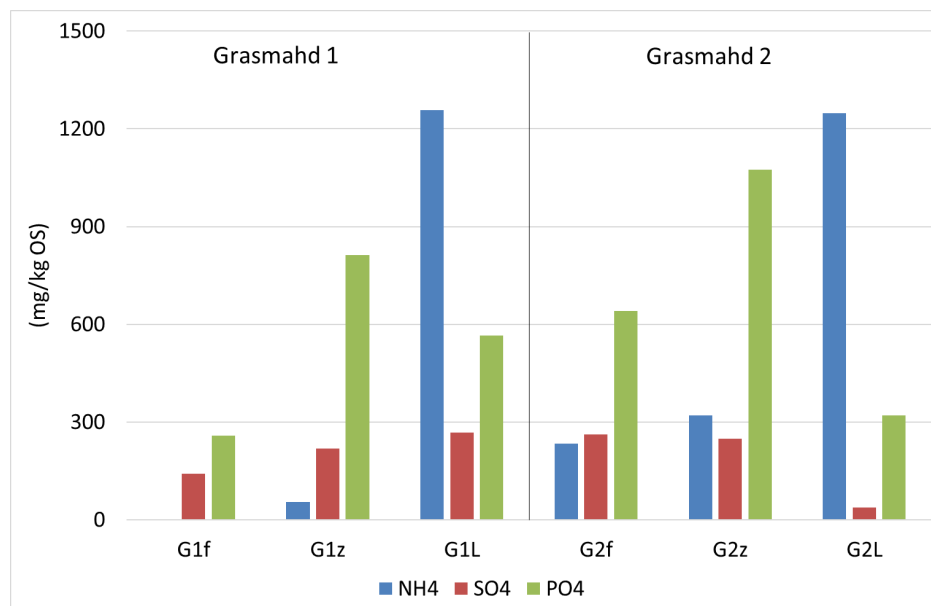


Abbildung 34 - gelöste Nährstoffe Grasmahd (G), frisch (f), zerkleinert (z), gelagert (L)

Durch die mechanische Zerkleinerung konnte deutlich Phosphat und tendenziell auch Kalium (hier nicht dargestellt) mobilisiert werden. Die aerobe Vorrotte (Lagerung) führt zu einer deutlichen Steigerung der Ammonium-Fracht in der Grasmahd, was für eine Stickstoffextraktion z.B. durch Strippung genutzt werden könnte.

Insgesamt sind die Freisetzungsraten aber noch relativ gering. Vor allem gemessen an den Gesamtgehalten (inkl. am Feststoff gebundene Nährstoffe) können nur relativ kleiner Anteile mobilisiert werden.

Für die dritte Behandlungsmethode (**Jauche-Ansatz**) wurde Grasmahd aus einer September-Beprobung mit Wasser im Verhältnis 1:4 oder 1:8 angesetzt und für 9 Tage bei 22 °C stehen gelassen. Dieses Verfahren ist abgeleitet aus der Praxis der Jaucheansätze im Gartenbau zur Erzeugung von biologischen Düngern. Gleichzeitig kann durch dieses Verfahren eine Art Waschung der Grasfasern für eine weitergehende Nutzung erfolgen.

Ein Absinken des pH-Wertes sowie ein Anstieg der elektrischen Leitfähigkeit für 3 Grasproben mit neutralem bis leicht basischen Ausgangs-pH-Wert konnte beobachtet werden. Ursache hierfür ist die biologische Versäuerung. Die Probe aus dem Städtischen Park war bereits vor der Jauchebehandlung versäuert, da diese Probe einen deutlich höheren Wassergehalt aufwies, wodurch die biologische Reaktion bereits kurz nach der Bergung startete.

In Abbildung 35 sind die drei wichtigsten gelösten Nährstofffrachten vor und nach Jauchebehandlung in Relation zum Gesamtgehalt dargestellt. Insbesondere die 3 Grasmahdproben mit Veränderung von pH-Wert und elektrischen Leitfähigkeit zeigen hier deutliche Zuwächse.

Auch Magnesium und Calcium werden jeweils verdreifacht (hier nicht dargestellt).

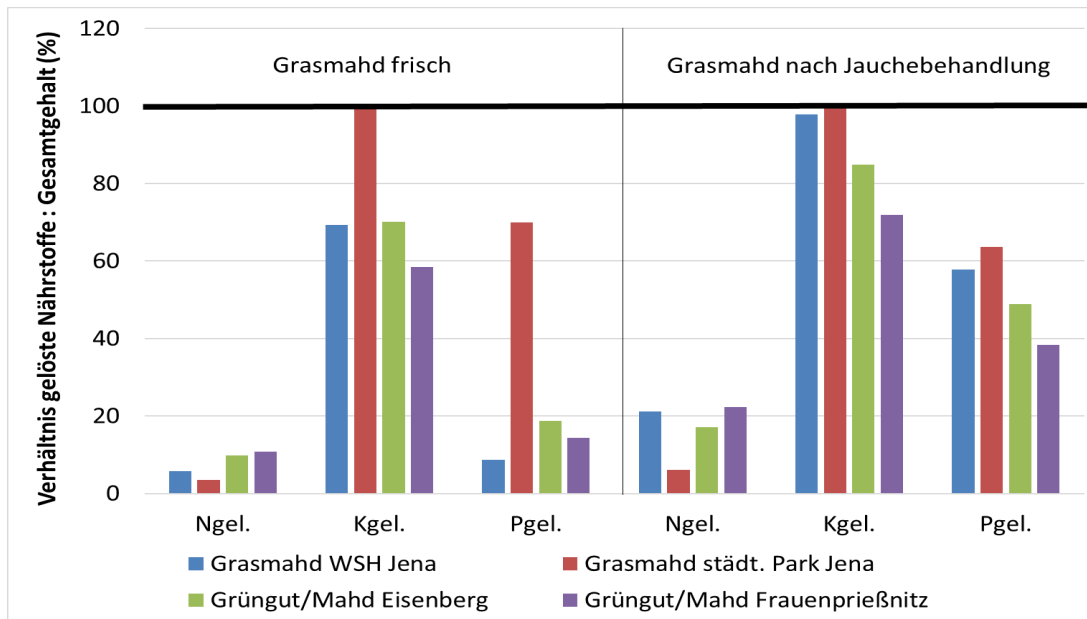


Abbildung 35: gelöste Nährstofffrachten im Vergleich zum Gesamtgehalt vor und nach Jauchebehandlung

Die Jauchebehandlung zeigt sich demnach als eine geeignete Methode für die Erhöhung der freigesetzten Nährstoffe und wurde im Projekt auch weitergehend untersucht. Dabei konnten folgende allgemeinen Ableitungen getroffen werden:

- NH_4 -Gehalt wird verdreifacht auf maximal 2,3 kg N pro t Originalsubstrat
 - maximal 20 % von N_{ges} in Lösung vorliegend und überführt
- PO_4 -Gehalt wird maximal verfünffacht auf bis zu 0,8 kg P pro t Originalsubstrat
 - Mind. 50 % von P_{ges} in Lösung vorliegend und überführt
- K wird kaum zusätzlich freigesetzt (ist aber bereits vor der Jauchebehandlung in Lösung)
 - Bis 7,1 kg K pro t Originalsubstrat erreichbar
 - Mind. 90 % von K_{ges} in Lösung vorliegend und überführt
- Wassergehalt und Versuchsdauer sind ohne großen Einfluss auf die Nährstofffreisetzung

Letzteres führt zur Ableitung, dass auch mit wenig Wasser und kurzen Verweilzeiten (< 7 Tage) gearbeitet werden kann. Die erfassten Nährstoffe sind auf jeden Fall als potenziell nutzbringend für die Kultivierung von Pflanzen einzuschätzen. Ob neben einem Einsatz im Boden auch ein direkter Einsatz als Nährlösung für hydroponische Pflanzensysteme in Frage kommt, wurde im Projekt bewertet. Ein möglicher Weg ist die **Filtration dieser Wässer**. Zum einen soll damit eine keimfreie Lösung (Abfiltrieren der Mikroorganismen) entstehen. Zum anderen sollte überprüft werden, inwieweit sich einzelne Nährstoffe separieren oder aufkonzentrieren lassen.

Dazu wurde Grasmahd in 30 L-Fässern über ein halbes Jahr siliert bzw. gelagert. Dabei versäuert das Substrat und wird durch die gebildeten organischen Säuren konserviert. Anschließend wurde diese Silage mittels Schneckenpresse abgepresst. Die abgepressten Fasern wurden für die Blattbildung und weitere stoffliche Nutzung getestet. Die abgepresste Flüssigphase wurde über mehrere Filtrationsstufen am Technikum des IKTS in Schmalkalden filtriert. Dabei fand zunächst eine Vorfiltration mit keramischen Mikrofiltrationsmembranen mit einer mittleren Porenweite von 70 nm statt. Die dabei erhaltenen Permeate (Filtrate) wurden anschließend auf zwei verschiedenen Nanofiltrationsmembranen getestet („LC1“ und „T0,9 nm“).

In Abbildung 36 ist eine Auswahl an Permaten (klare bzw. farblose Lösungen) und an Retentaten (braune Lösungen) nach Behandlung mit Nanofiltrationsmembranen dargestellt. Es wird deutlich, dass mit Hilfe der Nanofiltration eine Entfärbung und sichere Sterilisierung der Lösungen erreicht wird. Auch die braunen Retentate enthalten keine Schwebstoffe und auch keine Mikroorganismen mehr, da diese in der Vorfiltration bei 70 nm sicher abgetrennt werden.

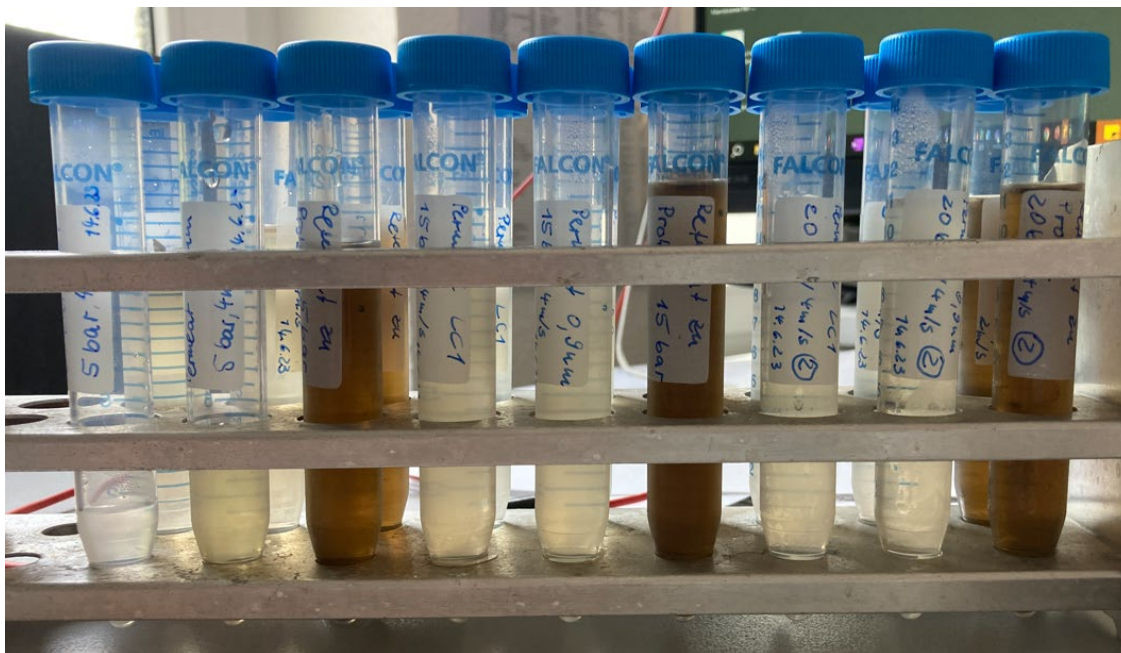


Abbildung 36: Permeate (klar) und Retentate (braun) aus den Filtrationsversuchen mit Presswasser

In Abbildung 37 sind die Konzentrationen an gelösten Ionen in Abhängigkeit von der Behandlung dargestellt. Wie auch beim CSB ist zwischen der Ausgangsprobe und dem Filtrat nach 70 nm kein signifikanter Unterschied zu erkennen. Einige Ionen, wie Phosphate und Kalium sowie insbesondere Sulfate, Magnesium und Calcium werden durch die Nanofiltration deutlich zurückgehalten.

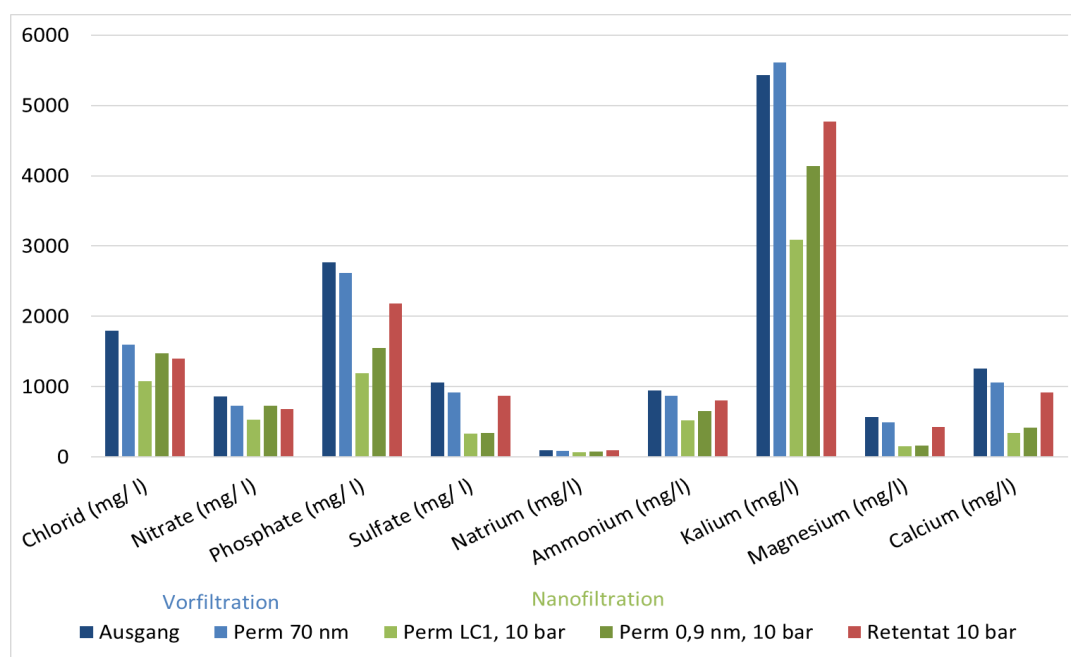


Abbildung 37: Gehalte an verschiedenen gelösten Ionen nach Vorfiltration und Nanofiltration (10 bar)

Als Schlussfolgerung lässt sich festhalten, dass mittels „einfacher“ Mikrofiltration bei einer Trenngrenze von ca. 70 nm ein steriles Nährmedium ohne Nährstoffverluste erhalten werden kann. Dieses Filtrat wurde in weiteren Untersuchungen auf die Eignung als Nährmedium geprüft.

Eine weitere Aufkonzentrierung für eine effizientere Lagerung und Transport als Konzentrat konnte mit den getesteten NF-Membranen nicht erreicht werden. Zu geringe Membranflüsse und zu geringer

Rückhalt der relevanten Nährstoffe waren hierfür die Ursache. Es wäre zu prüfen, ob für die Aufkonzentrierung bzw. für die Entfernung von Wasser und flüchtigen organischen Säuren eine Strippung oder Umkehrosmosebehandlung sinnvoll ist.

Die **pflanzenbauliche Nutzung der Nährstofflösungen** in Kombination mit ergänzenden Nährstoffgaben im Boden sollte gut funktionieren. Ob die Filtrate aber auch direkt in **hydroponischen Kultivierungssystemen** eingesetzt werden können, wurde anhand von Versuchen im IKTS untersucht.

In einer ersten Versuchsreihe wurde ein Filtrat einer Grasmahd-Jauche eingesetzt. Um abschätzen zu können, wie sich das Filtrat (Variante ROH) nicht nur im Vergleich zu einer Kontrollnährlösung im Pflanzenversuch verhält, sondern auch zu verstehen, wie das Filtrat als Bestandteil von flüssigen Mehrnährstoff-Düngern mit Pflanzen interagiert, wurden zwei weitere Nährlösungsmischungen eingesetzt. Ziel war, die Nährstoffzusammensetzung der beiden zusätzlichen Nährlösungen der der Kontrollvariante weitestgehend anzugleichen. Die Zusatznährlösung RECY verfolgt einen Ansatz, der Recyclingdünger (v.a. Vinasse (Folgerzeugnis nach der Fermentation von Melasse), Phosphorsäure (Produkt des Phosphorrecyclings aus Klärschlammaschen)) einbezieht, während der Variante VOLL handelsübliche Düngesalze beigelegt wurden.

Der Versuch wurde als teilrandomisierter Blockversuch im Versuchsstand für hydroponische Pflanzenversuche und Bioassays NutriTest des IKTS durchgeführt. Die Plots wurden mit sechs Pflanzstellen versehen. Bis zur Umsetzung der Pflanzen entwickelte das bis dahin verschlossen und gekühlt gelagerte Filtrat einen starken Geruch und eine weißliche Haut. Diese Beobachtung lässt auf eine starke biologische Aktivität in Verbindung mit einem hohen Proteingehalt schließen.

Diese mikrobielle Aktivität führte im erdfreien System zu einer starken Beeinträchtigung des Wurzelwachstums und damit der Pflanzenentwicklung. Wie in Abbildung 38 zu sehen, sind Blättergröße und Farbe nur bei der Referenzvariante (vorn rechts, ohne Filtrat) in einer guten Qualität. Alle anderen Varianten sind sehr klein und teilweise gelb. Die Wurzelbilder bestätigen den Befund.

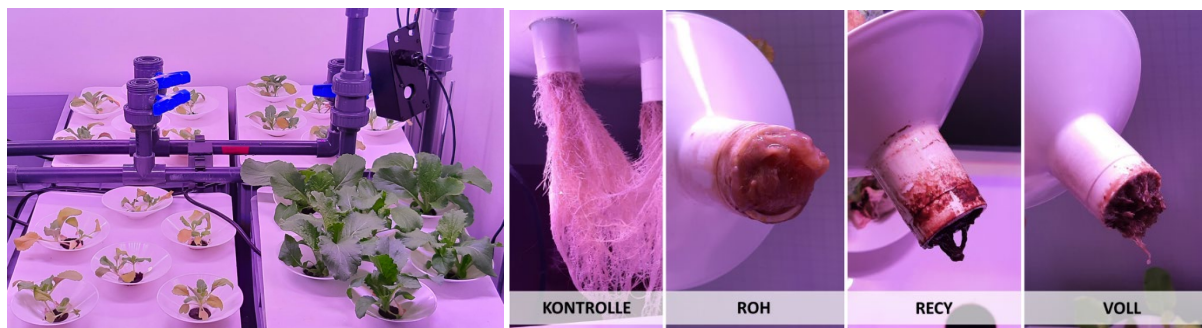


Abbildung 38: Pflanzversuch (Chinakohl) am Tag 24 (links) und Wurzelansprache am Ende (rechts)

Die in Abbildung 39 dargestellten Frischmassen nach Versuchsende (links) zeigen den großen Unterschied zwischen Kontroll- und Versuchsvarianten. In einer zweiten Versuchsreihe (rechter Graf) wurde Membranfiltrat von Grasmahd-Silage eingesetzt, welches vor dem Einsatz im Pflanzversuch nochmals bei 80 ° C über 1 h sterilisiert wurde, um die mikrobielle Aktivität zu unterdrücken. Zusätzlich wurde in der Variante „Slow“ die Jungpflanzenphase (vor Filtratnutzung) verlängert, um die Wurzelansprache vorab zu stärken. Trotz dieser zusätzlichen Maßnahmen kam es erneut zu einer Verkeimung der Nährstofflösungen im Versuch (evtl. durch Wiederverkeimung im Versuchsstand). Zwar konnten die Blätterträge etwas gesteigert werden, dennoch lagen diese immer noch deutlich um 65 % niedriger als in der Kontrollvariante.

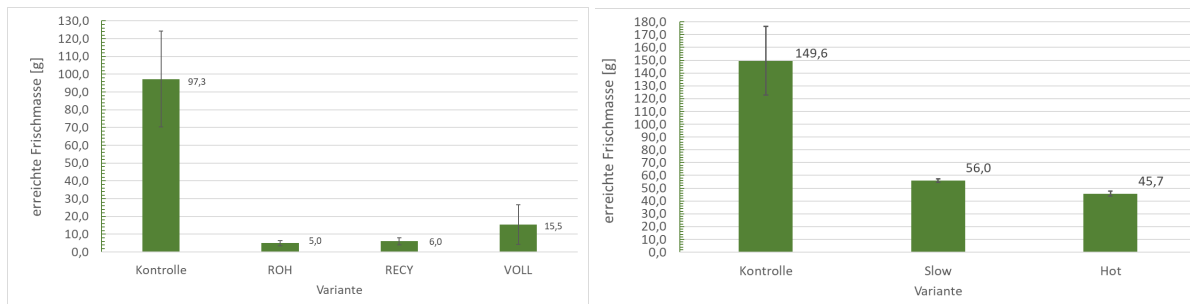


Abbildung 39: Frischmasse des Chinakohls nach verschiedenen hydroponischen Versuchen

Damit ist der Einsatz der Filtrate, aufgrund des hohen Gehaltes an gut verwertbaren Substraten (Zucker, organische Säure) und der damit verbundenen Verkeimungsneigung nicht für einen direkten Einsatz in hydroponischen Systemen geeignet. Alternativ könnte versucht werden, Gärreste für diesen Zweck aufzubereiten, da diese kaum noch bioverfügbare Komponenten aufweisen. Alternativ müssten die gelösten Nährstoffe durch Strippung und/oder Fällung aus den Prozesswässern abgetrennt werden, um diese direkt als Nährstoffzusatz (ohne Organik und Mikroorganismen) in hydroponischen Systemen einzusetzen.

2. Energiepotenzial: als Einsatzstoff für Biogasanlagen kann Grasmahd eine gute Ergänzung im Substratmix darstellen. Die enthaltenen Nährstoffe (vgl. Pkt. 1) gehen dabei nicht verloren und könnten im Gärrest einer nachgelagerten Nutzung zugeführt werden bzw. daraus gewonnen werden.

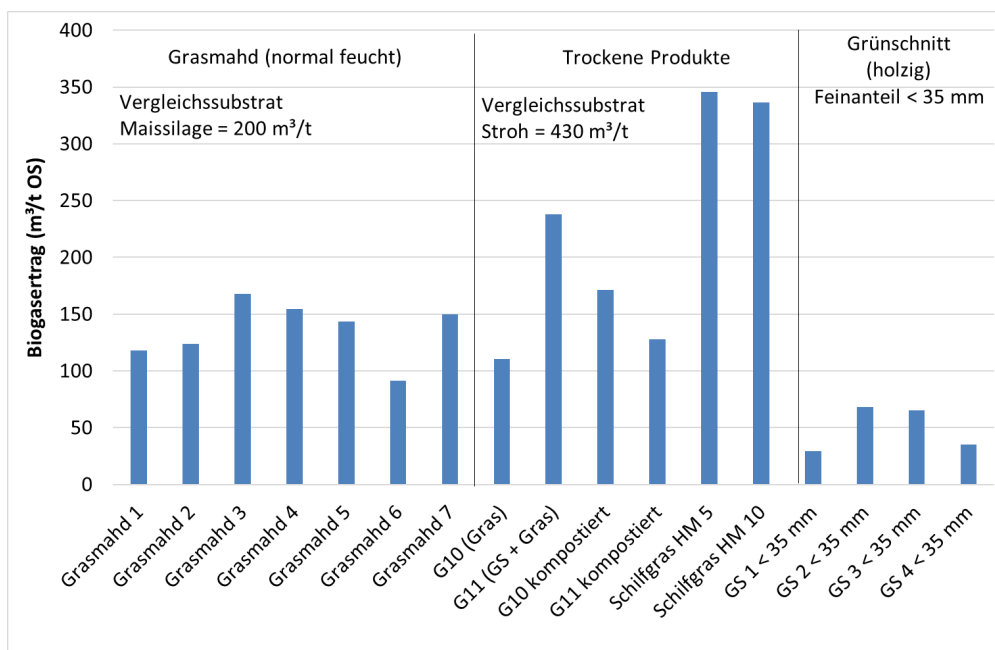


Abbildung 40: Biogasertrag pro Tonne Originalsubstrat (OS)

Das **Energiepotenzial** von Grasmahd wurde zudem durch den Partner KSJ großtechnisch untersucht bzw. getestet. Hier wurden separierter reiner Grasschnitt von städtischen Parkflächen zur Fermentierung in einer landwirtschaftlichen Biogasanlage verfrachtet. Insbesondere die Vorbereitung der Logistik und Mahdregime sowie Abtransport- und Verwertungstechnik standen zunächst im Fokus des Versuches.

