DreiSATS

Schlussbericht

Verbundprojekt: Technologiedemonstration zur Kombination von Staubfeuerung und Säureaufschlussgranulierung mit integrierter Schwermetall-abscheidung für das regionale Phosphorrecycling aus Klär-schlämmen im „Mittel-deutschen Dreiländereck" Sachsen-Anhalt, Thüringen und Sachsen
DreiSATS

Teilprojekt: Material- und Prozessentwicklung für die in-situ-Schwermetall-abtrennung in der Klärschlammverbrennung mit der Staubfeuerung

Förderkennzeichen: 02WPR1544E

Antragsteller: Fraunhofer Institut für Keramische Technologien und Systeme (IKTS),
Winterbergstraße 28, 01277 Dresden

Projektleiter: Dipl.-Ing. Marc Lincke
marc.lincke@ikts.fraunhofer.de
Tel.: 0351 2553-7766

Bewilligungszeitraum: 01.07.2020 – 30.06.2025

Berichtszeitraum: 01.07.2020 – 30.06.2025

Gefördert durch:

Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt

Dresden, den 14.08.2026

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis **I**

Abkürzungsverzeichnis **III**

Abbildungsverzeichnis **V**

Tabellenverzeichnis **VIII**

I Kurze Darstellung **1**
I.1 Aufgabenstellung 1
I.2 Kompetenzen und Ausstattung 3
I.3 Planung und Ablauf des Vorhabens 4
I.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Projektbeginn 7
I.4.1 Trocknung 8
I.4.2 Klärschlammverbrennung Wirbelschichtverbrennung und Staubfeuerung 8
I.4.3 Schwermetallreduktion während der Verbrennung 9
I.5 Aufzählung der wichtigsten wissenschaftlich-technischen Ergebnisse 11
I.6 Zusammenarbeit mit anderen Stellen 13

II Eingehende Darstellung **14**
II.1 Ergebnisdarstellung 14
II.1.1 Bewertung der Inputstoffe Klärschlamm und Klärschlammasche (Hauptarbeitspaket 1) 14
II.1.1.1 Charakterisierung Klärschlamme (AP1.1) 14
II.1.1.2 Charakterisierung Klärschlammaschen und alternative Inputstoffe (AP 1.2) 17
II.1.2 Adaption Staubfeuerung für die Mono-Klärschlamm-Verbrennung und in-situ-Modifikation und Schwermetallabtrennung (Hauptarbeitspaket 2) 20
II.1.2.1 Optimierung Mono-Klärschlamm-Verbrennung mit Staubfeuerungstechnologie (AP 2.1) 20
II.1.2.2 In-situ-Modifikation und Heißgasfiltration zur Schwermetallabscheidung (AP 2.2) 21
II.1.2.3 Umbau und Erweiterung Pilotanlage Staubfeuerung (AP 2.3) 34
II.1.2.4 Systematische Untersuchungen zur Bewertung des Dauerbetriebs und der Aschemodifikation (AP 2.4) 35
II.1.3 Themenschwerpunkt Phosphorrecycling und Granulatherstellung (Hauptarbeitspaket 3) 44
II.1.3.1 Standortspezifische Rezepturentwicklung (AP 3.1) 44
II.1.3.2 Bewertung und Testung der Düngerprodukte (AP 3.6) 45
II.1.4 Bilanzierungen, Stakeholder und Vorbereitung Anschlussphase zur kommerziellen Umsetzung (Hauptarbeitspaket 5) 52
II.1.4.1 Begleitende Bilanzierung und Wirtschaftlichkeitsbetrachtung (AP 5.1) 52
II.1.4.2 Stakeholdermanagement und -analyse für Zorbau und weitere Standorte (AP 5.3) 55
II.1.4.3 Vorbereitung Anschlussphase zur kommerziellen Umsetzung am Modellstandort Zorbau (AP 5.4) 59
II.1.5 Projektkoordination und Öffentlichkeitsarbeit (Hauptarbeitspaket 6) 59
II.1.5.1 Öffentlichkeitsarbeit (AP 6.1) 59
II.1.5.2 Projektkoordination und Berichtswesen (AP 6.2) 61
II.2 Zahlenmäßiger Nachweis 61
II.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit 61

II.4 Nutzbarkeit der Ergebnisse 62
II.5 Fortschritte bei anderen Stellen 62
II.6 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen 63

III Literaturverzeichnis 63

Abkürzungsverzeichnis

AbfKlärV	Klärschlammverordnung
AP	Arbeitspaket
ASW	Aluminiumsilikat-Wolle
ATEX	Explosionsschutz/ATEX-Richtlinien
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BMFTR	Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt
BMWI	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
CAL	Calcium-Acetat-Lactat-Methode
CT	Carbotechnik bzw. Proben-/Partnerkürzel
CVM	Exzenter-Schwingmühle / Mühlentyp
DIN	Deutsches Institut für Normung
DüMV	Düngemittelverordnung
EGW	Einwohnergleichwert
EMSR	Elektro-, Mess-, Steuer- und Regelungstechnik
EU	Europäische Union
EW	Einwohnerwert
Fa.	Firma
FESEM	Feldemissions-Rasterelektronenmikroskopie
FKZ	Förderkennzeichen
GIS	Geoinformationssystem
HA	Hauptarbeitspaket
HGF	Heißgasfiltration / Heißgasfilter
HTC	Hydrothermale Carbonisierung
IGCC	Integrated Gasification Combined Cycle
IKTS	Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien und Systeme
KS	Klärschlamm
KSA	Klärschlammasche
LCA	Life Cycle Assessment / Ökobilanz
Lkw	Lastkraftwagen
LTC	Projektpartner LTC
Ma.-%	Masseprozent
MPa	Megapascal
MS	Meilenstein
MSR	Mess-, Steuer- und Regelungstechnik
MW / MWth	Megawatt / thermische Leistung
NBK	Nachbrennkammer
PAK	Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe
PE-CONS	EU-Dokument-/Rechtsaktkürzel im Kontext Düngemittelrecht
PFBC	Pressurized Fluidized Bed Combustion
PGV	Partikelgrößenverteilung
ppm	parts per million

R&I / RI	Rohrleitungs- und Instrumentierungsschema
RFA	Röntgenfluoreszenzanalyse
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition (Prozessleitsystem)
SCR	Selective Catalytic Reduction (katalytische NO_x-Reduktion)
SiC	Siliciumcarbid
SNCR	Selective Non-Catalytic Reduction (nicht-katalytische NO_x-Reduktion)
STRUBIAS	EU-Arbeitsgruppe/Regelungskontext zu Struvit, Biochar und Aschen
THG	Treibhausgas
TM	Trockenmasse
TRL	Technology Readiness Level
TS	Trockensubstanz
TSP	Triple-Superphosphat (Referenz-Düngemittel)
VKD	Veolia Klärschlammverwertung Deutschland GmbH
WK	Wendekammer
XRD	Röntgendiffraktometrie / Röntgenbeugung

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Region „Mitteldeutsches Dreiländereck“ und beteiligte Projektpartner 1
Abbildung 2: Technologiekette Klärschlammverwertung Region „Mitteldeutsches Dreiländereck“ 2
Abbildung 3: Zweistufiger Heißgasfiltrationsstand zur Modifizierung und Trennung von Aschegemischen 4
Abbildung 4: Heißgasfiltrationsprüfstand für Wabenfilter oder Filterkerzen 4
Abbildung 5: Umsetzungsschritte DreiSATS: vom Grobkonzept zur kommerziellen Anlage 5
Abbildung 6: Versuchsanlage Staubfeuerung Carbotechnik 8
Abbildung 7: Funktionsprinzip Staubfeuerung Carbotechnik 8
Abbildung 8: Schema Aschemodifikation und Heißgasfiltration 10
Abbildung 9: ZnO-Gehalte thermochemisch unbehandelter und behandelter Klärschlammaschen aus der Wirbelschicht 10
Abbildung 10: keramische Filterkerzen 10
Abbildung 11: getrockneter Klärschlamm (links) und gemahlener Klärschlamm in Kugelmühle (rechts) 14
Abbildung 12: Wichtige verbrennungstechnische Eigenschaften (links) und relevante Erweichungs- und Schmelztemperaturen von Aschen (rechts) der Klärschlämme aus der Klärschlammmatrix 16
Abbildung 13: Spreizungsbreite der Hauptelement- (links) Schwermetallgehalte (rechts) in 20 Klärschlammproben aus der Klärschlammmatrix 17
Abbildung 14: Partikelgrößenverteilung einer Asche aus der Staubfeuerung 18
Abbildung 15: Phosphor- und Kaliumgehalte in Gärresten und Hühnertrockenkot 19
Abbildung 16: Mahluntersuchung zur Bewertung des Trocknungsgrads Klärschlamm 20
Abbildung 18: Filtrationseffizienz verschiedener Filtermaterialien 22
Abbildung 19: Probenrohre im Ofen nach Sinterung unter Luftatmosphäre 23
Abbildung 20: spezifischer Gegendruck verschiedener Filtermaterialien bei variierender Filterflächenbelastung 24
Abbildung 21: Verlauf der Bestaubung von fünf keramischen Heißgasfaserfilterkerzen mit Calciumcarbonat 25
Abbildung 22: mit Asche bestaubte Faserfilterkerzen (links) und mit Asche belegte Faserkerze als FESEM-Aufnahme (rechts) 25
Abbildung 23: Änderung des Partialdruckes von Schwermetallverbindungen in Abhängigkeit der Temperatur 26
Abbildung 24: Klapprohrofen (links), Probenschiffchen mit Asche und Additiv vor und nach einem Sublimationsversuch (rechts) 28
Abbildung 25: Reduktion Schwermetallgehalt nach Sublimationsversuchen mit verschiedenen Additiven zur in-situ-Schwermetallreduktion (* Hg in Asche ohne Additiv unterhalb Nachweisgrenze). 29

Abbildung 26: Temperaturvariation beim Verbrennungsversuch eines Klärschlamms im Laborreaktor zur Schwermetallentfrachtung (Versuch mit Additiv 150 g Cl/kg Klärschlamm, verwendet: NH_4Cl) 30

Abbildung 27: Einfluss des Chlorgehalts auf die Schwermetallentfrachtung bei 900 °C 30

Abbildung 28: Schwermetallreduktion am Klärschlamm IKTS030 durch Verwendung von verschiedenen Additiven (Temperaturrampe, 900 °C, 1 h Haltezeit) 31

Abbildung 29: Phosphorlöslichkeit (Phosphate in Lösung) für verbrannten Klärschlamm IKTS030 mit und ohne Additiv 32

Abbildung 30: zusammengeführte Daten mittels R&I-Schema 34

Abbildung 31: alternative Filterkerzen (links und Mitte: Siliciumcarbid) und eingebaute Filterkerze (rechts: Alumosilikatfasern) 35

Abbildung 32: Zusammensetzung der für die Demonstratorversuche ausgewählten Klärschlämme in Bezug zu den Hauptelement- (links) und Schwermetallgehalten (rechts) der Klärschlammproben aus der Klärschlammmatrix 36

Abbildung 33: Summenverteilung Q3(x) gemahlene Klärschlämme 37

Abbildung 34: Spreizungsbreite der Hauptelement- (links) Schwermetallgehalte (rechts von Klärschlammaschen der Klärschlämme IKTS031_ggKS, IKTS032_ ggKS, IKTS033_ ggKS, IKTS034_ggKS und CT010_ggKS aus Laborverbrennungen ohne Additiven (Temperaturrampe, 900 °C, 1 h Haltezeit) 38

Abbildung 35: Schwermetallgehalte von Klärschlammaschen des Klärschlamms IKTS031_ggKS aus Verbrennungsversuchen ohne Additivzugabe an der Staubfeuerungsanlage von Carbotechnik (Aschen aus verschiedenen Entnahmepunkten) 40

Abbildung 36: Schwermetallgehalte von Klärschlammaschen der Klärschlämme IKTS031_ggKS, CT008_ggKS, CT010_ggKS, IKTS032_ggKS, IKTS033_ggKS und IKTS034_ggKS - links aus der Laborverbrennung und rechts aus Verbrennungsversuchen ohne Additivzugabe an der Staubfeuerungsanlage von Carbotechnik (Entnahme aus den Nachbrennkammer) 40

Abbildung 37: Schwermetallgehalte von Klärschlammaschen der Klärschlämme IKTS031_ggKS (linke Graphik) und CT010_ggKS (rechte Graphik) im Vergleich zwischen Laborverbrennungen ohne Additiven und Aschen aus der Nachbrennkammer (NK) bzw. Heißgasfilter (HGF) bei Verbrennung mit $NaHCO_3$-Zugabe an der Staubfeuerungsanlage von Carbotechnik 41

Abbildung 38: Schwermetallgehalte von Klärschlammaschen des Klärschlamms IKTS031_ggKS im Vergleich zwischen Laborverbrennungen ohne Additiven und Aschen aus der Nachbrennkammer (NK) bei Verbrennung ohne Additiven bzw. mit $NaHCO_3$- und Na_2CO_3-Zugabe an der Staubfeuerungsanlage von Carbotechnik 42

Abbildung 40: Versuchsstand Phytotox im Aufbau 45

Abbildung 41: Versuchsstand Phytotox - Tastversuch 45

Abbildung 42: Unterteilung der pflanzlichen Entwicklungszyklen in Makro- und Mikrostadien nach dem BBCH-Code (Meier 2018) 46

Abbildung 43: Entscheidungsbaum zur materialgerechten Anwendung von Bioassay-Vorschriften 47

Abbildung 44: Titelblatt und Inhaltsverzeichnis des internen Leitfadens 47

Abbildung 45: Pflanzenbauliches Versuchswesen entlang der Produktentwicklung von Düngeprodukten; IKTS-Ansatz blau hinterlegt 48

Abbildung 46: Auszug aus dem Ergebnis eines Tastversuchs: Bedeckungsgrade Kohlrabi (links) und Salat (rechts) 48
Abbildung 47: Auszug aus dem Ergebnis eines Tastversuchs: Pflanzensaftuntersuchung (links) und BBCH-Code (rechts) 49
Abbildung 48: Frischmassen der oberirdischen Pflanzenteile [g] 49
Abbildung 49: TSP-Kontrolle und 0-Kontrolle 50
Abbildung 50: Versuchspflanzen der Variante J24, Beispiele für aufgetretene Chlorosen 50
Abbildung 51: Rotklee im Versuch 2025 mit Düngemittelvorprodukten 51
Abbildung 52: Weidelgras im Versuch 2025 mit Düngemittelvorprodukten 51
Abbildung 53: LCA-Modell DreiSATS - Massen- und Energieflüsse (für 100.000 EGW) 53
Abbildung 54: LCA-Modell DreiSATS - THG-Potenzial (in CO_2-äq.) (für 100.000 EGW) 53
Abbildung 55: Stoff- und Energieflüsse für Trocknung und Staubfeuerung – pro EGW und Jahr 54
Abbildung 56: THG-Bilanz für Trocknung und Staubfeuerung – pro EGW und Jahr 55
Abbildung 57: Auszug digitale Umfrage 2. Stakeholderworkshop 56
Abbildung 58: Stakeholdermanagement MindMap 57

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Probenspezifischer Analysenplan	15
Tabelle 2:	Eigenschaftsdaten kommerzieller Heißgasfiltermaterialien	21
Tabelle 3:	Einfluss der Porosierungsmittel auf verschiedene Werkstoffeigenschaften	23
Tabelle 4:	Liste von möglichen Additiven mit zugehörigem Temperaturverhalten und wichtigen Hinweisen	27
Tabelle 5:	Ergebnisse der Röntgenphasenanalyse für verbrannten Klärschlamm IKTS-030 mit und ohne Additiv	32
Tabelle 6:	Ergebnis Partikelgrößenanalyse gemahlene Klärschlämme	37
Tabelle 7:	Ergebnisse der Röntgenphasenanalyse für Klärschlammaschen aus Laborverbrennungen ohne Additiven (Temperaturrampe, 900 °C, 1 h Haltezeit)	39
Tabelle 8:	Ergebnisse der Röntgenphasenanalyse für Klärschlammaschen des Klärschlamms IKTS031_ggKS aus Laborverbrennungen und Staubfeuerung ohne und mit Additiven	43
Tabelle 10:	Analyseplan KS-Aschen und Düngerprodukte	44
Tabelle 11:	P-Löslichkeiten Klärschlammaschen aus der Staubfeuerung	45
Tabelle 12:	Veröffentlichungen des IKTS	60

I Kurze Darstellung

I.1 Aufgabenstellung

Motivation und Region

In Deutschland soll der in Klärschlämmen vorhandene Phosphor (P) - eine kritische Ressource - zukünftig verpflichtend zurückgewonnen werden. Mit mehrjährigen Übergangsfristen wird für kommunale Kläranlagen > 50.000 Einwohnerwerten (EW) die P-Rückgewinnung grundsätzlich vorgeschrieben und die bodenbezogene Verwertung von Klärschlämmen untersagt. Bereits heute ist die bodenbezogene Verwertung auf Grund von gesetzlichen Verschärfungen im Düngerecht sowie durch schwindende gesellschaftliche Akzeptanz stark rückläufig. Eine zentrale regulatorische Grundlage hierfür bildet die Novellierung der Klärschlammverordnung (AbfKlärV), die am 27. September 2017 beschlossen wurde und am 3. Oktober 2017 in Kraft trat. Ziel der Neuregelung ist die deutliche Reduzierung der bodenbezogenen Klärschlammverwertung sowie die Einführung einer verbindlichen Pflicht zur Phosphorrückgewinnung aus Klärschlamm beziehungsweise Klärschlammasche. Mit der Novelle wurden unter anderem strengere Grenzwerte für Schwermetalle festgelegt und die landwirtschaftliche Verwertung weiter eingeschränkt.

Im Rahmen des Verbundvorhabens DreiSATS ist es Ziel des Konsortiums, eine geschlossene Prozesskette zur regionalen Klärschlammverwertung im technischen Maßstab aufzubauen und zu erproben. Diese umfasst die Klärschlammlogistik, die Konditionierung durch Trocknung, die thermische Konversion mittels Staubfeuerung sowie die Konfektionierung marktfähiger Düngerprodukte bis hin zu deren regionaler Vermarktung mit dem pontes pabuli-Verfahren. Grundlage hierfür sind die umfangreichen praktischen Erfahrungen des Projektkoordinators VKD (Veolia Klärschlammverwertung Deutschland GmbH), der mit rund 350.000 t Originalsubstanz (entwässerter Klärschlamm) pro Jahr zu den größten Verwertungsbetrieben für kommunale Klärschlämme zählt, sowie die komplementären Kompetenzen der Projektpartner.

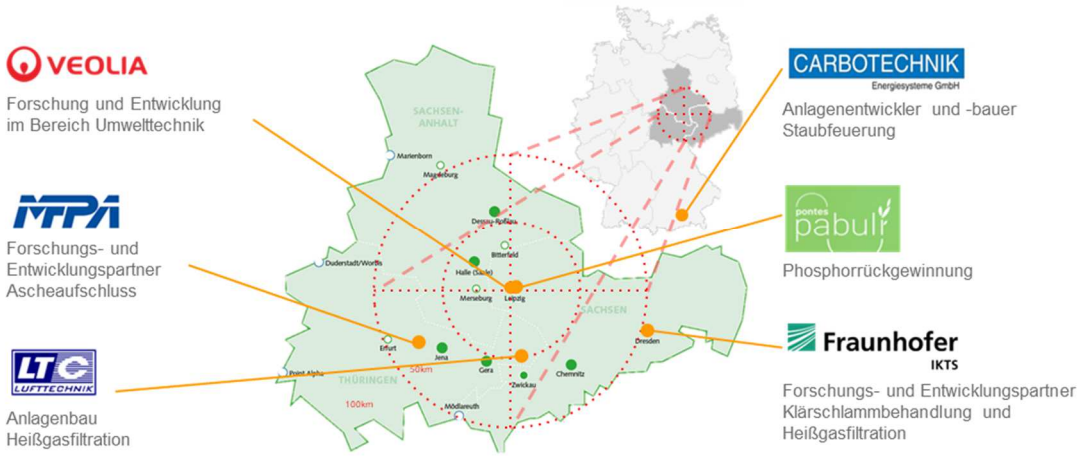


Abbildung 1: Region „Mitteldeutsches Dreiländereck" und beteiligte Projektpartner

Die Region „Mitteldeutsches Dreiländereck", die für die modellhafte Umsetzung des geschlossenen regionalen Verwertungsansatzes ausgewählt wurde, ist sowohl durch verdichtete städtische (Halle, Leipzig, Chemnitz) als auch durch ländliche Gebiete geprägt und gehört zu den landwirtschaftlich hochintensiv bewirtschafteten Regionen Deutschlands.

Technologischer und logistischer Ansatz DreiSATS

Die im Rahmen des Vorhabens geplante vertiefte Machbarkeitsuntersuchung soll zeigen, ob die von den Partnern aktuell favorisierte Technologiekette aus Trocknung (Nutzung marktgängiger Verfahren bzw. Nutzung des vorhandenen 50.000 $t_{Orginalsubstanz}$/a KS –Trockners der VKD am Industriestandort Zorbau, eine dezentralen Staubfeuerung mit optionaler Schwermetallabtrennung (Carbotechnik) sowie der Konfektionierung mittels Säureaufschluss und Agglomeration nach dem pontes pabuli-Verfahren aus wissenschaftlicher sowie technischer Sicht für das Phosphorrecycling in die Region ein zielführender Weg ist (Abbildung 2).

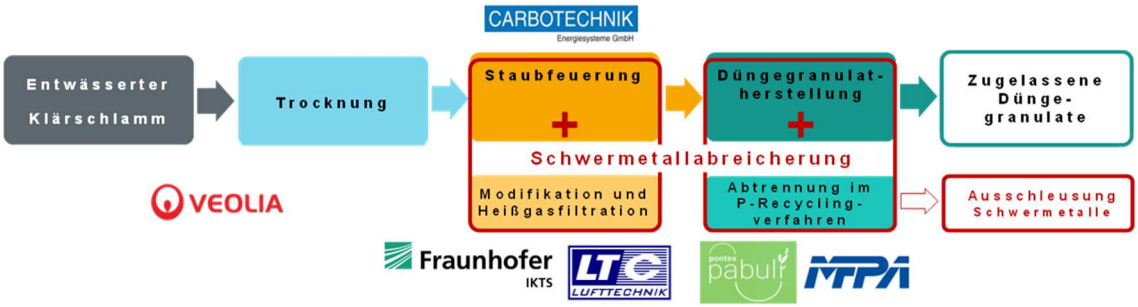


Abbildung 2: Technologiekette Klärschlammverwertung Region „Mitteldeutsches Dreiländereck"

In der ersten Stufe, der Trocknung, erfolgt eine Reduzierung des Klärschlammvolumens, um die Transportkosten zu senken und den Klärschlamm für die Verbrennung vorzubereiten. Trockner für organische Reststoffe (Klärschlamm, Gärprodukte und Gülle) werden nach dem heutigen Stand der Technik meist als Band-, Trommel-, Schubwende- oder Wirbelschichttrockner ausgeführt. Durch Kombinationen mit z.B. Heizkraftwerken oder Klärschlammverbrennungsanlagen können Synergien genutzt und die Energiekosten gesenkt werden. Dies erfolgt meist an den zentralen Standorten der Verbrennungsanlagen, so dass hohe Transportkosten für den entwässerten Klärschlamm anfallen. Im Rahmen der Konzeptphase soll daher die Kombination von Trocknern und Staubfeuerungsanlagen mit geringeren Verbrennungskapazitäten (<2.000 t Trockenmasse (TM)/a) geprüft werden.

In der zweiten Stufe, der thermischen Konversion, soll eine innovative Staubfeuerung mit optionaler Schwermetallabtrennung zum Einsatz gebracht werden. Die Technologiebewertung im Bereich der thermochemischen Verfahren zeigt, dass die stationäre Wirbelschichtfeuerung zurzeit das weitverbreitetste Verfahren zur thermischen Klärschlammbehandlung darstellt. Von den aktuell 20 in Betrieb befindlichen Monoklärschlammverbrennungsanlagen sind 17 Wirbelschichtanlagen mit einer Verbrennungskapazität von 2.000 bis 95.000 tTM/a (Vodegel und Müller 2017). Wobei nach Gaderer und Spliethoff (2011) eine wirtschaftlicher Betrieb erst ab 20.000 tTM/a (entspricht 10 MWth) realisierbar ist. Durch die konstruktive Ausbildung der Brennkammer, z.B. Auskleindung und Geometrie, steigen die spezifischen Investitionskosten mit sinkender Feuerungsleistung stark an. Ein Teillastbetrieb ist nur durch eine zweite Wirbelschicht umsetzbar.

Die Schwermetallgehalte der Aschen aus der Klärschlammmonoverbrennung entscheiden über deren Verwendung. Die heute bekannten Verfahren der Schwermetallabscheidung sind der Verbrennung nachgeschaltet (z.B. Ashdec, Outotec) und daher technologisch aufwändig, energie- und kostenintensiv sowie durch den hohen Einsatz von Chemikalien meist umweltbelastend. Der spezifische Energieverbrauch liegt zwischen 400 und 850 kWh/t Asche (AshDec / Outotec). Im geplanten Projekt soll daher die in-situ-Schwermetallabscheidung, welche im Rahmen eines internen Projektes am Fraunhofer IKTS entwickelt wurde, bewertet werden. Bei der in-situ-Schwermetallabscheidung erfolgt die Abtrennung direkt im Rauchgas, unter Ausnutzung des hohen Temperaturniveaus. Das Prinzip der Stofftrennung basiert auf unterschiedliche Flüchtigkeiten von Aschekomponenten im Heißgasbereich. Der methodische Ansatz besteht in der gezielten Erzeugung von leichtflüchtigen Schwermetallverbindungen, die bei den hohen Temperaturen der Feststoffverbrennung gasförmig gebildet werden und sich mittels keramischer Filterelementen von der Verbrennungsasche

separieren lassen. Durch die in-situ-Abtrennung der Schwermetalle kann der spezifische Energieverbrauch auf <200 kWh/t Asche reduziert werden.