Im Zuge dessen wurden rechtliche Fragestellungen aufgeworfen, die es galt, einer rechtlichen Prüfung zu unterziehen. Hierzu wurde ein Rechtsgutachterliche Stellungnahme an die Rechtsanwaltskanzlei von Bredow Valentin Herz in Auftrag gegeben zur rechtlichen Prüfung des Einsatzes von Grünschnitt konkret in den landwirtschaftlichen Biogasanlagen der Bündnisregion. Welcher verwaltungsrechtlichen

Grundlagen sowie welche Vergütungsrechtlichen Themen und Herausforderungen bzw. Anforderungen (EEG) sind beim Einsatz von kommunalem Grasschnitt in landwirtschaftlichen Biogasanlagen zu beachten:

- In dem Zusammenhang betroffen ist vor allem die **Vergütungsfähigkeit** nach den verschiedenen Boni – NawaRo-Bonus, Landschaftspflegebonus oder Einsatzstoffvergütungsklassen des EEG
- **Genehmigung:** vor Änderung der Einsatzstoffe ist zumindest eine Änderungsanzeige, unter Umständen eine Genehmigung der zuständigen Behörde erforderlich
- Post-EEG → bei BGA ohne besondere einsatzstoffbezogenen Bonusansprüche nach EEG sind genehmigungs- und abfallrechtlichen Fragen im Einzelfall zu klären.
- Die **Netzbetreiber** sind als wichtige Akteure hinsichtlich des Einsatzes von Grünschnitt anzusehen. Bei Anlagen mit Bonusvergütung sollte im Vorfeld eine Klärung mit dem Netzbetreiber erfolgen, ob dieser die Klassifizierung einer bestimmten Sorte Grünschnitt hinsichtlich der Bonusvergütung teilt.
- Es ist immer einer Einzelfallprüfung der Biogasanlagen notwendig (technisch und rechtlich) aufgrund der Unterschiedlichkeit der Einsatzstoffe, Mengen und EEG-Fassung des Jahres der Inbetriebnahme der BGA
- Kommt es dem BGA-Betreiber nicht auf die zusätzliche Vergütung an, sind vorwiegend genehmigungsrechtliche Themen zu beachten.
- **Umweltgutachter** als Schnittstelle zwischen Anlagenbetreiber und Netzbetreiber

Die Ergebnisse sind durchaus positiv, der Einsatz von Grünschnitt in landwirtschaftliche BGA ist rechtlich grundsätzlich möglich. Jedoch sind gewisse finanzielle Risiken für den Betreiber der Biogasanlagen, welche nicht außer Acht gelassen werden dürfen.

Im Projektjahr 2022 wurde an der BGA in Mörsdorf der Einsatz von Grasmahd aus kommunaler Herkunft im kleintechnischen Maßstab positiv getestet. In 2024 sollten die rechtlichen Grundlagen in der Praxis überprüft und an 2-3 Anlagen die Probe aufs Exempel gemacht werden. Leider konnten die Anlagenbetreiber in Frauenprießnitz und Jena-Zwätzen nicht überzeugt werden. Hier standen die finanziellen Risiken im Wege. In Mörsdorf konnten leider auch keine Einsätze im Großtechnischen Maßstab mehr durchgeführt werden, hier sprach eine behördliche Untersagung dagegen. (siehe auch dazu AP 5.4)

3. Faserrohstoff: Eine weitere Verwertungsmöglichkeit für faserreiche Reststoffe (insb. Grasmahd) stellt die **Nutzung der Fasern** für die Erzeugung von z.B. Papier oder Fließ dar.

Gras bzw. Grasmahd ist bekanntermaßen sehr faserhaltig. Diese Naturfasern könnten theoretisch in einer Vielzahl von Endprodukten aus dem Bereich Papier und Verpackungsmaterialien als Ersatz oder Ergänzung von Holz- bzw. Zellulosefasern einfließen. Die Gewinnung und vor allem die Aufbereitung der Grasfasern bietet sehr viele Freiheitsgrade und Ansatzpunkte und stellt daher eine Optimierungsaufgabe dar. Eine vorherige energetische Nutzung in Biogasanlagen oder eine Nährstoffgewinnung ändert die Fasereigenschaften, verhindert aber deren potenzielle Nutzbarkeit nicht zwingend, sondern führt evtl. zu anderen Aufbereitungs- und Nutzungsstrategien.

Dafür wurden im Projekt verschiedene Faserreste (frisch, nach Silierung, nach Jauche oder nach Vergärung) genutzt. Diese Faserstoffe wurden roh oder gewaschen oder zerkleinert eingesetzt, um unter definierten Bedingungen die Blattbildung zu bewerten. Für die Untersuchungen wurde eine Blattbildungsanlage von FRANK-PTI eingesetzt.

In einer der durchgeführten Versuchsreihen wurde Grassilage, welche aus Grasmahd in Fässern erzeugt wurde, nach 10 Monaten Lagerdauer einer Flüssigkeitsabpressung und einer anschließenden

Zerkleinerung mittels Extruder unterzogen. Damit standen die Substrate Grassilage, Pressgut und Pressgut zerkleinert für die Blattbildung zur Verfügung.

Die Blattbildung der einzelnen Teilfraktionen war mit üblichen Einsatzmengen an Fasern im Vergleich zur klassischen Papierherstellung aus Zellulosefasern nicht möglich. 80 g/m² bildeten kein geschlossenes Geflecht und lösten sich nicht vom Abscheidesieb. Die Erhöhung des Materialeinsatzes auf 320 g/m² führte nur zu geringfügigen Verbesserungen. Jedoch klebten die Fasern beim Trocknen am Deckblatt an (Abbildung 41). Die Zerkleinerung mittels Extrusion (nach Abpressung) führte zu einer homogenen Vernetzung und Struktur. Das gebildete „Blatt“ löst sich zum Teil vom Deckblatt nach der Trocknung.



Abbildung 41: Blattbildung mit 320 g/m² Grasmahd siliert (links) und Pressgut nach Extrusion (rechts)

Bei der Verwendung von unbehandelter Grasmahd (ohne Silierung) war der Klebeffekt geringer als bei den silierten Produkten. Dies führt zum einen für das „Blatt“ mit 320 g/m² zu einer besseren Ablösung vom Deckblatt, aber zum anderen zu sehr geringen Bindungskräften zwischen den Fasern. Die erhaltenen Produkte waren sehr instabil, spröde und bröselig.

Eine Zerkleinerung der Grasmahd mit Hammermühle brachte keine Verbesserung hinsichtlich der Blattbildung. Die Beimischung von 15 bis 25 % Zellulosefasern führte ebenfalls zu keiner signifikanten Verbesserung.

Grasfasern aus Jauche-Versuchen zur Freisetzung von Nährstoffen zeigten etwas bessere Eigenschaften hinsichtlich einer geringeren Klebeneigung und Blatteigenschaften. Die Verbesserung konnte auf einen Wascheffekt zurückgeführt werden, welcher sich durch die Zugabe von Wasser und dem Abpressen der Jaucheflüssigkeit ergab. Dieses Vorgehen wäre nur bei Nutzung der Nährstoffe sinnvoll. Eine alleinige Waschung würde zu einem hohen Wasserverbrauch führen.

Deutlich vorteilhafter wirkte sich eine starke mechanische Zerkleinerung der Fasern auf die Blattbildung aus. Die Fasern aus einem Jaucheanatz wurden nach Entwässerung und Waschung nochmals mit Wasser versetzt und in einer Schneidmühle mit schnell drehenden Messern nass zerkleinert. Die optische Veränderung der Fasern durch diese Behandlung ist in Abbildung 42 dargestellt.



Abbildung 42: Grasmahdfasern aus Jauchensatz J2 vor und nach Zerkleinerung

Die Blattbildung mit 100 % dieser zerkleinerten Fasern funktionierte selbst für kleinere Substratmengen von 160 g/m² sehr gut. Abbildung 43 zeigt das gut abgelöste Blatt mit vergleichsweise hoher Stabilität.

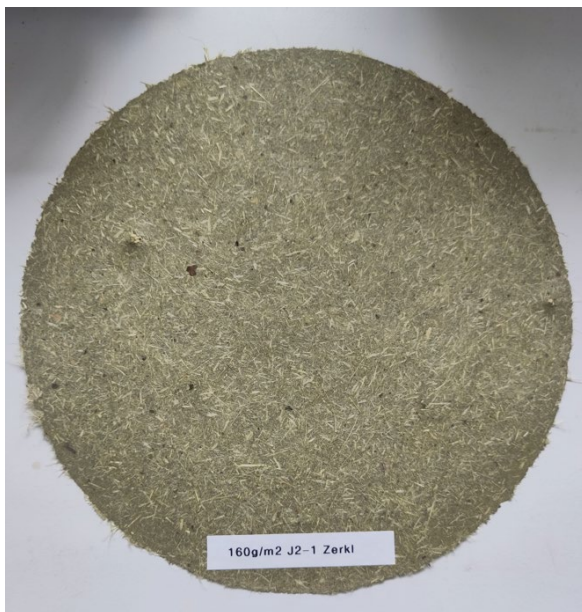


Abbildung 43: Blattbildung mit 160 g/m² aus zerkleinerten Fasern nach Jauche J2

Diese gute Blattbildung konnte mehrfach reproduziert werden.

Herstellung von Verpackungsmaterialien und Formlingen

Beim Projektpartner RBI lag ein besonderer Innovationsfokus auf der Entwicklung von umweltfreundlichen und biologisch abbaubaren Verpackungsmaterialien und Formlingen aus regional anfallenden Gras- und Grünschnittfraktionen. Auf Basis biologisch abbaubarer Stärkeester wurden extrudierbare Compounds entwickelt, die sowohl in ungeschäumter (spritzgussfähiger) als auch geschäumter (verpackungstauglicher) Form getestet wurden. Die Materialien erfüllen Anforderungen an mechanische Belastbarkeit, Umweltverträglichkeit sowie Vergärbarkeit in Biogasanlagen.

Die ungeschäumte Variante konnte mit bis zu 70% Graspulveranteil extrudiert werden und ist thermoplastisch verformbar, was vielfältige Anwendungsmöglichkeiten, auch abseits von Verpackungsmate-

rialien erlaubt. Eine Anwendung im Spritzguss ist möglich und somit erschließt sich eine große Bandbreite der Massenfertigung. Es kann auch mit verschiedenen Füllstoffen durch Extrusion zu Formkörpern verarbeitet werden, wobei auch andere Füllmaterialien in Frage kommen.



Abbildung 44: Biokunststoff mit verschiedenen Anteilen von Graspulver

Die geschäumte Variante kann aufgrund ihrer Aufschäumbarkeit als Verpackungsmaterial genutzt werden und mit gängigen Verarbeitungsverfahren bearbeitet werden, sodass beispielsweise Inlays oder Verpackungsecken etc. hergestellt werden können. Die finale Variante wurde schwarz eingefärbt und ist mit Chitosan versetzt, um einem mikrobiologischen Abbau während des Lebenszyklus entgegenzuwirken, bei gleichbleibender Vergärbarkeit in einer Biogasanlage zur Entsorgung bzw. Verwertung. Hinsichtlich der mechanischen Eigenschaften sind die Stärkeester/Graspulver-Komposite mit Schaumpolystyrolen vergleichbar.

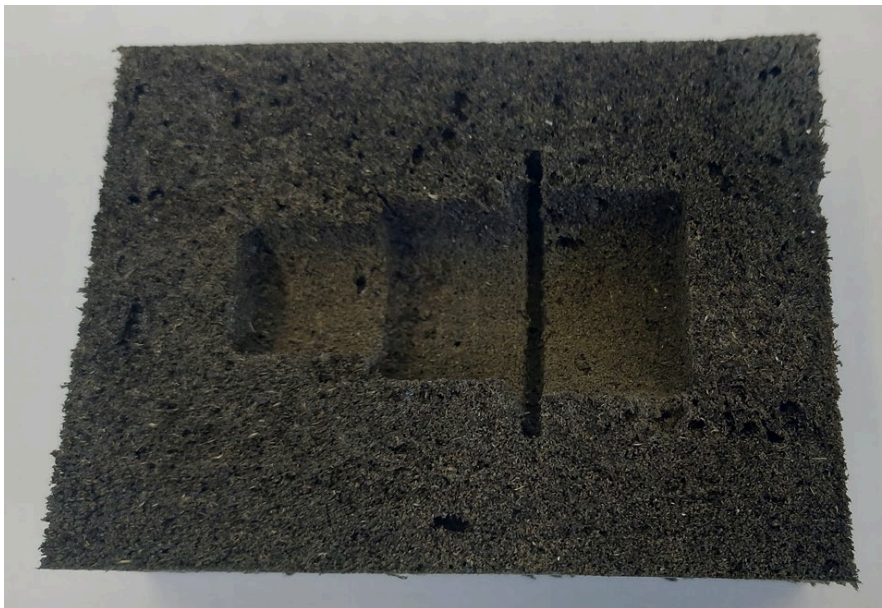


Abbildung 45: Aufgeschäumte Variante von Biokunststoff

Logistik und Lagerung

Für alle Nutzungsoptionen stellt sich aber die Frage, welchen Einfluss eine **Lagerung** auf die Substrateigenschaften hat, da häufig Zeit zwischen der Erzeugung der Grasmahd und deren weiterer Verarbeitung vergeht. Häufigste Lagerform ist dabei aktuell die lose Schüttung im Haufwerk am Wiesenrand oder im Container. Dabei kommt es zu einer schnellen Erwärmung des Materials durch mikrobiologische Abbauvorgänge (Oxidation) der Organik. Außerdem vermehren sich rasch Schimmelpilze, welche die Qualität des Materials beeinträchtigen (Abbildung 47) und den weitergehenden Abbau potenziell interessanter Inhaltsstoffe begünstigen.



Abbildung 46: Grasmahd frisch (2 x Mai-Schnitt (links) und 2 x Juni-Schnitt (rechts))



Abbildung 47: Grasmahd 9 d Lagerung (2 x Mai-Schnitt (links) und 2 x Juni-Schnitt (rechts))

Im Labor des IKTS wurden Lagerungsversuche für die beprobten Grasschnitte vom Mai und Juni in offenen Behältern mit Erfassung der Temperaturverlaufes durchgeführt. Trotz der zum Teil geringen Probenmenge zeigte sich eine mehr oder weniger ausgeprägte Eigenerwärmung der Proben auf bis zu 45 °C. Dabei zeigten sich signifikante Verluste bei der Organikfracht, welche durch biologische Umsetzung verursacht wurden (Abbildung 48).

Dieser Rückgang des energetischen Potenzials spiegelt sich auch im Gasertrag negativ wider (Abbildung 49). Bezogen auf die ursprüngliche Frischmasse an Grasmahd gehen bei einer Lagerung von 9 Tagen im Labor durch Masseverlust und Verlust an spezifischer Gasausbeute zwischen 40 % und 60 % an Biogasausbeute und damit an Energieausbeute oder potenziellem Erlös verloren.

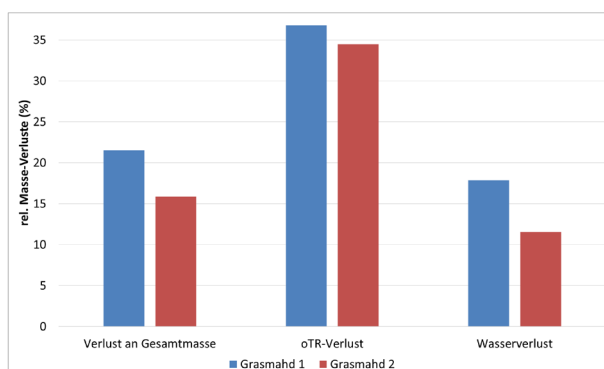


Abbildung 48: Masse-, Organik- und Wasserverlust während 9 d Lagerung

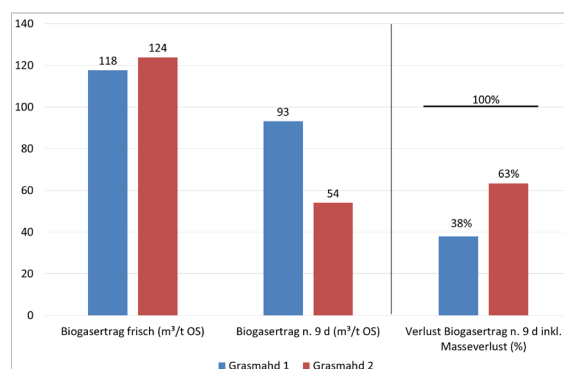


Abbildung 49: Biogaserträge und Verluste durch 9 d Lagerung von Grasmahd

Aus praktischen Erfahrungen im Umgang mit Grasmahd kann abgeschätzt werden, dass in größeren Haufwerken im Freien der Abbau der Organik deutlich schneller beginnen und ablaufen kann. Deshalb ist für die energetische Nutzung von Grasschnitt dafür Sorge zu tragen, dass das Material auf schnellstem Wege in die Biogasanlage gelangt. Alternativ kann das Material auch in Ballen gepresst oder in einem Silo stark verdichtet als Silage gelagert werden. Dies wurde im praktischen Maßstab durch KSJ durchgeführt (AP 5.2). Kleintechnische Versuche des IKTS haben gezeigt, dass beispielsweise eine Lagerung von Grasschnitt eingepresst in Fässern sehr gut über 6 Monate gelagert werden kann.

Aufgrund des hohen Lignin- und Zellulosegehalts eignet sich Grünschnitt besonders für die Herstellung von Pellets und damit Lagerung in dieser Form. Bei RBI wurde dieses Verfahren mit dem Grasschnittmaterial erprobt und optimiert. Die mehrfach durchgeführte Verarbeitung über eine Pelletieranlage zeigte, dass selbst bei hohem Wassergehalt des Ausgangsmaterials eine technisch beherrschbare Pelletierung möglich ist. Die Pellets erfüllten hinsichtlich Trockensubstanz, Lagerfähigkeit und energetischer, hier thermischer Verwertbarkeit die Anforderungen für eine mögliche Markteinführung.

Bewertung der geänderten Eigenschaften

Als Grundlage für die Bewertung der Aschen im Bezug zum Nährstoffrecycling wurde das ashespezifische Löse- und Umwandlungsverhalten der Nährstoffe untersucht. Für eine Nutzung als Düngemittel müssen die Nährstoffe aus den Aschen so aufbereitet werden, dass sie für die Pflanzen verfügbar sind. Dagegen müssen die Schadstoffe möglichst vollständig von den Nährstoffen abgetrennt werden können.

Aufgrund der enormen Bandbreite in der Zusammensetzung der Verbrennungsaschen wurde in Vorversuchen zunächst das grundsätzliche Löseverhalten unter Einsatz unterschiedlicher Lösungsmittel und in unterschiedlichen Konzentrationen untersucht. Für die Versuche wurden sechs typische Vertreter der drei Aschetypen (Holz-, Klärschlamm- und Tiermehlaschen) ausgewählt. Als Lösungsmittel wurde sowohl Wasser als auch verschiedene Säuren (Schwefelsäure, Salpetersäure, Phosphorsäure, Oxalsäure oder Zitronensäure) eingesetzt. Dabei wurde zusätzlich das Verhältnis von Asche zu Säure bzw. Wassermenge variiert und das Löseverhalten bei unterschiedlichen Temperaturen zwischen 20 und 60 °C und unterschiedlichen Reaktionszeiten untersucht.

Aufgrund der sehr unterschiedlichen Nähstoff- und Schwermetallgehalte sowie des Lösungsverhalten wurden für die drei Asche Typen anhand der Löseversuche sowie weiteren Vorversuchen unterschiedliche Verfahrensvarianten entwickelt.

Holzaschen – Untersuchungen zur Kalium-Magnesium-Phosphat (KMP) Fällung

Bei Holzaschen mit hohem Kaliumgehalt erfolgt die Trennung zwischen Nährstoff und Schwermetallen durch einen selektiven Löseprozess in Wasser in dem das Kalium in Lösung geht und die Schwermetalle im Feststoff verbleiben. Nach der Abtrennung fest-flüssig kann das kaliumreiche Wasser entweder in solcher Form für die Anreicherung von Humuspräparaten dienen. Als weitere Verwertungsmöglichkeit wäre eine Eindampfung des Wassers vorstellbar, die allerdings mit einem immensen Energieaufwand verbunden wäre.

In einer weiteren Versuchsreihe wurde untersucht, wie und ob das Kalium über eine Fällung als Struvit(K) Dünger nutzbar gemacht werden kann. Struvit(K) ist ein Kalium-Magnesium-Phosphat (KMP) mit der Summenformel $\text{KMg}(\text{PO}_4) \cdot 6\text{H}_2\text{O}$. Da die Fällungsreaktion eine starke Abhängigkeit von den Randbedingungen und Elementkonzentrationen zeigt und bei den ersten Vorversuchen mit kaliumreicher Asche kein KMP gefällt werden konnte, wurde zunächst mit einer Modelllösung gearbeitet. Diese enthielt die relevanten Elemente Kalium, Magnesium und Phosphor in unterschiedlichen Verhältnissen. Der pH-Wert wurde nach Literaturrecherche auf einen Wert von 10 bis 10,2 eingestellt. Als Spendersubstanzen wurden K_2SO_4 , Na_2HPO_4 und MgCl_2 verwendet. Der gefällte Niederschlag wurde mit Hilfe von Röntgenfluoreszenzanalyse auf die Zusammensetzung und mit Röntgenbeugung auf die Phasenbestandteile untersucht (Abbildung 50). Nach erfolgreicher Durchführung mit der Modelllösung wurde eine kaliumreiche Filterasche (H1) anstelle von K_2SO_4 verwendet. Da die Lösung aus Asche und Wasser sehr alkalisch ist (pH 13-14) wurde als alternative Phosphorquelle auch Phosphorsäure (H_3PO_4) verwendet, um den pH-Wert auf den gewünschten Bereich von 10 - 10,2 einzustellen.

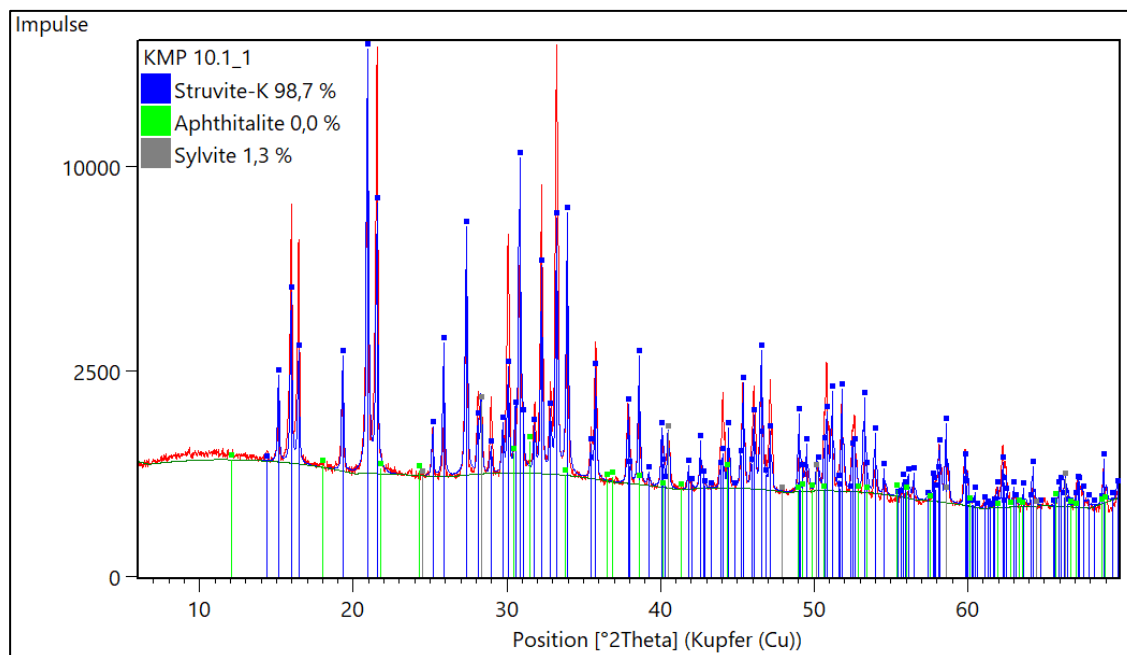


Abbildung 50: Ergebnisse Röntgenbeugung eines gefällten Struvit(K) Materials

Mit dieser Methode konnten nach einigen Optimierungsversuchen maximal 40% des gelösten Kaliums als KMP gefällt werden. Bei diesen Versuchsreihen wurden sowohl Natriumphosphat und Phosphorsäure als P-Quelle verwendet, wobei der Phosphor bei der Fällung komplett umgesetzt wird. Die Menge der verwendeten Phosphorsäure wird durch den pH-Wert limitiert, dieser müsste noch alkalischer sein.

Versuche mit $\text{Mg}(\text{OH})_2$ anstelle von MgCl_2 waren jedoch nicht sehr erfolgreich, vermutlich aufgrund der geringen Löslichkeit des $\text{Mg}(\text{OH})_2$ und den damit verbundenen Prozessschwierigkeiten. Wird der Anteil des genutzten Natriumphosphats jedoch weiter erhöht, entsteht anstelle des gewünschten Struvit(K) ein Niederschlag aus Hazenit ($\text{KNaMg}_2[\text{PO}_4]_2 \cdot 14\text{H}_2\text{O}$) oder Aphtitalit ($\text{K}_3\text{Na}[\text{SO}_4]_2$). Wird bei der Fällung nur die den pH-Wert einstellende Phosphorsäure als P-Quelle eingesetzt, liegt die Ausbeute bei der Fällung des gelösten Kaliums bei lediglich 20%.