In der letzten Stufe wird die KS-Asche nach dem pontes-pabuli-Ansatz chemisch aufgeschlossen und gleichzeitig zu einem marktfähigen Düngergranulat konfektioniert. Dabei wird das in der Klärschlammasche weitgehend unlöslich gebundene Phosphat durch Säurezugabe, beispielsweise Phosphorsäure, in pflanzenverfügbare Phosphatformen überführt. Durch die anschließende Granulation entstehen standardisierte, lager- und streufähige Recyclingdünger, die sich in bestehende landwirtschaftliche Anwendungssysteme integrieren lassen.

Die ausgewählte und beschriebene Prozesskette könnte in der zu betrachtenden Region „Mitteldeutsches Dreiländereck" aufgrund der räumlichen Strukturen sowohl ein zentraler Ansatz mit Bündelungen der Prozessstufen Mono-KS-Verbrennung und Konfektionierung an einem Standort (schlammanfallgewichteter Mittelpunkt) als auch ein dezentraler Ansatz mit dezentralen Mono-KS-Verbrennungsanlagen mit geringer Feuerungsleistung mit vorgeschalteter Trocknung und einer zentralen Konfektionierung sinnvoll sein und perspektivisch umgesetzt werden (Abbildung 4). Im Rahmen der Konzeptphase sollen daher beide Ansätze ökonomisch, ökologisch als auch genehmigungstechnisch bewertet und verglichen werden.

I.2 Kompetenzen und Ausstattung

Als Forschungs- und Technologiedienstleister entwickelt das Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien und Systeme (IKTS) moderne keramische Hochleistungswerkstoffe, industrierelevante Herstellungsverfahren sowie prototypische Bauteile und Systeme in vollständigen Fertigungslinien bis in den Pilotmaßstab. Darüber hinaus umfasst das Forschungsportfolio die Kompetenzen Werkstoffdiagnose und -prüfung. Um keramische Technologien und Komponenten sowie zerstörungsfreie Prüfverfahren für neue Branchen, Produktideen und Märkte innerhalb und außerhalb der klassischen Einsatzgebiete zu demonstrieren und zu qualifizieren, arbeitet das Fraunhofer IKTS in neun marktorientierten Geschäftsfeldern. Dazu gehörten keramische Werkstoffe und Verfahren, Maschinenbau und Fahrzeugtechnik, Elektronik und Mikrosysteme, Energie, Umwelt- und Verfahrenstechnik, Bio- und Medizintechnik, zerstörungsfreie Prüfung und Überwachung, Wasser sowie die Material- und Prozessanalyse.

Das Fraunhofer IKTS ist seit vielen Jahren auf den Gebieten der Umweltverfahrenstechnik und Energietechnik tätig. Nachhaltigkeit und Wirtschaftlichkeit prägen die Zielstellungen der Forschungs- und Systementwicklungsarbeiten auf den Gebieten der Energietechnik und des Umweltschutzes zur Ressourcenschonung und zur Schaffung geschlossener Stoff- und Energiekreisläufe. Insbesondere die bestehenden Fähigkeiten und Erfahrungen im Bereich der mechanischen und biologischen Aufbereitung von Stoffsystemen sowie die sehr weit entwickelten Charakterisierungsmöglichkeiten im Bereich der Partikelgrößenbestimmung sowie Oberflächencharakterisierung wurden von der Abteilung „Kreislauftechnologien und Wasser" des IKTS in das Projekt eingebracht. Einen Forschungs- und Entwicklungsschwerpunkt in der ebenfalls am Projekt beteiligten Arbeitsgruppe „Filterkeramik und Abgasnachbehandlung" bildeten poröse und zelluläre Keramiken für den Einsatz in der Filtration und Katalyse. Die Hauptanwendungsfelder dieser Entwicklungen lagen u. a. im Bereich der Entstaubung von Heißgasen, der Abgasnachbehandlung von stationären und mobilen Anlagen, der Flüssigfiltration oder der chemischen Reaktionstechnik.

Das Fraunhofer IKTS arbeitet speziell an der Entwicklung und Verbesserung von Filtermaterialien für die Heißgasfiltration, an Technologien zur Herstellung von innovativen Filtergeometrien und an neuen Anwendungen für Heißgasfilter. Neben der Material- und Bauteilentwicklung auf der Basis offenzelliger Keramikschäume oder poröser gesinterter Kornkeramiken liegen die Schwerpunkte der Arbeiten auf der Verfahrensentwicklung für neue technische Applikationen. Beispiele für erfolgreiche und industriell überführte Projekte im Bereich der Heißgasfiltration sind u. a. eine neue Generation kriechbeständigerer Heißgasfilterkerzen, innovative Dieselpartikelfilter für Off-Road-Anwendungen sowie integrierte Filter zur Feinstaubminderung in Holzfeuerstätten. Aktuelle Entwicklungsarbeiten beschäftigen sich

mit der Heißgasentstaubung von Abgasen aus der Stahl- und Kalkindustrie. Mit Hilfe eines eigens aufgebauten Spezialprüfstands wurde das Abscheide- und Abreinigungsverhalten verschiedener Stäube untersucht sowie die Anwendbarkeit der Heißgasfiltration nachgewiesen. Durch nachgeschaltete membrangestützte Verfahren konnten zudem heiße und staubbeladene Abgase zur Gewinnung von CO_2 genutzt werden.

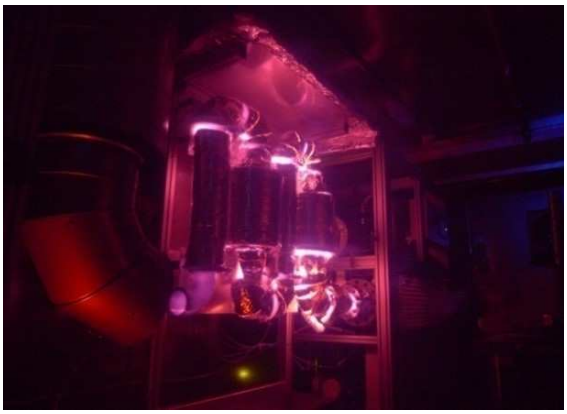


Abbildung 3: Zweistufiger Heißgasfiltrationsstand zur Modifizierung und Trennung von Aschegemischen



Abbildung 4: Heißgasfiltrationsprüfstand für Wabenfilter oder Filterkerzen

Im Rahmen eines Fraunhofer-internen Forschungsprojekts wurden am Fraunhofer IKTS Konzepte zur selektiven Abscheidung von Wertstoffen aus Heißgasprozessen wie der Klärschlammverbrennung untersucht. Dabei konnten erste positive Ergebnisse zur Schwermetallabtrennung aus Klärschlammaschen erreicht werden. Diese basieren bisher ausschließlich auf einer der Verbrennung nachgelagerten Modifizierung der Aschen mittels Hochtemperaturbehandlung und Heißgastrennung. Aufbauend auf diesen Ergebnissen wurde im Rahmen des Wachstumskerns abonocare® eine energieeffiziente Kopplung der Aschemodifizierung und Schwermetallabtrennung mit der Klärschlammmonoverbrennung in einem Wirbelschichtreaktor untersucht und für die Gewinnung düngemitteltauglicher Aschefraktionen erprobt. Abgrenzend hierzu sollte im Projekt DreiSATS die Aschemodifizierung und Schwermetallabtrennung für die Staubfeuerung erfolgen. Durch die Charakteristik des Verbrennungsverfahrens ergeben sich gravierende Unterschiede hinsichtlich der Aschezusammensetzung, Partikelgrößenverteilung der Aschen und Filtermodulanforderungen im Vergleich zur Wirbelschichtverbrennung.

I.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Der Projektansatz DreiSATS gliedert sich in drei übergeordnete Phasen. In der Konzeptphase (2019) erfolgte die Auswahl und Bewertung der einzelnen Technologien, das Screening und die Bewertung der regionalen Klärschlammaufkommen sowie die Erarbeitung eines GIS-gestützten Softwaretools zur Standortauswahl. Darüber hinaus wurde mit der Umfeld- und Akteursanalyse begonnen. In der sich anschließenden Umsetzungs- und Validierungsphase, die Ergebnisse dieser Phase werden in diesem Bericht erläutert, ist die Adaption, Entwicklung und Erprobung der Technologien unter Einsatzbedingungen im Maßstab 0,5 bis 1,0 t TM KS/d am Standort der vorhandenen Versuchspilotanlage der Staubfeuerung in Magdeburg sowie der neu zu errichtenden Versuchsanlage nach dem Pontes-Pabuli-Verfahren in Markranstädt geplant. Bei positivem Projektergebnis ist die Überführung der Technologien in den kommerziellen Maßstab vorgesehen. Somit bildet das beantragte Projekt den Grundstein für die zukünftige Klärschlammverwertung in der DreiSATS-Region und ist auf weitere Regionen in Deutschland und Europa übertragbar.

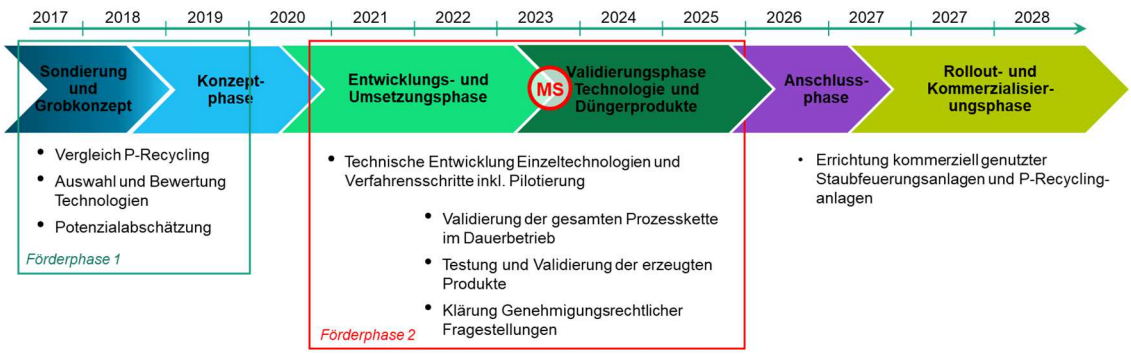


Abbildung 5: Umsetzungsschritte DreiSATS: vom Grobkonzept zur kommerziellen Anlage

Zum Erreichen der genannten Zielstellungen wurde ein gemeinsamer, detaillierter Arbeitsplan erstellt, in dem die partnerspezifischen Inhalte enthalten sind. Der Arbeitsplan gliedert sich in sechs Hauptarbeitspakete, die im Folgenden kurz beschrieben werden. Die Projektkoordination wurde durch die VKD übernommen, wobei das IKTS bei der wissenschaftlichen Koordinierung unterstützt hat.

Nachfolgend sind die Arbeitsinhalte für das Teilprojekt „Material- und Prozessentwicklung für die in-situ-Schwermetallabtrennung in der Klärschlammverbrennung mit der Staubfeuerung“ des IKTS beschrieben.

Für die Staubfeuerung war eine deutlich veränderte Aschecharakteristik zu erwarten. Im Vergleich zur herkömmlichen Wirbelschichtfeuerung entstehen sehr feine Partikel ohne Sandanteil. Die Entwicklung und der Aufbau der in-situ-Aschemodifikation sowie der gekoppelten Heißgasfiltration an der industriellen Verbrennungsanlage des Projektpartners Carbotechnik erforderten daher materialtechnische und technologische Grundlagenuntersuchungen. Diese Untersuchungen sollten die zentralen Fragestellungen des angestrebten Technologienachweises klären. Diese betreffen:

- Additiveinsatz und -einbringung für die in-situ-Aschemodifikation,
- Entwicklung neuer Filtermaterialien und Einbindungskonzepte,
- Erarbeiten neuer Anlagenkonzepte.

Die Projektlaufzeit betrug einschließlich einer sechsmonatigen Verlängerung 5,5 Jahre. Das Projekt war in zwei Phasen untergliedert. In der ersten Phase (01.07.2020 bis 30.06.2023) erfolgten die Material- und Technologieentwicklung sowie das Scaling-up in einen technisch relevanten Maßstab. Ziel war die Einbindung und Errichtung der in-situ-Aschemodifikation und der Heißgasfiltration an der Versuchsanlage Staubfeuerung. In der anschließenden zweiten Phase (01.07.2023 bis 31.12.2025 inkl. Verlängerung) erfolgten die Adaption der Technologien sowie der Nachweis der Dauerbetriebsstabilität. Die Projektverlängerung wurde genutzt, um verzögerte Arbeiten, insbesondere im Zusammenhang mit der Bereitstellung geeigneter Klärschlämme sowie der Inbetriebnahme und Erprobung der Versuchsanlage, abschließend umzusetzen.

Nachfolgend sind die Arbeiten des IKTS in die Hauptarbeitspakete (HA) eingeordnet sowie die Ziele und Herangehensweisen aufgezeigt.

Hauptarbeitspaket 1 (HA 1) – „Bewertung der Inputstoffe Klärschlamm und Klärschlammaschen“

Im Hauptarbeitspaket 1 bewertete das IKTS gemeinsam mit den Projektpartnern die für die Staubfeuerung relevanten Inputstoffe Klärschlamm, Klärschlammaschen und weitere phosphathaltige Reststoffströme. Dazu wurden regional verfügbare Klärschlämme ausgewählt, chemisch und granulometrisch charakterisiert sowie hinsichtlich ihrer verbrennungstechnischen und verwertungstechnischen Eignung beurteilt. Ergänzend untersuchte das IKTS typische Aschen aus der Klärschlammmonoverbrennung und bewertete deren stoffliche Eigenschaften als Grundlage für die spätere in-situ-Aschemodifikation. Darüber hinaus wurden weitere phosphathaltige Reststoffströme vergleichend analysiert und deren grundsätzliche Eignung für Staubfeuerung, Ascheverwertung und Düngerherstellung abgeschätzt. Die Ergebnisse lieferten eine belastbare Datengrundlage für die Auswahl geeigneter Einsatzstoffe sowie für die weiteren Arbeiten zur Staubfeuerung, Schwermetallreduktion und Standortbewertung.

Auf Basis dieser Datenerhebung erfolgten die Auswahl, Bereitstellung bzw. Vorbehandlung der Klärschlämme sowie die Planung der Untersuchungen in den Hauptarbeitspaketen 2 und 3 für die in Frage kommenden Klärschlämme und Aschen. Die logistischen Randbedingungen wurden für HA 4 „Entwicklung des GIS-Systems zur Standortwahl“ benötigt.

Hauptarbeitspaket 2 (HA 2) – „Optimierung Mono-Klärschlamm-Verbrennung mit Staubfeuerungstechnologie“

Im Hauptarbeitspaket 2 adaptierte das IKTS die in-situ-Aschemodifikation und die Heißgasfiltration für die besonderen Anforderungen der Mono-Klärschlammverbrennung in der Staubfeuerung. Dazu wurden die Verbrennungsversuche der Projektpartner analytisch begleitet, Stoff- und Volumenströme bewertet sowie Klärschlämme und Aschen hinsichtlich ihrer chemischen Zusammensetzung und Partikelgrößenverteilung charakterisiert. Die gewonnenen Daten dienten der Ableitung geeigneter Prozessfenster für eine stabile Verbrennung sowie für die Auslegung der nachgeschalteten Filtertechnik.

Im Labormaßstab wurden verschiedene Additive und Dosiermengen zur thermochemischen Modifikation der Aschen getestet, um eine wirksame Schwermetallreduktion unter den Bedingungen der Staubfeuerung zu ermöglichen. Parallel dazu wurden keramische Filtermaterialien entwickelt, charakterisiert und hinsichtlich Gegendruckverhalten, Trennleistung, Abreinigbarkeit, Korrosionsbeständigkeit und Thermoschockverhalten bewertet. Analog wurden auch kommerzielle Filterkerzen bewertet. Auf dieser Grundlage unterstützte das IKTS die Entwicklung und konstruktive Auslegung des Heißgasfiltermoduls, des Additivdosiersystems und des MSR-Konzepts für die Versuchsanlage. Die Module wurden in die bestehende Staubfeuerungsanlage integriert und im Rahmen erster Inbetriebnahme- und Leistungsfahrten unter realen Betriebsbedingungen erprobt. Anschließend bewertete das IKTS den Betrieb der Heißgasfiltration und der in-situ-Aschemodifikation anhand von Prozessdaten, Filterzuständen sowie chemischen, granulometrischen und pflanzenbaulich relevanten Eigenschaften der erzeugten Aschen.

Hauptarbeitspaket 3 (HA 3) – „Phosphorrecycling und Granulatproduktion“

Im Hauptarbeitspaket 3 begleitete das IKTS die Arbeiten zum Phosphorrecycling und zur Herstellung von Düngergranulaten analytisch und methodisch. Dazu wurden zunächst geeignete Messvorschriften und analytische Methoden für die Bewertung von Aschen, Zwischenprodukten und Düngergranulaten entwickelt, erprobt und in eine strukturierte Datenbasis überführt. Schwerpunkte lagen auf der chemischen Zusammensetzung, der Granulometrie sowie auf physikalischen Eigenschaften. Ergänzend wurden Versuchsstände zur Bewertung der Pflanzenverfügbarkeit und Phytotoxikologie konzipiert, aufgebaut und in Betrieb genommen. Die erzeugten Aschen aus der Staubfeuerung sowie die daraus hergestellten Zwischenprodukte und Düngergranulate wurden kontinuierlich analytisch begleitet und hinsichtlich ihrer Eignung als Düngemittel bewertet. Im weiteren Projektverlauf unterstützte das IKTS die Bewertung der Produkte aus den Verbrennungsversuchen durch

chemische, physikalische und biologische Untersuchungen. Zudem wurden relevante Analysedaten für die Vorbereitung einer möglichen Düngemittelzulassung zusammengestellt und vorgeprüft.

Hauptarbeitspaket 5 (HA 5) – „Bilanzierungen, Stakeholder und Vorbereitung Anschlussphase zur kommerziellen Umsetzung"

HA 5 umfasste die Prozessbewertung durch verschiedene Bilanzierungen sowie die Prüfung der Übertragbarkeit auf andere Regionen. Dazu wurden Stoff- und Energiebilanzen sowie ökologische und ökonomische Kennzahlen zusammengestellt, um die Grundlagen für die Ökobilanzierung zu schaffen.

Ergänzend führte das IKTS gemeinsam mit dem Partner VKD die Stakeholderanalyse und die Einordnung der beteiligten Akteure, ihrer Funktionen, Interessen und möglichen Einflüsse auf eine spätere Umsetzung durch. Die Ergebnisse wurden für die Vorbereitung und Auswertung von Stakeholder-Workshops genutzt. Zur Vorbereitung der Kommerzialisierung wurden die Ergebnisse mit den identifizierten Stakeholdern analysiert und diskutiert. Zur Einbeziehung aller Stakeholdergruppen wurde über die gesamte Projektlaufzeit ein Stakeholdermanagement mit regelmäßigen Workshops etabliert. Dieses wurde gemeinsam mit VKD durchgeführt. Ziel war die Bewertung der Gesamtprozesse unter Berücksichtigung der Reaktionen und Einschätzungen der Stakeholder.

Hauptarbeitspaket 6 (HA 6) – „Projektkoordination und Öffentlichkeitsarbeit"

In HA 6 waren alle Arbeiten zum strukturierten Informationsaustausch über gängige digitale Wege, zur öffentlichkeitswirksamen Präsentation sowie zur Projektkoordination und Planung der weiteren Arbeiten enthalten. Ziel dieses Hauptarbeitspaketes war es, die im Projekt entstandenen Ergebnisse zu bündeln, zu verteilen und zu koordinieren.

I.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Projektbeginn

Zu Projektbeginn war die thermische Klärschlammverwertung mit der Wirbelschichttechnologie bereits als etablierter Verfahrensweg zur Entsorgung und Verwertung kommunaler Klärschlämme anerkannt. Die Monoklärschlammverbrennung wurde dabei als wesentliche Grundlage für die spätere Phosphorrückgewinnung aus den entstehenden Aschen betrachtet. Gleichzeitig stellte die Schwermetallbelastung der Klärschlammaschen eine zentrale technische und wirtschaftliche Herausforderung dar. Erhöhte Schwermetallgehalte schränkten die direkte stoffliche Nutzung der Aschen deutlich ein und machten zusätzliche Aufbereitungsschritte erforderlich. Die vertiefende Bewertung zum Phosphorrecycling aus Klärschlamm wurde daher auf den Pfad der thermochemischen Konversion von entwässerten und/oder getrockneten Klärschlämmen konzentriert. In diesem Zusammenhang wurden durch die Projektpartner VKD und IKTS in der Konzeptphase die Verfahren der hydrothermalen Carbonisierung, Pyrolyse, Vergasung und Verbrennung einschließlich der zugehörigen Konfektionierungsprozesse sowohl technologisch als auch ökonomisch-ökologisch mittels Technologie- und Marktanalysen betrachtet. Die hydrothermalen Carbonisierung, Pyrolyse, sowie Vergasung konnten bislang aufgrund ungelöster Fragestellungen zur Reststoffnutzung sowie bestehender Betriebsprobleme nicht überzeugen. Insbesondere die Belastung der erzeugten Produkte (HTC-Kohle, Pyrolysekoks) mit Schadstoffen wie Schwermetallen oder polycyclischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK) steht einer späteren Verwertung entgegen. Darüber hinaus stellen Nebenprodukte wie HTC-Wasser oder bei der Vergasung entstehende Teere erhebliche Herausforderungen für einen wirtschaftlichen Betrieb dar (Vodegel und Müller 2017).

Im Rahmen der Vorbetrachtungen wurde deshalb die thermische Konversion mit anschließender Konfektionierung der Aschen zu hochwertigen und regional verwertbaren Düngeprodukten als wirtschaftlich und ökologisch zielführender Weg für die Region identifiziert.

I.4.1 Trocknung

In der ersten technischen Stufe, der Trocknung, erfolgt eine Reduzierung des Klärschlammvolumens, um die Transportkosten zu senken und den Klärschlamm für die Verbrennung vorzubereiten. Trockner für organische Reststoffe (Klärschlamm, Gärprodukte) werden nach dem heutigen Stand der Technik meist als Band-, Trommel-, Schubwende- oder Wirbelschichttrockner ausgeführt. Durch Kombinationen mit z. B. Heizkraftwerken oder Klärschlammverbrennungsanlagen können Synergien genutzt und die Energiekosten gesenkt werden. Daher ist im DreiSATS-Konzept die Kombination der Trocknung mit der Staubfeuerung vorgesehen.

I.4.2 Klärschlammverbrennung Wirbelschichtverbrennung und Staubfeuerung

In DreiSATS sollte die Staubfeuerungsanlagen mit geringeren Verbrennungskapazitäten (< 2.000 t_{TM}/a) erprobt werden. Die Technologiebewertung im Bereich der thermochemischen Verfahren zeigt, dass die stationäre Wirbelschichtfeuerung zurzeit das am weitesten verbreitete Verfahren zur thermischen Klärschlammbehandlung ist. Nach Gaderer und Spliethoff (2011) ist ein wirtschaftlicher Betrieb der Wirbelschichtverbrennung für Klärschlamm erst ab ca. 20.000 t_{TM}/a (entspricht 10 MW_{th}, ca. 4.000 Lkw-Ladungen) realisierbar. Bei kleineren Feuerungsleistung steigen die konstruktiven Aufwendungen bei z. B. Auskleidung der Brennkammer, was zu einer Steigerung der spezifischen Investitionskosten führt. Somit ist ein dezentraler Ansatz mit der Wirbelschichtverbrennungstechnologie wirtschaftlich kaum umsetzbar. Im Vergleich zur bisher standardmäßig genutzten Wirbelschicht sind Staubfeuerungsanlagen auch im kleinen Leistungsbereich von **<<**10 MWth wirtschaftlich betreibbar. Vorteile der Staubfeuerung sind die stufenlose Regelung der Feuerungsleistung und geringere Investitions- und Betriebskosten.

Ein aktuell großer Nachteil beider Verbrennungsverfahren ist die direkte Abhängigkeit der Aschequalität hinsichtlich der Schwermetallgehalte vom Inputstoffstrom Klärschlamm. Sind in den Klärschlämmen erhöhte Schwermetallgehalt, finden sich diese auch in den Aschen wieder. Durch die deutliche Massereduktion liegen die Schwermetallkonzentrationen in den Aschen über denen der Inputstoffe. Dies könnte zu einer Überschreitung von Grenzwerten führen, infolgedessen die Klärschlammaschen nicht weiterverwendet werden können bzw. einer nachgeschalteten kosten- und energieintensiven Schwermetallabtrennung unterzogen werden müssen.



Abbildung 6: Versuchsanlage Staubfeuerung Carbotechnik

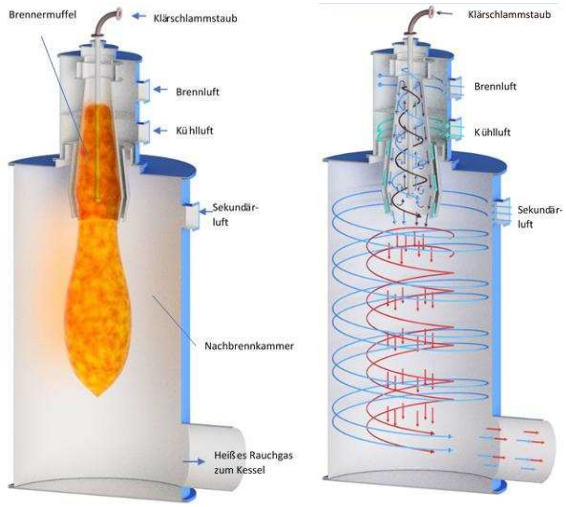


Abbildung 7: Funktionsprinzip Staubfeuerung Carbotechnik

Im Rahmen der sechsmonatigen Konzeptphase wurden erste Verbrennungsversuche an der Staubfeuerungsversuchsanlage des Projektpartners Carbotechnik (vgl. Abbildung 6) durchgeführt, um die prinzipielle Einsatzfähigkeit für DreiSATS zu prüfen. Es wurde zum einen die

Machbarkeit nachgewiesen, zum anderen konnten auf dieser Basis die Entwicklungsschwerpunkte für das geplante Projekt identifiziert werden. Bei den durchgeführten Versuchen trat ein weiterer wichtiger Vorteil der Staubfeuerung im Vergleich zur Wirbelschichtverbrennung zu Tage. Die Aschepartikel sind deutlich kleiner und die spezifische Oberfläche damit um den Faktor 10 größer. Durch die deutlich größere Oberfläche wird erwartet, dass zum einen die Schwermetallabtrennung in der Verbrennung als auch der spätere Säureaufschluss begünstigt wird, wodurch erhebliche Chemikalienmengen eingespart bzw. Reaktionszeiten infolge der höheren Reaktionsgeschwindigkeit verkürzt werden können.

Die Asche enthält darüber hinaus keine Störstoffe (Sand), die bei Wirbelbettverfahren in Folge von Austrag aus der Bettschicht oft zu finden sind und eine anschließende Verarbeitung aufgrund der abrasiven Wirkung erschweren. Durch diesen bei der Staubfeuerung nicht vorhanden Sandanteil in der Asche werden die Nährstoffe entsprechend weniger „verdünnt" und es reduziert sich die Aschemenge erheblich. Dies reduziert den Verarbeitungsaufwand und wirkt sich positiv auf die Wirtschaftlichkeit der P-Rückgewinnung aus. In der Umsetzungsphase erfolgten Untersuchungen dazu an der vorhandenen Pilot-Staubfeuerungsanlage der Fa. Carbotechnik (Durchsatz bis zu 1.000 kg/d) in Magdeburg.

I.4.3 Schwermetallreduktion während der Verbrennung

Das im Jahr 2015 durchgeführte Monitoring von Klärschlammverbrennungsaschen (Krüger und Adam 2014) sowie die Auswertung der vorhandenen Datensätze von Klärschlämmen der Region „Mitteldeutsches Dreiländereck" innerhalb der Konzeptphase haben gezeigt, dass bis zu 50 % der Aschen die Grenzwerte nach DüMV überschreiten. Da rechtlich ungeklärt ist, ob bereits die Aschen oder erst die Dünger die Grenzwerte einhalten müssen (Abfallrecht, Kreislaufwirtschaftsgesetzt etc.), mussten allein deshalb in DreiSATS geeignete Maßnahmen zur Schwermetallreduktion integriert werden. Neben dieser ungeklärten Rechtssituation ergibt sich diese Notwendigkeit zusätzlich auch aus dem Nachhaltigkeitsanspruch der DreiSATS-Konzeption.

Im Rahmen des Projektes DreiSATS sollte für die Staubfeuerung das zu etablierende Konzept der fraktionierten Heißgasfiltration das hohe Temperaturniveau der Verbrennung für thermochemische Reaktionen und die Ascheabscheidung direkt nutzen. Der Ansatz beruht auf der Trennung der gezielt erzeugten leicht flüchtigen Schwermetallverbindungen von der zu verwertenden Asche mittels keramischer Heißgasfilter. Im Rahmen eines abgeschlossen Projektes (Petasch et al. 2015; Schlotza et al. 2014) konnte die prinzipielle Machbarkeit des oben beschriebenen Ansatzes mit Hilfe eines Demonstrators im Technikumsmaßstab nachgewiesen werden. Durch die in-situ-Abtrennung der Schwermetalle kann der spezifische Energieverbrauch im Vergleich zu der nachgeschalteten Behandlung deutlich reduziert werden. Die Abtrennung von Staub (Partikeln) aus heißen Gasen >300 °C (bis ca. 850 °C) mit Heißgasfiltern ist bezüglich der generellen Auslegung und der Anlagentechnik im Zuge der Entwicklung von Kombi-Kohlekraftwerkstechnologien (PFBC = Pressurized Fluidized Bed Com-bustion bzw. IGCC = Integrated Gasification Combined Cycle) vorwiegend in den 1990er Jahren untersucht worden. Dies geschah vorrangig, um die Gasturbinen der Kombikraftwerke vor Flugstaub zu schützen, wodurch sich hohe Anforderungen an Reststaubgehalt und Gasreinheit (insbesondere Alkaligehalt) ergaben. Es konnte u. a. in einigen Versuchskraftwerksinstallationen gezeigt werden, dass die Gasreinigungstechnologie durch Filterkerzen und pulsierende Abreinigung mit Hilfe von Druckstößen technisch durchführbar ist (Überblick und weitere Literatur in (Voigt et al. 2013)). Keramische Filtermaterialien wurden im Rahmen u.a. von BMBF/BMWI-Projekten optimiert, um z. B. die Kriech- und Alkalienbeständigkeit bei hohen Temperaturen zu verbessern (Westerheide et al. 1999; Westerheide et al. 2003). Patente zu Werkstoff- und Verfahrensinnovationen aus dieser Zeit sind inzwischen freier Stand der Technik und können im Projekt bzw. bei einer späteren Verwertung genutzt werden. In den letzten Jahren wurde die Anwendung der Heißgasfiltration für unterschiedliche industrielle Verbrennungs- und Recyclingprozesse erfolgreich getestet und demonstriert (Heidenreich 2013). Jedoch erfordert die Übertragung der Heißgasentstaubung aus der Kraftwerkstechnologie auf andere Heißgasprozesse in

jedem Fall umfangreiche Versuche, Anpassungen und ggf. Weiterentwicklungen für die jeweiligen Staubeigenschaften, die Abreinigungssituation und die prozesstechnischen Randbedingungen. Erste Technikumserfahrungen zur Abtrennung und Rückgewinnung von Stäuben bei der thermochemischen Konversion von biologischen Stoffen zu Synthesegas wurden für die Anwendung der Heißgasfiltration in einem Wirbelschicht-Gaserzeuger beschrieben (Grove und Vodegel 2012). Anwendungshintergrund war die Trennung der entstehenden Aschen vom Produktgas und sich in der Gasphase bildenden Teerprodukten. Eine in-situ-Modifizierung der Aschen wurde dabei aber nicht angewendet. Im Rahmen des Fraunhofer-internen Großprojekts »Molecular Sorting« wurde am Fraunhofer IKTS die Machbarkeit einer Kombination der Klärschlammverbrennung mit der Modifizierung der Schwermetallverbindungen und deren Abscheidung mittels keramischer Filter erbracht.

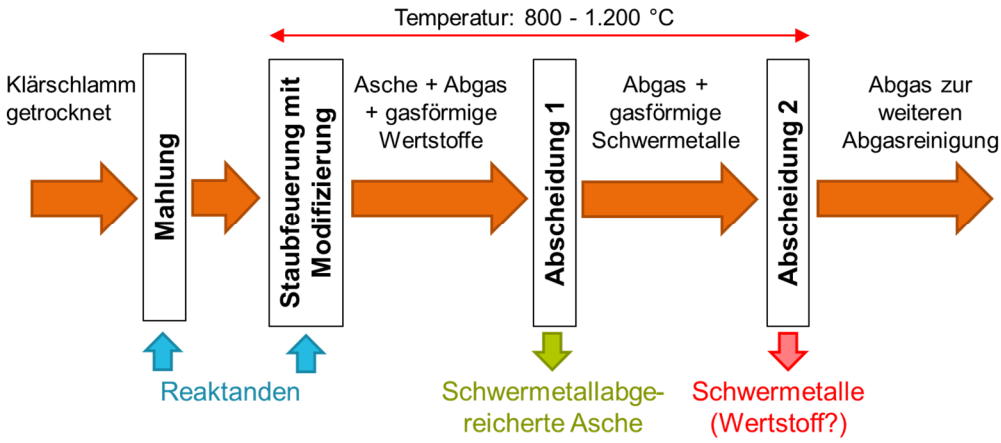


Abbildung 8: Schema Aschemodifikation und Heißgasfiltration

Das Prinzip der Stofftrennung basiert auf unterschiedlichen Flüchtigkeiten von Aschekomponenten im Heißgasbereich. Der methodische Ansatz besteht in der gezielten Erzeugung von leichtflüchtigen Schwermetallverbindungen, die bei den hohen Temperaturen der Feststoffverbrennung gasförmig gebildet werden und sich mittels keramischer Filterelemente von der Verbrennungsasche separieren lassen (vgl. Abbildung 8). Durch die in-situ-Heißgasfiltration zur Abtrennung der Schwermetalle im Verbrennungsprozess kann der spezifische Energieverbrauch auf <200 kWh/t Asche reduziert werden. Bei nachgeschalteter thermochemischer Behandlung der Aschen (z.B. AshDec-Verfahren) für die Schwermetallabscheidung ist der energetische Aufwand deutlich höher. Es konnte gezeigt werden, dass durch Zugabe von Additiven eine Reduzierung der Konzentrationen erzielt werden konnte (vgl. Abbildung 9).

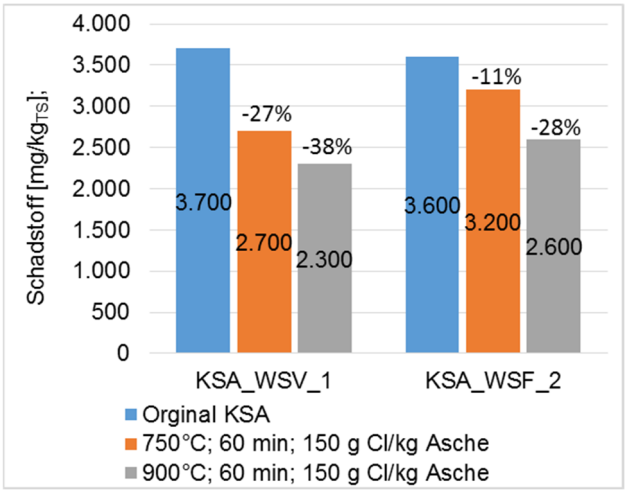


Abbildung 9: ZnO-Gehalte thermochemisch unbehandelter und behandelter Klärschlammaschen aus der Wirbelschicht



Abbildung 10: keramische Filterkerzen

Aufbauend auf den Ergebnissen erfolgte im Rahmen des Wachstumskerns abonocare® (FKZ 03WKDI) die Prozess- und Materialweiterentwicklung. Ziel dieser Entwicklungsarbeiten war die Erreichung von TRL 5, d. h. Funktionsnachweis der Technologie unter Einsatzbedingungen. Diese Ergebnisse bildeten die Grundlage für die Modulentwicklung zur Integration der in-situ- Heißgasfiltration zur Abtrennung von Schwermetallen in der Pilotstaubfeuerungsanlage (Erreichung von TRL 6) im Rahmen von DreiSATS.

Auf Grund der großen Oberflächen der Aschepartikel sowie des im Vergleich zur Wirbelschichtverbrennung geringeren Wassergehaltes im System (höherer Trockenrückstandsgehalt des Input-Materials, dadurch reduzierte Bildung von korrosiven Fluiden) bietet die Staubfeuerung ideale Voraussetzungen für den Einsatz dieser Technologie.

I.5 Aufzählung der wichtigsten wissenschaftlich-technischen Ergebnisse

Im Teilprojekt des Fraunhofer IKTS konnten wesentliche wissenschaftlich-technische Grundlagen für die Umsetzung der DreiSATS-Prozesskette erarbeitet und im Technikumsmaßstab validiert werden. Ein zentrales Ergebnis des Verbundprojektes DreiSATS war der Nachweis, dass getrocknete und gemahlene Klärschlämme in einer Staubfeuerung auch im kleinen Leistungsbereich stabil und lastflexibel verbrannt werden können. Damit wurde die grundsätzliche Eignung der Staubfeuerung für dezentrale Mono-Klärschlammverbrennungskonzepte bestätigt. Grundlage hierfür war die umfassende Charakterisierung einer breiten regionalen Klärschlammmatrix. Insgesamt wurden 20 Klärschlämme hinsichtlich verbrennungstechnischer Kennwerte, Elementzusammen-setzung, Schwermetallgehalte, Phosphorgehalte und Ascheverhalten untersucht. Die daraus abgeleiteten Daten bildeten eine belastbare Grundlage für die Auswahl geeigneter Einsatzstoffe, die Festlegung von Betriebsfenstern sowie die Bewertung der Übertragbarkeit auf weitere Standorte.

Für die in-situ-Aschemodifikation konnte das IKTS ein thermochemisches Konzept zur Schwermetallreduktion weiterentwickeln und gemeinsam mit den Partner LTC und Carbotechnik für die Staubfeuerung adaptieren. Durch die gezielte Zugabe geeigneter Additive während der Verbrennung werden flüchtige Schwermetallverbindungen gebildet, die anschließend über eine keramische Heißgasfiltration vom ascheführenden Gasstrom getrennt werden können. In Laboruntersuchungen wurden verschiedene Additive systematisch bewertet. Besonders chloridhaltige Additive, insbesondere Ammoniumchlorid, zeigten eine hohe Wirksamkeit zur Reduktion relevanter Schwermetalle wie Zink, Kupfer und Blei. Ergänzend wurden natriumhaltige Additive betrachtet, da sie neben der Schwermetallreduktion auch positive Effekte auf die Phosphorlöslichkeit der Aschen zeigen können und im Vergleich zu chloridhaltigen Additiven keine korrosiven Auswirkungen auf die Anlagentechnik der Verbrennung erwarten lassen. Daher erfolgte die Testverbrennung in der Technikumsverbrennungsanlage mit natriumhaltigen Additiven. Damit konnten wichtige Zusammenhänge zwischen Additivart, Additivmenge, Prozesstemperatur, Schwermetallentfrachtung, Anlagenverträglichkeit und späterer Pflanzenverfügbarkeit des Phosphors abgeleitet werden.

Parallel dazu wurden geeignete keramische Filtermaterialien für die Heißgasfiltration ausgewählt, untersucht und bewertet sowie entwickelt. Kommerzielle Filterkerzen aus Alumosilikatfasern zeigten aufgrund ihrer hohen Porosität, sehr guten Filtrationseffizienz und günstigen Gegendruckeigenschaften die beste Eignung für den Einsatz in der Staubfeuerungsanlage. Ergänzend wurden Siliciumcarbid-Filtermaterialien sowie angepasste Filterkonzepte betrachtet, um alternative Werkstoffe hinsichtlich Beständigkeit, Alterung und Betriebsverhalten bewerten zu können. Auf dieser Grundlage wurden mit LTC ein modulares Heißgasfiltersystem, ein Additivdosiersystem sowie ein Mess-, Steuer- und Regelungskonzept entwickelt und in die bestehende Staubfeuerungsanlage integriert. Die Module zur in-situ-Modifikation und Heißgasfiltration konnten aufgebaut, kalt und heiß in Betrieb genommen und unter realen Prozessbedingungen erprobt werden. Damit wurde ein wesentlicher technologischer Schritt vom Labor- und Technikumsmaßstab hin zum anwendungsnahen Demonstrationsbetrieb erreicht.

Ein wichtiger Beitrag des IKTS lag zudem in der Aufbereitung und Bereitstellung geeigneter Brennstoffe für die Demonstratorversuche. Da die Staubfeuerung ein staubförmiges Inputmaterial benötigt, wurden getrocknete Klärschlämme in größeren Mengen gemahlen und hinsichtlich ihrer Partikelgrößenverteilung bewertet. Die Untersuchungen zeigten, dass die ursprünglich sehr engen Zielvorgaben an die Brennstofffeinheit konservativer waren als erforderlich. Auch gröbere Fraktionen konnten im Impulsstaubbrenner stabil umgesetzt werden. Dies ist für eine spätere industrielle Anwendung von hoher Relevanz, da dadurch der notwendige Mahlaufwand, der Energiebedarf und die verfahrenstechnische Komplexität der Brennstoffaufbereitung reduziert werden können. Auf Basis der Mahl-, Verbrennungs- und Ascheuntersuchungen konnten geeignete Prozessfenster für eine stabile Verbrennung getrockneter Klärschlämme abgeleitet werden.

Neben der thermischen Konversion und Schwermetallreduktion wurden die erzeugten Aschen und Zwischenprodukte hinsichtlich ihrer Eignung für die Herstellung von Recyclingdüngern bewertet. In Verbindung mit dem pontes pabuli-Verfahren konnte gezeigt werden, dass die Aschen grundsätzlich zu marktfähigen Düngergranulaten weiterverarbeitet werden können. Das IKTS entwickelte und etablierte hierfür analytische Methoden zur Bewertung der chemischen Zusammensetzung, Phosphorlöslichkeit, Granulometrie und Produkteigenschaften.

Ein weiteres wesentliches Ergebnis betrifft die Aschecharakteristik der Staubfeuerung. Im Vergleich zur Wirbelschichtverbrennung entstehen deutlich feinere Aschepartikel mit höherer spezifischer Oberfläche und ohne störende Sandanteile. Diese Eigenschaften sind vorteilhaft für die nachgeschaltete Phosphorrückgewinnung, da sie Reaktionsgeschwindigkeiten beim Säureaufschluss begünstigen und den chemischen Aufbereitungsaufwand reduzieren können. Zugleich zeigte sich, dass die Phosphorgehalte der untersuchten Aschen grundsätzlich ausreichend hoch sind, um eine stoffliche Verwertung als Ausgangsmaterial für Recyclingdünger zu ermöglichen. Die Untersuchungen machten jedoch auch deutlich, dass die Schwermetallgehalte vieler Aschen ohne zusätzliche Behandlung die Anforderungen an eine düngemittelrechtliche Nutzung überschreiten können. Daraus ergab sich die Notwendigkeit, die im Projekt verfolgte in-situ-Schwermetallabtrennung direkt in den Verbrennungsprozess zu integrieren.

Ergänzend wurden am IKTS standardisierte Pflanzenversuche und Screeningmethoden entwickelt und aufgebaut, um die Pflanzenverfügbarkeit sowie mögliche phytotoxische Effekte der erzeugten Aschen, Düngemittelvor- und Düngeprodukte frühzeitig und vergleichbar beurteilen zu können. Hierfür wurden geeignete Bioassay-Ansätze, Tastversuche und Bewertungskriterien entlang der Produktentwicklung etabliert und mit chemisch-analytischen Kenngrößen, insbesondere der Phosphorlöslichkeit, verknüpft. In den Versuchen kamen speziell nährstoffarme Bodensubstrate zum Einsatz, wodurch Nährstoffeffekte der untersuchten Produkte gezielt erfasst und zugleich eine hohe Vergleichbarkeit zwischen einzelnen Versuchsreihen gewährleistet werden konnte. Die Untersuchungen umfassten unter anderem die Bewertung der Pflanzenentwicklung, sichtbarer Stresssymptome, Bedeckungsgrade, Frischmasseerträge und Entwicklungs-stadien der Versuchspflanzen im Vergleich zu mineralischen Referenzdüngern und Kontrollvarianten. Dadurch konnten Aussagen zur agronomischen Wirksamkeit der Recyclingprodukte sowie zur Verträglichkeit der erzeugten Aschen und Düngemittelvor- und Düngeprodukte abgeleitet werden. Mehrere Recyclingprodukte zeigten dabei eine mit mineralischen Referenzdüngern vergleichbare Wirkung und bestätigten die grundsätzliche Eignung der erzeugten Produkte für eine pflanzenbauliche Nutzung. Gleichzeitig konnte gezeigt werden, dass bei geeigneter Prozessführung keine relevanten phytotoxischen Effekte auftreten und die aufgebauten Screeningmethoden ein geeignetes Instrument zur prozessbegleitenden Bewertung und Optimierung der Düngemittelvorprodukte darstellen.

Zusätzlich wurden Stoff-, Energie- und Emissionsdaten für die Gesamtprozesskette erhoben und in ein harmonisiertes Bewertungsmodell überführt. Damit konnten Grundlagen für ökologische und ökonomische Bewertungen des DreiSATS-Ansatzes geschaffen werden. Die

Ergebnisse zeigen, dass insbesondere die Wärmeintegration, die Reduktion des Mahlaufwands, die dezentrale Anwendbarkeit der Staubfeuerung sowie die direkte Schwermetallabtrennung im Prozess wichtige Stellgrößen für eine spätere wirtschaftliche und ökologische Umsetzung darstellen. Insgesamt konnte das IKTS damit zeigen, dass die Kombination aus Staubfeuerung, in-situ-Aschemodifikation, keramischer Heißgasfiltration und anschließender Düngerherstellung einen technisch tragfähigen Ansatz für das regionale Phosphorrecycling aus Klärschlamm darstellt.

Ein weiterer Beitrag des IKTS lag im Stakeholdermanagement und in der Einbindung relevanter Akteure entlang der DreiSATS-Prozesskette. Gemeinsam mit dem Projektpartner VKD wurden Stakeholder aus Klärschlammerzeugung und -verwertung, Anlagen- und Verfahrenstechnik, Landwirtschaft, Düngemittelwirtschaft, Verwaltung und regionaler Wertschöpfung identifiziert, strukturiert eingeordnet und über Workshops sowie begleitende Austauschformate in die Bewertung des Verwertungskonzeptes eingebunden. Die Rückmeldungen bestätigten grundsätzlich das hohe Interesse an regionalen Phosphorrecyclinglösungen, verdeutlichten jedoch zugleich zentrale Anforderungen an eine spätere Umsetzung, insbesondere hinsichtlich Wirtschaftlichkeit, Genehmigungsfähigkeit, Produktsicherheit, Düngemittelqualität, Logistik und Akzeptanz bei potenziellen Anwendern. Aus dem Stakeholderprozess konnten damit wichtige Randbedingungen für die Weiterentwicklung der technischen Prozesskette, die Bewertung möglicher Betreibermodelle sowie die Vorbereitung einer Anschluss- und Kommerzialisierungsphase abgeleitet werden.

I.6 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Im Rahmen des Vorhabens hat IKTS eng mit den Projektpartnern zusammengearbeitet. Ergänzend erfolgten ein Austausch mit dem Begleitprojekt TransPhoR, der Deutschen Phosphor-Plattform sowie die Einbindung externer Dienstleister und relevanter Stakeholder entlang der Prozesskette.

II Eingehende Darstellung

II.1 Ergebnisdarstellung

II.1.1 Bewertung der Inputstoffe Klärschlamm und Klärschlammasche (Hauptarbeitspaket 1)

II.1.1.1 Charakterisierung Klärschlamme (AP1.1)

Ziel der Arbeiten war die Identifizierung, Auswahl und umfassende Charakterisierung regional verfügbarer Klärschlämme als Einsatzstoffe für Verbrennungs- und in-situ-Aschemodifikationsversuche. Hierfür wurden gemeinsam mit den Projektpartnern spezifische Anforderungen definiert, die sowohl feuerungstechnische Aspekte als auch Kriterien der Aschemodifikation, Heißgasfiltration und Phosphorrückgewinnung berücksichtigen.

Für die Auswahl von Klärschlämmen für die Versuchsdurchführungen wurde ein Anforderungsprofil aus Sicht der in-situ-Aschemodifikation und der Heißgasfiltration (u. a. Schwermetallgehalte, Eisengehalt, Korngröße, Dichte) sowie durch den Projektpartner Carbotechnik aus feuerungstechnischer Sicht (u. a. Glühverlust, Heizwert, Kornband) erarbeitet. Ergänzend wurden Anforderungen an den Phosphorgehalt formuliert. Weiterhin wurden relevante nationale und europäische Regelwerke (u. a. DüMV, EU-Verordnung 2019/1009, STRUBIAS-Kriterien) berücksichtigt.

Auf Basis des Anforderungsprofils identifizierte der Projektpartner VKD potenzielle Kläranlagen in Mitteldeutschland. Aus insgesamt 15 betrachteten Anlagen (sechs Kläranlagen aus Sachsen, drei aus Sachsen-Anhalt und sechs aus Thüringen) wurden zehn Klärschlämme für die Beprobung ausgewählt. Ergänzend dazu wurden im Projektverlauf aufgrund spezieller Eigenschaften zwei Klärschlämme aus Bayern (solargetrockneter Klärschlamm) und Berlin sowie darüber hinaus noch zusätzliche Klärschlämme verschiedener Herkunft in die Untersuchungen zur Klärschlammmatrix aufgenommen. Insgesamt wurden im ersten Hauptarbeitspaket 20 verschiedene Klärschlämme analysiert. Bei der Auswahl der Klärschlämme wurde gezielt auf eine große Spreizung hinsichtlich Schwermetallgehalt, Fällmitteln, Organikanteil, Brennwert, Phosphorgehalt sowie der Gehalte an CaO, Fe_2O_3 und Al_2O_3 geachtet.

Probennahme, Aufbereitung und Analytik

Die Probennahmen wurden gemeinsam mit VKD durchgeführt. Die Proben lagen als entwässerte oder getrocknete Klärschlämme vor und wurden für Analytik und Versuchsdurchführungen am IKTS weiter aufbereitet. Dazu erfolgten Trocknung (Trockenschrank bei 105 °C) und Mahlung mittels Kugelmühle. Die Probencharakterisierung erfolgte gemäß eines mit den Projektpartnern abgestimmten Analysenplans (Tabelle 1).