Hierbei wäre auch ein mehrstufiges Verfahren denkbar, bei dem zuerst 40% vom Kalium durch gezielte Mg und P Zugabe gefällt werden und anschließend die immer noch Nährstoffreiche Lösung weiterverwendet wird. Allerdings kommt das Verfahren durch den kostspieligen Einsatz der benötigten chemischen Substanzen (Mg und P Quellen) und der zusätzlich geringen Ausbeute (max. 40%) in Bezug auf das Kalium schnell an seine wirtschaftlichen Grenzen. Einen Austausch der Phosphorquelle mit einer kalium- und phosphorreichen Asche ist nicht möglich, da sich unter den benötigten alkalischen Bedingungen für die Fällung nur das Kalium löst.

Tiermehlasche

Das pontes pabuli Grundverfahren wurde mit verschiedenen anorganischen Säuren und Tiermehlaschen untersucht wobei sich die Schwefelsäure als am geeignetsten erwies um die schwerlöslichen Apatit-Phasen (allg. Formel $\text{Ca}_5[(\text{F},\text{Cl},\text{OH})](\text{PO}_4)_3$) in Lösung zu bringen.

Jedoch sind vergleichsweise hohe Mengen an Schwefelsäure nötig, um das vorhandene Phosphor quantitativ in eine pflanzenverfügbare Form zu bringen. Dadurch sinkt jedoch auch der Phosphoranteil, da zusätzlich große Mengen an Gips ausfallen und somit den Phosphoranteil reduzieren (von ursprünglich ~16% P auf ~8% P).

Daher wurde auch untersucht, ob es nicht auch möglich ist den gelösten Phosphor separat auszufällen damit man nicht auch den vollständigen Gips im Produkt hat. Hierzu wurde der Phosphor mittels Säureaufschluss gelöst, der Rückstand wurde abgetrennt und anschließend wurde der pH-Wert mittels

Lauge (Ca(OH)_2 , KOH oder NaOH) erhöht, um den Phosphor nahezu vollständig auszufällen. Dies gelingt auch (siehe Abbildung 51, Fällung mittels Ca(OH)_2). Jedoch ist hierzu auch ein sehr hoher pH-Wert nötig. Mit NaOH und KOH ist die Fällung schlechter, es ist noch mehr Phosphor in Lösung bei gleichem pH-Wert.

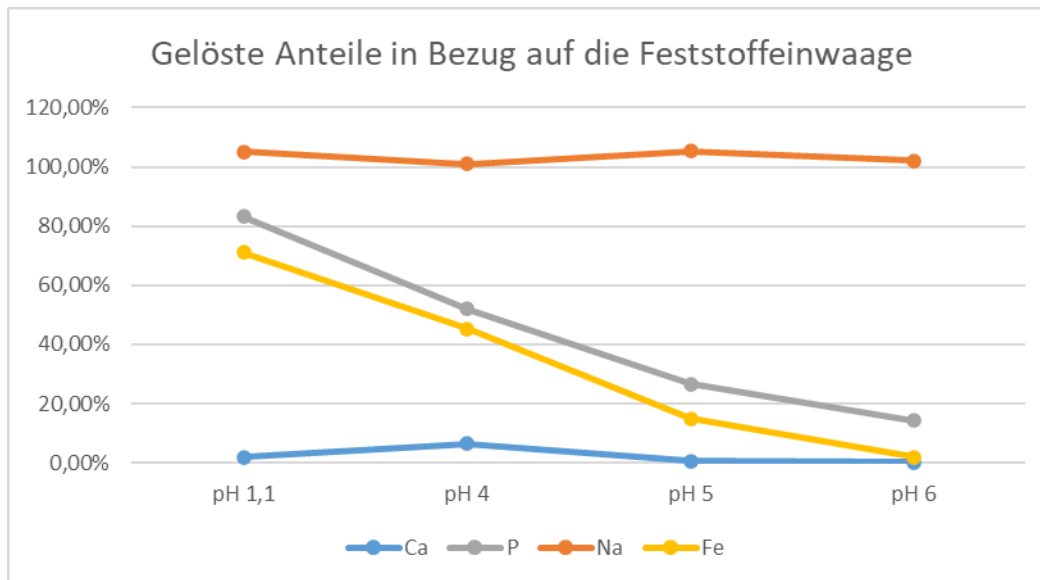


Abbildung 51: Gelöste Anteile an ausgewählten Elementen in Bezug auf die ursprüngliche Feststoffeinwaage sowie deren Fällungsverhalten in Abhängigkeit des pH-Werts (Einstellung mittels Ca(OH)_2)

Analysiert man den abgetrennten Filterkuchen in Abhängigkeit des pH-Wertes der Fällung, stellt man fest, dass sowohl der Phosphor (welcher sich in einer Neutralammoniumcitrat Lösung extrahieren lässt) als auch der wasserlösliche Phosphor stark abnehmen, wenn während der Fällung der pH-Wert über 4 liegt. Um bereits bei niedrigeren pH-Werten eine nahezu vollständige Fällung zu erzielen, wurden Versuchsreihen mit Eisensulfat, Eisenchlorid, Aluminiumchlorid und Aluminiumsulfat durchgeführt um anschließend das Fällungsverhalten mit Ca(OH)_2 und KOH zu untersuchen. Durch gezieltes Dosieren und Auswählen des Fällungsmittels lassen sich Produkte mit P Gehalten von ~14%, also nahe an der ursprünglichen Tiermehlasche erzeugen, die zudem auch eine hohe Neutralammoniumcitrat Löslichkeit besitzen.

Diese Verfahrensvariante mit Fällung würde sich grundsätzlich eignen, um ein Phosphorreicherer Produkt als im Grundverfahren herzustellen. Allerdings benötigt man für diese Variante mehr Verfahrensschritte sowie zusätzliche Fällungsmittel (Ca(OH)_2 und u.a. $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$) was die Kosten erhöht. Zudem verliert man bereits einen Teil vom Phosphor im Abfall, wenn man die anfängliche Fest/Flüssig Trennung nach dem Löseschritt durchführt. Dies verschlechtert die Gesamtbilanz.

Das pontes pabuli Grundverfahren und die Fällungsvariante können zwar auf Tiermehlaschen angewendet werden, jedoch bietet sich aufgrund die sehr geringen Schwermetallbelastung eine vom Projektpartner entwickelte weitere Verfahrensvariante an, welche aufgrund der geringeren Prozessschritte wirtschaftlicher sein könnte. Hierbei erfolgt der Säureaufschluss nicht in Suspension, sondern direkt in einem erdfeuchten System. Somit entfällt die spätere fest/flüssig Trennung. Diese Verfahrensvariante ist auch für Klärschlammaschen mit sehr geringer Schwermetallbelastung möglich.

Hierzu wurden zuerst Vorversuche im kleinen Maßstab (Becherglas) mit verschiedenen Säuresystemen durchgeführt, wobei mit Schwefelsäure und Phosphorsäure bisher die besten Ergebnisse erzielt werden konnten, was die anschließenden Phosphorlöslichkeiten betrifft. Beim Hochskalieren im Labormaßstab erwies sich der Intensivmischer als am geeignetsten, da er durch das gleichzeitige Rühren und Drehen die Proben besonders gut homogenisiert sowie auch durch das intensive Scheren größere Brocken zerkleinern kann (Abbildung 52). Durch Variation der Säure, Dosierung, Reaktionszeit

und Ablauf wurden die zum Aufschluss nötigen Parameter in Zusammenarbeit mit pontes pabuli ermittelt.



Abbildung 52: Links Erdfeuchtes TMA; rechts Verklumpung aufgrund von zu hoher Flüssigkeitszugabe, unten getrocknete Granulate aus Tiermehlasche und Phosphorsäure.

Bei **Klärschlammaschen** wurde das pontes pabuli Verfahren angewandt. Im ersten Schritt fand ein Löseprozess in einer auf die Asche abgestimmten Säure-Art und -Konzentration statt. Dabei löst sich sowohl der Hauptnährstoff Phosphor als auch ein Großteil der Schwermetalle. Der Phosphor wird so in eine pflanzenverfügbare Form überführt. Nach der fest-flüssig Trennung konnten die Schwermetalle im Prozesswasser mittels sulfidischer Fällung aus dem Kreislauf entfernt werden. Der Prozess muss demnach auch so gesteuert werden, dass je nach Kontamination der Asche ein ausreichend hoher Schwermetallanteil mit in Lösung geht. Die praktische Durchführung dieser Kreislaufversuche wurde zuerst im Labormaßstab durchgeführt, um zu überprüfen wie viele Zyklen es dauert bis der Prozess stabil (keine Änderungen der Konzentration) abläuft bevor der Prozess später in den (klein-)technischen Versuchsbetrieb übertragen wurde.

Die aufbereiteten Verbrennungsaschen nach dem pontes-pabuli-Verfahren stellen im Augenblick die interessanteste Stoffgruppe für die Überführung neuer Technologien in bestehende Stoffkreisläufe bspw. der LAV-Erdenwerke dar – insbesondere in Hinblick auf die Nährstoffversorgung in Pflanzsubstraten, aber auch bei der Verwendung als Bodenhilfsstoff. Die jüngsten Preissteigerungen für Düngemittel untermauern diesen Ansatz.

In enger Abstimmung der Projektpartner, insbesondere mit Fraunhofer IKTS, MFPA und pontes pabuli, sind wie oben dargestellt verschiedene Verbrennungsaschen charakterisiert und getestet worden. Einige der aufbereiteten Verbrennungsaschen sind eine interessante und wirtschaftlich attraktive Stoffgruppe für die Überführung neuer Technologien in bestehende Stoffkreisläufe der LAV.

Besondere Aufmerksamkeit bekamen zwei Filterkuchen, hergestellt nach dem pontes-pabuli-Verfahren. Infolge der gestiegenen Düngerpreise und sich stetig verschärfender Umweltauflagen kann die Nutzung von Verbrennungsrückständen mit Phosphorrückgewinnung bei gleich mehreren Problemen eine Lösung bieten.

Zu den Vorarbeiten zählen vor allem die Ermittlung von Stoffcharakteristika der aufbereiteten Aschen und die Erstellung von Versuchsmaterialien für Kompost- und Pflanzenversuche. Hierzu wurden Proben von MFPA und pontes pabuli chemisch und physikalisch aufbereitet, analysiert (Tabelle 5).

Tabelle 5: Grunduntersuchung pflanzenspezifischer Parameter

Probe Nr.	Probenbezeichnung	pH-Wert (Wasser)	pH-Wert (CaCl ₂)	Restfeuchte (%)	Rohdichte g/Liter	Leitfähigkeit EC	Salzgehalt (g/L)	Salzgehalt (mg/100 g Boden)
P1	HNO ₃ FK original	3,2	2,92	17,8	856,4	14,50	65,57	928
P2	HNO ₃ FK + 2 % KOH	5,3	4,82	16,4	855,3	17,07	77,09	1092
P3	HNO ₃ FK + 4 % KOH	6,3	5,43	15,3	858,7	18,01	81,66	1153
P4	H ₂ SO ₄ FK trocken	-	1,54	2,5	860,1	7,89	35,83	505
P5	H ₂ SO ₄ FK + 12 % KOH	4,2	4,12	19,5	1047,6	12,41	68,65	794
P6	H ₂ SO ₄ FK + 14 % KOH	4,9	5,24	19,4	1034,5	10,66	58,23	682

Weiterhin wurde eine Konzeption für Pflanzenversuche erarbeitet und abgestimmt. Diese konnten ab August 2023 dann in einem externen Versuchsgewächshaus durchgeführt werden (AP 5). Auf Grundlage der Ergebnisse der Pflanzenversuche wurden weitere Kompostversuche unter RAL-Bedingungen durchgeführt (AP 5).

AP 5 Überführung ausgewählter Technologieansätze in den technischen Maßstab zur Überprüfung der Machbarkeit und zur Erfassung technischer und wirtschaftlicher Parameter

Nach Abschluss der Analysen und Verwertungskonzeptionen wurden in diesem Arbeitsschwerpunkt die kleintechnische Beprobung in die praktische Anwendung bzw. in den technischen Maßstab überführt. Hier waren Feldversuche zur Logistik, Sammlung, Erfassung und Verwertung vorgesehen.

In ausgewählten Siedlungsstrukturen sollten qualitätsorientierte Sammelsysteme abgebildet und analytisch begleitet werden.

Feldversuch Holsystem im Landkreis SHK:

Die Auswertung des vorhandenen Holsystems in Jena (inkl. seiner ländlich geprägten Ortsteile) haben gezeigt, dass Fehlwürfe mit sehr hohem Plastikanteil viel zu häufig auftreten, sodass diese Mengen aktuell kaum für eine stoffliche Verwertung geeignet sind. Des Weiteren ist der politische Wille im Landkreis Saale-Holzland-Kreis nochmal ins Projekt IRRMa hinein klar gemacht worden, keine Biotonne (Holsystem) zu testen, geschweige denn einführen zu wollen.

Ein Holsystem im Landkreis an ausgewählten Stellen zu testen machte daher nur begrenzt Sinn, beispielsweise bei Pflegemaßnahmen von Naturschutzflächen oder an kommunalen Hotspots (Popup-Container-Gestellung). Hier kann durch die sehr eingeschränkte Nutzerzahl der Fehlwurfanteil auf ein Minimum reduziert werden. Im Naturschutzbereich wurde diese Variante 2023 und 2024 getestet und das Material (Schilf, Kopfweiden, Grasmahd) auf alternative Nachnutzung analysiert.

Die sogenannten Popup-Container sollten 2024 an gemeindlichen Hotspots getestet werden. Die Einführung der IRRMa Sammelstellen in 5 Kommunen bedurfte allein schon umfangreiche Abstimmung mit den Kommunalen Vertretern, sodass die „Popup“ nicht gestartet werden konnten.

Feldversuch „Sammlung“

Aus den o.g. Gründen wurde der Fokus auf die Ausweitung der kommunalen Sammelplätze, sprich das Bringsystem gesetzt. Den Gemeinden und deren Mitarbeitenden der Bauhöfe wurde in gemeinsamen Workshops das IRRMa-Projekt inklusive seiner datenbasierten APP vorgestellt. Ziel ist die Umstellung der bisherigen unkontrollierten Sammlung der biogenen Abfälle auf eine kontrollierte und fachgerechte Verwertung durch etablierte Logistiksysteme (Bringsystem/Sammelplätze) und Holsystem in Jena, um durch eine höhere Sortiertiefe für bestimmte Abfallfraktionen neue innovative Verwertungsmöglichkeiten zu erschließen.

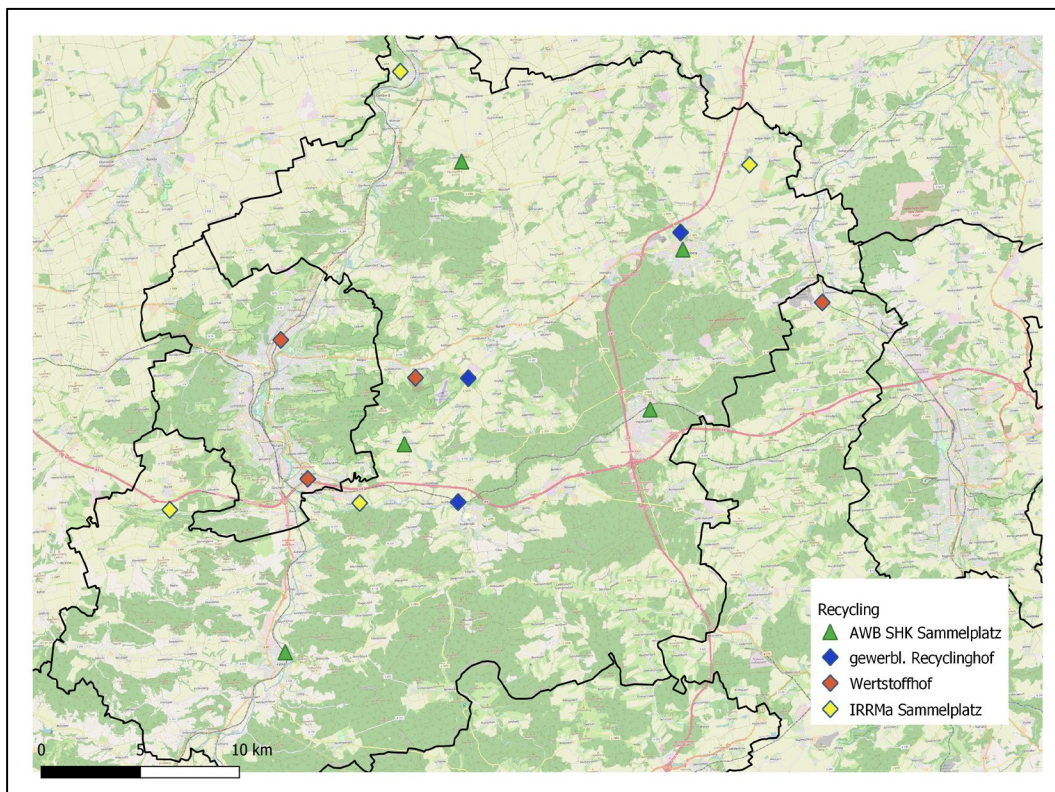
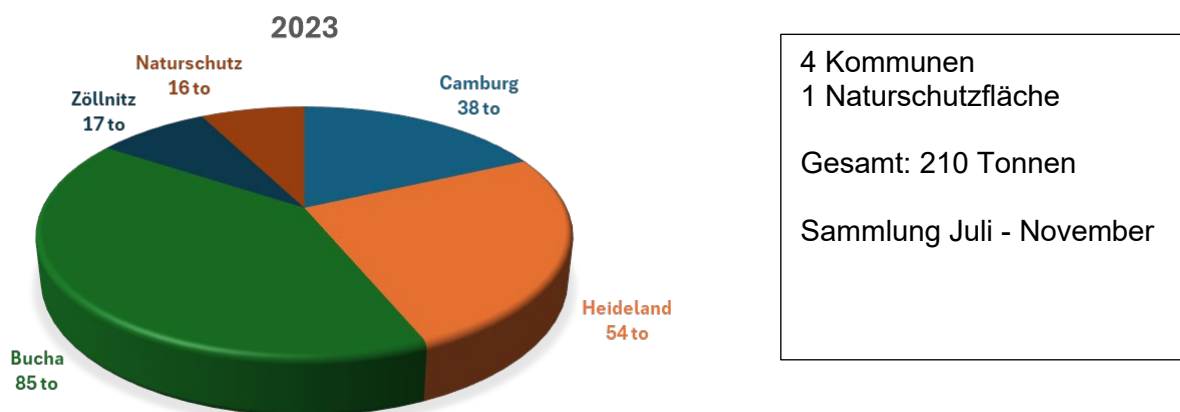


Abbildung 53: Grüngut Sammelplätze Projektgebiet

Die Digitalisierung und eine intensive Zusammenarbeit mit den verschiedenen regionalen Akteuren bieten Potentiale, die es ermöglichen die Verwertungstechnologien weiterzuentwickeln. Die beteiligten Gemeinden, welche den Kooperationsvertrag mit IRRMa abgeschlossen haben, wurden beim Ausbau der Sammelstellen (Bringsystem) in ihren Ortschaften durch die IRRMa Projektpartner unterstützt und konnten 2023 eine fachgerechte Verwertung und digitale Erfassung der Mengen für sich in Anspruch nehmen.

2024 konnte die Anzahl der Kooperationspartner im Saale-Holzland-Kreis weiter ausgebaut werden. Während sich im Vorjahr nur 4 Gemeinden am Ausbau der Sammelstellen beteiligten, waren es 2024 bereits 9 Gemeinden. Dies zeigt, dass das Interesse von Seiten der Bauhöfe vorhanden ist, ein vielfältiges Angebot zur Verwertung des Grünschnitts anzubieten und zu nutzen sowie die Strecken für die einzelnen Gemeinden zur Annahmestelle zu verkürzen. Insbesondere liegt der Focus auf einer kontrollierten fachgerechten Verwertung in Richtung Kompostierung, damit wilde Ablagerungen in der Natur vermieden werden.



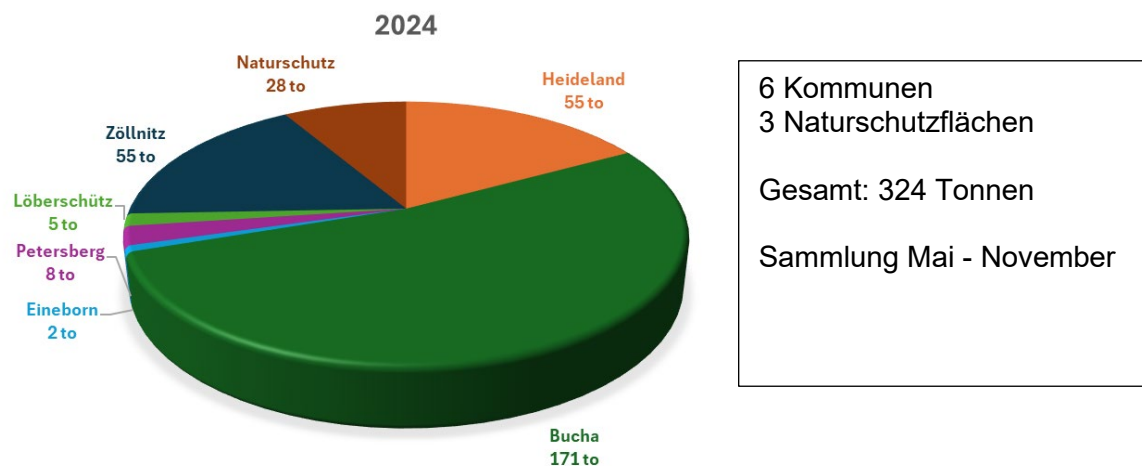


Abbildung 54 - Datenerfassung Ergebnisse Feldversuch 2023 und 2024

Das angenommene Volumen zeigt erhebliches Potential, welches entweder die Erweiterung des Projektes unterstreicht bzw. weitere Verwertungstechnologien für die Gemeinden für sich beansprucht.

Die getrennte Grasmahdsammlung auf dem Wertstoffhof des KSJ in der Löbstedter Straße wurde 2024 konsequent fortgesetzt. In der Tabelle 6 ist ersichtlich, dass die Mengen in 2023 und 2024 fast identisch lagen. Mangelnde Vegetation auf Grund ausbleibender Regenfälle senkten in beiden Jahren die Grasmahd- und gesamt erfassten Grünschnittmengen erheblich.

Tabelle 6: Separate Erfassung der Grasmahdmengen

Wertstoffhof	2022	2023	2024
Volumen in cbm gesamt	156	174	174
Menge in Tonnen gesamt	46,62	29,60	29,54
Dichte to/cbm (33 cbm)	0,33	entfällt	entfällt
Dichte to/cbm (6 cbm)	0,12	0,17	0,16
Anzahl Transporte Container 33 cbm	4	entfällt	entfällt
Anzahl Transporte Container 6 cbm	6	29	30
Verbleibsanlage	Gemes	Veolia	Gemes
%-tualer Anteil von Gesamtmenge	2%	1,21%	1,21%
Zeitraum	Mai bis Nov.	Mai bis Okt.	Apr. bis Nov.
städt. Grünanlagenpflege	2022	2023	2023
Volumen gepresst in cbm	40	100	entfällt
Menge in Tonnen	12,22	49,58	49,58
Dichte in to/cbm	0,30	0,5	entfällt
Anzahl Transporte Sammelfahrzeug	2	5	entfällt
Verbleibsanlagen	Mörsdorf	Mörsdorf	entfällt
%-tualer Anteil von Gesamtmenge	3,51%	5,80%	entfällt

Zu erwähnen ist auch, dass die seit 2022 eingeführte separate Grasmahdsammlung bei den europaweit ausgeschriebenen Mengen von den zwei anbietenden Entsorgern nicht mit einer Preissenkung honoriert wurde. Dies lässt letztendlich Schlüsse darauf zurück, dass die eingesetzte Verwertungstechnologie für 1.000 Tonnen Grasmahd für externe Entsorger die klassische Kompostierungsvariante ist, so wie sie für die 2.500 Tonnen Astschnitt und Grünschnitt bereits angewandt wird.

Der geplante Wertstoffhof des Kommunalservice Jena im Süden von Jena könnte hierbei zukünftig eine wichtige zentrale Anlaufstelle für die Entsorgung des Grüngutes beider kommunalen Partner darstellen und strategisch die Verwertungsoptionen für die Bürger im SHK Bereich südlich von Jena erheblich erleichtern.

Auch die Mengen Grünschnitt an den nun 9 Sammelorten im Feldversuch des Saale-Holzland-Kreises konnte deutlich gesteigert werden. Im Vergleich zu 2023, wo 175 Tonnen Grünschnitt anlandeten, waren es 2024 bereits knapp 300 Tonnen. Jedoch gilt hierbei zu beachten, dass das Angebot der Sammelplätze 2023 erst später im Jahr startete als 2024. Durch die Angebote der Sammelplätze an günstigen Punkten im ländlichen Bereich innerhalb dieses Projektes, wird es dem Bürger zugänglich und unkompliziert gestaltet.