Abbildung 11: getrockneter Klärschlamm (links) und gemahlener Klärschlamm in Kugelmühle (rechts)

Tabelle 1: Probenspezifischer Analysenplan

Analyse		KS-entwässert		KS-getrocknet		KS-Asche		nstige P-reiche Sto		Düngerprodukte	
Feststoff		Standard	Optional	Standard	Optional	Standard	Optional	Standard	Optional	Standard	Optional
Trockenrückstand / Wassergehalt	% OS	x		x		x		x		x	
Glühverlust / oTR	% TR	x		x		x		x		x	
Glührückstand / Aschegehalt	% TR	x		x		x		x		x	
TC - Feststoff (Kohlenstoff - gesamt)	mg/kg TR	x		x		x		x		x	
PGV (Laserbeugung, Bildgebend)	µm		x		x	x			x		x
BET (Oberfläche)	m²/g				x		x				
Feststoffdicht					x		x		x		x
XRD (Phasenbestimmung)				x		x			x	x	
Elementeanalyse - Gesamtgehalte (As, Pb, Cd, Cr, CrVI, Cu, Ni, Hg, Tl, Zn)	mg/kg TR		x		x		x		x		x
Phosphor - gesamt	mg/kg TR		x		x	x		x		x	
Schwefel - gesamt	mg/kg TR		x		x	x		x		x	
Kohlenstoff - gesamt	mg/kg TR		x		x	x		x		x	
Entsorgungsnachweis Verbrennung (pH, Cl.-ges., S-ges. Flammpunkt, oberer Heizwert, Zn, Hg, Cd, Cu, Flour-ges., Brom-ges., Jod-ges.)			x		x		x		x		
Heizwert (unter)	kJ/kg	x		x				x			
Heizwert (oberer) = Brennwert	kJ/kg	x		x				x			
Ascheschmelzverhalten mittels DTA/TG	°C, kJ		x		x				x		
RFA/XRF - Elementanalyse (P, As, K, Pb, Ca, Cd, Na, Cr, Mg, Cu, Fe, Ni, Si, Hg, S, Zn)	Ma.-%, mg/kg		x		x		x		x		x
Nährstoffe und Nebenbestandteile gemäß DüngVO (Tab 1.1, 1.2 und 1.3)					x	x			x	x	
Schwermetalle gemäß DüngVO (1.4)					x	x			x	x	
P-Löslichkeiten		x			x	x		x		x	
Phytotox und Düngerwirkung			x		x	x			x	x	
Eluat			x		x		x		x		x
pH-Wert	-		x		x		x		x		x
Messtemperatur pH-Wert	°C		x		x		x		x		x
el. LF	µS/cm		x		x		x		x		x
Kationen	mg/L		x		x		x		x		x
Anion	mg/L		x		x		x		x		x
(Salzgehalt)	g/kg OS		x		x		x		x		x
DOC	mg/kg TS		x		x		x		x		x
Düngergranulat											
Düngerwirkung			x			x			x	x	
Bewertung mechanische Beanspruchung										x	

Zur einheitlichen Proben-, Analyse- und Versuchsdokumentation wurde eine projektübergreifend genutzte Datenbank mit eindeutiger Probenkennzeichnung eingerichtet. Die analytischen Untersuchungen umfassten u. a.:

- Schwermetall- und Phosphorgehalte,
- Haupt- und Nebenelementzusammensetzung,
- Partikelgrößenverteilungen,
- verbrennungstechnische Kennwerte (Trockenrückstand, Aschegehalt, Glühverlust, Heizwert, Brennwert),
- charakteristische Aschetemperaturen (Sinter-, Erweichungs-, Halbkugel- und Fließtemperatur).

Ergebnisse der Klärschlammmatrix

Insgesamt wurden 20 Klärschlämme detailliert analysiert und zu einer Klärschlammmatrix zusammengeführt, die im weiteren Projektverlauf als Entscheidungsgrundlage für die Auswahl der Einsatzstoffe für Verbrennungsversuche in der Staubfeuerungsanlage der Firma Carbotechnik diente. Die Ergebnisse zeigen eine ausgeprägte Heterogenität der Klärschlämme hinsichtlich Aschegehalt, Glühverlust, Heizwert und verbrennungstechnisch relevanter Temperaturen in Bezug auf das Verschlackungsverhalten der Aschen (siehe Abbildung 12).

Die Aschegehalte der untersuchten Klärschlämme liegen, mit Ausnahme eines Ausreißers von 53 %, zwischen 25 und 42 %. Es besteht eine umgekehrte Beziehung zwischen Aschegehalt und Heiz- bzw. Brennwert, die mit zunehmendem Aschgehalt abnehmen. Die Heizwerte der getrockneten Klärschlämme lagen meist zwischen 11,6 und 16,6 MJ/kg,

wobei der Klärschlamm mit dem höchsten Aschegehalt von 53 % hatte jedoch nur einen Heizwert von 6,7 MJ/kg. Die Aschen beginnen bei Temperaturen zwischen 860 °C und 1.000 °C zu sintern, haben ihre Erweichungspunkte aber erst oberhalb von 1.000 °C.

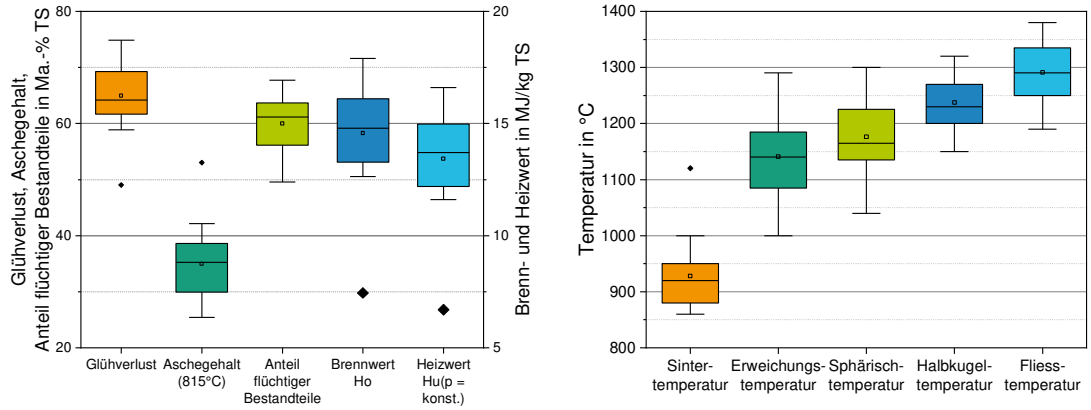


Abbildung 12: Wichtige verbrennungstechnische Eigenschaften (links) und relevante Erweichungs- und Schmelztemperaturen von Aschen (rechts) der Klärschlämme aus der Klärschlammmatrix

Die große Bandbreite der Eigenschaften der Klärschlämme (insbesondere bei Glühverlust, Aschegehalte und Heizwert) kann die Funktionsfähigkeit der Verbrennung beeinflussen. Deshalb wurden Klärschlämme mit unterschiedlichen Eigenschaften für großtechnische Verbrennungsversuche ausgewählt, um geeignete Betriebsfenster für die Staubfeuerungsanlage zu ermitteln. Besonders relevant für die großtechnischen Demonstratorversuche war darüber hinaus die Verfügbarkeit größerer Mengen eines getrockneten Klärschlammgranulats.

Auch bei der Elementzusammensetzung der mineralischen Inhaltsstoffe (Abbildung 13) wurden deutliche Unterschiede zwischen den Klärschlämmen festgestellt, die auf unterschiedliche Aufbereitungs- und Fällprozesse zurückzuführen waren. Zu den mittels Röntgenfluoreszenzanalyse bestimmten Hauptelementen mit den höchsten Gehalten gehörten neben Phosphor auch Eisen, Silicium, Calcium, Aluminium, Schwefel und Magnesium. Die P_2O_5-Gehalte lagen, bis auf zwei Ausreißer mit etwa 3,2 %, zwischen 5 und 7,6 %. Unter Berücksichtigung der Glühverluste ergaben sich daraus theoretische P_2O_5-Gehalte der abgeleiteten Klärschlammaschen von 6 bis 26 Ma.-%, die für eine potenzielle Nutzung der Aschen als Düngemittel sprechen. Weiterhin weißen die Klärschlämme noch hohe Gehalte an Eisen und Silicium auf, die allerding einen große Streuungen aufwiesen. Insbesondere die starken Unterschiede in den Fe_2O_3-Gehalten von 7 bis 39 Ma.-% weisen auf einen unterschiedlichen Einsatz von Fällmitteln in den Kläranlagen hin. Dies trifft auch auf die Schwankungen im Al_2O_3-Gehalt sowie auf CaO mit einem besonders hohen Ausreißer von 27,8 Ma-% zu.

Im Vergleich zu den Hauptelementen weisen die Schwermetalle nur Gehalte im ppm-Bereich auf, wobei Zink und Kupfer die höchsten Werte zeigen. Allerdings liegen die unter Berücksichtigung der Glühverluste theoretisch berechneten Schwermetallgehalte in den Aschen für die meisten untersuchten Klärschlämme insbesondere für Zn, Cu, Ni, As und Cd deutlich über den Grenzwerten der Düngemittelverordnung. Eine Nutzung ohne vorherige Schwermetallreduktion ist daher nicht möglich. Die Reduktion der Schwermetallfracht war daher ein zentrales Ziel des Projekts und sollte durch den Einsatz geeigneter Additive während der Klärschlammverbrennung in Kombination mit einer Abtrennung über Heißgasfiltration erreicht werden.

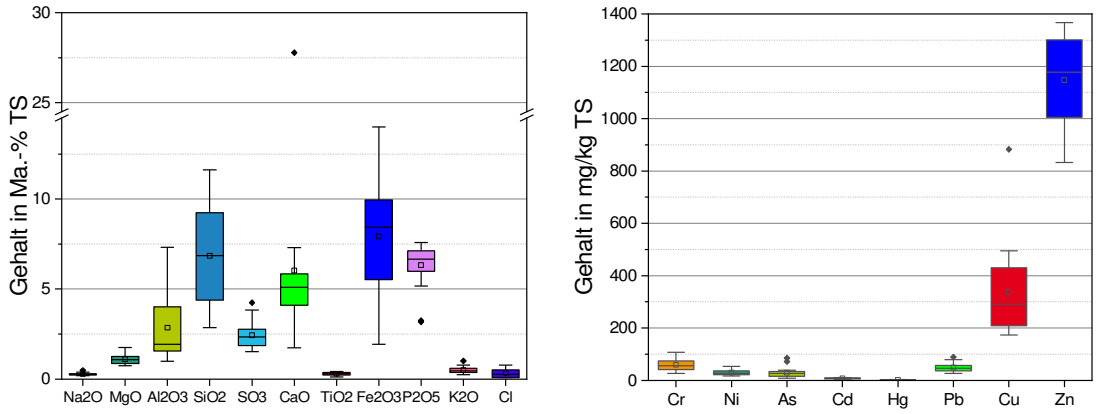


Abbildung 13: Spreizungsbreite der Hauptelement- (links) Schwermetallgehalte (rechts) in 20 Klärschlammproben aus der Klärschlammmatrix

II.1.1.2 Charakterisierung Klärschlammaschen und alternative Inputstoffe (AP 1.2)

Klärschlammaschen aus der Staubfeuerung

Zur Identifizierung der stofflichen und prozesstechnischen Randbedingungen für die spätere Aschemodifizierung wurde zu Beginn des Projekts eine vergleichende Untersuchung unterschiedlicher Aschen aus der Klärschlammverbrennung durchgeführt. Hierzu stellte der Projektpartner Carbotechnik Aschen aus der Staubfeuerung bereit. Ergänzend wurden Aschen aus der Wirbelschichtverbrennung beschafft. Die in AP1.1.1 beschriebenen Klärschlämme wurden im Labor verascht und ebenfalls in die Charakterisierung aufgenommen.

Ziel dieser Untersuchungen war es, Basisdaten von Aschen für die nachgeschaltete in-situ-Modifikation und Schwermetallreduktion zu ermitteln. Die Bewertung erfolgte anhand zentraler material- und prozessrelevanter Kenngrößen, insbesondere:

- Partikelgröße und Partikelgrößenverteilung,
- Elementzusammensetzung mit Fokus auf Schwermetalle und Phosphor,
- Phasenzusammensetzung der Aschen.

Die Aschen wurden laborseitig umfassend analysiert. Im Mittelpunkt standen dabei die regulierten Schwermetalle Kupfer, Zink, Chrom, Nickel, Cadmium, Quecksilber und Blei sowie der Phosphorgehalt als Zielkomponente für eine spätere Phosphorrückgewinnung.

Bei der Staubfeuerung bleibt der Hauptanteil an groben Aschepartikeln (bedingt durch die Rauchgasführung) in der Nachbrennkammer zurück, wohingegen die Partikelgröße entlang des Rauchgasweges in Richtung Staubfilter deutlich abnimmt. Ein ähnlicher Trend wurde auch bei Wirbelschichtaschen aus unterschiedlichen Entnahmepunkte im Rauchgasweg festgestellt. Bei den untersuchten Staubfeuerungsaschen lag der mittlere Partikeldurchmesser (d 0,5) in der Nachbrennkammer bei 85,7 µm, im Zyklon bei 16,9 µm und im Filter bei 4,6 µm. Die gröberen Aschepartikel aus der Nachbrennkammer und lassen sich im Heißgasfilter aufgrund ihrer geringen Eindringtiefe und guten Abreinigbarkeit effizient von der Filteroberfläche entfernen. Ein erhöhter Feinpartikelanteil ist hingegen kritisch, da feine Partikel zur Penetration der Filterwand neigen, was zu Porenverblockung, steigendem Differenzdruck und einer Verschlechterung der Filterabreinigbarkeit führt.

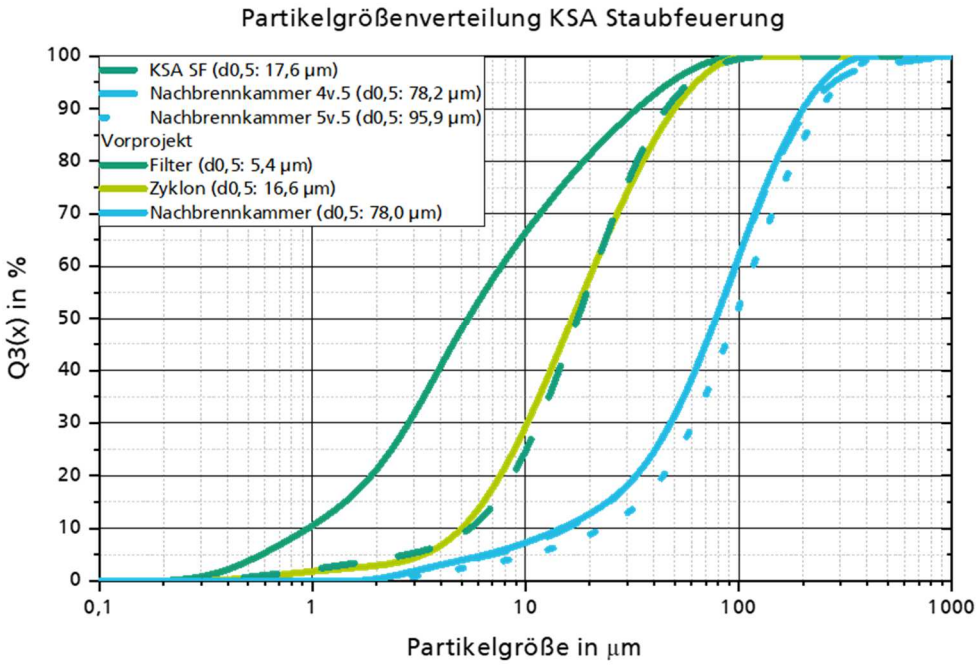


Abbildung 14: Partikelgrößenverteilung Asche aus der Staubfeuerung

Die Ergebnisse der Aschen aus der Wirbelschicht sowie der Staubfeuerung zeigen, dass die Elementgehalte ebenfalls deutlich vom jeweiligen Entnahmeort innerhalb der Abgasreinigung abhängen. Für Aschen aus der Staubfeuerung konnte beobachtet werden, dass die Gehalte an Chrom und Nickel vom Bereich der Nachbrennkammer über den Zyklon bis zum Schlauchfilter abnehmen, während die Konzentrationen von Arsen, Cadmium, Kupfer, Zink sowie Blei in gleicher Richtung ansteigen. Diese gegenläufige Verteilung weist auf unterschiedliche Abscheidemechanismen hin. Als wesentliche Einflussgrößen wurden die Temperatur entlang des Rauchgasweges sowie die mit den Anlagenteilen variierende Partikelgröße der Aschen identifiziert.

Bei Phosphor zeigte sich eine weitgehend homogene Verteilung über die verschiedenen Entnahmeorte hinweg. Für eine wirtschaftliche Phosphorrückgewinnung wird ein Phosphorgehalt von mehr als 10 Ma.-% in der Asche angestrebt, was bei den untersuchten Aschen grundsätzlich gegeben war. Neben Phosphor traten Silizium, Calcium, Magnesium und Eisen als weitere Haupt- bzw. Nebenbestandteile in relevanten Mengen auf. Der vergleichsweise hohe Aluminiumoxidanteil deutet darauf hin, dass bei der Klärschlammaufbereitung überwiegend Aluminiumsalze als Fällmittel eingesetzt wurden.

Auf Basis der durchgeführten Ascheanalysen konnte abgeleitet werden, dass eine gezielte Schwermetallreduktion insbesondere bei Aschen aus den ersten filternden Einheiten geeignet ist, um die gesetzlichen Grenzwerte zu unterschreiten. Aschen aus den nachgeschalteten, kälteren Anlagenteilen weisen hingegen deutlich höhere Schwermetallgehalte auf. Die durchgeführten Untersuchungen lieferten die Datenbasis für die Auslegung der in-situ-Modifikation sowie der Heißgasfiltration unmittelbar in der Verbrennungszone bzw. an der Nachbrennkammer.

Alternative Inputstoffe

Im Projektverlauf wurden verschiedene phosphorhaltige Reststoffströme hinsichtlich ihrer Eignung als Inputmaterial für die Staubfeuerung sowie für das Säureaufschlussverfahren (Pontes-Pabuli-Verfahren) bewertet. Auf Basis von Literaturrecherchen und Verfügbarkeitsanalysen wurden insbesondere Gärreste und Tiermehle als potenziell geeignete Einsatzstoffe identifiziert. Eigene Untersuchungen zeigen zudem, dass Hühnertrockenkot einen

hohen Phosphorgehalt aufweist. Die Phosphorgehalte von Gärresten variieren in Abhängigkeit vom eingesetzten Substrat der Biogasanlage und liegen nach eigenen Messdaten zwischen 13.000 und 25.000 mg/kg TS, während Kaliumgehalte von 20.000 bis 37.000 mg/kg TS bestimmt wurden. Hühnertrockenkot weist mit 22.000 bis 29.000 mg/kg TS nochmals höhere Phosphorgehalte auf. Diese Ergebnisse unterstreichen das Potenzial der genannten Reststoffströme für eine weiterführende stoffliche Verwertung.

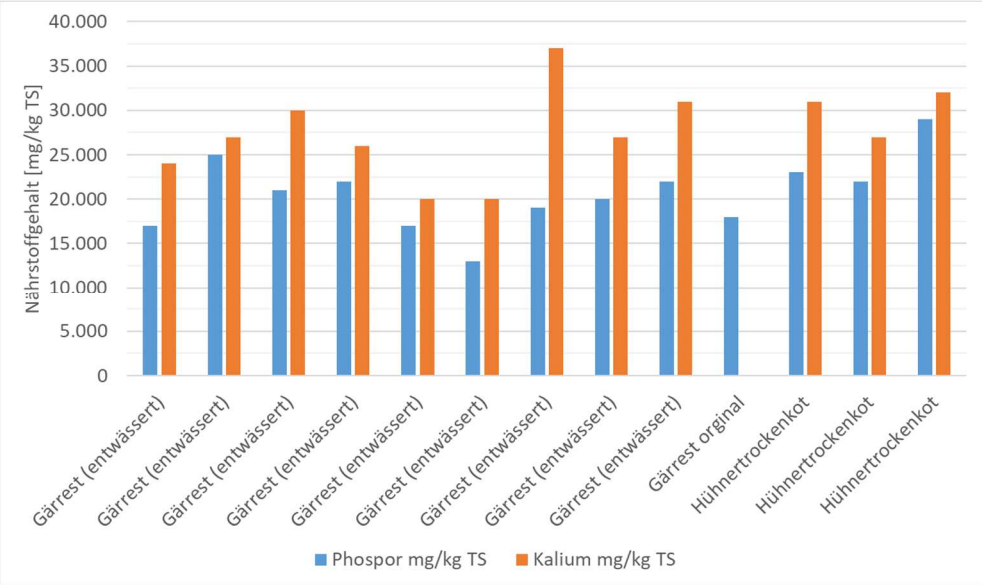


Abbildung 15: Phosphor- und Kaliumgehalte in Gärresten und Hühnertrockenkot

II.1.2 Adaption Staubfeuerung für die Mono-Klärschlamm-Verbrennung und in-situ-Modifikation und Schwermetallabtrennung (Hauptarbeitspaket 2)

II.1.2.1 Optimierung Mono-Klärschlamm-Verbrennung mit Staubfeuerungstechnologie (AP 2.1)

Im Rahmen des Arbeitspakets zur Adaption der Staubfeuerung für die Mono-Klärschlamm-Verbrennung wurden Untersuchungen zur Optimierung des Verbrennungsprozesses sowie zum Einfluss der Partikelgröße des Einsatzmaterials durchgeführt. Ziel war es, auf Basis von Verbrennungsversuchen an einer vorhandenen Pilotanlage zentrale Verfahrensparameter zu ermitteln, Stoff- und Volumenströme zu bewerten und deren Einfluss auf die resultierenden Ascheeigenschaften systematisch zu analysieren. Hierzu führte der Projektpartner Carbotechnik Verbrennungsversuche mit getrocknetem und gemahlenem Klärschlamm an der Pilotanlage Staubfeuerung durch, wodurch erste belastbare Erkenntnisse zum Betriebsverhalten der Anlage sowie zur Auslegung relevanter Komponenten und Bauteile gewonnen werden konnten.

Das eingesetzte Inputsubstrat sowie die im Verbrennungsprozess anfallenden Aschen wurden dem IKTS gemeinsam mit den zugehörigen Prozessdaten zur Verfügung gestellt und einer detaillierten stofflichen und granulometrischen Charakterisierung unterzogen. Die Untersuchungen umfassten insbesondere die chemische Zusammensetzung sowie die Partikelgrößenverteilungen der Klärschlämme und Aschen. Auf dieser Grundlage konnten Zusammenhänge zwischen Durchsatz, Luftführung und Temperaturregime sowie der resultierenden Aschebeschaffenheit abgeleitet werden. Die gewonnenen Erkenntnisse wurden zudem für die Konzeption und Auslegung der in-situ-Modifikation und der nachgeschalteten Heißgasfiltration herangezogen und dienten der Festlegung relevanter Zielgrößen für die Klärschlammmahlung.

Im Rahmen des Arbeitspakets wurden durch das IKTS umfassende Untersuchungen zur Mahlung getrockneter Klärschlämme durchgeführt, da die Partikelgröße des Einsatzstoffes einen maßgeblichen Einfluss auf die Prozessstabilität der Staubfeuerung sowie auf die nachgeschaltete Aschemodifikation und Heißgasfiltration hat. Insbesondere ist für einen stabilen und reproduzierbaren Verbrennungsprozess die Bereitstellung eines feinkörnigen, definierten Kornbandes erforderlich.

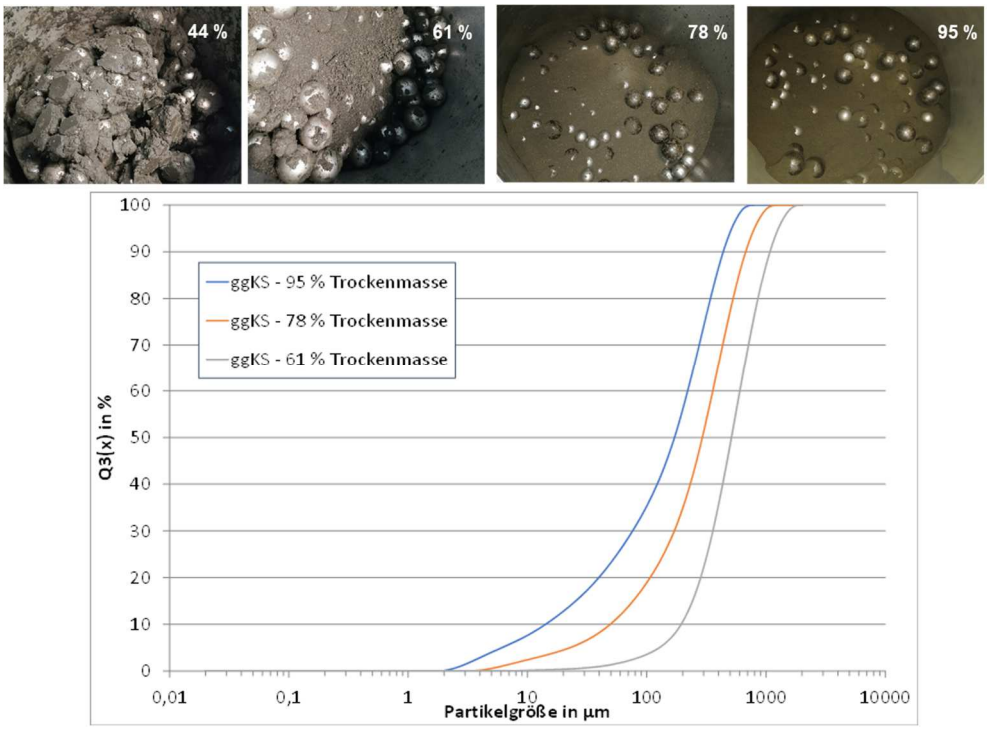


Abbildung 16: Mahluntersuchung zur Bewertung des Trocknungsgrads Klärschlamm

Zur Ermittlung geeigneter Aufbereitungsstrategien wurden im IKTS-Labor Mahlversuche mit einer Kugelmühle durchgeführt. Ziel dieser Untersuchungen war es, zentrale Prozessparameter der Klärschlammmahlung zu identifizieren und deren Einfluss auf die erreichbaren Partikelgrößen zu bewerten. Ein besonderer Fokus lag dabei auf dem Einfluss des Wassergehaltes der getrockneten Klärschlämme, da dieser sowohl das Mahlverhalten als auch den Energieeintrag und den Verschleiß der Mahlaggregate maßgeblich beeinflusst.

Durch gezielte Variationen der Mahlparameter, insbesondere der Kugelgrößenzusammensetzung und der Mahldauer, konnte gezeigt werden, dass bei einer Mahldauer von etwa 60 min und einer Kugelzusammensetzung aus 10, 20 und 30 mm Partikelgrößen unterhalb von 100 µm erreicht werden können. Dabei zeigte sich, dass der Trocknungsgrad des Klärschlamms einen maßgeblichen Einfluss auf das Mahlergebnis hat, wobei optimale Ergebnisse bei Trocknungsgraden von etwa 95 % erzielt wurden. Die resultierenden Partikelgrößenverteilungen bildeten eine wesentliche Grundlage für die Ableitung geeigneter Prozessfenster sowohl für den Verbrennungsprozess als auch für die nachgeschaltete Filtration.

Für die in-situ-Modifikation war vorgesehen, das Additiv in die Dosierkammer einzubringen und gemeinsam mit dem Klärschlamm ein Wirbelbett zu erzeugen, um eine homogene Durchmischung zu erreichen und das Gemisch anschließend über den Brennkopf einzudüsen. Voraussetzung hierfür ist, dass Additiv und Klärschlamm hinsichtlich ihrer stofflichen und partikelphysikalischen Eigenschaften möglichst ähnlich sind. Zur initialen Bewertung wurden beim Projektpartner Carbotechnik Untersuchungen zum Entmischungsverhalten von Additiv und Klärschlamm durchgeführt. Dabei zeigte sich, dass ohne eine vorherige Aufbereitung der Additive eine ausgeprägte Entmischungserscheinungen auftrat. Der Dichteunterschied zwischen Ammoniumchlorid und Klärschlamm ist mit 1,52 g/cm³ bzw. 1,64 g/cm³ gering und kann als vernachlässigbar angesehen werden, sodass die Partikelgröße als dominierender Einflussfaktor identifiziert wurde. Aus diesem Grund wurden am IKTS gezielte Mahlversuche an Additiven und an Mischungen aus Klärschlamm und Additiv (z. B. NH_4Cl) durchgeführt. Durch die Anpassung der Partikelgrößen konnte die Entmischungsneigung deutlich reduziert werden.

II.1.2.2 In-situ-Modifikation und Heißgasfiltration zur Schwermetallabscheidung (AP 2.2)

Heißgasfiltration

Um geeignete Filtermaterialien und Prozessparameter für die Anwendung der Heißgasfiltration im Technikumsmaßstab abzuleiten, wurden Untersuchungen zur Auswahl des Filtermaterials sowie zur Optimierung von Heißgasfilterwerkstoffen durchgeführt. Dabei wurde eine hohe Gasdurchlässigkeit (hohe Porosität, passende Porengröße, geringe Wandstärke) der Filter bei gleichzeitig hoher Filtrationseffizienz sowie ausreichender mechanischer Stabilität angestrebt. Zu diesem Zweck wurden verschiedene kommerzielle Filterelemente bezüglich der Gegendruck- und Filtrationseigenschaften analysiert und bewertet. Dabei handelte es sich um Faserkeramikkerzen der Firma Rath aus Aluminiumsilikat-Wolle (ASW) sowie um SiC-Kornkeramikfilter der Fa. Pall Corporation. Einen Überblick der Materialeigenschaften gibt Tabelle 2.

Tabelle 2: Eigenschaftsdaten kommerzieller Heißgasfiltermaterialien

	ASW	**SiC**	**SiC/Membran**
Membran	ohne	ohne	Al_2O_3-Fasern
Temperatur	1.000 °C	1.000 °C	1.000 °C
Porosität	97,9 %	32,7 %	36,6 %
Porendurchmesser	48,0 µm	11,6 µm	99,7 / 8,0 µm
Biegefestigkeit	0,9 MPa	28,9 MPa	18,5 MPa

Die Filtrationseigenschaften der kommerziell verfügbarer Filtermaterialien wurden anhand von Bestaubungsversuchen in einem Laborprüfstand unter Verwendung von synthetischem

Ruß als Referenzstaub bewertet. Dabei zeigte sich ein unterschiedliches Filtrationsverhalten (hohe initiale Effizienz bei Faserfiltern bzw. Membranfiltern versus ein zeitabhängige Zunahme der Filtrationseffizienz beim SiC-Substrat ohne Membran), das in Abbildung 17 für die verschiedenen Filtermaterialien zu erkennen ist. Sowohl bei dem Faserfilter als auch beim SiC-Filter mit Membran liegt die Filtrationseffizienz über den gesamten Bestaubungszeitraum nahe 100 %. Jedoch sinkt die Effizienz des Membranfilters mit steigender Zeit geringfügig ab, was auf einen Durchtritt einzelner Partikel durch die Membranwand und den Filter hindeutet. Dagegen zeigt der SiC-Filter ohne Membran zu Beginn der Bestaubung eine deutlich niedrigere Fitrationseffizienz, die durch eine Tiefenfiltration und teilweisen Durchbruch der Partikel durch den Filter hervorgerufen wird. Im Verlaufe der Zeit kommt es zur Ablagerung der Partikel auf der Filterwand mit Ausbildung eines Filterkuchens. Dieser filtert feinere Partikel und bewirkt eine Verbesserung der Filtrationsleistung. Die Effizienz steigt mit der Zeit an und weniger Partikel können nach dem Filter detektiert werden. Aus diesen Untersuchungen eignen sich die zwei erstgenannten Filter besser für den Einsatz in der Staubfeuerungsanlage, da bei diesen Materialien keine Tiefenfiltration auftritt, die zu einer verringerten Permeabilität und Erhöhung der Gegendrucks der Filter in der Anwendung führt.

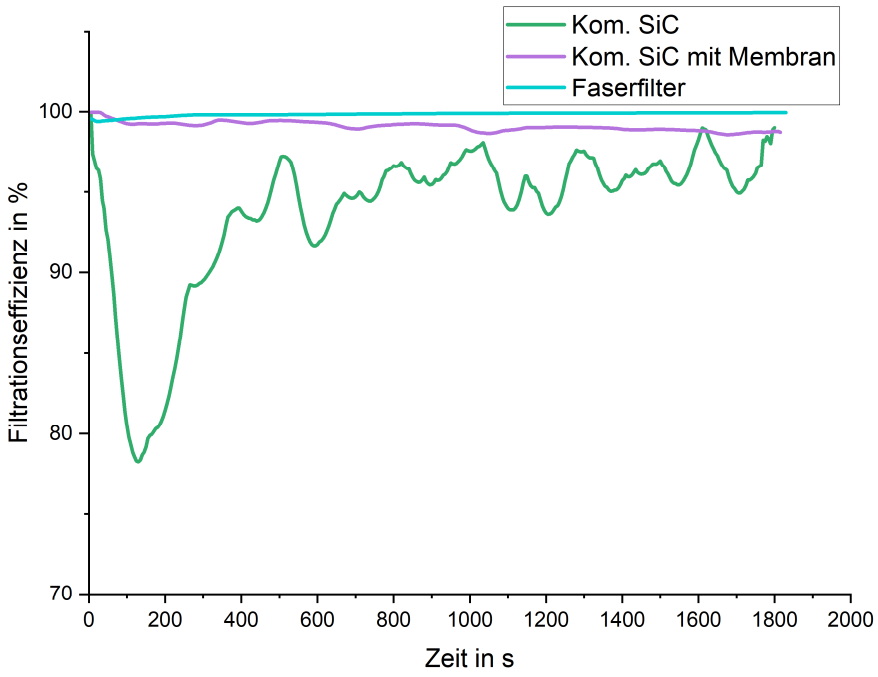


Abbildung 17: Filtrationseffizienz verschiedener Filtermaterialien

Der weitere Vergleich der Filtereigenschaften zeigt, dass die Biegefestigkeit des Faserfilters deutlich geringer als bei den SiC-Filtern ist, wohingegen die SiC-Filter in den Bestaubungsversuchen wesentlich höhere Gegendrücke als der Faserfilter zeigten. Aus diesem Grund wurden Versuche zur Entwicklung von SiC-Filtern mit verbesserten Gegendruckeigenschaften vorgenommen. Dazu wurden tongebundene SiC-Materialien mit verschiedenen Porosierungsmitteln hergestellt, prozessbegleitend charakterisiert und hinsichtlich Porosität, Porendurchmesser und Biegefestigkeit analysiert, um robuste Kandidaten für den filtertechnischen Einsatz zu identifizieren. Die Herstellung erfolgte durch isostatisches Pressen von Rohrsegmenten (siehe Abbildung 18). Charakteristische Kennwerte der entwickelten Materialien, wie Porosität, Porendurchmesser und Biegefestigkeit, sind in Tabelle 3 zusammengefasst.



Abbildung 18: Probenrohre im Ofen nach Sinterung unter Luftatmosphäre

Die Ergebnisse zeigten, dass Porenbildner die Gesamtporosität zwar erhöhen können, dies jedoch häufig mit Festigkeitsverlusten und/oder Porenvergröberung einhergeht. Als günstige Kompromisskandidaten wurden u. a. Mischungen identifiziert, die eine Porositätssteigerung bei begrenzter Festigkeitsreduktion erlauben, während sehr stark porositätssteigernde Porenbildner mit deutlich reduzierter Festigkeit als weniger geeignet bewertet wurden.

Tabelle 3: Einfluss der Porosierungsmittel auf verschiedene Werkstoffeigenschaften

Porosierungsmittel	**Biegefestigkeit**	**Porosität**	**Porendurchmesser***
	MPa	%	µm
IKTS-Referenzmaterial ohne Porenbildner	26,4	33,78	14,52
Zellulose mikrokristallin	20,5	40,84	17,34
Strohfaser	8,2	49,00	26,00 (192,27)
Kokosnussgranulat	10,9	20,44	13,95 (90,59)
Kokosnussschalenmehl	6,8	48,58	24,01 (119,56)
Attapulgit	40,5	29,90	19,50 (85,56)
Lignin	17,1	34,62	14,53 (32,85)
Polyamid	17,5	40,68	16,01 (82,03)
Polyamid grob	24,6	48,06	21,31
Olivenkernmehl	1,3	56,05	47,98
Benzoguanamin-formaldehyd	15,8	40,56	14,52
Attapulgit	40,5	29,90	19,50
Attapulgit + Polyamid (60/40)	24,1	35,63	16,01

*in Klammern sind die maximal auftretenden Porendurchmesser angegeben

Für die praktische Auslegung des Filtersystems wurde das Gegendruckverhalten gezielt herangezogen, da dieses einen direkten Einfluss auf die erforderliche Lüfterleistung sowie den stabilen Anlagenbetrieb hat. Hierzu wurden unterschiedliche Filtermaterialien vergleichend bewertet und die Ergebnisse der Druckverlustmessungen zur Auswahl einer geeigneten Erstbestückung genutzt. Dabei zeigten kommerzielle Faserfilter aufgrund der Kombination aus sehr hoher Porosität und großen Poren ein besonders günstiges Gegendruckverhalten (Abbildung 19).

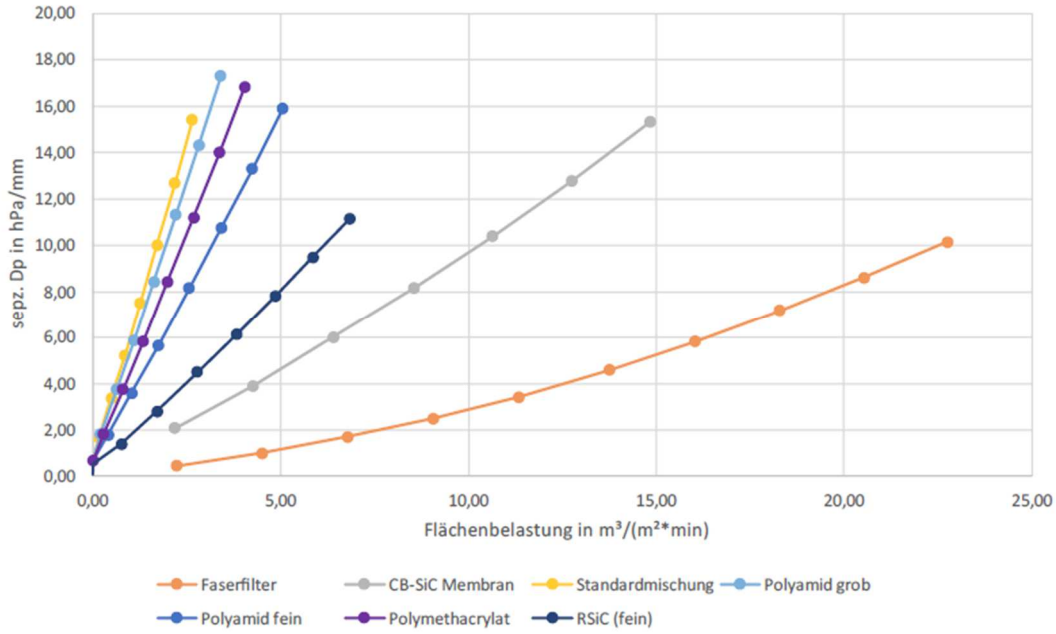


Abbildung 19: spezifischer Gegendruck verschiedener Filtermaterialien bei variierender Filterflächenbelastung

Die am IKTS entwickelten Materialien besitzen durchgängig einen höheren Gegendruck als die kommerziellen Filtermaterialien (siehe Abbildung 19). Dieser wird zwar mit Porositätserhöhung gesenkt, bleibt aber auch für die besten Materialien über dem Niveau kommerzieller SiC-Filter. Durch den mit Abstand niedrigsten Gegendruck und die ebenfalls besten Filtrationseffizienz kann für die Staubfeuerungsanlage abgeleitet werden, dass Faserfilter aus Aluminiumsilikat-Wolle grundsätzlich am besten für den vorgesehenen Einsatz geeignet sind. Entsprechend wurde gemeinsam mit dem Projektpartner LTC die Integration dieses Filtertyps angestrebt. Dabei sollte aber auch die Integration von alternativen Filtermaterialien in das zu entwickelnde Heißgasfiltermodul möglich sein.

Für die praktische Betriebsführung und Übertragung auf den Demonstrator wurden schließlich Parameter zur Abreinigbarkeit und zur Abreinigungssteuerung abgeleitet (u. a. Druck der Abreinigungsluft, Ventilöffnungszeit, Online-Abreinigung). Dazu wurden am IKTS unter Labor- und Technikumsbedingungen Voruntersuchungen zur Heißgasfiltration von Aschen aus der Staubfeuerung durchgeführt, um Prozessparameter für die spätere Übertragung auf eine größere Versuchsanlage abzuleiten und zugleich das Reinigungs- bzw. Abreinigungsverhalten relevanter Stäube und Aschen zu charakterisieren. Versuche mit Aschen aus der Staubfeuerung am Heißgasprüfstand konnten zunächst nicht im geplanten Umfang umgesetzt werden, da die Bereitstellung ausreichend großer Aschemengen als Voraussetzung für belastbare Technikumsversuche verzögert war. Zur Inbetriebnahme- und Funktionsabsicherung der Heißgasfiltrationsanlage am IKTS wurden daher vorab standardisierte Bestaubungsversuche mit einem Calciumcarbonat-Referenzstaub durchgeführt. Dabei wurde ein standardisiertes Calciumcarbonat-Pulver bei 250 °C und einem Volumenstrom von 30 B.m³/h auf fünf keramische Faserfilterkerzen aus Aluminosilikatfasern aufgegeben. Im Versuch wurden 2 kg Staub gefahren (Rohgas-Staubkonzentration 21,5 g/B.m³; Filterflächenbelastung 0,56 m³/(m² min)) und ein maximaler Kerzengegendruck von 8,37 hPa ermittelt, der nach Druckluftabreinigung auf 1,62 hPa und damit auf Anfangsniveau abgesenkt werden konnte.

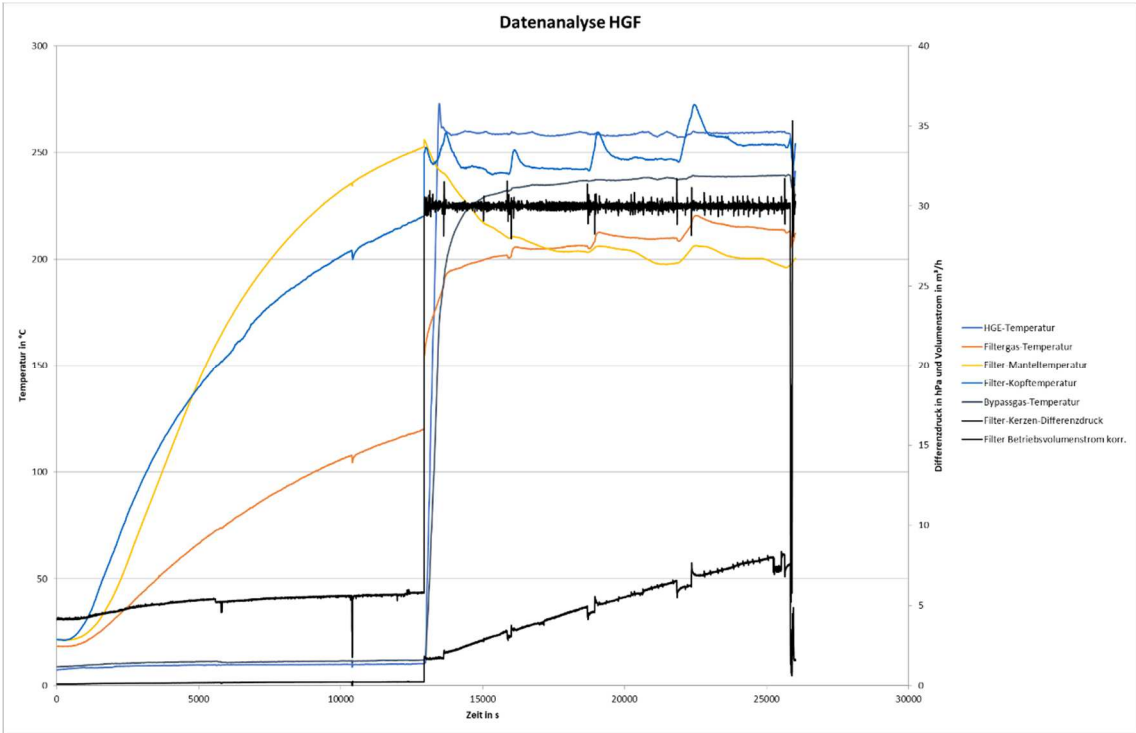


Abbildung 20: Verlauf der Bestaubung von fünf keramischen Heißgasfaserfilterkerzen mit Calciumcarbonat

Weiterführende Versuche mit Aschen aus der Staubfeuerung bei variierenden Temperaturen lieferten Hinweise, dass mit steigender Temperatur die Rückgewinnungsrate der Asche sinken kann und dass eine Erhöhung des Druckstoßes sowie eine Verlängerung der Ventilöffnungszeit positive Effekte auf die Reinigung erwarten lässt. Daraus wurden Start- bzw. Richtwerte für die Inbetriebnahme (u. a. Mindestvordruck der Abreinigungsluft, Versorgungsdruck und Ventilöffnungszeit) abgeleitet, mit dem Hinweis, dass eine finale Parametrierung im realen Heißgasfilter während Inbetriebnahme und Dauerbetrieb festzulegen ist (Abbildung 21).

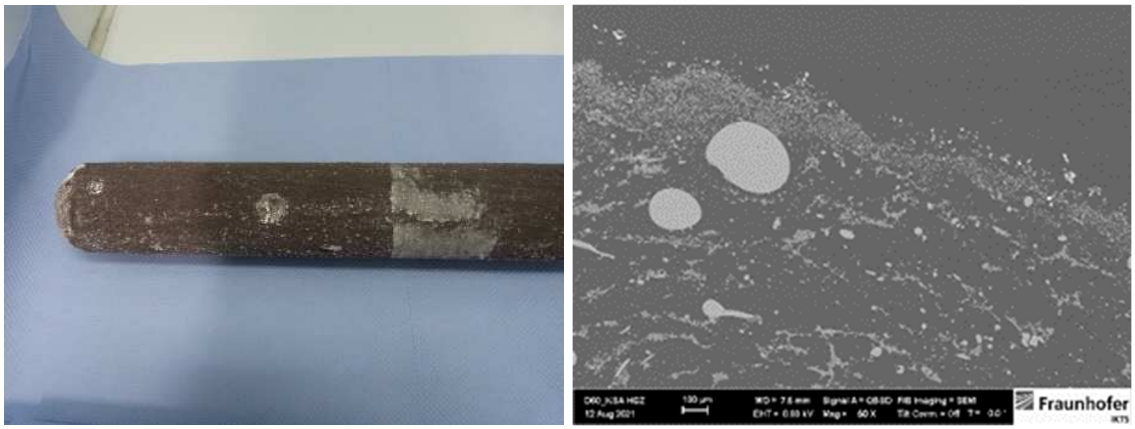


Abbildung 21: mit Asche bestaubte Faserfilterkerzen (links) und mit Asche belegte Faserkerze als FESEM-Aufnahme (rechts)

Insgesamt konnten damit charakteristische Ergebnisse zum Reinigungs- und Filtrationsverhalten (Referenzstaub und Staubfeuerungsasche) sowie abgeleitete Prozess und Auslegungsparameter ermittelt werden, die als Grundlage für die Skalierung und den Betrieb der Heißgasfiltration im Technikums- bzw. Demonstratormaßstab dienen.

Theoretische Vorbetrachtungen zur in-situ-Modifikation und Heißgasfiltration: Das Prinzip der in-situ-Modifikation

Das Prinzip der Schwermetallreduktion von Aschen setzt unterschiedliche Flüchtigkeiten von Schwermetallverbindungen und dem zu recycelnden Phosphor sowie wichtigen Mineralstoffen voraus. Dabei besteht die Herausforderung bei prozessrelevanten Temperaturen (zwischen 500 °C und 900 °C) nahezu alle Schwermetalle in die Gasphase zu überführen, Phosphor und wichtige Mineralstoffe nicht zu verflüchtigen und diese durch gezielte Filtration der Feststoffe aus dem Abgasstrom auszutragen. Eine geeignete Technik hierfür ist die Heißgasfiltration, die bis ca. 1.000 °C (aktueller Stand der Technik) eingesetzt werden kann. Durch diese Technik wird der heiße Abgasstrom von den Partikeln befreit, in denen sich die Wertstoffe befinden. Schwermetalle können in gasförmiger Form den Filter passieren, sodass die Asche von diesen gereinigt ist. Im weiteren Verlauf der Abgasstrecke erfolgt dann die Kondensation der Schwermetalle und flüchtigen Bestandteile.

Die Erzeugung leichtflüchtiger Schwermetallverbindungen ist von der Temperatur (Prozesstemperatur des Klärschlammfeuerungsraumes und der Filtrationstemperatur), der Atmosphäre (oxidativ, reduzierend) und der Zugabe von Hilfsmittel (Additive) zur Erzeugung leichtflüchtiger Verbindungen abhängig. Aus der Literatur sind bereits einige Veröffentlichungen und Versuche zur Reduzierung der Schwermetalle in Klärschlammaschen oder von Aschen aus anderen Verwertungsprozessen bekannt (siehe Adam et al. 2009; Vogel und Adam 2011; Lorenz 2018; Schnell 2023). Als besonders effektiv haben sich in verschiedenen Arbeiten chlorhaltige Additive herausgestellt (z.B. $MgCl_2$ und $CaCl_2$). Die Zugabe von Alkali- und Erdalkalichloriden zu Klärschlammaschen und Klärschlämmen führt bei ausreichender Erhitzung zur Schwermetallreduktion. Durch die Reaktion der schwerflüchtigen Oxidphasen der Schwermetalle mit dem in den Additiven enthaltenen Chlor bilden sich Schwermetall-Chloride, die bei einer Wärmebehandlung einen wesentlich höheren Gleichgewichtsdampfdruck besitzen als die Oxide. Daraus resultiert die bessere Verflüchtigung und Schwermetallreduktion der Asche.

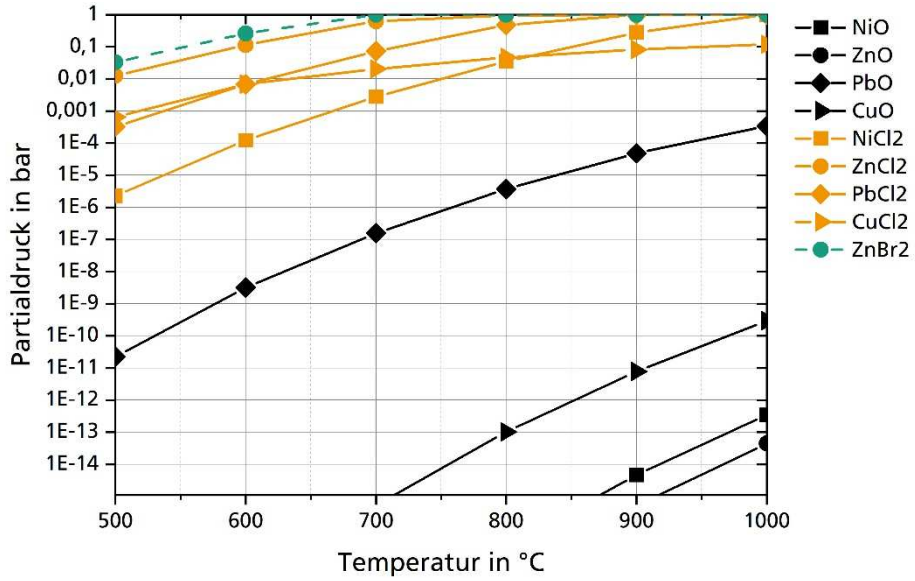


Abbildung 22: Änderung des Partialdruckes von Schwermetallverbindungen in Abhängigkeit der Temperatur

Durch thermodynamische Gleichgewichtsberechnungen können Verflüchtigungsvorgänge modellhaft berechnet und dargestellt werden. Für theoretischen Vorbetrachtungen zum Verdampfungs- und Reaktionsprozess der Schwermetalle mit Additiven wurde das Thermodynamik-Berechnungsprogramm FactSage verwendet. In Abbildung 22 sind die berechneten Gleichgewichtsdampfdruckkurven der Schwermetalloxide Ni, Zn, Pb und Cu sowie deren Chloride bei einem Umgebungsdruck von 1 bar in Abhängigkeit der Temperatur dargestellt. Die Kurven zeigen, dass die Überführung des Zinkoxides in ein Zinkhalogenid

einen starken Anstieg des Partialdruckes um mehr als 15 Größenordnungen bewirkt. Aus den thermodynamischen Berechnungen geht hervor, dass $ZnCl_2$ ab ca. 750 °C vollständig verdampft wird, da ab dieser Temperatur der Partialdruck den Umgebungsdruck von 1 bar erreicht. Als Vergleich ist die Dampfkurve für $ZnBr_2$ mit angegeben. Bromide können auch zur Verflüchtigung bei geringerer Temperatur führen, wie aus dem Vergleich der chlorhaltigen mit der bromhaltigen Kurve hervorgeht. Für Nickel und Kupfer wird der Partialdruck von 1 bar im angegebenen Temperaturbereich nicht erreicht. Blei ist bei ca. 900 °C als Chlorid-Verbindung vollständig verdampft.