Tabelle 7: Auszug der Annahmedokumentation von Juli bis Oktober 2023

2023	Datum	Erzeuger/Containerstellplatz	Gewicht
Juli	04.07.2023	Camburg	6,08
	11.07.2023	Camburg	5,62
	18.07.2023	Camburg	4,76
	21.07.2023	Camburg	5,94
	21.07.2023	Zöllnitz	10,12
	28.07.2023	Camburg	6,42
August	03.08.2023	Camburg	9,34
	08.08.2023	Bucha	7,88
	22.08.2023	Bucha	12,38
	29.08.2023	Bucha	6,02
	30.08.2023	Heideland	18,52
	30.08.2023	Heideland	17,42

Tabelle 8: Erfassung der angelieferten Grünschnittmengen zwischen Januar und November 2024

2024	Gewicht	Anfallstelle
Januar	6,06	
Februar	11,64	
März	19,98	Bucha
April	44,32	Bucha Großlobichau
Mai	11,82	Bucha
Juni	16,64	Bucha
Juli	28,4	Bucha Zöllnitz
August	20,46	Bucha Heideland Buchheim
September	52,22	Bucha Zöllnitz
Oktober	25,36	Bucha Zöllnitz
November	60,52	Zöllnitz Agrar Ottendorf Eineborn
	297,42	

Im Saale-Holzland-Kreis existieren bis Ende 2024 fünf kommunale Wertstoffhöfe, wo Grün- und Astschnitt sowie Bioabfälle abgegeben werden können im sogenannten Bringsystem. Zusätzlich wurden innerhalb des Projektes IRRMa 4 weitere Sammelplätze etabliert. An diesen Sammelplätzen wurden

Container des KSJ im Wechselmodell aufgestellt und in der Kompostieranlage GEMES verwertet. Die angelieferten Mengen dieser Sammelplätze wurden digital erfasst (per IRRMa ErfassungsAPP) und gesondert gelagert, um sie der weiteren Verwertung innerhalb der Projektaufgaben zuzuführen. Ab 2025 werden 2 weiterer offizielle Sammelplätze übernommen, direkt bei Fa. GEMES in Schöngleina sowie 1 Platz in Bucha. Weiterhin wird ein weiterer Platz in Milda eingeführt. Somit verdichtet sich der Abdeckungsgrad und die Wege für die Kunden im Landkreis werden kürzer.

Aufbauend auf die GIS-Analyse (AP 2.3) wurde eine Abdeckungs- und Entfernungstudie geführt. Wie in Abbildung 55 bereits ersichtlich, existieren im Landkreis nur in eingeschränkter Anzahl Sammelstellen für privaten und/oder kommunalen Grünschnitt. Speziell bei Letzteren, den Kommunen, ist die Anfahrt zu entsprechenden Stellen mit hohem zeitlichen Aufwand verbunden. Dies wurde in der Entfernungstudie mit unterschiedlicher Sammelstellendichte dargestellt. Kennzahl der Polygone sind die Fahrtzeiten von maximal 10 Minuten mit einem Kommunalüblichen Fahrzeug (Multicar) auf öffentlichen Straßen zu den Sammelplätzen. In Abbildung 55 sind die weißen Flecken der Nichterreichbarkeit in angegebener Zeit und Entfernung deutlich zu erkennen. Umso mehr Plätze zur Verfügung stehen, auch durch Öffnung für unterschiedliches Klientel (Bürger + Kommunen) kann die Verfügbarkeit optimiert werden.

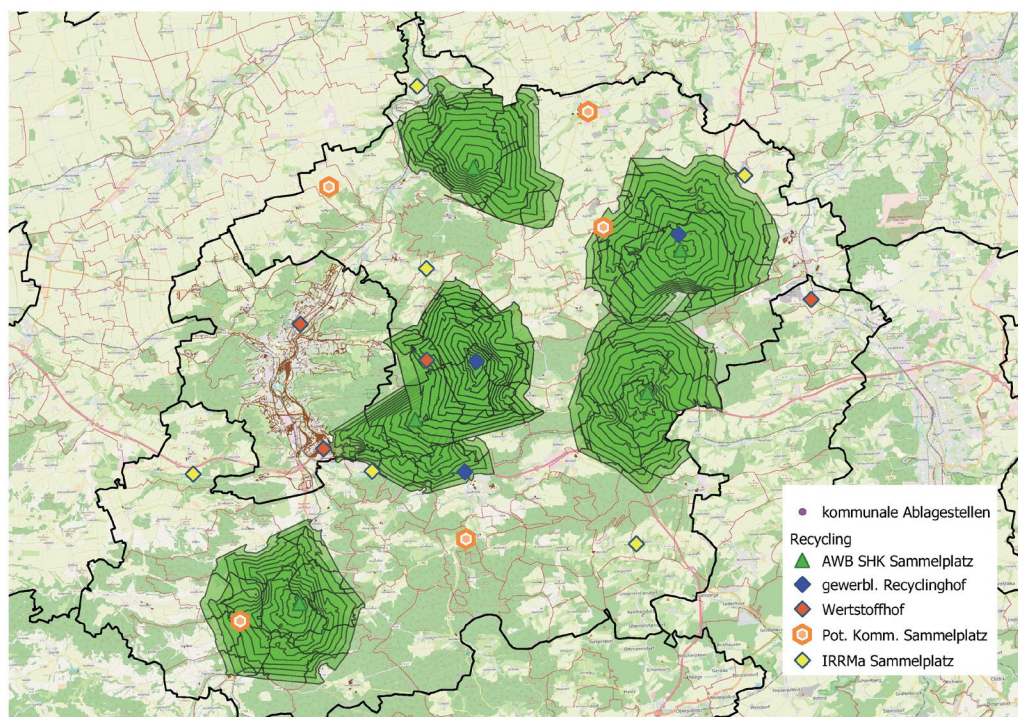


Abbildung 55: Abdeckungsgrad der Region nur Sammelstellen Dienstleistungsbetrieb SHK

Umso mehr Plätze zur Verfügung stehen, auch durch Öffnung für unterschiedliches Klientel (Bürger + Kommunen) kann die Verfügbarkeit optimiert werden. Die eingeführten Sammelstellen aus dem IRRMa Projekt (Feldversuch) sind ein guter Ansatz der Verdichtung. Abbildung 57 zeichnet ein Zukunftsszenario unter Einbeziehung weiterer Plätze und gemischter bzw. gemeinsamer Nutzung.

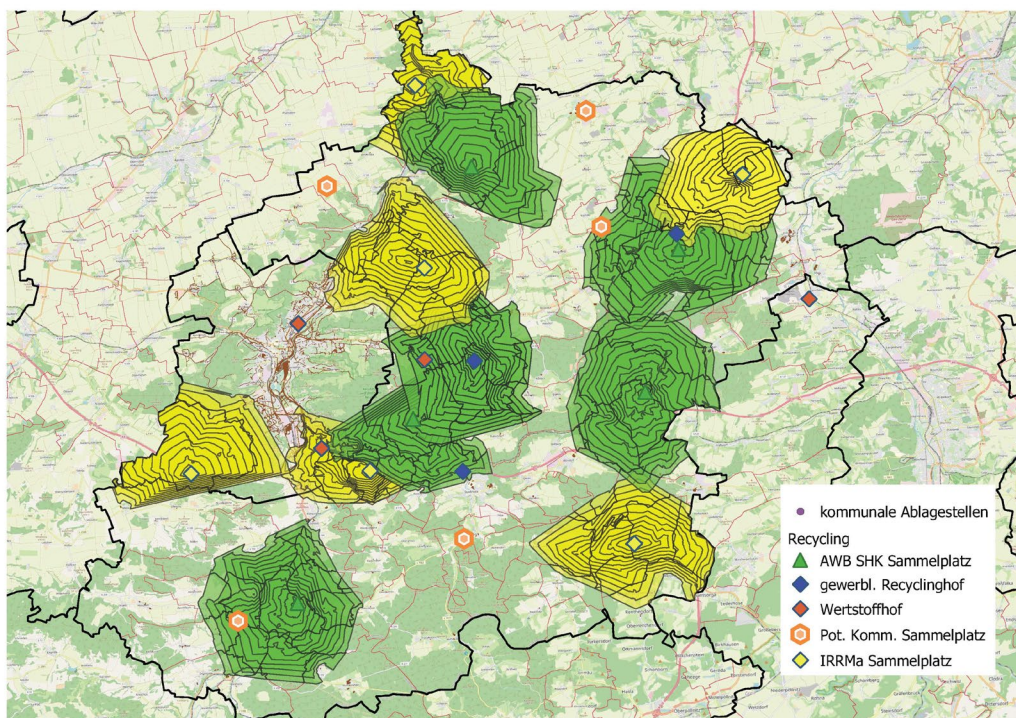


Abbildung 56: Abdeckungsgrad der Region Sammelstellen Dienstleistungsbetrieb SHK + IRRMa Plätze

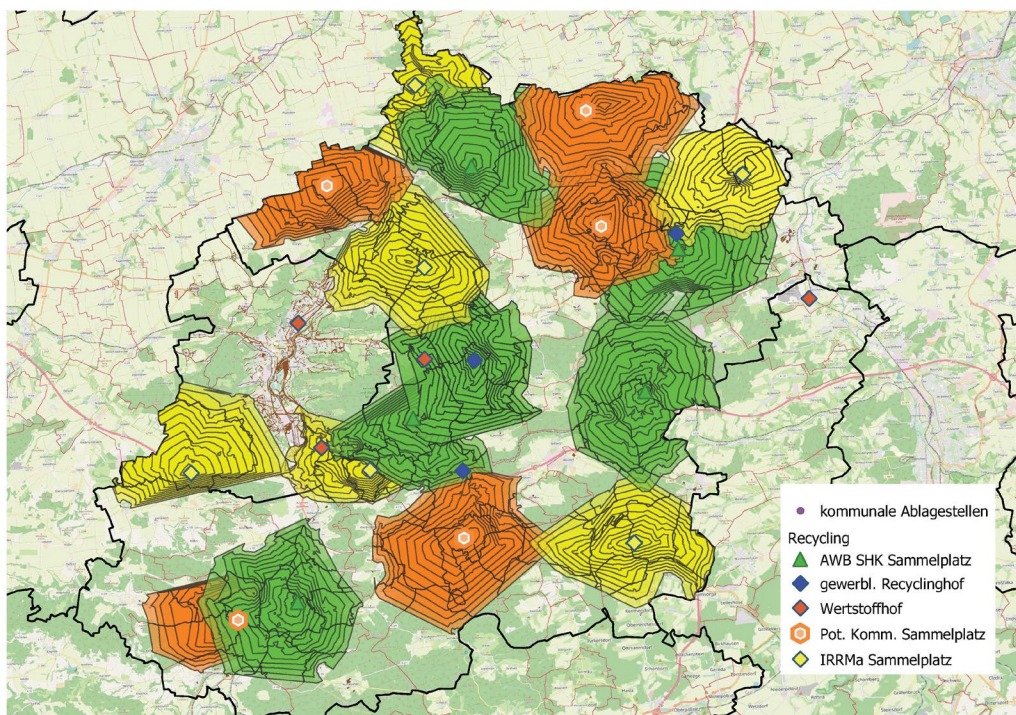


Abbildung 57: Zukunftsszenario des Abdeckungsgrades

Neuer Handling-, Aufbereitungs- und Lagerungskonzepte für getrennt gesammelte Qualitäten an organischen Reststoffen zu testen war ein weiterer Arbeitspunkt. Die über das im Landkreis etablierte Bringsystem separat gesammelten Gras- und Grünschnittabfälle wurden im technischen Maßstab in neuen Konzepten des Verwertungsprozesses erprobt.

Voraussetzung für eine weitere Verwertung bspw. im Biogasbereich oder Fasernutzung ist grundsätzlich die Sicherstellung der Störstofffreiheit (Steine, Äste,...) und eine Minimierung der Faserlängen, so dass keine Verzopfungen im Fermenter oder beim Umpumpen auftreten. Hierfür eignen sich verschiedene Vorbehandlungsstufen, wie z. B. die Zerkleinerung mittels Prallreaktor.

Die **Zerkleinerung von Grasmahd im Prallreaktor** im großtechnischen Maßstab wurde am Standort einer Biogasanlage in Bayern getestet (Abbildung 58).



Abbildung 58: Lieferung Grasmahd (links), Dosierer (Mitte) und zerkleinertes Material nach Prallreaktor (rechts)

Dazu wurde unbehandelte Grasmahd aus Jena angeliefert und zum Teil mit Steinen (bis 10 cm Kantenlänge) und Ästen aufgestockt, um die Robustheit des Verfahrens zu testen. Die Zerkleinerung der Steine gelang sehr gut auf Größen kleiner 2 cm. Die hinzugefügten Äste wurden ebenfalls erheblich zerkleinert, blieben aber mit maximalen Längen von bis zu 20 cm noch als relevante Störstoffe übrig.

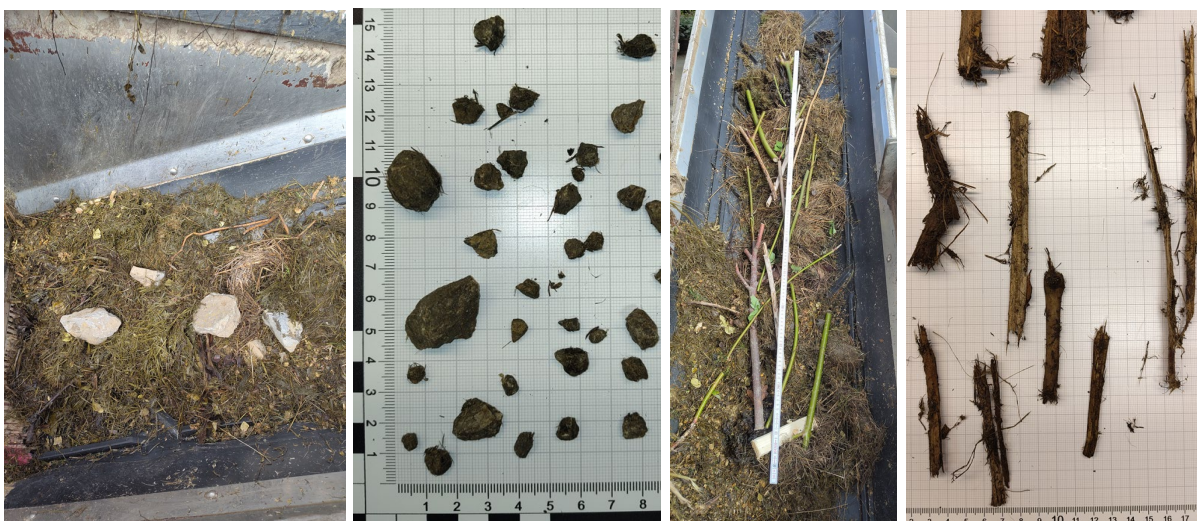


Abbildung 59: Zerkleinerung von Steinen und Holz (jeweils vor und nach Prallreaktor)

Dennoch kann der Prallzerkleinerer als Vorbehandlungseinheit für die Verwendung von Grasmahd empfohlen werden.

Lagerung/Haltbarmachung

Die **Silierung (Konservierung) und Entwässerung** von verschiedenen Grasmahdproben wurde erfolgreich im kleintechnischen und praktischen Maßstab realisiert.

Dazu wurden beim IKTS 30 Liter Fässer mit Grasschnitt (direkt nach Rasenmäher oder nach Prallzerkleinerer) befüllt und verdichtet. Eine sehr gute Haltbarkeit des Materials über mindestens 6 Monate konnte nachgewiesen werden (vgl. auch Abbildung 61 links).

Der Projektpartner KSJ veranlasste die Herstellung von großtechnischen Grasmahd-Ballen von gemähter kommunaler Fläche des KommunalService Jena. Dazu wurde im Sommer 2024 ein Versuch gestartet, bei welchem die geerntete Grasmahd zu einem Silage-Rundballen verpresst wurde (Abbildung 60). Die Gasbildungsrate wurde zum Zeitpunkt der unmittelbaren Herstellung des Grasballens und zum Zeitpunkt der Silierung nach ca. 8 Wochen gemessen. Analytisch begleitet wurde der Versuch wiederum durch IKTS im Labor in Dresden.



Abbildung 60: Herstellung und Beprobung eines Heuballens

Dabei zeigte sich am pH-Wert eine gute Versäuerung und Konservierung. Der spezifische Biogas- und Methanertrag konnte erhöht werden (Tabelle 9). Damit wäre die Ballierung eine potenzielle Möglichkeit der Konservierung von Material. Alternativ auch im größeren Maßstab in einem kostengünstigeren Schlauchsilos oder einer Fahrsiloanlage.

Tabelle 9: Analyseparameter für die Ballierung von Grasmahd

	TR	oTR	pH	CSB	NH4	PO4	K	Biogas		CH4
	%	%		mg/g OS	mg/kg OS			NL/kg oTRzu	Nm³/t OS	%
Grasmahd (frisch)	24,0	88,0	6,46	63	115	3579	15526	552,0	116,4	53,9
Grasmahd (Ballen, 8 Wochen)	28,7	88,4	4,56	75	923	3386	7758	683,8	173,4	54,9

Die Abpressung von Flüssigphasen aus silierten Grasmahd-Chargen wurde durch IKTS mittels einer Hochleistungsschneckenpresse realisiert (Abbildung 61). Dabei können je nach Wassergehalt der Silagen zwischen 25 und 45 % Masseanteil als Flüssigphase abgepresst werden. Das Pressgut erreicht Feststoffgehalte von mindestens 40 % und wäre für die Weiterverwendung als Faserrohstoff vorbehandelt.



Abbildung 61: Grasmahd-Silage im Fass (links) und Ponndorf-Presse, Presskuchen und Flüssigphase

2024 wurde zusätzlich in zwei Zeiträumen der Beprobung (Mai und August) die analytische Begleitung der separierten Grasmahdmengen (Abbildung 62) durch das IKTs durchgeführt. Im Ergebnis der Probe-reihen wurde festgestellt, dass die Biogasrate mit zunehmender Verweildauer im offenen Absetz-container sank. Temperaturen und Feuchtigkeit beeinflussten ebenso stark die Schnelligkeit des Absenkens der vorhandenen Biogasrate.



Abbildung 62: separate Grasmahdsammlung am Wertstoffhof Jena

Ein weiterer Verwertungsweg ist die Herstellung von Spezialerden unter Einbeziehung von biogenen Reststoffen. Im Rahmen dieses Arbeitspakets wurden in Zusammenarbeit mit pontes pabuli Muster für weitergehende Versuche erzeugt und analysiert (Bodensubstrat und Düngergranulate). Die Proben stammten entweder aus Laborversuchen oder aus der (klein-)technischen Versuchsanlage. Für die Überprüfung vom Verwertungsweg Spezialerden wurden Proben aus dem pontes pabuli Prozess verwendet, bei dem aus Klärschlammasche mittels Schwefelsäure oder Salpetersäure der Phosphor in eine pflanzenverfügbare Form überführt wurde (Tabelle 10). P_{Gesamt} ist der Gesamtphosphor, welcher mittels Königswasser Aufschluss bestimmt wurde. P_{NAC} ist der Phosphor, welcher sich in einer Neutralammoniumcitrat Lösung extrahieren lässt und $P_{\text{H}_2\text{O}}$ ist der wasserlösliche Phosphor. Die Bioverfügbarkeit entspricht P_{NAC} zu P_{Gesamt} und ist eine Annäherung für den pflanzenverfügbaren Phosphor.

Tabelle 10: Proben für die Pflanzversuche bei LAV; Phosphorlöslichkeiten der Filterkuchen (FK)

Proben LAV	pH-Wert	Restfeuchtigkeit	~~P_{gesamt}~~	P _{NAC}	P _{H₂O}	Bioverfügbarkeit
H ₂ SO ₄ FK Trocken	2,0	2,5%	3,9%	3,7%	0,83%	94%
H ₂ SO ₄ FK 12% KOH feucht	4,2	19,5%	3,0%	2,9%	0,02%	97%
H ₂ SO ₄ FK 14% KOH feucht	4,9	19,4%	3,0%	2,9%	0,02%	97%
HNO ₃ FK feucht	3,2	17,8%	3,8%	3,5%	0,20%	93%
HNO ₃ FK 2% KOH feucht	5,3	16,4%	3,7%	3,5%	0,13%	97%
HNO ₃ FK 4% KOH feucht	6,3	15,3%	3,8%	3,6%	0,11%	95%

Um aus diesen Proben ein verarbeitbares Substrat herzustellen, wurden zum einen der Filterkuchen getrocknet (H₂SO₄ FK Trocken), eine Mischung aus trockenem und feuchten Filterkuchen (HNO₃ FK feucht) hergestellt sowie mit unterschiedlichen Mengen an KOH intensiv vermischt, um den pH-Wert anzuheben und die Verarbeitbarkeit vom Filterkuchen zu erhöhen.

Des Weiteren wurde von den Salpetersäuren FK Proben der Nitrat-, Ammonium- und Gesamtstickstoffwert bestimmt sowie der Nährstoffgehalt der einzelnen Proben (Tabelle 11 und Tabelle 12).

Tabelle 11: Proben für die Pflanzversuche bei LAV; Stickstoff im Filterkuchen

Proben LAV	NO ₃ ⁻	N als NO ₃ ⁻	NH ₄ ⁺	N als NH ₄ ⁺	N Gesamt
HNO ₃ FK feucht	10,7%	2,4%	3,4%	2,7%	5,1%
HNO ₃ FK 2% KOH feucht	10,6%	2,4%	3,4%	2,6%	5,0%
HNO ₃ FK 4% KOH feucht	10,5%	2,4%	3,4%	2,6%	5,0%

Tabelle 12: Proben für die Pflanzversuche bei LAV; Nährstoffgehalte

Proben LAV	K	<u>Na</u>	Ca	Mg	S	P	Al	<u>Fe</u>
H ₂ SO ₄ FK Trocken	0,6%	0,2%	7,8%	0,9%	11,6%	3,9%	4,0%	5,0%
H ₂ SO ₄ FK 12% KOH feucht	7,2%	0,4%	5,9%	0,7%	8,8%	3,0%	3,0%	3,9%
H ₂ SO ₄ FK 14% KOH feucht	7,0%	0,2%	5,8%	0,7%	8,7%	2,9%	3,0%	3,8%
HNO ₃ FK feucht	7,1%	0,3%	5,9%	0,7%	8,7%	3,0%	3,0%	3,8%
HNO ₃ FK 2% KOH feucht	7,5%	0,2%	5,8%	0,7%	8,4%	3,0%	2,9%	3,8%
HNO ₃ FK 4% KOH feucht	7,5%	0,2%	5,8%	0,7%	8,3%	3,0%	2,9%	3,9%

Es zeigte sich, dass bis zu einem Anteil von 1,5 Massen-% Filterkuchen keine pflanzenschädigende Wirkung zu beobachten war. Die Keimfähigkeit war jedoch bei höheren Salzgehalten beeinträchtigt. Die hohen Salzgehalte können auf die Neutralisation mit KOH und die daraus entstehenden wasserlöslichen Salze wie Kaliumsulfat oder Kaliumnitrat zurückgeführt werden. Die vorhandenen Nährstoffe (Phosphor, Kalium, Stickstoff, Magnesium u.a.) wirken sich hingegen positiv auf das spätere Wachstum aus.

Durch Einsatz vom günstigeren CaO anstelle vom KOH kann der Anteil an löslichen Salzen verringert werden, was Vorteilhaft für die Keimfähigkeit der Pflanzen ist.

Da die Verwendung als Bodensubstrat im diskontinuierlichen Betrieb Schwierigkeiten machen kann, vor allem bedingt durch die Lagerung von feuchten Filterkuchen, wurden auch verschiedene Muster aus getrockneten Filterkuchen hergestellt. Diese lagerstabilen nährstoffreichen Granulate können entweder als Dünger oder als Beimischung für Bodensubstrate verwendet werden.

Die Nährstoffeigenschaften, schwermetallgehalte sowie die Phosphorlöslichkeiten der Muster wurden im Labor analysiert. Die Düngewirkung wurde beim Partner IKTS mittels Topfversuchen an Luzerne und Chinakohl getestet. Die weitergehende Analyse bezüglich Auswirkungen auf die Prozessführung wurden vom Projektpartner pontes pabuli durchgeführt.

Weitere Verwertungswege von biogenen Reststoffen sind die **Biogaserzeugung, die Verbrennung und die landwirtschaftliche Verwertung als Kompost**. Dies wurde ebenfalls modellhaft getestet.

Feldversuch „Biogas“

Wie im AP 4 erläutert wurden separierter Grasschnitt von kommunalen Grünflächen zur Fermentierung in einer landwirtschaftlichen Biogasanlage getestet. Rechtliche Herausforderung galt es zunächst abzuwägen, Themen des Verwaltungs- und Vergütungsrechts bzw. gesetzliche Anforderungen (hier: EEG) sind zu beachten und galt es zunächst zu klären. Laut den Ergebnissen des Gutachtens sind die rechtlichen Grundlagen eindeutig, jedoch sind finanzielle Risiken vorhanden und abzuwägen. Für die Anlagenbetreiber hängt der wirtschaftliche Erfolg ihres Betriebes auch an den Biogasanlagen. Daher muss die Vergütungsthematik mit den Stromnetzbetreibern (zuständig für die EEG-Auszahlungen) und vorgeschaltet mit Umweltgutachter abgestimmt werden.

Die **Vergärung von Grasmahd im praktischen Maßstab** wurde seitens der Projektpartner KSJ und RAG in einer vorhandenen landwirtschaftlichen Biogasanlage begonnen. Lieferung und Einbringung funktionierten sehr gut. Allerdings musste der Versuch bereits kurz nach dem Start wieder beendet werden, da rechtliche Bedingungen nicht kurzfristig erfüllt werden konnten. Es handelte sich um eine rein juristische Entscheidung. Verfahrenstechnisch wäre die großtechnische Grasmahdverwertung in Biogasanlagen attraktiv. Voraussetzung wäre die Sicherstellung, dass keine Störstoffe (Steine, Äste etc.) eingebracht und die Faserlängen insofern minimiert werden, dass keine Verzopfungen im Fermenter oder beim Umpumpen auftreten. Hierfür eignen sich verschiedene Vorbehandlungsstufen, wie z. B. die Zerkleinerung mittels Prallreaktor (siehe oben Aufbereitungsverfahren).

Da die separate Verwertung der Grasmahd in der Biogasanlage Mörsdorf ab 2023 im Forschungsbetrieb von behördlicher Seite (Landratsamt Eisenberg) nicht mehr genehmigt wurde, suchte der KSJ erneut die Kontaktaufnahme zu den Stadtwerken Jena um die Grasmahd gegebenenfalls in der Biogasanlage Jena-Zwätzen zu verwerten. Leider ist es auch hier bis jetzt beim Austausch von Datenmengen geblieben, eine Probelieferung konnte noch nicht erfolgen.

Ein weiterer Vergärungsversuch der Materialien Grasmahd, Grünschnitt und Gärrest fand im September/Oktober 2024 in einer Trockenfermentationsanlage im Bekon-Prinzip des Partners GEMES in Saalfeld statt. Das Material wird in gasdichte Fermentationsboxen eingebracht, die unter anaeroben Bedingungen betrieben werden. Der mikrobielle Abbau des organischen Materials findet bei Temperaturen zwischen 37 °C und 55°C statt. Durch den anaeroben Abbauprozess entstehen Methan (CH₄) und Kohlendioxid (CO₂) als Hauptkomponenten des Biogases. Der Prozess dauert in der Regel 21 bis 28 Tage. Das gewonnene Biogas wird einer energetischen Verwertung zugeführt und zur Strom- und Wärmenutzung in einem Blockheizkraftwerk verarbeitet und in das Stromnetz eingespeist.

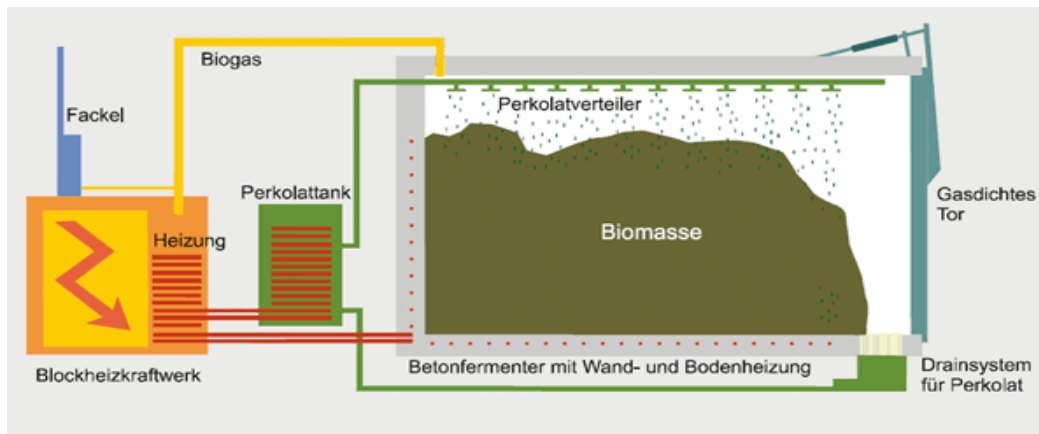


Abbildung 63: Block-Schaltbild Trockenvergärung Bekon

Die nach der Vergärung verbleibenden Gärreste werden entnommen und zum Teil als Animpfmaterial einem neuen Vergärungszyklus zugegeben oder in einer aeroben Nachrotte stabilisiert. Aus der Nachbehandlung wird ein hochwertiger Kompost erzeugt, der als Bodenverbesserer und organischer Dünger in der Landwirtschaft und im Gartenbau genutzt werden kann.



Abbildung 64: Mischung zur Befüllung (links) – Gärrest (rechts)

Für die Befüllung des Versuchs wurden 136 Tonnen Gärrest, 156 Tonnen Biotonne, 20 Tonnen Gras- und Grünschnitt, 18 Tonnen Maissilage und 10 Tonnen Pferdemist verwendet.

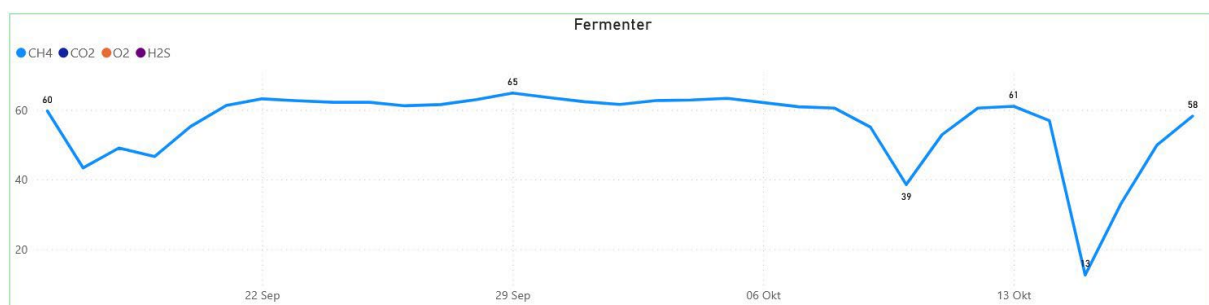


Abbildung 65: Gasbildungskurve während der Vergärung

Der Methangehalt lag im Durchschnitt bei 50,28 % und zeigt damit eine gute Methanausbeute, welche zur Verstromung des Gases eingesetzt werden kann.

Hier lässt sich im Ergebnis festhalten, dass Gras sehr gut zur Vergärung eingesetzt werden kann. Jedoch bedarf es hierbei zusätzlich weitere Komponenten, die zur Gasbildung beitragen.

Das Gärrestmaterial wird daran anschließend in einen aeroben Prozess überführt und zur Kompostierung auf Miete aufgesetzt. Dabei werden Produkte für die Landwirtschaft, den Gartenlandschaftsbau, die Rekultivierung und für den Privatbedarf hergestellt.



Abbildung 66 - Produkte Hochbeeterde (links) und Komposterde (rechts)

2024 wurden weitere Kompostversuche mit den regional angelieferten Reststoff Grasmahd beim Partner GEMES durchgeführt. Die Grasmahd wurde bewusst mit einem Strukturgeber versetzt, um den Kompostierungsprozess zu beschleunigen und einen Vergleich herzustellen zum Kompostierungsversuch im Jahr 2023 sowie zu den Materialmischungen im alltäglichen industriellen Prozess im Kompostierungsbetrieb.

Die Kompostmieten wurden in einem Turnus von 4 bis 8 Wochen mit Hilfe eines Baggers umgesetzt und ggf. befeuchtet. Durch den Umsetzvorgang und der Befeuchtung wird der Kompostierungsprozess aktiviert und es können sich Temperaturen von 55 bis 70 °C einstellen, wodurch eine Hygienisierung des Materials stattfindet und Keime sowie Pflanzensamen (besonders wichtig bei nichtheimischen Pflanzen, sog. Neophyten) abgetötet werden.

Nach ca. 15 Wochen wurde der Kompostversuch beendet, das Ergebnis wird in Abbildung 66 dargestellt. Auch hier ist, wie im Kompostversuch 2023, deutlich zu erkennen, dass die Vergleichsmiete mit geschreddertem Grünschnitt einen besseren Kompostierungsvorgang aufweist. Jedoch kann im Vergleich der Grasmahd-Mieten im Ergebnis festgehalten werden, dass die Kompostierung von Grasmahd mit geschreddertem Astschnitt eine deutlich bessere Abbaubarkeit aufzeigt. Die Umsetzung und Mineralisation der Einsatzstoffe verlaufen im gleichen Zeitraum schneller. Durch den Strukturgeber Astschnitt wird eine bessere Belüftung des Materials erzielt und der aerobe Vorgang kann unter besseren Bedingungen ablaufen.



Abbildung 67: fertige Kompostmieten in 2023 (links) und 2024 (rechts)

Die Bilder in Abbildung 67 zeigen die Grasmahd-Mieten aus dem Jahr 2023 und 2024. Hieraus lässt sich die Struktur der beiden Kompostmieten gut ins Verhältnis setzen und zeigt deutlich, dass die reine Grasmahd (2023) noch keine abschließende Kompostierung durchlaufen hat. Im Gegensatz zur Grasmahd mit Astschnitt (2024).

Folgende Abbildungen zeigen den Kompostversuch mit dem Inputstoff Gras und einem zusätzlichen Strukturgeber Weidenästen aus einem Naturschutzgebiet (Sammlung in Abstimmung mit der unteren Naturschutzbehörde):



Bild 8-10: Einsatzstoffe – Weidenastschnitt (geschreddert), Grasmahd



Bild 11 + 12: Kompostversuch: 1. Miete (links) – geschredderter Grünschnitt; 2. Miete (rechts): Gras und Astschnitt



Bild 13: Vergleich der 1. Und 2. Miete nach ca. 3 Monaten Kompostierung

Abbildung 68: Kompostversuch GEMES 2023 und 2024

Nachfolgend sind die Ergebnisse der (klein-)technische Untersuchungen zur Aufbereitung erzeugter Verbrennungaschen zu nährstoffhaltigen Filterkuchen.

Im Rahmen des Verbundprojektes lag der Arbeitsschwerpunkt von **pontes pabuli** in diesem Arbeitspaket in der Verwertung von schadstoffbelasteten, organischen Reststoffen (wie Klärschlamme, Tiermehle, (Alt-)Holzabfälle) und dort insbesondere auf der **Erschließung von darin enthaltenen Nährstoffen** sowie deren Nutzbarmachung in Form von nährstoffhaltigen Bodensubstraten. Durch das Teilpro-

jekt pontes pabuli wurden technologische Lösungen zur Entfrachtung von Schadstoffen, dem Aufschluss und der Überführung so entstandenen Verbrennungsaschen in nährstoffreiche Bodensubstrate erarbeitet.

Für die Untersuchungen wurden demonstrierhaft 3 sehr unterschiedliche Aschetypen ausgewählt (Holz-, Klärschlamm- und Tiermehlasche). Diese unterschieden sich sehr grundsätzlich in ihrer chemisch-mineralogischen Konstitution. Dies eröffnete die Möglichkeit, die erhaltenen Untersuchungsergebnisse auf eine Vielzahl von nährstoffhaltigen Verbrennungsaschen aus organischen Reststoffen zu übertragen.

Erstellung einer Grundkonzeption für eine Pilotanlage

Mit den durchgeführten laborativen und (klein-)technischen Versuchen konnten für die 3 untersuchten Demonstratoraschen jeweils eine ashespezifische Verfahrensführung entwickelt und deren technische Machbarkeit nachgewiesen werden. Die abgeleitete, aschetypspezifische Prozessführung für die 3 Demonstratoren (Holz-, Klärschlamm-/ Tiermehlasche) wurde zu der folgenden Verfahrensmatrix (Abbildung 68) so zusammengefasst, dass sie als Prozessfließbild für eine kombinierte Verwertungsanlage dienen kann.

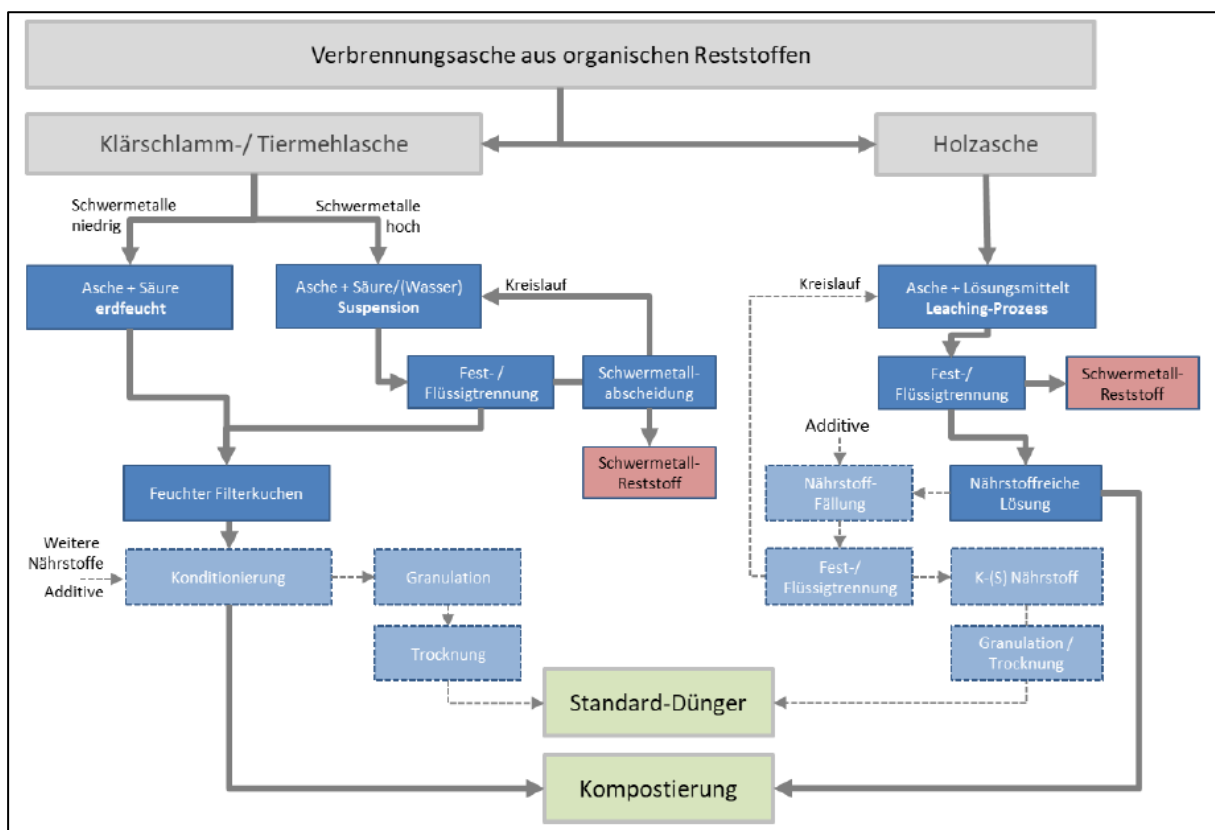


Abbildung 69: Prozessfließbild für eine kombinierte Verwertungsanlage

Aus den (klein-)technischen Untersuchungen konnten für jeden Prozessschritt die jeweiligen wesentlichen Steuerparameter und Steuergrößen ermittelt werden. Darauf basierend wurde ein grobes Steuerungs- und Automatisierungskonzept für eine mögliche zukünftige Produktionsanlage konzipiert. Neben den Steuerungsparametern und den nun definierten Technologieanforderungen konnten mit den (klein-)technischen Versuchen auch die Verbrauchsdaten orientierend abgeleitet werden. Dies ermöglicht eine Wirtschaftlichkeitsanalyse für eine mögliche, zukünftige Produktionsanlage im Großtechnischen Maßstab.

Kompostversuche der LAV mit Filterkuchen aus dem pontes-pabuli-Verfahren (Asche)

Mit den Analyse-Ergebnissen aus AP 4 konnte eine Konzeption für Kompostversuche auf der Kompostieranlage der LAV in Kyhna erarbeitet werden. Hierzu wurde eine Anforderungs- und Bewertungsmatrix für die Eignung der erzeugten Substratkomposte (unter Berücksichtigung der Anforderungen von RAL-Gütesicherung der Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V.) erarbeitet. Die Kompostierungsversuche wurden im halbtechnischen Maßstab (ca. 80 m³) durchgeführt.



Abbildung 70: Kompostversuche in der Kompostanlage Kyhna & Qualitätskontrolle im Bodenlabor Kulkwitz

Die Kompostierung erfolgte mit 100 % geschredderten Grünschnittabfällen der LAV und einmal zusätzlich mit aufbereiteten Filterkuchen (Zumischung: 1,5 Massen-% aus dem pontes-pabuli-Verfahren). Diese wurden technisch homogenisiert bzw. eingemischt (mittels Siebtrommelanlage) und anschließend unter Realbedingungen kompostiert. Die Kompost-Mieten wurden jeweils am selben Tag aufgesetzt, insgesamt zweimal umgesetzt und schließlich abgesiebt. Damit herrschten während der Kompostierung gleiche Bedingungen; diese wurden für beide Mieten dokumentiert (Temperaturverlauf). Die Zeit der Heißrotte betrug 3 Monate (Temperatur > 65 °C), sie stellt die Hygienisierung und eine phytotoxische Unbedenklichkeit des Mietenmaterials sicher. Die Nachrotte bis zum Erreichen eines Fertigkompostes (Rottegrad 4/5) betrug weitere 4 Monate.

Alle Kontrollmessungen ergaben Werte innerhalb der gesetzlichen Vorsorgewerte und innerhalb der Parameter der RAL-Gütesicherung (RAL GZ 251) für Komposte. Damit sind die Filterkuchen aus dem pontes-pabuli-Verfahren auch in der Kompostierung (bis 1,5 Masse-%) anwendungsfähig.

Anschließend konnte in Vorversuchen der LAV die Pflanzenverträglichkeit bewertet und die möglichen Einsatzmengen für die pflanzenbauliche Verwendung in Substrat-Rezepturen ermittelt werden.

Probe Nr.	Probenbezeichnung	Probenmenge (Masse%)	Kresse (Keimlinge/100)	Abweichung von Kontrolle %
0	Keimtest Zellstoff		80	
K	Kontrolle		55	100%
P1	HNO3 FK original	0,5	46	83,6%
P2	HNO3 FK + 2 % KOH	0,5	38	69,1%
P3	HNO3 FK + 4 % KOH	0,5	50	90,9%
P4	H2SO4 FK trocken	0,5	52	94,5%
P5	H2SO4 FK + 12 % KOH	0,5	52	94,5%
P6	H2SO4 FK + 14 % KOH	0,5	47	85,5%



Tabelle 13: Kressetest (DIN 16086): Auszählung

Abbildung 71 - Kressetest Auswertung

Die Untersuchungen wurden im LAV-eigenen Bodenlabor in Kulkwitz durchgeführt und erlaubten eine gezielte Weiterentwicklung der Rezepturen auf Grundlage erster Keimversuche (DIN 16086-Teil 2: Petrischalentest mit Kresse).

Gekoppelt mit weiteren labortechnischen Untersuchungen konnten die pflanzenbaulichen Stoffeigenschaften und die Anforderungen von Substraten ermittelt werden. Darauf aufbauend wurde ein Versuchsplan erstellt und die Konditionierungsschritte angepasst, um letztendlich Substrat-Rezepte für den Garten- und Landschaftsbau, die Jungpflanzenanzucht und die Landwirtschaft zu entwickeln.

Ein weiterer Kern dieses Arbeitspaketes ist die modellhafte Testung des Verwertungsweges Spezialerden. Für die pflanzenbauliche Eignung der Spezialerden wurden **Pflanzversuche** u.a. im Gewächshaus durchgeführt. Die Erkenntnisse aus AP 4.2 wurden zusammengefasst, der Versuchsplan sah einen Steigerungsversuch mit 2 Filterkuchen mit je 3 Vorbehandlungsstufen vor. Die Versuche wurden mit 5 unterschiedlichen Nährstoffkonzentrationen und an der dikotylen, anspruchsvollen Beispieelpflanze Chinakohl (*Brassica rapa pekinensis*) sowie dem monokotylen, genügsamen Weidelgras (*Lolium perenne*) in je 2 Wiederholungen durchgeführt.



Abbildung 72: Pflanzenversuche im Gewächshaus nach Keimung

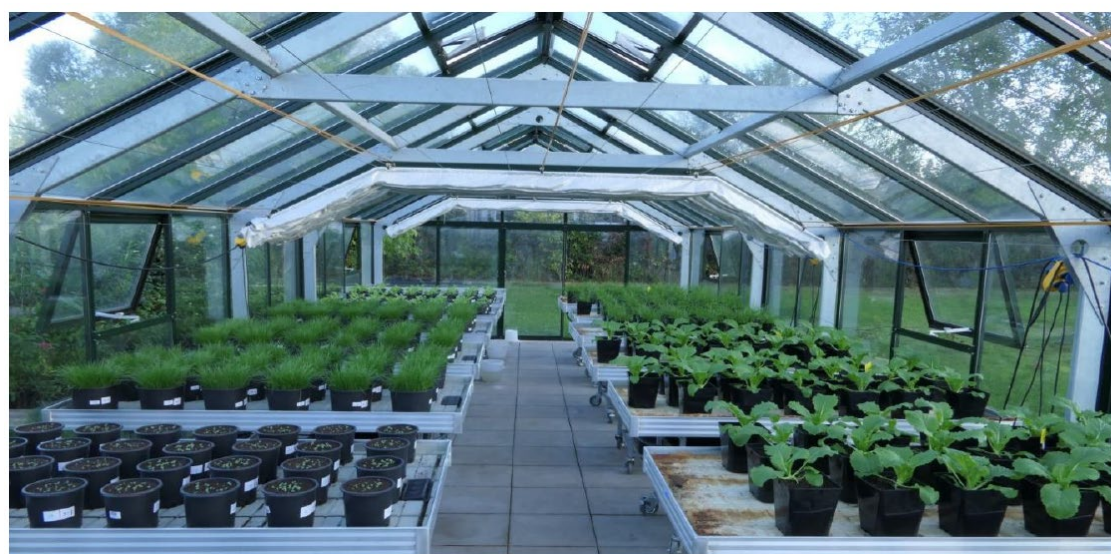


Abbildung 73: Pflanzversuche in der Wachstumsphase

Gemessen wurden Keimfähigkeit und Wachstum (Blattoberfläche, Frischmasse per Mahd). Die Pflanzengesundheit wurde zusätzlich anhand ihrer äußeren Erscheinung und Schadbildern bewertet.

Ergebnisse der Pflanzversuche:

Bei einer Zugabe von bis zu 1,5 Massen-% Filterkuchen in der Substrat-Rezeptur ist beim Wachstum keine pflanzenschädigende Wirkung erkennbar. Ein Einfluss von Schwermetallen auf das Wachstum oder die Pflanzengesundheit konnte nicht festgestellt werden.

Allgemein nimmt die Keimfähigkeit aufgrund erhöhter Salzgehalte mit zunehmender Konzentration ab. Der positive Düngeeffekt konnte dem im Filterkuchen enthaltenen Stickstoff aus dem HNO_3 -Aufschluss, dem wiedergewonnenen Phosphat und dem Kalium aus der pH-Anpassung mit KOH in der Reihenfolge zugeordnet werden. Bei höheren Konzentrationen wirkt sich der Salzgehalt (Chinakohl) und der pH-Wert (Weidelgras) negativ auf das Wachstum aus.

Mögliches Optimierungspotential besteht darin, eine Neutralisierungsmethode anzuwenden, die den Salzgehalt nicht erhöht, sodass auch größere Konzentrationen des Filterkuchens eingesetzt werden könnten, ohne dass die Pflanze oder der Keimling beeinträchtigt werden.

Die Ergebnisse der Praxisversuche ermöglichen es nun, Anwendungsempfehlungen für Spezialerden zu machen und neue verfahrenstechnische Optimierungspotentiale zu identifizieren, die aus den Laborwerten und den Vorversuchen noch nicht zu erkennen waren.

AP 6 Stakeholderanalyse und -management, Risikobewertung

Im ersten Schritt wurden die wesentlichen Stakeholder in Bezug auf den Projektinhalt identifiziert und nach ihren Aufgaben bzw. Funktionen beschrieben. Die Erwartungen und Standpunkte zum Projekt wurden in Form von Umfragen und individuellen Interviews oder auch Workshops sowie Projekttreffen erfasst. Daraus leiten sich Maßnahmen und Strategien im Umgang mit den Stakeholdern ab. Themenspezifische Stakeholder-Workshops (Themen: Softwaretools, Umsetzung der qualitätsorientierten Sammlung, Umsetzung von Verwertungswegen usw.) wurden Inhalt des Weiterbildungskonzeptes und Angebotes des Partners MFPA.

In Auswertung der Gespräche und Sitzungen mit Unternehmen, Politik und Mitgliedern wurde eine Stakeholder Matrix erstellt (Abbildung 74). Diese soll den beteiligten Interessengruppen mit geringem verwaltungsrechtlichem Fachwissen eine Übersicht der Zuständigkeiten verdeutlichen. Zu nennen sind beispielsweise welche Verwaltungsorgane und politische Gremien für die Erfüllung der Kreislaufwirtschaftlichen Gesetzgebung in den Kommunen zuständig sind. Welche Aufgaben, Einflussgebiete, Durchgriff und Wirkungsbereiche sind an welcher Stelle in den Kommunalverwaltungen zu finden, wer ist in Entscheidungsprozesse für neue Konzepte einzubinden.