Additivgestützte Asche-Modifikation

Um den Additiveinsatz für eine in-situ-Schwermetallabtrennung zu bewerten und eine belastbare Entscheidungsgrundlage für die spätere Anwendung im Technikums- und Anlagenmaßstab zu schaffen, wurden systematische Untersuchungen zur Modifikation von Aschen aus der Staubfeuerung durchgeführt. Die Arbeiten umfassten die experimentelle Testung der Reaktion zwischen Additiv und Klärschlamm sowie die Evaluation notwendiger Additivmengen anhand der chemischen Charakterisierung der Verbrennungsprodukte (Aschen) mit und ohne Modifizierung.

Als Ausgangspunkt wurden Erkenntnisse aus Vorarbeiten, einer Literaturstudie und thermodynamische Betrachtungen genutzt, um potenziell geeignete Additive inklusive ihres Temperaturverhaltens und sicherheits-/ handhabungsrelevanter Hinweise zusammenzustellen (siehe Tabelle 4). Daraus resultierten ausgewählte halogenidhaltige Additive, die für Laboruntersuchungen an einer Modellasche und Klärschlamm verwendet wurden. Zu diesen zählen: $MgCl_2$, $CaCl_2$ NaCl, NH_4Cl, KBr, NaBr, $MgBr_2$, NH_4Br und eine Mischung aus $MgCl_2$ und $CaCl_2$. Für vergleichende Untersuchungen wurden zusätzlich $NaHCO_3$, Na_2CO_3 sowie Na_2SO_4 verwendet. Die natriumhaltigen Additive wurden in die Untersuchungen mit aufgenommen, um hier den Einfluss auf die Pflanzenverfügbarkeit und Schwermetallreduktion zu untersuchen.

Tabelle 4: Liste von möglichen Additiven mit zugehörigem Temperaturverhalten und wichtigen Hinweisen

Additiv	**Schmelz- / Verdampfungs-temperatur**	**Reindichte [g/cm³]**	**Hinweise**
Calciumchlorid	Schmelzen ab 772 °C	2,15	• nicht staubexplosionsfähig • akute chronische Gesundheitsgefahr • bildet an Luft $CaCO_3$ (hygroskopisch)
Magnesiumchlorid	Schmelzen ab 712 °C	2,32	• nicht hygroskopisch • Schmelzpunkt Hexahydrat bei schneller Erhitzung 118 °C à Zersetzung
Natriumchlorid	Schmelzen ab 801 °C	2,16	• Explosionsgefahr bei Kontakt mit Alkalimetallen (jedoch selten)
Ammoniumchlorid	Sublimation ab 338 °C	1,52	• hygroskopisch • Selbstentzündung > 400 °C • Risiko der Ammoniakabspaltung
Natriumsulfat	Sublimation ab 890 °C	n.b.	• nicht staubexplosionsfähig • Selbstentzündung > 400 °C • Explosion von Aluminium mit Natrium- oder Kaliumsulfat
Natriumcarbonat	Schmelzen ab 854 °C	2,54	• nicht staubexplosionsfähig • Verdampfen ab 1.800 °C
Kaliumbromid	Schmelzen ab 732 °C	2,75	• Hygroskopisch • nicht staubexplosionsfähig
Natriumbromid	Schmelzen ab 755 °C	3,20	• schwach hygroskopisch • reagiert mit starken Oxidationsmitteln unter Freisetzung von Brom

Additiv	**Schmelz- / Verdampfungs-temperatur**	**Reindichte [g/cm³]**	**Hinweise**
Magnesium-bromid	Schmelzen ab 711 °C	3,72	• stark hygroskopisch • nicht staubexpolosionsfähig
Ammonium-bromid	Sublimation ab 452 °C	2,43	• hygroskopisch • nicht staubexpolosionsfähig

Auf Basis dieser Vorauswahl wurde abgeleitet, dass für die Staubfeuerung insbesondere Additive mit Sublimationsverhalten (zur Vermeidung von Schmelzbildung und möglicher Flammen-/ Betriebsstörung) vorteilhaft sind. Deshalb wurden für vertiefende Untersuchungen Ammoniumchlorid und Natriumsulfat in die engere Auswahl genommen, darüber hinaus aber auch Additive, die erst bei höheren Temperaturen schmelzen (u. a. Natriumchlorid, Magnesiumchlorid, Natriumcarbonat) mit einbezogen. Für die Dosierung/ Förderung (Fluidisierung) sind granulometrische Kenngrößen und Dichteunterscheidung entscheidend, um Entmischung von Additiv und Klärschlamm im Dosierer der Staubfeuerung zu reduzieren. Die Reindichten der relevanten Additive wurde mittels Helium-Pyknometrie bestimmt und mit dem Mittelwert der Klärschlämme aus der Matrix (1,64 g/cm³) verglichen.

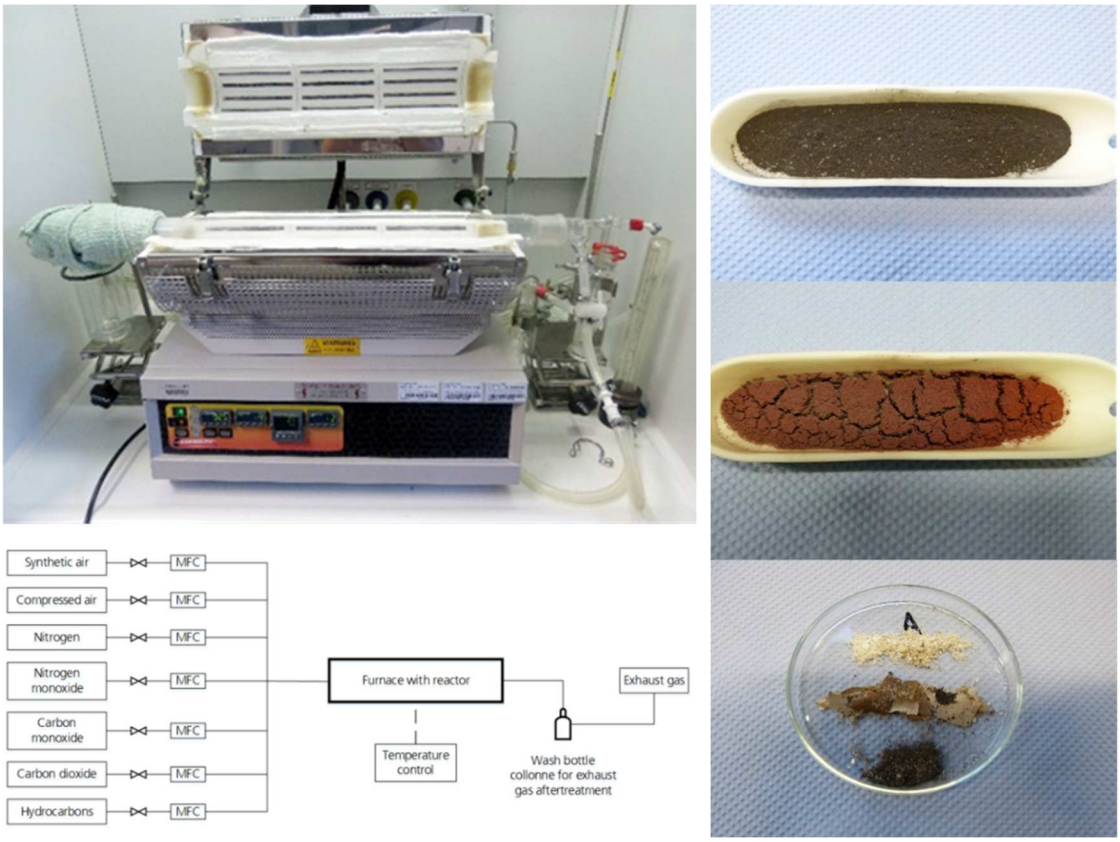


Abbildung 23: Klapprohrofen (links), Probenschiffchen mit Asche und Additiv vor und nach einem Sublimationsversuch (rechts)

Zur Beurteilung der Schwermetallabreicherung wurden Verbrennungs-/ Sublimationsversuche im Laborreaktor am IKTS durchgeführt. Als Reaktor diente ein Rohrofen (Carbolite), in dem ein mit Klärschlamm-Additiv-Gemisch oder Klärschlammasche-Additiv-Gemisch befülltes Aluminiumoxidschiffchen im Trägerrohr erhitzt wurde. Die Aufheizung erfolgte exemplarisch mit einer Temperaturrampe von 5 K/min bis 900 °C und einer Haltezeit von 1 h, während kontinuierlich Druckluft über die Probe geleitet wurde. Aufbauend auf den

ersten Laboransätzen wurde eine strukturierte Versuchsmatrix aus Additivart, Additivmenge und Verbrennungstemperatur untersucht. Die Additivzugabe wurde für chlorhaltige Systeme über den Chlorgehalt bezogen auf die Klärschlammmasse eingestellt (u. a. 50 / 100 / 150 / 200 g Cl pro kg Klärschlamm), während Natriumcarbonat-Mischungen auf Basis des zuvor mittels RFA bestimmten P_2O_5-Gehalts mit einem Verhältnis von $Na_2CO_3 : P_2O_5 = 70 : 30$ angesetzt wurden. Die Temperatur wurde im Rahmen der Untersuchungen variiert und lag unter anderem bei 350, 850, 900 und 1.000 °C.

Zur Validierung der aus thermodynamischen Vorbetrachtungen abgeleiteten Hypothesen zur Schwermetallabtrennung wurde in einem ersten Iterationsschritt Klärschlammaschen aus einer Monoverbrennung mit den Additiven gemischt und bei 900 °C und einer Haltezeit von 60 min verascht. Abbildung 24 zeigt die prozentuale Reduktion der Schwermetallgehalte bezogen auf eine nachträglich verbrannte Asche ohne Additivzugabe. Die untersuchten chloridhaltigen Additive zeigten eine gute Wirksamkeit zur Reduktion von Pb, Cu und Zn, während Ni und Cr nur geringfügig beziehungsweise nicht reduziert wurden. KCl und $MgCl_2$ erwiesen sich als wenig effektiv, wohingegen NaCl, $CaCl_2$ und insbesondere NH_4Cl hohe Entfrachtungsraten aufwiesen. Bromhaltige Additive sowie natriumhaltige Additive zeigten insgesamt eine geringere Wirksamkeit bei der Modellasche. Durch den Einsatz von KBr und NaBr konnte jedoch eine Absenkung der Ni- und Cr-Gehalte erzielt werden, was mit den getesteten Chloriden nicht möglich war. Bei natriumhaltigen Additiven ist die Schwermetallreduktion auf Festkörperreaktionen mit einem Austausch von Metallionen zurückzuführen.

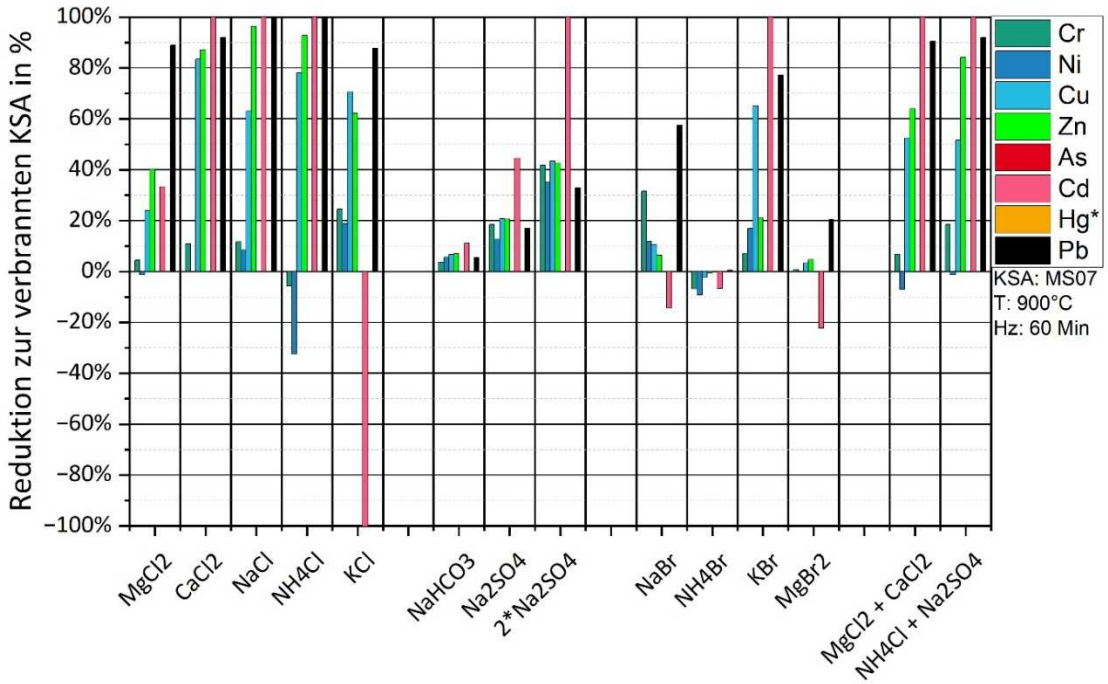


Abbildung 24: Reduktion Schwermetallgehalt nach Sublimationsversuchen mit verschiedenen Additiven zur in-situ-Schwermetallreduktion (* Hg in Asche ohne Additiv unterhalb Nachweisgrenze).

Die anschließenden Versuche mit Klärschlamm dienten der Verifizierung der getroffenen Additivauswahl sowie der weitergehenden Untersuchung der Zusammenhänge zwischen Klärschlammzusammensetzung, Prozesstemperatur, Additivzugabe, Schwermetallreduktion und Phosphorlöslichkeit. Für das Screening wurden definierte Dosiermengen an Chlorid pro Kilogramm Klärschlammasche sowie ausgewählte brom- und natriumhaltige Additive eingesetzt. Im Folgenden werden ausgewählte Ergebnisse kurz dargestellt.

Wie in Abbildung 25 zu erkennen, führt die Erhöhung der Temperatur von 350 °C auf 900 °C nur marginal zu einer Reduktion des Schwermetallgehaltes und damit zum Unterschreiten des Grenzwertes. Bei 1.000 °C ohne Additivzugabe treten unterschiedliche

Wechselwirkungsmechanismen auf, welche zu einer leichten Erhöhung der Schwermetallkonzentration führt. Wird Additiv hinzugegeben (NH_4Cl mit 150 g Cl/kg Klärschlamm), kann der Grenzwert für Zn und Cu deutlich unterschritten werden. Jedoch werden Pb und Ni nicht reduziert und auch der Cr-Wert zeigt keine positive Entwicklung. Wird der Additivanteil von 50 auf 200 g Cl/kg Klärschlamm erhöht, zeigt auch der Wert für Pb eine Reduktion unterhalb des Grenzwertes und auch Cu kann deutlich reduziert werden (siehe Abbildung 26).

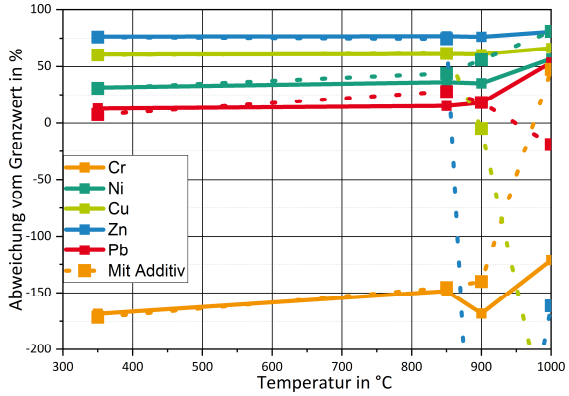


Abbildung 25: Temperaturvariation beim Verbrennungsversuch eines Klärschlamms im Laborreaktor zur Schwermetallentfrachtung (Versuch mit Additiv 150 g Cl/kg Klärschlamm, verwendet: NH_4Cl)

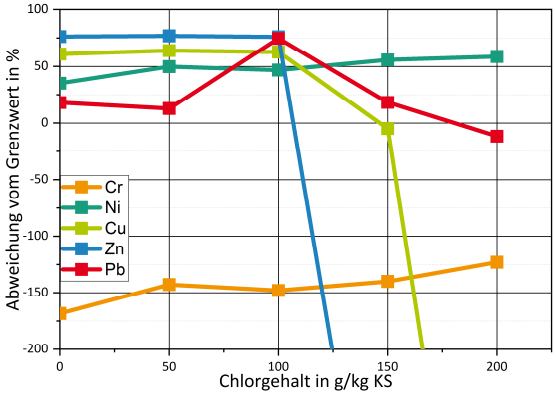


Abbildung 26: Einfluss des Chlorgehalts auf die Schwermetallentfrachtung bei 900 °C

Andere untersuchte Additive zeigen nur eine begrenzte Wirkung und sind wesentlich schlechter in der Reduktion als Ammoniumchlorid. Das kostengünstige, aber Schlacke bildende NaCl zeigt gute Reduktion bei Cr und Zn, hat jedoch in der gleichen molaren Konzentration wie das NH_4Cl Defizite beim Ni, Cu und Pb. $MgCl_2$ und Na_2CO_3 können den Ni-Anteil reduzieren, zeigen jedoch Probleme beim Zn und Cu. Eine Mischung aus NH_4Cl und Na_2CO_3 schien daher eine mögliche Alternative zu sein, jedoch war auch hier das Reduktionspotential begrenzt.

Aus den Laborversuchen wurde Ammoniumchlorid als Additiv abgeleitet, das gute Entfrachtungsraten der Schwermetalle ermöglichen kann. Jedoch geben die Laborversuche mit eingesetzten Additivmengen von 150 g Cl/kg Klärschlamm nur eine prinzipielle Orientierung für die im Verbrennungsversuch an der Staubfeuerungsanlage auftretenden Reduktionspotentiale. Bei der Verbrennung im Brennkopf des Staubbrenners herrscht ein deutlich höheres Temperaturniveau, das eine besseren Entfrachtung der Schwermetalle erwarten lässt, wodurch die notwendige Additivmenge zur Reduktion deutlich gesenkt werden kann.

Bei den Laborversuchen musste aufgrund der Ofenauslegung eine Temperaturrampe gefahren werden, die 5 K/min beträgt. Durch die Sublimation des NH_4Cl bei 338 °C steht eine große Menge Chlor der Reaktion mit dem Schwermetall nicht mehr zur Verfügung. Daher war eine deutliche Überdosierung bei den Laborversuchen erforderlich. Stöchiometrisch sind ca. 5 g Chlor pro kg Klärschlamm (abhängig vom Schwermetall und Konzentration) notwendig. In der Staubfeuerung wird Additiv und Klärschlamm zusammen in die Flamme eingegeben. Da die sehr hohen Temperaturen direkt vorliegen wird eine Verminderung des Additiveinsatzes erwartet. Zusätzlich durch Brenngutführung mit Additivzugabe sowie durch die Einführung von Sekundärluft kommt es zu einer starken Durchmischung der Inputstoffe, was der Schwermetallentfrachtung zuträglich ist. Daher wird für die Verbrennungsversuche mit der Staubfeuerungsanlage eine weitaus geringere Additivmenge zur signifikanten Schwermetallreduktion erwartet. Hierfür wurden im Labormaßstab orientierende Versuche bei maximal möglicher Temperatur zur Absenkung der

Additivmenge durchgeführt. Diese bestätigen, dass bei einer direkten Temperaturbereitstellung Zink und Blei schon bei geringeren Zugabemengen von 50 g Chlor pro Kilogramm getrocknetem Klärschlamm in vergleichbarem Maße reduziert werden.

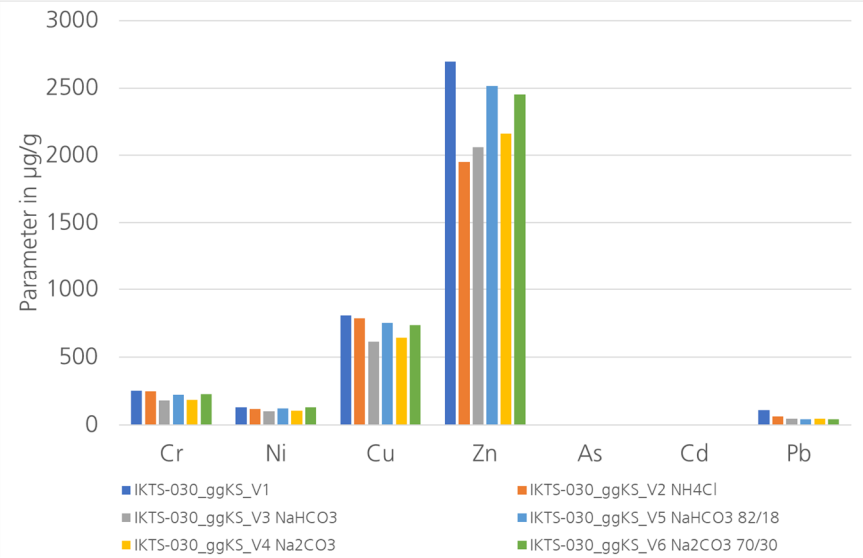


Abbildung 27: Schwermetallreduktion am Klärschlamm IKTS030 durch Verwendung von verschiedenen Additiven (Temperaturrampe, 900 °C, 1 h Haltezeit)

Da chlorhaltige Additive in der Staubfeuerung zu korrosiven Abgasen führen können wurden ergänzend zu Untersuchungen zur Wirksamkeit von Additiven auf die Aschemodifizierung und Ascheeigenschaften am Klärschlamm IKTS030 der Additiveinfluss auf die Schwermetallreduktion, Phasenbildung und Phosphorlöslichkeit im Zusammenhang bewertet. Dazu wurden Aschen aus Laborverbrennungsversuchen mit den Additiven NH_4Cl, Na_2CO_3 und $NaHCO_3$ herangezogen. Die Verbrennungsversuche erfolgten unter strömender Luftatmosphäre mit einer Temperaturrampe von 5 K/min von Raumtemperatur bis 900 °C und einer Haltezeit von 1 Stunde bei der maximalen Temperatur, wobei sich die in Abbildung 27 dargestellten Schwermetallgehalte in den Aschen ergaben.

Im Vergleich zur unmodifizierten Asche zeigte NH_4Cl deutliche Verringerungen der Schwermetallfracht bezogen auf Zink und Blei. Ähnliche Werte wurden bei der jeweils höheren Zugabe von Na_2CO_3 und $NaHCO_3$ erreicht. Zusätzlich wurden dabei aber auch die Gehalte an Chrom, Nickel und Kupfer gesenkt, so dass die Reduktionsergebnisse insgesamt noch besser als bei NH_4Cl ausgefallen sind. Da in beiden Aschen erhöhte Gehalte an Natrium festgestellt wurden, liegt die Ursache dafür neben der Schwermetallabreicherung auch in Verdünnungseffekten.

Bei gleicher Natriumzugabe wies Natriumbicarbonat gegenüber Natriumcarbonat eine etwas bessere Schwermetallreduktion auf. Auch auf die nach der CAL-Methode bestimmte Phosphorlöslichkeit haben die Natriumadditive einen positiven Einfluss. Dabei gilt für beide Additive, dass eine höhere Natriumzugabe zu einer besseren Phosphorlöslichkeit führt (siehe Abbildung 28), wobei sich $NaHCO_3$ (high) als besonders wirkungsvoll herausstellte. Bei einer Na-Zugabe von P : Na = 46 : 54 ist die Phosphorlöslichkeit mit 61 % der maximalen Löslichkeit deutlich besser als bei Na_2CO_3 mit nur 11 %. Die unmodifizierte Asche und die Aschen mit NH_4Cl- bzw. niedrigen Na_2CO_3- und $NaHCO_3$-Zugaben liegen dagegen bei unter 5 % Phosphorlöslichkeit.