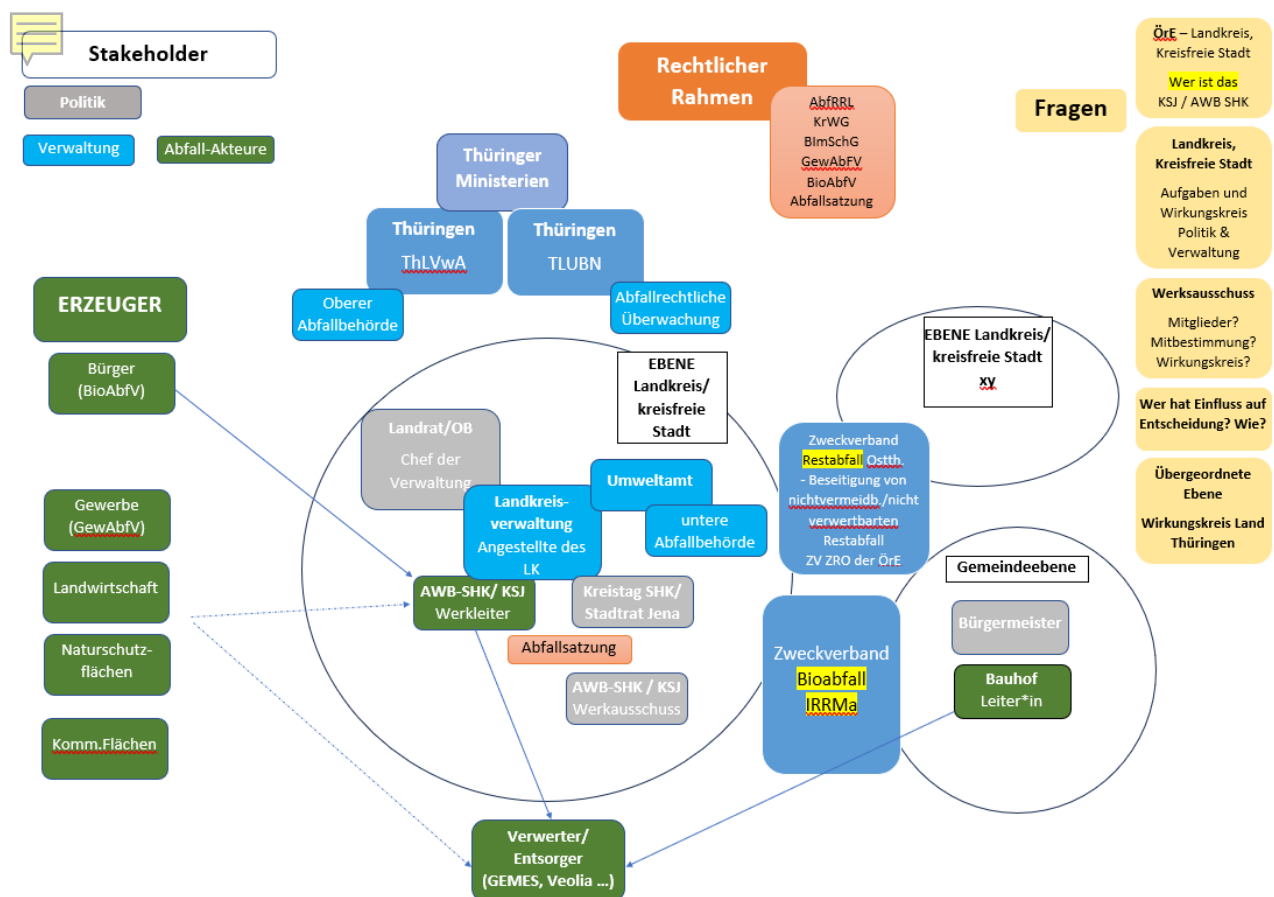


Abbildung 74: Stakeholdermatrix

Die nachfolgende Übersicht (Abbildung 75) zeigt die Verantwortlichkeiten und Wirkungskreise der einzelnen Institutionen und beschreibt ein Stück weit die Komplexität für Anstöße der Veränderung, wer alles 'ins Boot' geholt, gefragt bzw. einwilligen muss.

Öffentlich-rechtlicher Entsorgungsträger (ÖrE) – Landkreis, Kreisfreie Stadt

Der ÖrE ist Werkbetrieb ... ausführende Organ

Kommunal Service Jena (KSJ) / Dienstleistungsbetrieb Saale-Holzland-Kreis (DLB SHK)

Landkreis, Kreisfreie Stadt

Aufgaben und Wirkungskreis Politik & Verwaltung

Beschluss über die **Abfallwirtschaftssatzung & Abfallgebührensatzung**

Werksausschuss

Mitglieder? Die Mitgliedschaft im Werksausschuss endet im Falle einer Abberufung; jedenfalls aber mit dem Verlust des kommunalen Mandates.

Mitbestimmung? Werksausschuss überwacht die Werkleitung. Der Werksausschuss ist als vorberatender Ausschuss in allen Angelegenheiten des Unternehmens tätig, die dem Beschluss des Stadtrates unterliegen.

Wirkungskreis? Werkleitung vertritt die Stadt in Werkangelegenheiten gerichtlich und außergerichtlich

Eigenbetrieb(e)

Jena – KSJ/SHK – DLB SHK

Werkleitung - Kreistag des Saale-Holzland-Kreises beauftragt die Werkleitung des Dienstleistungsbetriebes Saale-Holzland-Kreis mit der Fortschreibung und Umsetzung des Abfallwirtschaftskonzeptes des Saale-Holzland-Kreises

Wer hat Einfluss auf Entscheidung?

Oberbürgermeister, Landrat

Übergeordnete Ebene/Wirkungskreis Land Thüringen

TLUBN - Abfallrechtliche Überwachung

TMUEN – Strategie

Prüfung + Freigabe der Abfallwirtschaftssatzung

Abbildung 75: Matrix Verantwortlichkeiten

Weiteres Kernthema ist hier vor allem die fachliche Risikoeinschätzung für bestehende und alternative Verwertungswege, abfallrechtliche Vorschriften, betriebswirtschaftliche Aspekte verschiedener Verwertungsoptionen und die Erkenntnisse aus anderen Modellregionen (Stadt Leipzig, Landkreis Leipzig, Metropolregion Halle-Leipzig). Der Austausch war intensiv und fordernd und führte teils zu neuen Erkenntnissen.

Eine konkrete Ableitung aus den Ergebnissen ist die Notwendigkeit einer Informationsschrift für kommunale Entscheidungsträger zur Eigen- und Kleinkompostierung. Diese wurde gemeinsam von LAV und IKTS vorangetrieben und vor allem im Verlängerungszeitraum bearbeitet. Eine Veröffentlichung ist im Juli 2025 geplant (Anhang Anlage SB 4).

Hintergrund der Notwendigkeit der Erstellung eines solchen Leitfadens ist die stattfindende Praxis der Verwertung in den Kommunen. Aktuell werden große Mengen des anfallenden Grüngutes auf Lagerplätzen im kommunalen Umfeld abgelegt (Abbildung 4). An diesen Lagerplätzen erfolgt über die Lagerzeit ein unkontrollierter biologischer Abbau. Durch diesen entsteht ein minderwertiger Kompost, es kommt zur Bildung von Treibhausgasen und zu Auswaschung von Nährstoffen.

Der alternative Weg über die Entsorgungsfachbetriebe führt meist zu erheblichen Kosten und ist unter Umständen mit weiten Transportwegen verbunden, so dass meist der Weg über die Lagerplätze gewählt wird. Darüber hinaus werden die Stoffströme aus dem regionalen Kreislauf entnommen und die Kommunen müssen Nährstoffe und Komposte für ihre Grünflächen zukaufen.

Ein möglicher Ansatz für dezentrale Verwertungsoptionen sind Eigenkompostieranlagen, welche durch die Kommunen bestmöglich interkommunal betrieben werden. Diese bieten die Chance, einen Beitrag

zur Schließung der kommunalen bzw. regionalen Kreisläufe (Nährstoffe, Organik) zu leisten sowie die Kosten der Kommunen zu senken.

Diese Handreichung soll praxisnah die Planung, den Bau und den Betrieb von Eigenkompostieranlagen sowie die Eigenverwertung der Komposte im kommunalen Umfeld erläutern.

AP 7 Konzeption von Schulungs- und Weiterbildungsangeboten

Im Mittelpunkt der ersten Projektmonate standen Recherchen, Kennenlernen der Region und der regionalen Besonderheiten zur Ableitung der (notwendigen) Bildungskonzepte. Danach wurde durch den Bildungspartner CoCreation ein modulares Rahmenkonzept für die Entwicklung von Schulungs- und Weiterbildungsangeboten erarbeitet, welches kontinuierlich inhaltlich und didaktisch im Rahmen von Besprechungen, Workshops, Präsenz-Umfragen, Videokonferenzen und Telefonate mit den Partnern und weiterentwickelt wurde. Das Schulungs- und Weiterbildungsangebot sollte folgende Module umfassen:

- Basiswissen
- Multiplikatoren-Modul
- Nachhaltigkeitsmanagement
- Prozessmanagement
- Technologie und Methoden
- Trainee „on the job“
- Prüfungsvorbereitung

Aufbauend auf dem Konzept und den Arbeiten durch die MFPA und dem Bildungspartner CoCreation wurde gemeinsam mit den Projektpartnern und externen Dozierenden eine fünftägige Workshop-Reihe mit Titel „Entsorgung und Verwertung von organischen Reststoffen“ mit den folgenden Modultemen konzipiert:

- Grundlagen Kreislaufwirtschaft und Basiswissen zu Bioökonomie & Stoffstrommanagement
- Grundlagen biologischer Verwertungsverfahren - Die Kompostierung
- Praxistag: Einführung biogene Stoffströme: Arten, Mengen, Eigenschaften, Sammelsysteme, Verwendung/Entsorgung
- Praxistag: Technologie und Methoden der Verwertung von biogenen Stoffströmen
- Rechtsgrundlagen und deren Reflexion in der Praxis

Das Weiterbildungsangebot richtet sich primär an Mitarbeitende aus öffentlichen Verwaltungen und Kommunen in der Bündnisregion, die im Bereich des Abfalls tätig sind bzw. indirekt mit biogenen Reststoffen zu tun haben, wie:

- Bürgermeister/innen & Landräte
- Verwaltungsangestellte (Abteilung Abfallwirtschaft & Umweltamt)
- Bauhofleiterende und Gemeindemitarbeitende
- Technische Mitarbeitende der Wertstoffhöfe

Neben der Workshop-Reihe wurde eine zusätzliche Schulung für die Einführung in die IRRMa-Software konzipiert und durchgeführt sowie eine Online-Plattform zur hybriden Durchführung der Weiterbildung (in Präsenz und online) ausgebaut und getestet.

Es wurde weiterhin mit der Entwicklung eines Programms für Jugendliche begonnen, das im Rahmen der Berufsorientierungsmaßnahmen an der MFPA Weimar im Jahr 2024 durchgeführt werden soll.

Es wurden Umfragen mit den kommunalen und industriellen Partnern sowie eine Partner-Workshops durchgeführt, um den individuellen Weiterbildungsbedarf der Partner zu ermitteln und sowohl den Schulungsinhalt als auch die Implementierung zum Thema nachhaltiges Stoffstrommanagement bedarfsgerecht zu erstellen.

Hierbei ergab die Evaluation aus dem Austausch mit ausgewählten Kommunen aus SHK, dass aus mangelnden Personalkapazitäten ihr unmittelbares Mitwirken bei der Entwicklung von individuell zugeschnittenen Schulungsmaßnahmen nicht möglich war. Ferner ergab sich sowohl aus der Bedarfsanalyse im IRRMa-Netzwerk als auch aus dem Feedback unserer Partnerunternehmen, dass vor allem die Industriepartner ein ausgeprägtes Interesse an den Themen Recycling- und Reststoffmanagement im Bereich der Kreislaufwirtschaft haben.

Daher wurde das Weiterbildungsangebot angepasst, um zum einen auch die die Industriepartner stärker miteinzubinden. Zum anderen wurden auch Angebote für Jugendliche entwickelt welche jungen Menschen das Thema nachhaltiges, umweltfreundliches Abfallmanagement näherbringen sollen. Dies war zum einen ein Angebot zur Berufsorientierung zum Thema Phosphorrecycling sowie eine Broschüre zum Thema Verwertung von organischen Reststoffe als Schulungsunterlage für den Einsatz im Schulunterricht (Zielgruppe 7-9 Klasse).

Der fünftägige Workshop mit dem Titel „Entsorgung und Verwertung von organischen Reststoffen – kommunale Verantwortung, Chancen und Lösungen“ wurde im Oktober 2024 in enger Zusammenarbeit mit regionalen Partnern (aus Forschung, Industrie und öffentlichen Verwaltungen) in hybrider Form (online und in Präsenz) durchgeführt (<https://www.mfpa.de/veranstaltung-detail/workshop-entsorgung-und-verwertung-von-organischen-reststoffen.html>). Ziel des Workshops war es, Kommunen, kommunale Entsorgungsbetriebe und öffentliche Verwaltungen für die Herausforderungen und Potenziale in der Erfassung, Verwertung und Kreislaufführung organischer Reststoffe zu sensibilisieren und praxisnah zu qualifizieren.

Neben Fachvorträge, Erfahrungsberichte sowie interaktive Diskussionsformaten wurden zwei Praxistagen mit Fachexkursionen angeboten, bei denen aktuelle Technologien und Verwertungsverfahren von Projektpartnern (GEMES und KSJ) aufgezeigt und die zentralen Fragestellungen im Projekt anhand der gelebten Praxis veranschaulicht wurden.

Als zentrale Themen des Workshops wurden folgende inhaltliche Schwerpunkte gesetzt:

- Grundlagen des Stoffstrommanagements mit Fokus auf biogene Reststoffe
- Gesetzliche Rahmenbedingungen und aktuelle Entwicklungen
- Regionale Kreislaufwirtschaftsstrategien
- Praxisbeispiele zur stofflichen und energetischen Verwertung
- Möglichkeiten zur interkommunalen Zusammenarbeit und Digitalisierung

Das Workshop-Programm wurde gezielt so gestaltet, dass sowohl strategische als auch operative Perspektiven des regional aufzubauenden biogenen Stoffstrommanagements betont wurden. Besonders hervorgehoben wurden Herausforderungen im Hinblick auf den aktuellen Stand der Technik, praktikable Lösungsansätze sowie Synergiepotenziale durch regionale Kooperation auf dem Gebiet des biogenen Abfallmanagements in der Region. Mit dem Lehrgang wurde ein wichtiger Baustein zur Stärkung der kommunalen Handlungskompetenz im Bereich Kreislaufwirtschaft geschaffen.

Die Bewerbung des Lehrgangs erfolgte über direkte Ansprache per Telefonakquise und verschiedenen Formen des Online-Marketings – Newsletter, E-Mail-Kommunikation, MFPA-Webseite, LinkedIn-Kanal der Partner. Um die Optimierung der Reichweite der im Projekt erreichten Ergebnisse und Erkenntnisse zu gewährleisten, wurde die Weiterbildung nicht nur in der Verbundregion beworben, sondern auch außerhalb Thüringens. An dem Lehrgang nahmen je Tag 15 bis 22 interessierte Vertreter aus

öffentlichen Verwaltungen, Kommunen, Ministerien (TLLR) und Industrieunternehmen aus Saale-Holzland-Kreis, Weimar, Weimarer Land, Erfurt und sogar Brandenburg teil.

Zudem wurde eine individuell zugeschnittene, eintägige Schulung im Landratsamt in Eisenberg durchgeführt. Die Veranstaltung richtete sich insbesondere an Bürgermeisterinnen und Bürgermeister, Bauhofleitungen und an das technische Personal aus der öffentlichen Verwaltung. Es hatte das Ziel, fundiertes Wissen zu den Themen Kompostierung, Vergärung und Bioökonomie zu vermitteln. Im Fokus stand dabei die praktische Relevanz für das kommunale Abfallmanagement und die Stärkung der fachlichen Kompetenzen zur Förderung einer ressourcenschonenden Kreislaufwirtschaft im ländlichen Raum.

Es wurde eine Veranstaltung zur Berufsorientierung für Schüler*innen der Klassenstufe 9 zum Thema Phosphor-Recycling konzipiert. Hier konnten die Jugendlichen einen vereinfachten, aber typischen Prozess für das Recycling von Aschen aus Klärschlamm im Labor nachvollziehen. Zu Beginn der Veranstaltung erhielten die Schüler*innen einen theoretischen Einblick in die im Projekt IRRMa relevanten Themen Kreislaufwirtschaft, Nährstoffrecycling und organische Reststoffe.

Im Labor wurden zuerst sowohl Nährstoffe als auch unerwünschte Schwermetalle extrahiert. Um den Nährstoff Phosphor weiterverwenden zu können, mussten die Schwermetalle abgetrennt werden. Dieses wurde mit den Jugendlichen am Beispiel von Kupfer und Eisen und mit Hilfe von Ionentauschern durchgeführt. Für die Nutzbarmachung als Düngemittel wurde eine Phosphatfällung und anschließende Verarbeitung als Granulat durchgeführt. Das Granulat aus Calciumhydrogenphosphat und Calciumsulfat konnte von den Schüler*innen als Dünger mit nach Hause genommen werden.

Für die Versuche wurde eine modifizierte Klärschlammasche mit geringen Mengen Kaliumdihydrogenphosphat und Kupfersulfat verwendet. So konnte eine ausreichende Löslichkeit von Nährstoffen und Schwermetallen ohne den Einsatz von in der Handhabung mit Jugendlichen problematischen Säuremengen erreicht werden.

Zum ersten Mal wurde das Angebot am 16.12.24 erfolgreich mit 10 Schüler*innen vom Lyonel-Feininger-Gymnasium Mellingen/ Berlstadt durchgeführt (Abbildung 75).

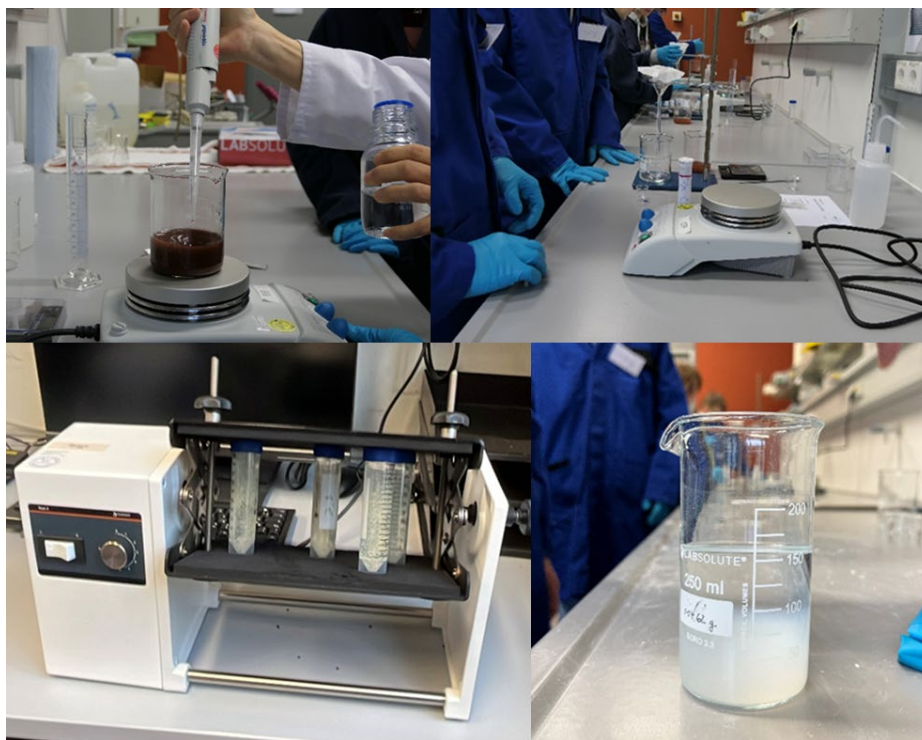


Abbildung 76: Praktischer Teil - Berufsorientierung

Lernmaterial (nicht nur) für Kinder und Jugendliche

Begleitend hierzu wurde eine Broschüre mit dem Titel „Kreislaufwirtschaft von organischen Reststoffen – Mehr Wissen über nachhaltige Abfallwirtschaft in Deutschland“ entwickelt. Die inhaltliche und graphische Gestaltung erfolgte durch die Firma DRIVE GmbH & Co. KG unter Mitwirkung der MFPA.

Ziel der Broschüre war die fachliche und didaktische Aufbereitung des Themas Kreislaufwirtschaft von organischen Reststoffen für die Zielgruppe (7-9 Klasse) um Ihnen die Bedeutung dieses Themas anhand von Zahlen und von eigene Rechercharbeit und Versuchen anschaulich zu erklären.

Über 1.000 gedruckte Exemplare wurden bereits an die Projektpartner zum Verteilen ausgehändigt. Die Verteilung von Exemplaren durch die MFPA erfolgte zum einen direkt an die Stadt Weimar, Schulen und bei Veranstaltungen mit Schüler*innen wie Jugend Forscht, Schüler Praktika, Berufsorientierung und ähnliche Maßnahmen. Die Broschüre wird auch in den kommenden Jahren weiter ausgereicht werden, sowohl in gedruckter Fassung als auch digital. In Abbildung 76 sind einige Ausschnitte aus der Broschüre dargestellt.



Abbildung 77: Beispiel Seiten aus der Broschüre

Konzeption von interaktiven online-Formaten

Im Rahmen des Projekts wurden drei Fachpräsentationen zu den Themen als digitale Lernmodule aufbereitet.

- Grundlagen der Bioökonomie und Stoffstrommanagement,
- Biologische Abfallbehandlung - Kompostierung,
- Biologische Abfallbehandlung - Vergärung

Diese interaktiven Formate dienen dazu, komplexe Inhalte anschaulich und praxisnah zu vermitteln.

Im Rahmen des Projektes wurden Mitarbeitende aus den öffentlichen Verwaltungen und Kommunen aus der Bündnisregion und darüber hinaus, die im Bereich der Abfallwirtschaft tätig sind, geschult. Durch die Bereitstellung der Lehrunterlagen in digitaler und interaktiver Form, besteht für die Teilnehmenden zum einen die Möglichkeit der erneuten Reflexion und zum anderen können die Inhalte weiteren Interessierten als interaktives Medium für z.B. ein Selbststudium zur Verfügung gestellt werden. Die Prozesse werden hier durch Videos, Grafiken und Animationen verständlich dargestellt (Abbildung 79).

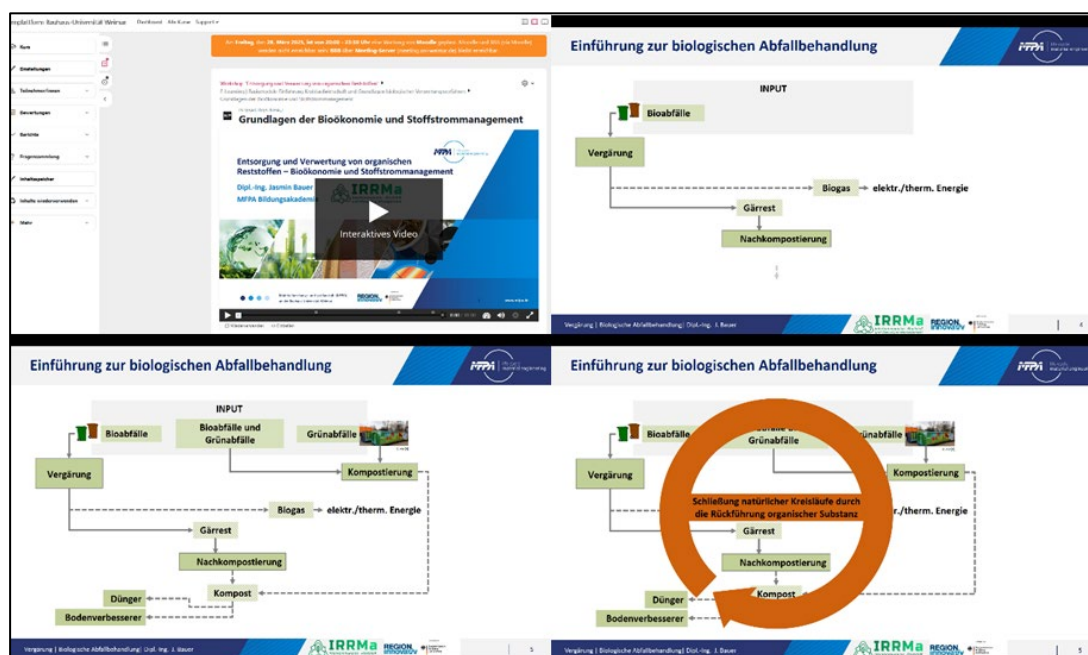


Abbildung 78: Darstellung vom Prozess der biologischen Abfallbehandlung

Interaktivität: diverse Lerntools (Quizfragen, Umfragen, Multiple Choice, Drag and Drop) fördern die aktive Teilnahme und das Verstehen/Anwenden der vermittelten Lerninhalte (Abbildung 78). Basierend auf der Auswertung der einzelnen Tools (Quizfragen, Umfragen, Multiple Choice, Drag and Drop) in den interaktiven Lernvideos, haben die Teilnehmenden am Ende der Lerneinheiten zudem die Möglichkeit, ein Feedback zu ihrem Wissenstand zu bekommen.