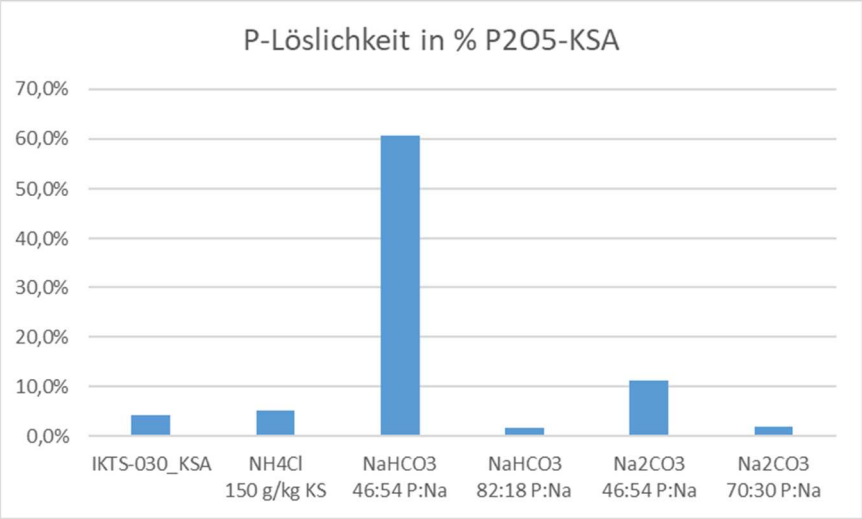


Abbildung 28: Phosphorlöslichkeit (Phosphate in Lösung) für verbrannten Klärschlamm IKTS030 mit und ohne Additiv

Als Ursache für die Unterschiede in der Phosphorlöslichkeit wurden die kristallographischen Phasenzusammensetzungen der modifizierten Aschen identifiziert. Dieses wurden mittels Röntgenbeugung bestimmt und sind in Tabelle 5 dargestellt. Die Klärschlammasche ohne Additivzugabe enthält als Hauptphasen Hämatit (Fe_2O_3) und Quarz (SiO_2). Als Phosphate lassen sich Aluminiumphosphat ($AlPO_4$) und Ca/Mg/Fe-Phosphate mit Whitlockit-Struktur identifizieren. Darüber hinaus enthält die Asche Anhydrit ($CaSO_4$), Ca(Fe, Al, Mg)-Silikat und Calcite ($MgCaCO_3$). Die Zugabe von $NaHCO_3$ und Na_2CO_3 jeweils in der high-Variante verändert die Aschezusammensetzung dahingehend, dass in signifikanten Mengen Phosphate mit eingebautem Natrium entstehen (Whitlockit-Struktur: NaCaMg-Phosphat und $Ca_9MgNa(PO_4)_{18}$; $Na_{18}Ca_{13}Mg_5(PO_4)_{18}$). Diese führen laut Literaturangaben zu einer Erhöhung der Phosphorlöslichkeit. Besonders ausgeprägt ist dieser Effekt bei der Asche mit Zugabe von $NaHCO_3$ (high) als Verbrennungsadditiv, bei der die höchsten Gehalte an Na-haltigen Phosphaten detektiert wurden.

Tabelle 5: Ergebnisse der Röntgenphasenanalyse für verbrannten Klärschlamm IKTS-030 mit und ohne Additiv

Hauptphasen aus XRD	**IKTS-030_ KSA**	**NH_4Cl 150 g Cl /kg KS**	**$NaHCO_3$ 46:54 P:Na**	**$NaHCO_3$ 82:18 P:Na**	**Na_2CO_3 46:54 P:Na**	**Na_2CO_3 70:30 P:Na**
Hematite (Fe_2O_3)	**x**	**x**	**x**	**x**	**x**	**x**
Quartz (SiO_2)	**x**	**x**	**x**	**x**	**x**	**x**
Whitlockite type $Ca_{18}Mg_2H_2(PO_4)_{14}$ $Ca_9Fe(PO_4)_7$	x	x	(x)	x	(x)	**x**
Whitlockite type NaCaMg-Phosphat $Ca_9MgNa(PO_4)_{18}$	-	-	**x**	(x)	x	-
$Na_{18}Ca_{13}Mg_5(PO_4)_{18}$	-	-	**x**	x	x	?
Aluminium Phosphate $AlPO_4$	x	x	-	x	-	x
Anhydrit ($CaSO_4$)	x	x	?	-	-	x
Ca(Fe, Al, Mg)-Silikat	x	x	-	x	x	-
Calcite ($MgCaCO_3$)	x	-	(x)	x	x	x

Entwicklung, Engineering sowie Konstruktion der In-Situ-Modifikation und Heißgasfiltration

Im Rahmen der Arbeitspakete 2.2.3 und 2.2.4 wurden die Entwicklung, das Engineering sowie die konstruktive Umsetzung der In-Situ-Modifikation und Heißgasfiltration für die Staubfeuerungsanlage zur Mono-Klärschlammverbrennung durchgeführt. Ziel war die Bereitstellung eines modularen, technisch belastbaren Filter- und Dosiersystems einschließlich Mess-, Steuer- und Regelungskonzept (MSR), das für die Einbindung in die Verbrennungsanlage mit 1 MW Feuerungswärmeleistung geeignet ist.

Zu Beginn wurden gemeinsam mit den Projektpartnern Carbotechnik und LTC die anlagentechnischen Randbedingungen erarbeitet, die als Grundlage für die Dimensionierung und Auslegung des Heißgasfilters sowie der Additivdosierung dienten. Darauf aufbauend wurde ein umfassendes R&I-Schema für die Staubfeuerungsanlage mit integrierter Heißgasfiltration und in-situ-Additivzugabe erstellt. Parallel dazu erfolgte die Definition relevanter Prozessparameter, Messstellen und Anforderungen an die Datenerfassung. Zeitgleich nahm Carbotechnik Anpassungen an der Staubfeuerungsanlage in Magdeburg vor, sodass die gewonnenen Erkenntnisse wechselseitig berücksichtigt werden konnten.

Ein zentrales Ergebnis dieses Arbeitsschrittes war die Ausarbeitung eines übergeordneten MSR-Konzepts, das die Einbindung der Heißgasfiltration und der Additivdosierung in die bestehende Anlagentechnik ermöglicht. Hierzu wurden ein Lastenheft sowie eine Funktionsbeschreibung erstellt, die alle relevanten Betriebszustände abbilden, darunter Anfahren, Betrieb, Abreinigung, Abfahren, Ascheaustrag sowie Sicherheits- und Notfallzustände. Die Steuerung umfasst zudem die automatisierte Puls-Jet-Abreinigung der Filterelemente sowie den geregelten Austrag der abgeschiedenen Asche.

Für die konstruktive Auslegung der Filtereinheit wurden verfahrenstechnische Kerndaten berechnet. Grundlage hierfür waren der Gesamtdurchsatz der Anlage, die geplante Aufteilung des Abgasstroms auf die Heißgasfiltration und bestehende Staubfiltereinheit zur Abgasreinigung sowie der Staubgehalt des Abgases nach der Verbrennung. Weiterhin wurden die im Labor ermittelten Prozessparameter genutzt. Daraus wurden die relevanten Teilmassen- und Volumenströme für die Heißgasfilterstrecke abgeleitet. Im Projektverlauf konnte ermittelt werden, dass für einen aussagekräftigen Filterbetrieb ein Staubmassenstrom von mindestens 1 kg/h erforderlich ist. Dieser Wert wurde als Randbedingung für die weitere Auslegung berücksichtigt. Zusätzlich wurden minimale und maximale Strömungsgeschwindigkeiten definiert, die für die Dimensionierung der Rohrleitungsdurchmesser am Filterein- und -austritt maßgeblich sind. Die resultierenden Berechnungen führten zu einem zulässigen Bereich der Rohrleitungsinnendurchmesser, der eine stabile Strömungsführung sowie einen sicheren Filterbetrieb gewährleistet. Die Einbindung der Heißgasfiltration in die bestehende Anlage wurde abschließend in einem zusammengeführten R&I-Schema dargestellt.

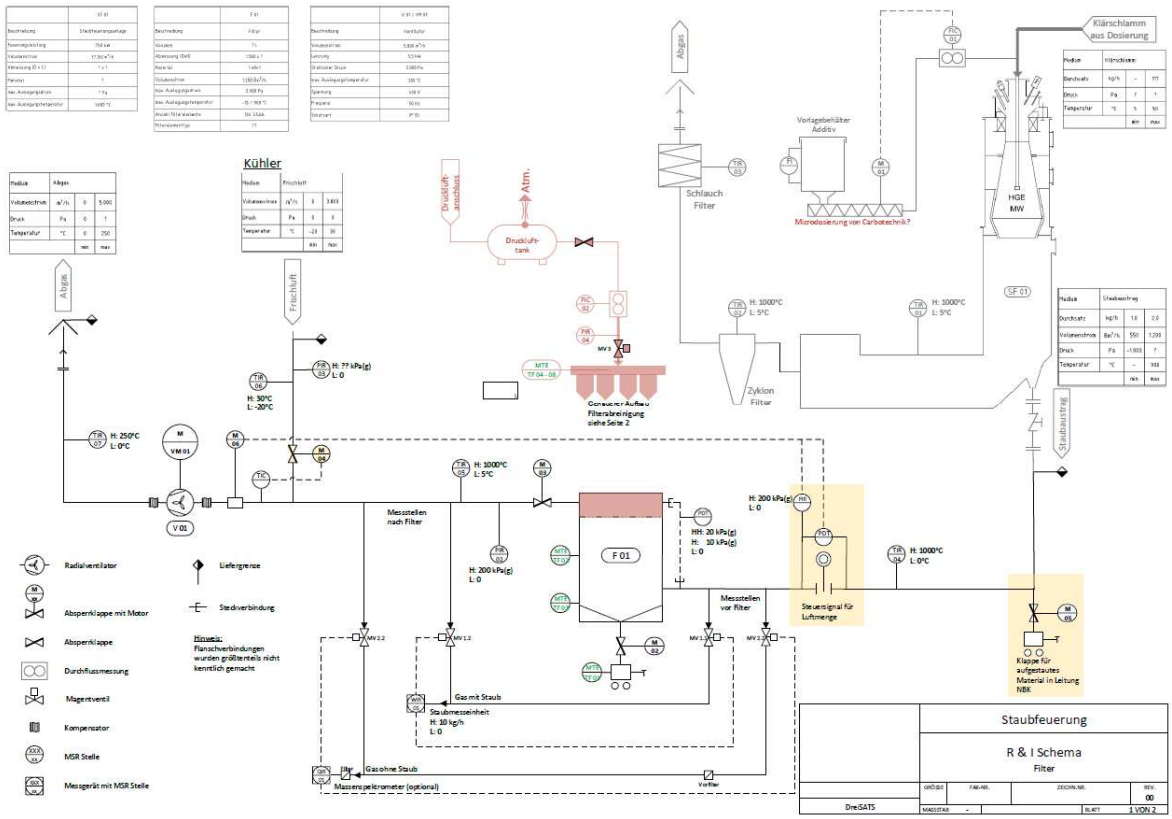


Abbildung 29: zusammengeführte Daten mittels R&I-Schema

II.1.2.3 Umbau und Erweiterung Pilotanlage Staubfeuerung (AP 2.3)

Einbau der Module zur In-Situ-Modifikation und Heißgasfiltration erfolgte durch den Projektpartner LTC in die bestehende Staubfeuerungsanlage der Fa. Carbotechnik sowie deren schrittweise Inbetriebnahme. Ziel war die vollständige Integration der Filter- und Dosiermodule einschließlich Mess-, Steuer- und Regelungstechnik (MSR) und die Herstellung der Betriebsbereitschaft der Anlage unter realen Betriebsbedingungen.

Für die Integration der neuen Anlagenteile mussten zunächst geeignete Freiflächen geschaffen, die elektrische Versorgung sichergestellt und die Kommunikation zwischen Staubfeuerung, Additivdosiereinheit und Heißgasfilter aufgebaut werden. Parallel dazu wurden die erforderlichen Module durch den Projektpartner LTC gefertigt. Die Planungen zur Aufstellung der Anlage, zur Stromzufuhr sowie zur Anbindung der einzelnen Anlagenteile konnten erfolgreich umgesetzt werden. Aufgrund eines gegenüber der Planung erhöhten Leistungsbedarfs war eine Anpassung der verfügbaren Anschlussleistung notwendig, die von Carbotechnik in Abstimmung mit dem Halleneigentümer umgesetzt wurde.

Ein wesentlicher Arbeitsschwerpunkt lag auf der Integration der MSR-Technik. Das IKTS unterstützte die Projektpartner bei der Auslegung der Steuerung, der Logikschaltung sowie der Messwerterfassung und Datenkommunikation. Dabei war eine enge Abstimmung erforderlich, da die Anlagen Staubfeuerung, Additivdosierung und Heißgasfilter funktional und sicherheitstechnisch aufeinander abgestimmt werden mussten. Das wurde im Rahmen eines Unterauftrag zur Implementierung der EMSR-Technik des Heißgasfilters umgesetzt.

Zur Ausstattung des Heißgasfilters wurden insgesamt 60 kommerzielle Filterkerzen aus Alumosilikatfasern vorgesehen, die im Rahmen der Vorversuche den niedrigsten Gegendruck bei hoher Filtrationsleistung zeigten. Diese wurden durch das IKTS beschafft und dem Projektpartner LTC für die Integration in das Heißgasfiltermodul zur Verfügung gestellt. Ergänzend dazu erfolgte die Beschaffung eine kleinen Menge an kommerzieller Filterkerzen aus zwei Siliciumcarbid-Materialien. Diese sollten mit in den Heißgasfilter eingebaut

werden, um unterschiedliche Filtermaterialien unter realen Anwendungsbedingungen zu testen und Alterungserscheinungen systematisch zu analysieren. Aufgrund der konischen Ausführung und abweichenden Geometrie der Filteraufnahme ließen sich die Siliciumcarbid-Kerzen aber nicht in die bestehende Aufhängung der Kopfplatte des Heißgasfilters integrieren, so dass der Filtervergleich nicht umgesetzt werden konnte.

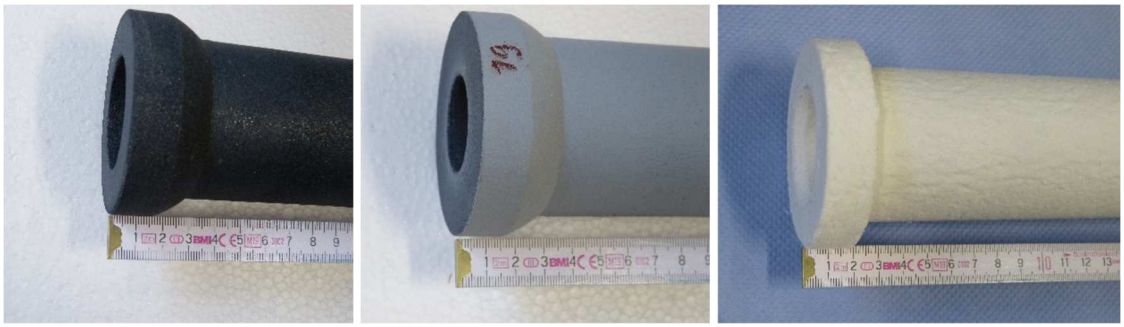


Abbildung 30: alternative Filterkerzen (links und Mitte: Siliciumcarbid) und eingebaute Filterkerze (rechts: Alumosilikatfasern)

Nach abgeschlossenen Aufbau und Testung der Module zur Additivdosierung und Heißgasfiltration wurden erste Versuche zur Heißinbetriebnahme zunächst mit Braunkohlestaub durchgeführt, um notwendige Nachbesserungsmaßnahmen abzuleiten. Auch für die Inbetriebnahme der Additivdosierung wurde Braunkohlenstaub eingesetzt, da dieser vergleichbare förder- und dosiertechnische Eigenschaften wie die vorgesehenen Additive aufweist. Nach Bereitstellung ausreichender Mengen an gemahlenem Klärschlamm konnte die Heißinbetriebnahme final abgeschlossen werden.

Im Ergebnis konnte die vollständige Integration der Module zur in-situ-Modifikation und Heißgasfiltration in die Staubfeuerungsanlage erfolgreich umgesetzt und die Anlage trotz verschiedener Verzögerungen bei Filterbeschaffung und Brennstoffbereitstellung schrittweise in Betrieb genommen werden. Der Meilenstein MS 2.3 „Versuchsmodule sind aufgebaut und in Betrieb genommen“ wurde damit vollständig erreicht und bildet die Grundlage für die nachfolgenden Untersuchungen unter Einsatz von Klärschlamm und unterschiedlichen Additiven.

II.1.2.4 Systematische Untersuchungen zur Bewertung des Dauerbetriebs und der Aschemodifikation (AP 2.4)

Im Rahmen von AP 2.4 wurden die Voraussetzungen geschaffen, die Technikumsanlage Staubfeuerung in einen stabilen (Dauer-)Betrieb zu betreiben und dabei sowohl Heißgasfiltration als auch in-situ-Aschemodifikation unter realen Betriebsbedingungen zu bewerten.

Sicherstellung geeigneter Klärschlämme als Inputstoffe (getrocknet, staubförmig)

Für die Staubfeuerung ist ein staubförmiger Brennstoff erforderlich; daher mussten Klärschlämme in ausreichender Menge und im trockenem Zustand verfügbar sein. Aufgrund begrenzter Trocknungskapazitäten konnten ursprünglich geplante Schlämme teilweise nicht genutzt werden, sodass die Klärschlammmatrix erweitert und gezielt nach Quellen für bereits getrocknetes Klärschlammgranulat gesucht wurde. Die ausgewählten, für Demonstrator- und Leistungsfahrten vorgesehenen getrockneten Klärschlämme decken ein breites Spektrum ab, um das Prozessfenster der Staubfeuerung für unterschiedliche Qualitäten bewerten zu können. Abbildung 31 verankert diese Auswahl anhand Zusammensetzung und Schwermetallgehalten. Bei den verbrennungstechnisch relevanter Kenngrößen decken die ausgewählten Klärschlämme ebenfalls die Verteilungsbreite der Klärschlämme aus der bisherigen Klärschlammmatix ab.

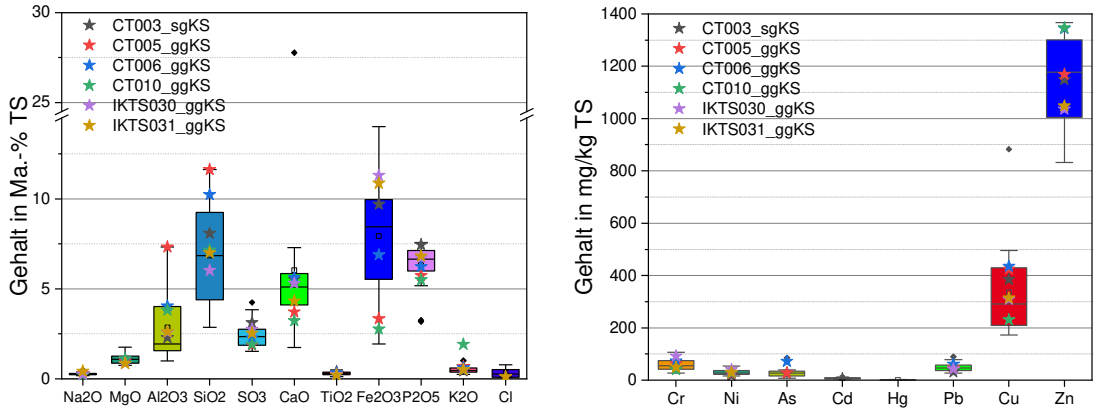


Abbildung 31: Zusammensetzung der für die Demonstratorversuche ausgewählten Klärschlämme in Bezug zu den Hauptelement- (links) und Schwermetallgehalten (rechts) der Klärschlammproben aus der Klärschlammmatrix

Mahlung in Demonstratorgröße: Vergabe, Anlagenaufbau, Qualitätsabgleich (Granulometrie)

Für die Durchführung der Verbrennungsversuche mit der Staubfeuerungsanlage im Technikum Magdeburg mussten größere Mengen getrockneter Klärschlämme Partikelgröße vermahlen werden. Die Sicherstellung einer entsprechenden Lohnmahlung erwies sich jedoch als deutlich anspruchsvoller als zu Projektbeginn angenommen. Zahlreiche potenzielle Dienstleister lehnten die Verarbeitung von Klärschlamm aufgrund fehlender ATEX-Konformität, hoher Anforderungen an den Explosionsschutz, potenzieller Geruchsbelastungen, erhöhtem Verschleiß sowie mangelnder Erfahrungen mit diesem Material ab. Vor diesem Hintergrund arbeiteten IKTS und Carbotechnik eng zusammen, um alternative Lösungswege zu entwickeln und geeignete Partner für die Brennstoffaufbereitung zu identifizieren. Die Projektpartner prüften zeitweise sogar die eigenständige Durchführung der Mahlung, einschließlich der Planung einer mobilen Mahlinfrastruktur.

Mit der CheMill GmbH konnte 2024 ein geeigneter Dienstleister identifiziert und mit der Mahlung von insgesamt 20 t getrocknetem Klärschlamm beauftragt werden. CheMill verfügte über geeignete Exzenter-Schwingmühlentechnik und war bereit, die notwendigen anlagentechnischen und organisatorischen Anpassungen für das Stoffsystem Klärschlamm umzusetzen. Da die zunächst verfügbare Technikumsanlage im Ausland stand und der grenzüberschreitende Transport getrockneten Klärschlamms erhebliche regulatorische Hürden verursacht hätte, wurde gemeinsam eine temporäre Mahlanlage in Deutschland aufgebaut. Eingesetzt wurde eine Exzenter-Schwingmühle mit Big-Bag-Aufgabe, Schneckenförderung, Saugzug, Filterabscheidung und Abfüllung des Mahlguts in Big Bags. Abbildung 35 und Abbildung 36 zeigen die eingesetzte Mühlentechnik sowie den Anlagenaufbau am Standort Sangerhausen.

Die Mahlkampagne umfasste acht getrocknete Klärschlämme und erforderte insbesondere aufgrund von Staub- und Geräuschemissionen technische Anpassungen. Da es sich um ein anderes Mahlverfahren als in den Laboruntersuchungen handelte, mussten die Verfahrensparameter neu eingestellt werden. Durch Anpassung der Mühlenkonfiguration, Erhöhung der Mahlkörperanzahl und zusätzliche Mahldurchgänge konnte die Feinheit schrittweise verbessert werden; dennoch blieb bei einzelnen Chargen ein höherer Grobanteil bestehen. Die Partikelgrößenverteilungen wurden versuchsbegleitend durch CheMill sowie anschließend am IKTS bewertet. Tabelle 6 und Abbildung 32 dokumentieren die am IKTS durchgeführte PGV-Bewertung der gemahlenen Chargen.

Tabelle 6: Ergebnis Partikelgrößenanalyse gemahlene Klärschlämme

Proben-bezeichnung	U5633	U5634	U5635	U5636	U5643	U5648	U5649	U5650
	CT010_ ggKS	IKTS034_ ggKS	IKTS032_ ggKS	IKTS031_ ggKS	CT003_ IKTS035_ggKS	CT006_ ggKS	IKTS033_ ggKS	CT005_ ggKS
x3(Q=10.00 %) [µm]	15,529	16,887	54,883	13,364	184,96	24,951	4,531	11,445
x3(Q=50.00 %) [µm]	154,769	136,89	291,821	132,268	667,176	162,905	57,6	115,556
x3(Q=90.00 %) [µm]	809,501	542,018	972,579	611,8	1399,013	399,932	306,342	366,951

Die Zielvorgaben konnten nicht in allen Mahlungen erreicht werden. Nach Rücksprache mit Carbotechnik konnten jedoch alle gemahlenen Klärschlämme für die Verbrennungsuntersuchungen genutzt werden, wobei Verbrennungsparameter anzupassen waren (z. B. Verweilzeit/Temperaturführung), da gröbere Partikel tendenziell zu unvollständigerem Abbrand und erhöhten CO-Emissionen führen können. Die Ergebnisse der Verbrennungsversuche lieferten eine wichtige Erkenntnis für die weitere Verfahrensentwicklung. Entgegen der ursprünglichen Annahme erwies sich das für die Staubfeuerung definierte Zielkornband mit einem X_{50} von 90 µm als deutlich konservativer als erforderlich. Auch gröbere Brennstofffraktionen konnten im Impulsstaubbrenner stabil und mit vollständigem Ausbrand eingesetzt werden. Die Ergebnisse zeigen, dass die Staubfeuerung gegenüber Schwankungen der Brennstofffeinheit wesentlich robuster ist als zunächst angenommen. Dadurch kann der notwendige Mahlaufwand zukünftig erheblich reduziert werden, was sowohl den Energiebedarf der Brennstoffaufbereitung als auch die verfahrenstechnische Komplexität senkt. Die großtechnische Mahlung stellte somit nicht nur einen wesentlichen Demonstrationsschritt innerhalb des Projekts dar, sondern lieferte auch wichtige Erkenntnisse für die wirtschaftliche und technische Optimierung einer späteren industriellen Umsetzung.

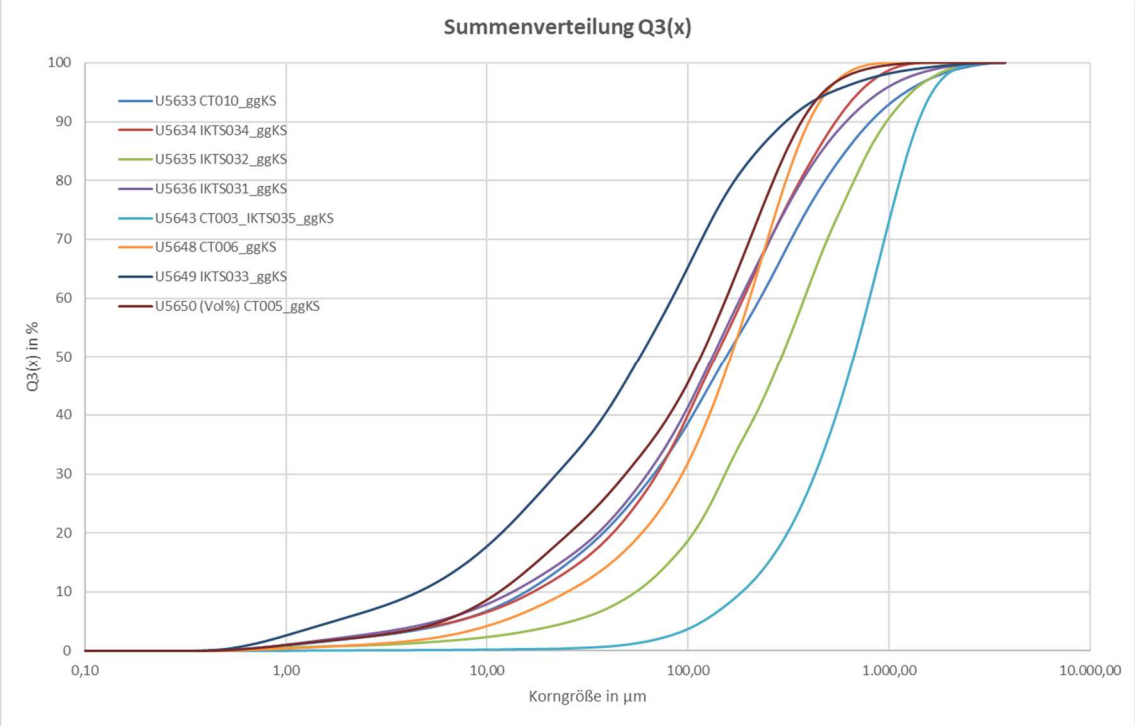


Abbildung 32: Summenverteilung Q3(x) gemahlene Klärschlämme

Insgesamt konnten auf Basis der Mahl- und Verbrennungsversuche sowie der zugehörigen Stoffstrom- und Ascheanalysen geeignete Prozessfenster identifiziert werden, die eine stabile und selbsterhaltende Verbrennung getrockneter Klärschlämme in der Staubfeuerung ermöglichen.