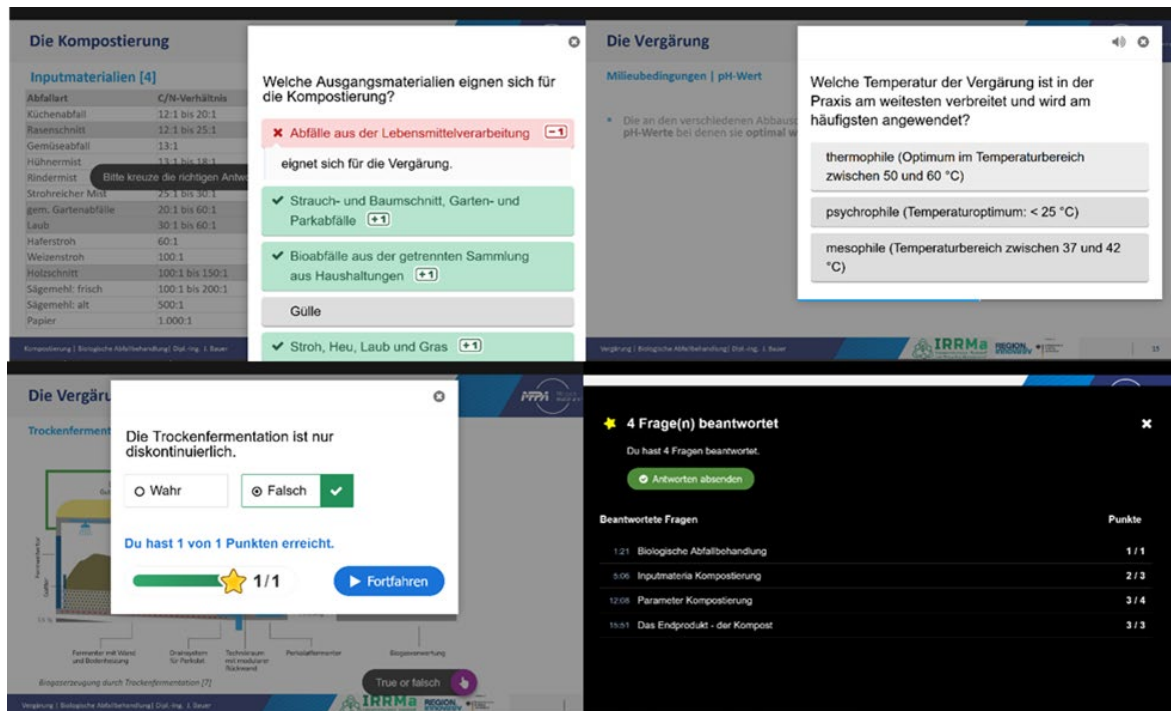


Abbildung 79: Beispiele für mögliche Interaktivität

Die digitalen Lernmodule sind jederzeit und ortsunabhängig abrufbar, was eine hohe Flexibilität gewährleistet. Durch verschiedene Lerntools wird die aktive Teilnahme gefördert, was die Interaktivität stärkt. Die Module sind langfristig nutzbar und können regelmäßig aktualisiert werden, was ihre Nachhaltigkeit sicherstellt.

Erweiterung und Verbreitung:

- Die Online-Formate können jederzeit um weitere relevante Fachthemen erweitert werden
- Feedback-Mechanismen ermöglichen eine kontinuierliche Verbesserung der Inhalte
- Die Verbreitung über soziale Medien und Netzwerke ist sinnvoll, um eine größere Reichweite zu erzielen
- Link zur Online-Plattform „Moodle“: <https://moodle.uni-weimar.de/course/view.php?id=47874>
(Freischaltung nötig)

Wissenstransfer

Während der gesamten Projektlaufzeit bestand das Anliegen auch in andere Regionen zu strahlen, aber auch von anderen Projektergebnissen zu profitieren. Hier stand stets die Wissensstandvermittlung im Fokus, um Aspekte ins Projekt zu involvieren oder zu transferieren. Hier einige Beispiele:

- ➔ Gemeinde Pullach bei München war interessiert an der alternativen Verwertung von Bioabfällen der Gemeinde nach Schließung der örtlichen Kompostieranlage. Hier auch speziell die Herausforderungen der Kosten der Logistik und Verwertung lokal oder regional zu denken.
- ➔ Es ist deutschlandweit ein Problem der Schäfer die Schafwolle ihrer Tiere zu verwerten. Meistenteils wird diese nur entsorgt und kostet damit extra Aufwand und Geld. Fa. FloraPell bietet neue Wertschöpfungskette zwischen Schäfern und Ökolandbau bei der Rohwolleverwertung. Die düngenden Inhaltstoffe der Wolle wird in Pelletform gepresst und vermarktet. Interesse fand vor allem die IRRMa-APP für die Tourenplanung und Logistik zwischen Schäferereien und Pellet-Produktionsstätte in Lauchhammer.

- ➔ CarboMass, ebenfalls ein Projektkonsortium der Region.Innovativ Gruppe ist für unsere ergänzenden Verwertungsformen hoch interessant. Das Thema Pyrolyse wurde im IRRMa nicht betrachtet, auch wegen der anderen Projektansätzen andernorts. Hier gab es Austauschtreffen zu Themen der Technischen Umsetzung und der pflanzenbaulichen Erkenntnisse. Weiterhin wurde in CarboMass das Klärschlammthema behandelt, was eine gute Ergänzung zum biogenen Reststoffpotential darstellt.

Auch mit anderen Projekten der REGION.innovativ-Reihe, insbesondere INTERPYRO und zirkulierBAR, konnte in einen regen fachlichen Austausch zum Umgang mit organischen Reststoffen und deren Grenzen bei der Realisierung von Projektideen getreten werden und so neue Einblicke in die Verwaltungsarbeit von und mit Kommunen gewinnen.

- ➔ Das Projekt Biocharstory der TU Dresden haben wir zu Anfang der Projektlaufzeit gefunden. Hier waren Grundsatzfragen der Pyrolyse-Technik und Anwendung der Pflanzenkohle betrachtet worden. Auch ein Ausblick auf die Wirtschaftlichkeit der Nutzung wurde gestellt. Damit ein guter Ansatz und Ergänzung für Verwertungsthemen in IRRMa.

AP 8 Implementierung Softwaretool IRRMa in den praktischen Betrieb der Kommunen und Testanwendung

Die Vorstufe der Software wurde bereits 2023 in den Kommunen getestet und genutzt. Die eigentliche Matching-Plattform für Angebot und Nachfrage ist in der Struktur bereit für den Test mit Anwendern im internen und auch externen Kontext, also mit realen Anbietern wie Kommunen und Nachfragern aus dem Verwertungssektor.

Die Implementierung in den praktischen Betrieb war aufgrund der niedrigschwelligen Umsetzung bzgl. der Hardware einfach umzusetzen: Mit handelsüblichen mobilen Endgeräten und PCs unter Nutzung der gängigen Internetbrowser. Zusatzinvestitionen in diesem Bereich waren von keinem der Beteiligten zu leisten.

Die Software selbst folgt in ihrem globalen Bedienungskonzept bekannten Standards und ist auf Nutzerfreundlichkeit und geringen Schulungsaufwand ausgelegt. Letzterer beschränkt sich im Wesentlichen also auf die durch das System abgebildeten Prozesse und deren Umsetzung.

Für den Betatest- bzw. Praxiseinsatz war es nötig, die Einrichtung der Software vorzunehmen. Dies betrifft die Eintragung der beteiligten Gemeinden, Standorte, Behältertypen und Abfallsorten sowie der angeschlossenen Verwerter. Diese Grundeinstellungen wurden plangemäß durch den Systemadministrator vorgenommen.

Die Validierung der Software und der Prozesse fand unter realen Bedingungen über mehrere Verbandsgemeinden und Anfallstellen im Saale-Holzland-Kreis statt, zum Beispiel Golmsdorf, Südliches Saaletal, Hügelland-Täler und Stadt Bürgel.

Weitere Anpassungen wurden anhand der Erfahrungen und Rückmeldungen während des laufenden Betriebs programmiert und eingespielt.

AP 9 Entwurf für Umsetzung in Jena und SHK

In diesen Arbeitspaketen wurde ein Konzept für eine dauerhafte Umsetzung von identifizierten Kernprozessen biogenen Recycling Systems (Sammelquartiere, Sammelsysteme) in Jena und SHK erarbeitet, unter Betrachtung und Bewertung wirtschaftlicher Auswirkungen inkl. Abschätzung der Entsorgungspreise bzw. -gebühren der Kommunen und Endkunden.

Dazu wurde das Beratungsunternehmen ECONUM aus Dresden und Rechtsanwaltkanzlei Battke-Grünberg beauftragt die organisatorischen, wirtschaftlichen und rechtlich Rahmenbedingungen zu prüfen und auszuarbeiten, wie das Konzept einer interkommunalen Grünschnittkarte im Landkreis Saale-Holzland-Kreis umsetzbar ist.

Dazu flossen die Erkenntnisse und Daten aus dem IRRMa Projektphasen 1-5 und zum Abgleich deutschlandweite Daten in das Mengengerüst der Erfassungen ein (Abbildung 81).

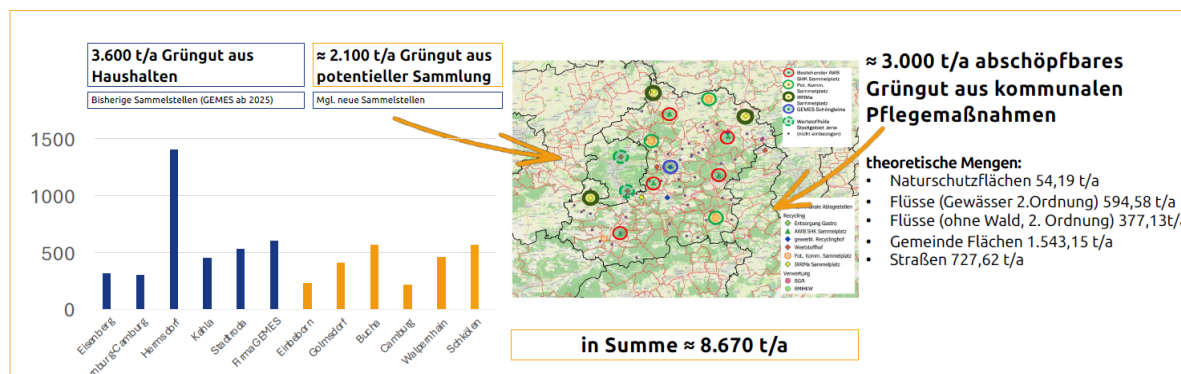


Abbildung 80: Mengengerüst Erfassungen im SHK

Die Daten der etablierten Sammlungen, neuer Sammelstellen aus IRRMa Projektzeit und aus GIS-Prognosen sind die Grundlage der wirtschaftlichen Betrachtung und Erstellung einer Kostenkalkulation für eine Ausweitung der Sammelstellen von derzeit 6 auf insgesamt 12 Plätze.



Abbildung 81: Kostenprognose neue Sammelstellen (Erfassung, Transport und Verwertung)

Eine Übersicht des Investitionsbedarfes, Betriebskosten und variable Aufwendungen zeigt die Abbildung 81. Die veranschlagten Sammelstationen widerspiegeln einen guten Abdeckungsgrad gemäß der Entfernungsanalyse aus Abbildung 57 in Abschnitt 5.1. Die Kosten sind aber auch durchaus ein Faktor der Umsetzbarkeit in der Form und in dem Rahmen. Die Finanzierbarkeit der Investitionskosten und laufenden Aufwendungen wurde selbstverständlich betrachtet. Fördermittel werden derzeit in der Kommunalrichtlinie des Bundes für die Ausstattung der Plätze bereitgestellt. Das Gros der Kosten entfällt auf Personal, Transport und Verwertung. Diese Punkte wurden im Detail im Strategieworkshop mit den interessierten Gemeinden intensiver diskutiert und deren realistischer Beitrag skizziert. Dazu gehörte auch die rechtliche Bewertung einer interkommunalen Zusammenarbeit, wie können sich die Gemeinden untereinander organisieren, um die Logistik und Verwertung zu gestalten und wie kann der Landkreis mit seiner Aufgabenhoheit und Pflicht aus dem Kreislaufwirtschaftsgesetz einbezogen werden.

Im Thüringer Gesetz über die kommunale Gemeinschaftsarbeit (ThürKGG) sind weitere Möglichkeiten von interkommunalen Kooperationen geregelt, von kommunalen Arbeitsgemeinschaften, Zweckvereinbarungen, Zweckverbände bis zu gemeinsamen kommunalen Anstalten öffentlichen Rechts (AöR) ist vieles möglich. Eine belastbare Empfehlung über die vorzugswürdigere Organisationsform kann letztlich erst dann entwickelt werden, wenn die Zielstellung und Strukturen und die einzelnen Beiträge zur Kooperation - jedenfalls dem Grunde nach - festgelegt sind.

Dazu sollte u.a. die abschließende Strategieworkshopreihe mit Kommunen und Landkreisverwaltung dienen. Die erarbeiteten Ergebnisse bzw. Teilergebnisse sollen weiterverfolgt bzw. verstetigt werden.

Mit externer Begleitung durch das Leipziger Consulting-Büro *beratungsraum* wurde mit den interessierten kommunalen Vertretern, der Kreisverwaltung und RAG eine Fortführungsstrategie zur Weiterentwicklung Erfahrungen und Ergebnisse aus dem Verbundprojekt IRRMa abgeleitet. Diese ist unter setzt mit Teilzielen und abgeleiteten Maßnahmen:

Ziel 1: Schaffung einer rechtsfähigen Organisation zur Weiterentwicklung der IRRMa Erkenntnisse

Maßnahmen:

- Darstellung der rechtlichen Situation zur Klarstellung der organisatorischen Anforderungen und Rahmenbedingungen.
- Entwicklung einer entsprechenden Organisation und Schaffung der rechtlichen Voraussetzungen (z. B. Abschluss von Zweckvereinbarungen, Gründung einer Gesellschaft)
- Prüfung der rechtlichen Rahmenbedingungen für die Integration von gewerblichem Grünschnitt in das System.
- Identifikation und Planung zusätzlicher Sammelstellen in der Region unter Berücksichtigung der bestehenden Infrastruktur und des bedarfsgerechten Ausbaus.
- Unterstützung von freiwilligen Zusammenschlüssen von Kommunen zur Steigerung der Effizienz.
- Beschaffung von Fördermitteln für den Aufbau der Infrastruktur einzelner Sammelplätze.

Ziel 2: Sicherung der Wirtschaftlichkeit und Verbesserung der Logistik

Maßnahmen:

- Durchführung einer detaillierten Kostenanalyse, bei der die derzeitigen Ausgaben und der operative Aufwand (Status Quo der Kommunen) mit den Kostenerkenntnissen des IRRMa-Projekts verglichen werden.
- Analyse und Umgestaltung der Transportrouten zur Verwertung unter Berücksichtigung von geographischen und ökologischen Aspekten, um die Transporteffizienz zu steigern und Emissionen zu reduzieren.
- Klärung der organisatorischen Anforderungen zur Optimierung der Abläufe.

- Festlegung einer transparenten Kostenverteilung(-System) der Aufgabenträger, um die wirtschaftliche Effizienz zu gewährleisten und Erstellung einer detaillierten Kostenkalkulation für jede beteiligte Kommune.
- Optimierung der Erfassung und Abrechnung der Reststoffe, um die Prozesse transparenter und effizienter zu gestalten.

Ziel 3: Schaffung effektiver und effizienter Verwertungswege

Maßnahmen:

- Erstellung einer Bestandsaufnahme der bestehenden Sammelstellen und die Planung der Erweiterung um neue, gut erreichbare Sammelplätze in den betroffenen Kommunen.
- Steigerung der Kundenzufriedenheit durch Erhöhung des Angebotes und durch flexiblere Öffnungszeiten, wie z. B. erreichbare und geöffnete Sammelstellen.
- Bereitstellung der notwendigen Technik und Ressourcen in den Kommunen, einschließlich beispielsweise durch Bereitstellung/Teilen/gemeinsame von Schreddern.
- Implementierung von neuen Möglichkeiten, wie z. B. Popup-Containern und Grünschnittmobilen an strategischen Standorten, um die Sammlung von organischen Reststoffen zu verbessern und flexibler zu gestalten.
- Verbesserung der Trennung von Grünschnitt zur Erhöhung der Effizienz in der Abfallverwertung.
- Einbindung der Biogasanlagenbetreiber, um Annahmemengen und Sammelflächen für eine effektive Verwertung zu koordinieren.
- Festlegung der Anforderungen für die Eigenkompostierung und die erforderliche Genehmigung.

Ziel 4: Entwicklung einer umfänglichen Öffentlichkeitsarbeit und Sensibilisierung

Maßnahmen:

- Entwicklung eines stärkeren Bewusstseins für Rechte und Pflichten im Bereich der Abfallwirtschaft und Förderung des Recyclingbewusstseins in den Gemeinden bzw. bei den Verantwortungsträgern.
- Organisation von Informationsveranstaltungen und Workshops für Bürgermeister und Verwaltungsvertreter zur Präsentation der rechtlichen Rahmenbedingungen und Best Practice Schritte.
- Entwicklung und Durchführung eines Schulungsprogramms für kommunale Verantwortliche, um ein Bewusstsein für die rechtlichen Verpflichtungen im Bereich Abfall- und Kreislaufwirtschaft zu schaffen und Best Practices für Abfalltrennung zu fördern.

Nicht zuletzt finden sich die Erkenntnisse aus IRRMa auch in der Neuauflage des Klimaschutzkonzeptes des Landkreises wieder. Zum einen werden hier Datenanalysen abgefordert und Potentiale der Region ermittelt, aber auch Maßnahmen abgefordert. Die Verwertung regionaler Biogener Reststoffe können einen Betrag zum Klimaschutz bewirken, indem diese Rohstoffe in den Wertstoffkreislauf gelangen und Importe bspw. fossiler Quellen ersetzen. Somit stellt die Fortschreibung des Klimaschutzkonzeptes auch eine Fortschreibung der IRRMa Erkenntnisse dar, spätestens wenn man von der Theorie ins Handeln kommt.

Potenzielle Erlöse durch die Nutzung der Reststoffe

Neben den Kosten für Sammlung, Transport und Verwertung (Abbildung 82) darf ein wichtiger Aspekt des Projektes IRRMa nicht vergessen werden. Wenn es gelingt, die gesammelten Grüngutfraktionen der Bürger:innen und Kommunen, in werthaltige Produkte umzuwandeln, können Erlöse generiert werden, welche die Aufwendungen zum Teil kompensieren. Im Folgenden werden potenzielle Erlöse im Bereich der Nährstoffgewinnung, der Energieerzeugung und der Faserbereitstellung aufgezeigt. Es handelt sich um eine qualifizierte Abschätzung der möglichen Enderlöse für die Produkte ohne den Aufwand für Sammlung und Behandlung gegenzurechnen.

Im **Bereich Nährstoffe** sollte davon ausgegangen werden, dass die im Reststoff gebundenen Nährstoffe (N, P, K) für die Düngung von Pflanzen eingesetzt werden können und dabei herkömmliche Düngeprodukte ersetzen. Für eine grobe Abschätzung wurden die Börsenpreise für die Einzelnährstoffe angesetzt. Diese Preise schwanken zum Teil stark, insbesondere bei stockender Weltwirtschaft. Werden die im Projekt ermittelten Gesamtgehalte an Nährstoffen mit den Börsenpreisen der Jahre 2022 oder 2023 multipliziert, erhält man ein grobes Bild davon, welche maximale Wertschöpfung über Nährstoffe pro Tonne Substrat erreicht werden kann (Abbildung 82).

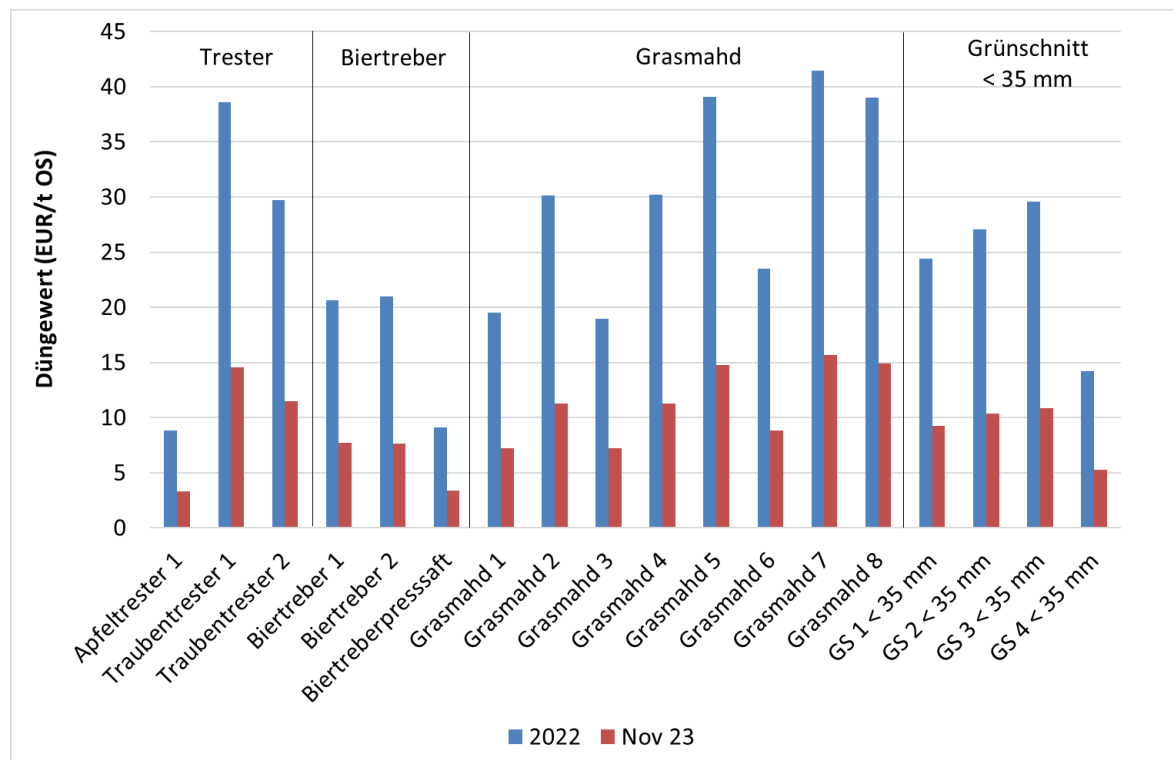


Abbildung 82: Maximalerlöse für Nährstoffe (N+P+K) in verschiedenen Reststoffen

In einer kombinierten Variante könnte das komplette Material in Biogasanlagen umgesetzt werden. Der dabei entstehende Gärrest enthält je nach Abbaugrad höhere Anteile an gelösten Nährstoffen und könnte komplett zur Nährstoffversorgung von Pflanzen dienen. Diese Kombination stellt außerdem einen Doppelnutzen dar, da Energie (siehe folgender Abschnitt) gewonnen wird ohne Nährstoffe zu verlieren.

Im **Bereich Energieerzeugung** stellt die Biogasgewinnung und der Verkauf von Strom und Wärme (oder alternativ Biomethan z.B. als Kraftstoff) das Verfahren der Wahl dar. Aus der Erlösspanne von Strompreisen an der Börse (in der Regel relativ niedrig, aber zeitlich flexibel auch höher) und Eigenstromnutzung (hohe Erlöse durch Ersatz von hohen Einkaufspreisen) sowie den Möglichkeiten des EEG wurde für eine erste Abschätzung ein Erlös von 18 ct/kWh_{el} angesetzt. Für den Verkauf von Wärme wurden 7 ct/kWh_{th} angesetzt. Damit ergeben sich auf Basis der ermittelten Gasertragspotenziale die in (Abbildung 83) dargestellten Erlöse pro Tonne Reststoff. Ähnliche Erlöse wären auch durch den Verkauf von Methan als Kraftstoff möglich.

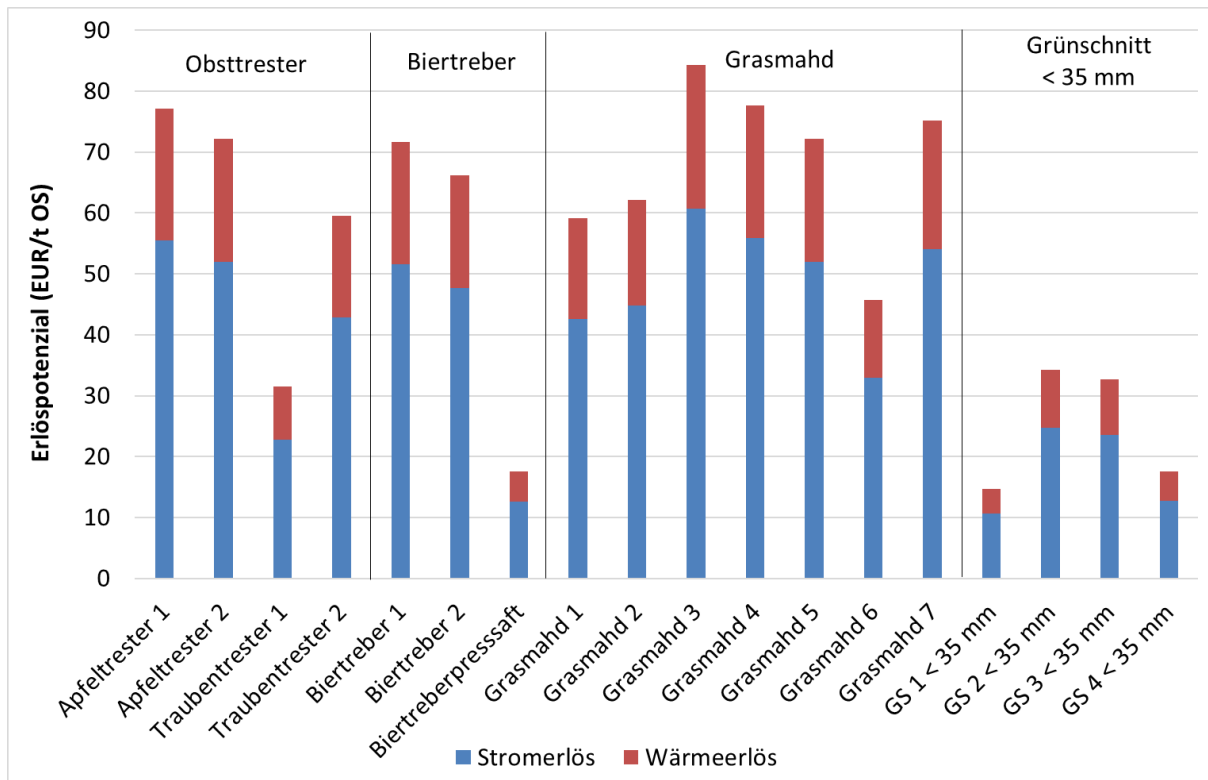


Abbildung 83: Summierte Erlöspotenziale für Strom und Wärme aus der Vergärung

Eine Tonne Grasmahd enthält je nach Wassergehalt zwischen 200 und 400 kg trockene **Fasern**. Im Gartenbau und Hobbygarten werden bereits heute Mulchpapier oder Mulchscheiben verwendet, um Unkraut zu unterdrücken. Der Trend geht dabei weg von Kunststoffen hin zu Naturfasern (z. B. Kokosfili, Holzfasern). Diese Mulchscheiben werden z. B. für 1,50 EUR pro Stück verkauft und enthalten z. B. 200 g Fasermasse. Das bedeutet, dass pro Tonne Grasmahd für mindestens 1000 Mulchscheiben Fasermaterial bereitgestellt werden kann. Wenn pro Mulchscheibe beispielsweise 10 ct für das Fasermaterial angesetzt werden, liegt der Erlös pro Tonne Grasmahd bereits bei 100 EUR. Für höhere Materialpreise können entsprechend höhere Einnahmen generiert werden.

Damit kann zusammenfassend **pro Tonne von z. B. Grasmahd** mit den folgenden maximalen Erlösen gerechnet werden:

1. Nährstoffe: 5 bis 20 EUR
2. Energie: 60 bis 80 EUR
3. Fasern > 100 EUR

Wenn es gelingt, dieses Wertschöpfungspotenzial für einen Teil der prognostizierten Grüngutmengen von 8670 t/a (vgl. Abbildung 80) zu realisieren, dann stehen den berechneten Aufwendungen zwischen 60.000 und über 100.000 EUR pro 1000 t verwertete Biomasse gegenüber.

Anders betrachtet fallen für das Rechenbeispiel aus (Abbildung 81) die Verwertungskosten (199.000 EUR) weg, da das Material von potenziellen Verwertern z. B. kostenlos entgegengenommen wird. Möglicherweise verringern sich auch die Transportkosten von 250.000 EUR, da lokal verwertet wird (z. B. in verschiedenen Biogasanlagen). Gleichzeitig können die Verwerter eine Wertschöpfung generieren durch Einbringung Ihrer Umwandlungsleistung und den Verkauf von Produkten.

Am Beispiel der 6 zusätzlichen Sammelstellen, welche ohnehin für die Pflichtaufgabe der ordnungsgemäßen Entsorgung der Reststoffe notwendig wären, blieben am Ende noch 192.000 EUR für den Betrieb der Sammelstelle übrig. Man müsste versuchen, dort qualitativ vorzusortieren, um neben der

kostenlose Abgabe evtl. auch noch kleinere Erlöse für hochwertige Biomasse (z. B. für die Faseraufbereitung) zu generieren. Damit könnten minderwertige Biomassen dann ebenfalls kostenneutral entsorgt werden.

Ökologische Auswirkungen

Neben direkten ökologischen Verbesserungen durch die Beseitigung von irregulären Ablagerungen von Biomassen in der Natur (Verbreitung von invasiven Pflanzen und Krankheitserregern, Verunreinigung von Gewässern, ...) wurden Veränderungen der Treibhausgasemissionen und anderer Faktoren berechnet. Anstatt die anfallenden Biomassen ungenutzt verrotten zu lassen, könnten damit (wie gezeigt) Nährstoffe, Energie oder Fasern hergestellt werden und damit fossile oder andere Ressourcen eingespart werden. In Abbildung 84 sind für die Erträge und Einsparungen aus 1000 Tonnen Grasmahd dargestellt. In Summe lassen sich dabei bis zu 280 Tonnen CO₂-Äquivalente einsparen.

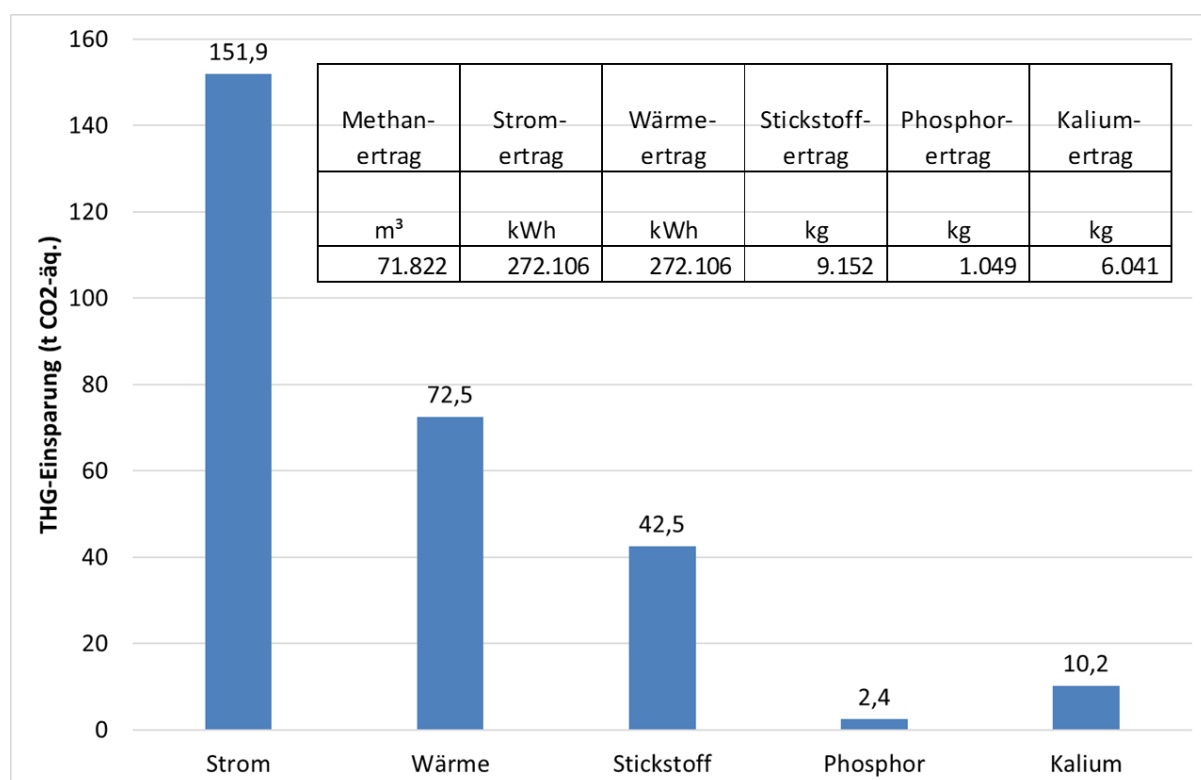


Abbildung 84: THG-Einsparungen bei der Nutzung von 1000 t Grasmahd

Darüber hinaus werden dadurch etwa 10.400 m² an Fläche und 1000 m³ an Wasser eingespart, welche für die Produktion der entsprechenden fossilen Ressourcen notwendig gewesen wären. 1000 Tonnen Grasmahd können bis zu 650 Tonnen Maissilage in Biogasanlagen einsparen, was ebenfalls eine erhebliche Ackerfläche für andere Zwecke freihalten würde.

Werden aus 1000 Tonnen Grasmahd z. B. 200 Tonnen Faserstoff gewonnen, so könne durch Ersatz von Holzzellstoff etwa 194 Tonnen CO₂-Äquivalente + Wasser + Chemikalien + Transporte eingespart werden und zusätzlich wertvolle Wälder erhalten bleiben.

AP 10 Veröffentlichungen, Berichte, Projekttreffen

Erste gemeinsame Auftakttermin war das Kickoff-Meeting am 12.10.2021 aller Partner in Nickelsdorf/Crossen. Hier war die Abstimmung von Schnittstellen und Aktivitäten im Fokus. Weitere Treffen wurden digital abgehalten und regelmäßige Jour fixe durchgeführt, um Arbeitsaufgaben kontinuierlich abzustimmen. Bilaterale Abstimmungen erfolgen unabhängig davon zwischen den relevanten Partnern. Speziell für die Softwareentwicklung haben wir eigens ein Planspiel abgehalten und für das Weiterbildungstool Präsenz-Workshops durchgeführt.

Im November (2022) fand das 2-tägige Verbundtreffen aller Partner in Crossen statt, um aktuelle Arbeitsstände auszuwerten, den Arbeitsplan für 2023 zu fixieren und auch Projektpartnern die Möglichkeit zu geben, Ihre Inhalte mit den Partnern zu vertiefen.

Ende November 2023 fand das 2-tägige Verbundtreffen aller Partner in Weimar bei MFPA statt, um aktuelle Arbeitsstände auszuwerten, den Arbeitsplan für 2024 zu fixieren. Ein Schwerpunkt war die Softwareentwicklung und deren Testung. Weiterhin die Planung des Feldtestes in 2024. Ein anderer Schwerpunkt lag auf der Planung der Ausweitung der Sammlung/Logistik und Verwertung. Auch die Weiterbildungsstrategie für letzte Projektjahr wurde fixiert.

Anfang Dezember 2024 fand die 2-tägige Abschlusskonferenz in Kahla auf der Leuchtenburg statt. Hier war der Fokus im Wesentlichen auf Auswertung der Ergebnisse des IRRMa Projektes und Ableitungen für die Zukunft zu treffen. Zu nennen sind der Aufbau und Koordinierung der Logistik, Nutzung der IRRMa Plattform für die Erfassung und Abrechnungssystematik, optimale Verwertungsoptionen hier speziell der Fokus auf der Kleinkompostierung, Koordinierung der interkommunalen Zusammenarbeit im Bereich biogene Reststoffe, Verfestigung des Bildungsangebotes im virtuellen Lernplattformen.

Veröffentlichungen:

- 2022-09-03 Ostthüringer Zeitung Jena: Zu viel Plastik im Lobedaer Biomüll
- 2022-09-17 Ostthüringer Zeitung Jena: KSJ schwankt zwischen Hoffnung und Verzweiflung
- 2023-03-22 Ostthüringer Zeitung Eisenberg & Stadtroda: Große Mengen Bio-Rohstoff da
- 2024-03 Beitrag in der Mieterzeitschrift der WG Carl Zeiss (Anlage SB 1)
- 2025-11 Lernmaterial (nicht nur) für Kinder und Jugendliche Anlage SB 3
teils auf den Homepages der Partner veröffentlicht. Druckversionen über die Partner an Zielgruppen verteilt.
- 2025-08 Handreichung für eine kommunale Eigenverwertung von pflanzlichen Reststoffen
über eine Kompostierung (Kleinkompostierung) Anlage SB 4
auf den Homepages der Partner veröffentlicht

Das Projektblatt wurde erarbeitet und auf der Homepage der RAG Saale-Holzland neben weiteren Informationen zum Download bereitgestellt (<https://www.rag-sh.de/projekte/irрма>).

Presseveröffentlichungen der Partner sind im gemeinsamen Cloudspeicher abgelegt, speziell auf die Biomüll-Kampagne des KSJ ist zu verweisen

Projekttreffen (Alle)

Liste der durchgeführten Arbeitstreffen, Beratungen, Fachaustausche

- 20220124 Beratung Stadt Eisenberg
- 20220126 Jour fixe
- 20220127 Beratung S&F
- 20220203 IRRMa - Brainstorming Fragebogen
- 20220309 Beratung Stadt Stadtroda

20220210 IRRMa - S&F Fragebogenabstimmung
20220315 Beratung Gemeinde Petersberg
20220331 Jour fixe digitales Projekttreffen
20220404 Beratung Stadt Bürgel
20220413 Beratung Stadt Hermsdorf
20220428 Jour fixe
20220428 Beratung Verwaltungsgemeinschaft Hügelland-Täler
20220516 Beratung Gemeinde Hainspitz
20220519 IRRMa Workshop Anwender
20220630 Jour fixe
20220713 Bildungsworkshop Apolda MFPA
20220720 Fachaustausch/ Besichtigung Berndt Bioenergy Wünschendorf
20220728 Jour fixe
20220825 Jour fixe + Planspiel zur Softwareentwicklung/ Lastenheft
20220929 Jour fixe
20221006 Abstimmung IRRMa & RIN - Regionales Netzwerk Stoffströme“ Frau Schock
20221019 Landratsamt SHK Abstimmung
20221027 Jour fixe
20221101 IRRMa Verbundtreffen in Crossen/Nickelsdorf (2 Tage)
20221124 Jour fixe
20221202 Beratung Dr. Scholwin - Biogasberatung
20221208 Beratung Frauenprießnitz Bürgermeister und Agrarbetrieb
20230117 Abstimmung Softwaretool
20230125 Beratung „Organisation der Abfallverwaltung“
20230126 Jour fixe
20230221 Jahresgespräch REGION.innovativ-Kreislaufwirtschaft - IRRMa/DIfU
20230222 IRRMa - Abstimmung Jahresplanung 2023
20230223 Jour fixe
20230308 IRRMa - Beratung KSJ DLB SHK
20230309 Abstimmung Biogas-Rechtslage Dr. Scholwin – Jour fixe GIS-Potentialanalyse,
Abstimmung Workshop- Reihe
20230317 Jour fixe GIS-Potentialanalyse
20230320 IRRMa - Beratung LRA SHK Umweltamt
20230320 Pressegespräch IRRMa-OTZ
20230322 1. Bauhof Workshop Golmsdorf
20230330 Jour fixe
20230404 Jour fixe GIS-Potentialanalyse
20230418 Jour fixe GIS-Potentialanalyse
20230427 Jour fixe
20230509/10 Fachkonferenz 2023 „Strukturwandel und Transformation in Kommunen und
Regionen“ Jena
20230511 IRRMa - BIOCHARSTORY - Austausch zu Pflanzenkohleprojekten
20230525 Bauhofmitarbeitende-Beratungen
20230525 Jour fixe
20230529 Jour fixe GIS-Potentialanalyse
20230530 Brainstorming "Stakeholder Workshop ... wie weiter mit den Ergebnissen"
20230629 Jour fixe
20230707 IRRMa-Software Abstimmung
20230710 Abstimmung WS-Stakeholder
20230714 Jour fixe GIS-Potentialanalyse
20230821 Workshop Thema „Stakeholdermatrix“
20230831 Jour fixe

20230910/11 FNR/KTBL-Kongress "Biogas in der Landwirtschaft Stand u. Perspektiven"
20230928 Jour fixe
20231102 Jour fixe
20231108 Abstimmungstreffen Software
20231128/29 IRRMa Verbundtreffen Weimar
20231205 IRRMa - Abstimmung/Beratung Frau BM Storch
20231206 Koordinator:innentreffen „REGION.innovativ-Kreislaufwirtschaft“
20240314 Workshop „Entsorgung und Verwertung von organischen Reststoffe in Jena, Organisation durch MFPA, Ausführungsort KommunalService Jena, siehe auch Anlage zum Workshop „Entsorgung und Verwertung von organischen Reststoffen“ durch Manuela Block
20240610 Kleinkompostieranlagen, Bibra & Petersberg
20240712 CarboMass Projektbesichtigung beim Abwasserzweckverband Bode-Wipper in Bleicherode
20241018 Beratung Gemeinde Pullach
20241127 Vortrag: Vorstellung des IRRMa-Projektes bei der Biogas Convention
20241204 4. IRRMa Verbundtreffen in Seitenroda/ Leuchtenburg am 04. und 05.12.2024

2. Die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Im zahlenmäßigen Nachweis sind alle Positionen enthalten. Aufgrund der Vielzahl der Positionen der einzelnen Kooperationspartner wird auf eine Aufzählung verzichtet. Allgemein lässt sich feststellen, dass sich bei einigen Projektpartnern die Kosten zur ursprünglichen Planung verringert haben. Dies ist im Wesentlichen auf eine teilweise veränderte Besetzung der Projektteams und die damit verbundenen Personalkosten sowie geringere Sachausgaben zurückzuführen. Ebenso konnten nicht alle geplanten Umsetzungen in dem geplanten technischen Maßstab realisiert werden. Dies betrifft beispielsweise die Testung des Holsystems im Landkreis sowie Popup Sammelpunkte. Ebenso konnte die Bio-gasanwendung nicht im vollen Umfang an laufenden Anlagen getestet werden.

3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten

Mit dem Projekt wurde das bestehende pontes pabuli – Verfahren zur Phosphorrückgewinnung aus Klärschlammaschen auf weitere Ausgangsstoffe und Anwendungsfelder erweitert. Dies erforderte die Beantwortung bis dato offener fachlicher und technischer Fragestellungen, was einerseits eine grundlegende Herangehensweise erfordert, andererseits jedoch auch erhebliche technische und in der Folge auch wirtschaftliche Risiken nach sich zog. Durch die absolvierten analytischen und experimentellen Untersuchungen konnten die entsprechenden kausalen Zusammenhänge ermittelt und eine technisch machbare Prozessführung abgeleitet werden. Dabei konnte der Projektaufwand, trotz der großen Breite der unterschiedlichen organischen Reststoffe durch die Fokussierung auf 3 ausgewählte Asche-typen, der Versuchs- und Analyseumfang auf einen akzeptablen Umfang eingegrenzt werden, wobei eine hohe Übertragbarkeit der Ergebnisse dennoch gewährleistet wurde. Damit konnten sowohl die verfolgten Zielstellungen erreicht und dabei die geplanten Personalkapazitäten und Sachmittel unter-schritten werden.

Trotz sich im Laufe des Projektes ergebender Änderungen zum ursprünglich geplanten Projektarbeits-plan konnten die Entwicklungshürden durch erarbeitete, technische Lösungen innerhalb der geplanten Personal- oder Investitionsaufwände realisiert werden.

4. Verwertbarkeit der Ergebnisse

Im Rahmen von IRRMa wurde ein softwarebasiertes, GIS-unterstütztes interkommunales Managementsystem gemeinsam mit den beteiligten kommunalen Partnern entwickelt und unter realen Bedingungen mit ausgewählten Technologiebausteinen getestet. Dies befähigt die Partner zukünftig, den gesamten Ablauf und Verwertungsprozesses von organischen Reststoffen in einer neuen, hoch effizienten Art und Weise umzusetzen. Dadurch bieten sich erhebliche Verwertungs- und Nachhaltigkeitsvorteile für organische Reststoffe sowie technologischen Vorzüge zur Nutzbarmachung dieser organischen Reststoffe. Die entwickelte Web-Anwendung erlaubt eine flexible Erfassung, Sortierung und Koordination von Stoffströmen in Echtzeit. Nutzer können passende Reststoffe nach Standort und Art filtern und zur Abholung freigeben. Das System ist offen für zukünftige Erweiterungen im Sinne der Kreislaufwirtschaft.

Die Projektergebnisse im IRRMA-Teilbereich der Nutzbarmachung von Nährstoffen aus den organischen Reststoffen und dabei insbesondere der Verwertung schadstoffbelasteter Verbrennungsaschen sind sehr positiv und lassen eine wirtschaftliche Verwertbarkeit erwarten.

Auch der Teilbereich stoffliche Nutzung stellt Potentiale der Substitution von fossilen Rohstoffen in Aussicht - aus Graspulver und Stärkeestern wurden biologisch abbaubare Verpackungen entwickelt; Grasmahd dient als Ausgangsstoff für Papier und Mulchscheiben.

Im Teilstück Energie sind technische Anwendungen speziell im Biogasbereich rechtlich bestätigt, Optimierungsprozesse im technischen Verfahren zeigen unter Laborbedingungen auch hier signifikante Steigerung des Methanertrags.

Die entwickelten Fortbildungsangebote für Verwaltung, Unternehmen und die Öffentlichkeit sind im digitalen Lernraum weiterhin erreichbar.

Ein Leitfaden zur Eigenkompostierung wurde erstellt, um insbesondere Kommunen bei rechtlichen und praktischen Fragen zu unterstützen.

Es wurde ein Arbeitsstand erreicht, der konkrete Verwertungsansätze eröffnet. Dazu müssen die Projektergebnisse nun in konkrete, standortspezifische Produktionsprozesse und Produktionsanlagen überführt werden. Die ermittelten, kausalen Zusammenhänge zwischen Rohstoffeigenschaften, Prozessführung und resultierenden Produktparametern, die abgeleitete Parametermatrix, die abgeleitete ashespezifische Prozessführung und die nun definierten Steuerungsparameter bilden eine belastbare Basis für die Konzipierung derartiger Anlagen. Damit können nun die notwendigen, weiterführenden Arbeiten insbesondere zum prozess- und anlagentechnischen Scale-up bestritten werden.

Der in IRRMA entwickelte innovative Lösungsweg stellt eine nachhaltige, dezentrale Verwertungslösung organischen Reststoffen im Sinne der Kreislaufwirtschaft auch für andere Regionen dar. Entsprechend kann das gesamte Konzept IRRMa, aber auch die entwickelten Teillösungen zur Verwertung von der aktuellen Modellregion auf andere Regionen übertragen werden. Auch in diesen Regionen kann dadurch die Erhöhung der Erfassungs- und Verwertungsquoten organischer Reststoffe ermöglicht werden.

5. Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

In der Projektphase wurde der Austausch zu bestehenden Aktivitäten Anderer, insbesondere innerhalb der „Projekt-Familie Region.innovativ“, im Themen- und Innovationsfeld ausführlich recherchiert und betrachtet. Dabei sind grundsätzlich im Bereich der Nährstoffrückgewinnung zahlreiche Akteure in der Forschung, Entwicklung und Umsetzung aktiv.

Das verfolgte Konzept IRRMA steht für ein nachhaltiges Ressourcen- und Stoffstrommanagement und will ganzheitliche Verwertungslösungen für regional anfallende, organische Reststoffe bieten. Bis

heute sind keine Entwicklungs- oder Bündnisaktivitäten bekannt, die sich konzeptionell genauso ausrichten.

6. Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen

Mit dem Projekt konnte die Technologiebasis der Partner erweitert werden. Die Partner werden die Teilergebnisse regelmäßig auf Konferenzen, Tagungen und diversen Präsentationen bei potenziellen Kunden und Kooperationspartnern, insbesondere im Rahmen der Kundenakquise und Vertriebsstrategie vorstellen.

Zudem wurde für das von MFPA entwickelte Seminar "Entsorgung und Verwertung von organischen Reststoffen" ein Modul zum Exkurs Klärschlamm und Nährstoffrecycling entwickelt, welches diesen Teilbereich der IRRMA-Konzeption ausführlich darstellt. Dieses Seminar wurde im Rahmen des Projektes im 1. Quartal 2024 für die regionalen Partner durchgeführt und soll zukünftig in der MFPA-Akademie regelmäßig angeboten werden.

Begleitend hierzu wurde eine Broschüre mit dem Titel „Kreislaufwirtschaft von organischen Reststoffen – Mehr Wissen über nachhaltige Abfallwirtschaft in Deutschland“ entwickelt. Inhalt des Heftes ist die fachliche und didaktische Aufbereitung des Themas Kreislaufwirtschaft von organischen Reststoffen für die Zielgruppe (7-9 Klasse).

Ein Leitfaden zur Klein- und Eigenkompostierung wurde erstellt. Diese soll praxisnah die Planung, den Bau und den Betrieb von Eigenkompostieranlagen sowie die Eigenverwertung der Komposte im kommunalen Umfeld erläutern.