Für die Dauerbetriebsvorbereitung wurden Lager- und Handlingkonzepte im Konsortium abgestimmt. Da an der Technikumsanlage in Magdeburg nur eine eingeschränkte Lagerung möglich war, wurden Teilmengen des gemahlenen Klärschlamms auf mehrere Standorte verteilt. Zur Zwischenlagerung stellte LTC drei Seecontainer bereit; die Einlagerung in Big-Bags und die Transportkoordination erfolgten abgestimmt mit VKD. Zusätzlich wurden geeignete Behälter für das Aschehandling beschafft, um Aschen heiß aus der Staubfeuerung und Heißgasfiltration entnehmen zu können.

Additive: Auswahl, Dosierbarkeit/Fluidisierung und Bereitstellung in relevanten Mengen

Basierend auf Laborergebnissen zur Aschemodifikation wurden „vielversprechende" Additive für Technikums-/Leistungsfahrten eingegrenzt und zunächst in Kleinmengen bereitgestellt, um die Dosier- und Fluidisierbarkeit im Brennerbetrieb zu prüfen. Erste Tests mit NaCl zeigten, dass ein ungemahlenes Additivprodukt zu grob ist und zur Entmischung/ Absetzung neigt. Eine Mahlung reduzierte die Entmischungsneigung und verbesserte die Dosierqualität. Darauf aufbauend wurden u. a. NH_4Cl, Na_2CO_3 und $NaHCO_3$ als relevante Kandidaten priorisiert, Anbieterrecherchen durchgeführt und Mengenabschätzungen zur Beschaffung erstellt. Für die Durchführung additivgestützter Verbrennungsversuche an der Staubfeuerungsanlage wurden schließlich Additive in relevanten Mengen bereitgestellt. Auf Betreiberseite wurden die Additive zusätzlich hinsichtlich Korngrößenband und Fluidisierbarkeit bewertet; dabei wurden Na_2CO_3 und $NaHCO_3$ als geeignete Kandidaten identifiziert und die Versuchsplanung entsprechend fokussiert.

Charakterisierung Input/Output: Referenzaschen (Labor) und Aschen aus Staubfeuerung (Technikum)

Zur Referenzbildung für die Demonstratorversuche an der Staubfeuerung wurden kleine Probenmengen aller ausgewählten und gemahlenen Klärschlämme im IKTS-Laborreaktor ohne Additiv verascht (Temperaturrampe 5 K/min auf 900 °C, 1 h Haltezeit) und anschließend mittels Röntgenfluoreszenzspektroskopie und Röntgenbeugung hinsichtlich ihrer Element- und Phasenzusammensetzungen charakterisiert.

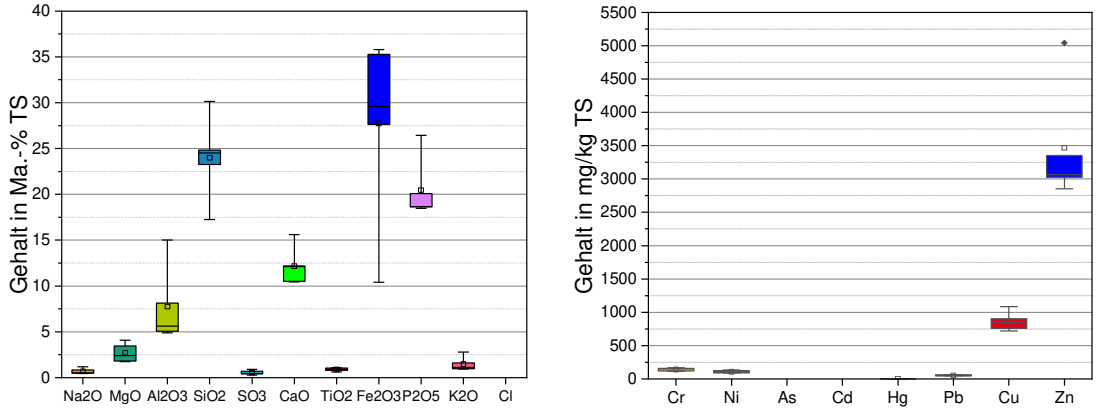


Abbildung 33: Spreizungsbreite der Hauptelement- (links) Schwermetallgehalte (rechts von Klärschlammaschen der Klärschlämme IKTS031_ggKS, IKTS032_ ggKS, IKTS033_ ggKS, IKTS034_ggKS und CT010_ggKS aus Laborverbrennungen ohne Additiven (Temperaturrampe, 900 °C, 1 h Haltezeit)

Abbildung 33 zeigt die Streuung in den Element- und Schwermetallgehalten der Referenzaschen. Die Hauptelemente mit den höchsten Gehalten sind bei allen Aschen Si, P, Fe, Ca und Al. Die als P_2O_5 bestimmten Phosphorgehalte liegen bei den Aschen zwischen 18 und 26 %, womit sie ein hohes Potenzial für das Phosphorrecycling aufweisen. Dabei besitzt die Asche IKTS032_IKTS041_KSA mit 26 % P_2O_5 einen besonders hohen Phosphorgehalt. Hinsichtlich der Schwermetallgehalte liegen die Konzentrationen der Elemente As, Cd, Pb und Ni bei allen Aschen unterhalb bzw. im Bereich der Grenzwerte der PE-CONS 76/18 für

Anorganische Makronährstoff-Düngemittel. Bei Kupfer werden die Werte leicht und bei Zink deutlich überschritten.

Tabelle 7: Ergebnisse der Röntgenphasenanalyse für Klärschlammaschen aus Laborverbrennungen ohne Additiven (Temperaturrampe, 900 °C, 1 h Haltezeit)

Hauptphasen aus XRD	**IKTS030_ KSA**	**IKTS031_ IKTS040_ KSA**	**CT010_ IKTS039_ KSA**	**IKTS032_ IKTS041_ KSA**	**IKTS034_ IKTS042_ KSA**
Hematite (Fe_2O_3)	**X**	**x**	**x**	**x**	**x**
Quartz (SiO_2)	**X**	**x**	**x**	**x**	**x**
Whitlockite type $Ca_{18}Mg_2H_2(PO_4)_{14}$ $Ca_9Fe(PO_4)_7$	X	x	x	**x**	x
Aluminium Phosphate $AlPO_4$	X	x	x	**X**	x
Anhydrit ($CaSO_4$)	X	x	x	(x)	x
$Ca_4(Mg,Fe)_5(PO_4)_6$	-	-	x	-	-
$Mg_2(P_2O_7)$	-	-	-	x	-
$Si(P_2O_7)$	-	-	x	-	-
Ca(Fe, Al, Mg)-Silikat	X	x	-	-	-
Calcite ($MgCaCO_3$)	X	x	-	-	-

Die XRD-Phasenbefunde in Tabelle 7 zeigen eine gute Vergleichbarkeit hinsichtlich der detektierten Hauptphasen bei den betrachteten Aschen aus der Laborverbrennung. Als Hauptphasen lassen sich bei allen Aschen Hämatit (Fe_2O_3) und Quarz (SiO_2) sowie als Phosphate Aluminiumphosphat ($AlPO_4$) und Ca/Mg/Fe-Phosphate mit Whitlockit-Struktur identifizieren. Darüber hinaus enthalten die Aschen jeweils Anhydrit ($CaSO_4$) und als Nebenphasen verschiedene Phosphate, Ca(Fe, Al, Mg)-Silikat und Calcite ($MgCaCO_3$). Dabei wurden keine Natrium-haltigen Phosphate identifiziert, die bei der Asche IKTS030_KSA nach Additivmodifizierung zu einer Erhöhung der Phosphorlöslichkeit nach der CAL-Methode geführt haben.

Mit den im Demonstratormaßstab gemahlenen Klärschlämmen wurden Verbrennungsversuche an der Staubfeuerungsanlage des Projektpartners Carbotechnik vorgenommen und vom IKTS durch Ascheanalysen und den Abgleich der Ergebnisse zu den Referenzuntersuchungen aus der Laborverbrennung begleitet. Dabei wurden Aschen aus unterschiedlichen Entnahmepunkten (u. a. Nachbrennkammer, Wendekammer, Zyklon, Filter) verglichen. Abbildung 34 zeigt exemplarisch die Element-/Schwermetallprofile des Klärschlamms IKTS031 aus den verschiedenen Entnahmestellen im Vergleich zur Laborreferenz. Die hohen Temperaturen der Staubfeuerung führen zu einem deutlichen Gradienten im Zink-Gehalt der Aschen entsprechend der Temperaturniveaus der Entnahmepunkte (Nachbrennkammer > Wendekammer > Zyklon > Staubfilter). Gegenüber der Referenzasche aus der Laborverbrennung ist die Zink-Konzentration bei der Asche aus der Nachbrennkammer auf Grund der hohen Temperaturen nahezu halbiert. Mit abnehmender Temperatur nimmt die Zink-Konzentration der Aschen aus den nachfolgenden Entnahmepunkten zu, so dass die Asche aus dem Staubfilter (Entnahmepunkt mit der geringsten Prozesstemperatur) annähernd um Faktor 5 höher liegt als bei der Referenzasche aus der Laborverbrennung. Ebenso wurden in dieser Asche die höchsten Blei- und Kupfer-Gehalte detektiert. Im Gegensatz dazu sind die Chrom- und Nickel-Konzentrationen der Asche aus der Nachbrennkammer höher als bei der Referenzasche.

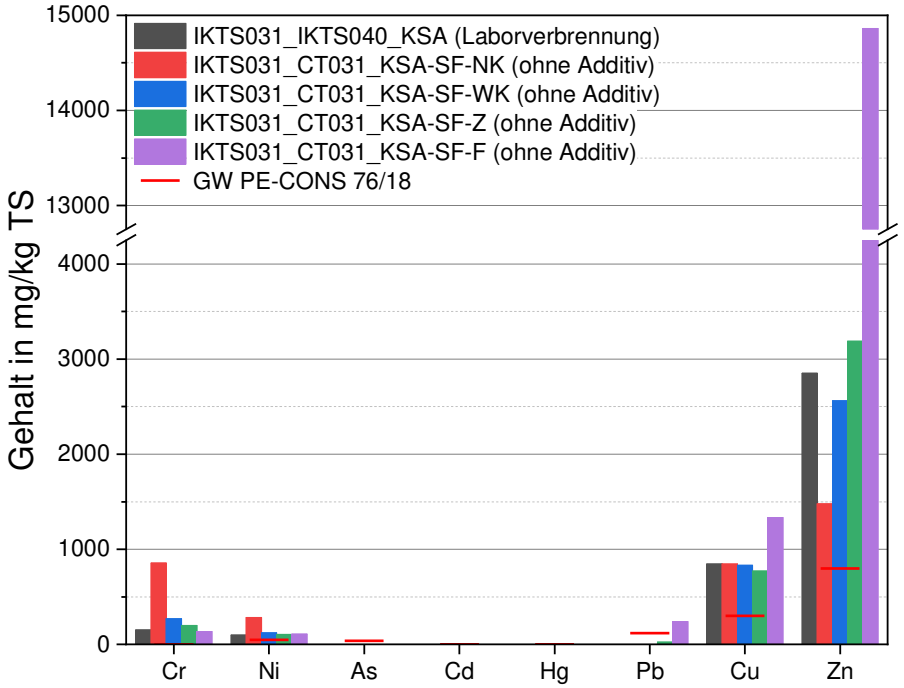


Abbildung 34: Schwermetallgehalte von Klärschlammaschen des Klärschlamms IKTS031_ggKS aus Verbrennungsversuchen ohne Additivzugabe an der Staubfeuerungsanlage von Carbotechnik (Aschen aus verschiedenen Entnahmepunkten)

Bei den Verbrennungsversuchen mit den gemahlenen Klärschlämmen CT008_ggKS, CT010_ggKS; IKTS032_ggKS, IKTS033_ggKS und IKTS034_ggKS wurden ähnlich Ergebnisse erzielt. Die linke Graphik in Abbildung 35 fasst die Nachbrennkammer-Aschen mehrerer Klärschlämme zusammen. Gegenüber den Vergleichsaschen aus der Laborverbrennung in der linken Graphik in Abbildung 35 sind die Zink- und Bleigehalte der Aschen stark reduziert. Damit liegen die Konzentrationen von Blei ebenso wie Arsen, Cadmium und Quecksilber bei allen Aschen unterhalb der Grenzwerte der PE-CONS 76/18 für Anorganische Makronährstoff-Düngemittel. Für Kupfer sind die Werte ähnlich zur Laborverbrennung und für Nickel und Chrom wiederum höher. Zink Kupfer und Nickel bleiben in ihren Konzentrationen bei Verbrennung ohne Additivzugabe über den Grenzwerten. Für Chrom kann keine direkte Aussage aus den Analysen getroffen werde, da der Grenzwert ausschließlich für sechswertiges Chrom zählt, das über XRF nicht separat erfasst wird.

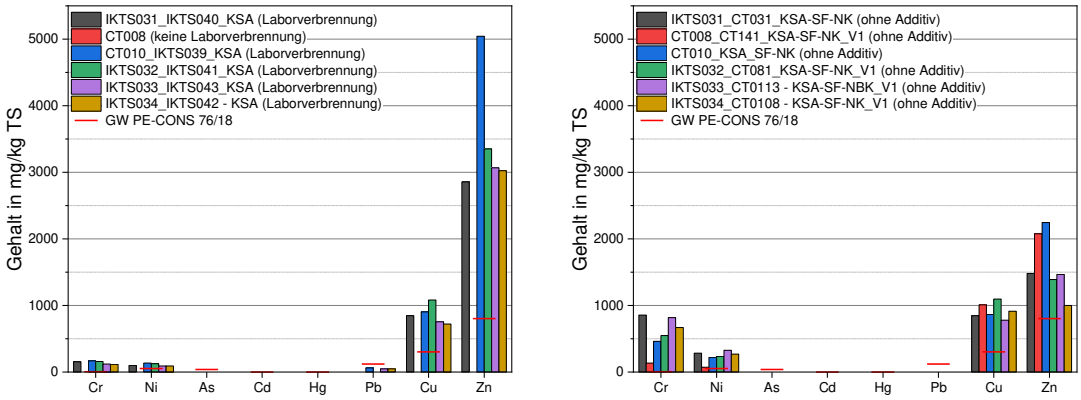


Abbildung 35: Schwermetallgehalte von Klärschlammaschen der Klärschlämme IKTS031_ggKS, CT008_ggKS, CT010_ggKS, IKTS032_ggKS, IKTS033_ggKS und IKTS034_ggKS - links aus der Laborverbrennung und rechts aus Verbrennungsversuchen ohne Additivzugabe an der Staubfeuerungsanlage von Carbotechnik (Entnahme aus den Nachbrennkammer)

Heißgasfiltration, in-situ-Modifikation und Dauerbetrieb

Die Untersuchungen zur Heißgasfiltration, zur In-situ-Aschemodifikation sowie zur Überführung der Anlage in den Dauerbetrieb wurden im Projekt maßgeblich durch die Projektpartner LTC (Modultechnik, Heißgasfilter, Additivdosierung) und Carbotechnik (Betrieb der Staubfeuerungsanlage, Versuchsdurchführung) umgesetzt und durch das IKTS mit Analysen der Verbrennungsprodukte und modifizierten Aschen begleitet. Mit fortschreitender Inbetriebnahme und zunehmender Versuchstätigkeit an der Anlage wurden wesentliche betriebliche Wechselwirkungen identifiziert, die eine schrittweise Anpassung der Betriebsführung erforderlich machten. So zeigte sich, dass die Einbindung der Heißgasfiltration einen Einfluss auf die Temperaturführung der Anlage hatte, insbesondere durch einen Temperaturabfall in Richtung der Nachbrennkammer. Darauf wurde durch Anpassungen der Tertiär- bzw. Rezirkulationsluftführung reagiert, um die geforderten Temperaturbedingungen am Austritt der Nachbrennkammer sicherzustellen.

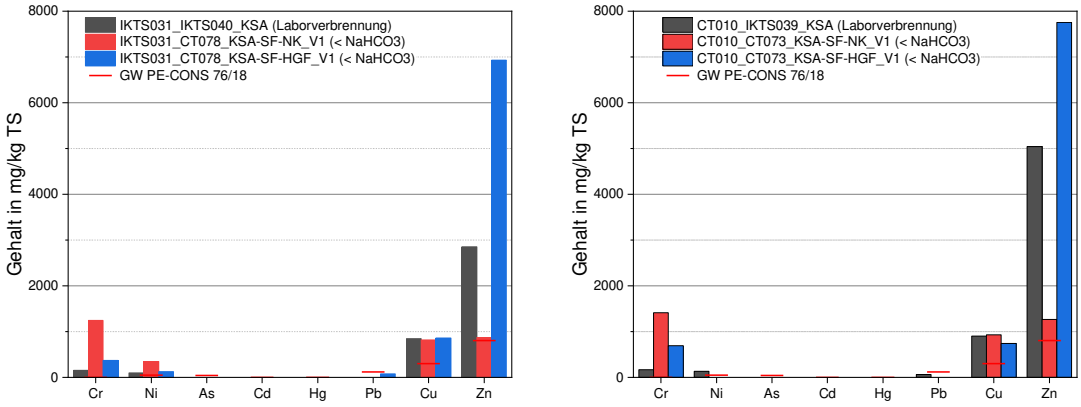


Abbildung 36: Schwermetallgehalte von Klärschlammaschen der Klärschlämme IKTS031_ggKS (linke Graphik) und CT010_ggKS (rechte Graphik) im Vergleich zwischen Laborverbrennungen ohne Additiven und Aschen aus der Nachbrennkammer (NK) bzw. Heißgasfilter (HGF) bei Verbrennung mit $NaHCO_3$-Zugabe an der Staubfeuerungsanlage von Carbotechnik

Durch die Verlängerung der Ausbrandzone traten im Betrieb der Heißgasfiltration anlagen- und layoutbedingte Herausforderungen auf, unter anderem eine ungünstige Position des Rauchgasabzugs im Einflussbereich hoher Temperaturen, die zu einer erhöhten thermischen Belastung und einer Neigung zur Ascheanbackung und zum Zusetzen des Rauchgasabzugs führte. Das Erweichen der Aschen bei den hohen Verbrennungstemperaturen bewirkte eine ausgeprägte Schlackebildung im Bereich des Bypasses zum Heißgasfilter, was durch Druckverlusterhöhungen und verringerte Gasvolumenströme den vorgesehenen Filterbetrieb beeinträchtigte. Diese Effekte ließen sich trotz konstruktiver und betriebstechnischer Verbesserungsmaßnahmen in den durchgeführten Versuchskampagnen nicht beheben und führten zu einer systematischen Absenkung der Heißgasfiltertemperatur und des Ascheeintrags. Im Resultat wurden in Heißgasfilteraschen höhere Zinkgehalte als bei den Aschen aus der Laborverbrennung und Nachbrennkammer festgestellt (siehe Abbildung 36), womit die Temperaturen für eine erfolgreiche in-situ-Modifikation im Heißgasfilter zu gering waren. Verbesserungen könnten nur durch eine Einbindung des Heißgasfilters im Vollstrom erreicht werden, die aber im Rahmen des Projekts nicht realisiert werden konnte. Demgegenüber zeigte Aschen aus der der Nachbrennkamme eine deutliche Reduktion der leichter flüchtigen Schwermetalle. Deshalb wurde im Projektverlauf die Entscheidung getroffen, die in-situ-Modifikation ausschließlich an Aschen aus der Nachbrennkammer zu untersuchen. Dazu wurden die Klärschlämme aus Tabelle 6 ohne bzw. mit Zudosierung von Additiven in der Staubfeuerung verbrannt. Als Additive wurden dabei $NaHCO_3$ und Na_2CO_3 verwendet

Im Sinne der Antragsthemen konnte im Anlagenbetrieb mit den unterschiedlichen Klärschlammchargen ein stabiler Betrieb mit Durchsätzen von etwa 250 kg/h realisiert werden.

Damit wurde der im Arbeitsplan von AP 2.4 definierte Zielwert zur Vorbereitung des Dauerbetriebs von 800 kg/d nicht nur erreicht, sondern deutlich überschritten. Die Anlage kann somit flexibel auf den jeweils erforderlichen Durchsatzpunkt eingestellt werden, was insbesondere für die Materialhaushaltung und die Durchführung längerer Versuchsfahrten von Bedeutung ist.

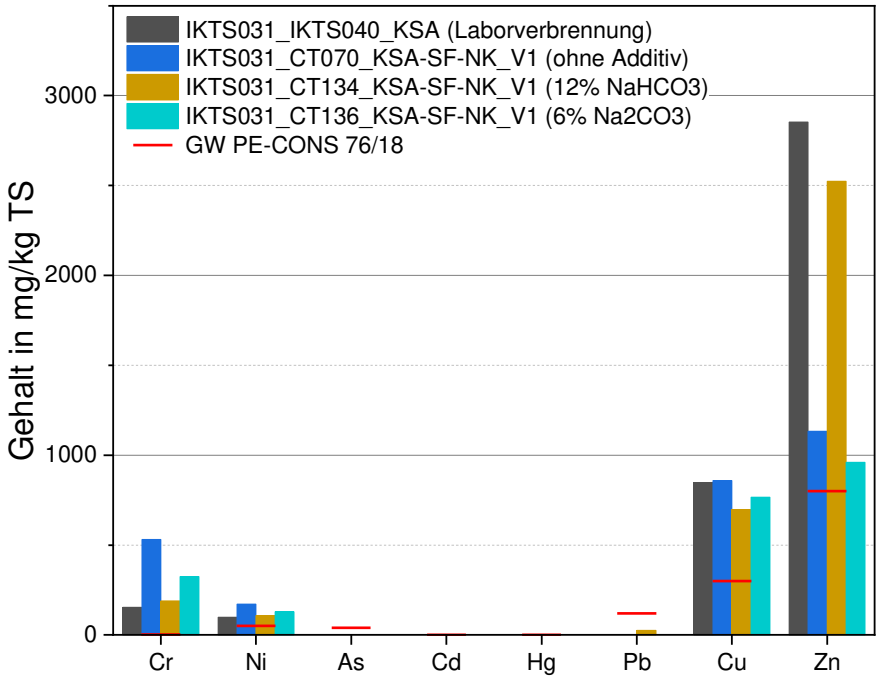


Abbildung 37: Schwermetallgehalte von Klärschlammaschen des Klärschlamms IKTS031_ggKS im Vergleich zwischen Laborverbrennungen ohne Additiven und Aschen aus der Nachbrennkammer (NK) bei Verbrennung ohne Additiven bzw. mit $NaHCO_3$- und Na_2CO_3-Zugabe an der Staubfeuerungsanlage von Carbotechnik

Die Verbrennung von Klärschlamm mit Additivzugabe führt im Vergleich zu additivfreien Verbrennung zu einer Absenkung der Schwermetallgehalte der Aschen aus der Nachbrennkammer. In Abbildung 37 sind beispielhaft die Ergebnisse für den Klärschlamm IKTS031_ggKS dargestellt. Außer dem Zink-Gehalt in der Asche IKTS031_CT134_KSA-SF-NK_V1 mit 12 % $NaHCO_3$-Zugabe liegen alle Schwermetallgehalte niedriger als bei der Verbrennung ohne Additiv. Die Chrom- und Nickelgehalte kommen in den Bereich der Referenzasche aus der Laborverbrennung und Kupfergehalte darunter. Der Zinkgehalt ist durch die hohe Verbrennungstemperatur in der Staubfeuerung bereits ohne Additivzugabe deutlich niedriger als bei der Laborverbrennung und verringert sich durch Zugabe von Na_2CO_3 noch einmal zusätzlich. Der hohe Zink-Gehalt in der Asche mit $NaHCO_3$-Zugabe ist ein Ausreißer, der sich in anderen Verbrennungsversuchen (siehe Asche IKTS031_CT078_KSA-SF-NK_V1 (< $NaHCO_3$) in Abbildung 36 links) nicht bestätigt hat.

Tabelle 8: Ergebnisse der Röntgenphasenanalyse für Klärschlammaschen des Klärschlamms IKTS031_ggKS aus Laborverbrennungen und Staubfeuerung ohne und mit Additiven

Hauptphasen aus XRD	**IKTS031_ IKTS040_ KSA**	**IKTS031_ CT070_ KSA-SF-NK_V1**	**IKTS031_ CT134_ KSA-SF-NK_V1 (12 % NaHCO3)**	**IKTS031_ CT136_ KSA_SF-NK_V1 (6 % Na2CO3)**
Hematite (Fe_2O_3)	**x**	**x**	**x**	**x**
Quartz (SiO_2)	**x**	**x**	x	**x**
Ca(Mg,Fe)-Phosphate (Whitlockite type)				
Ca18Mg2H2(PO4)14	x		-	x
Ca9Fe(PO4)7	x	**x**	x	(x)
Ca(Mg,Na)-Phosphate (Whitlockite type)				
Na18Ca13Mg5(PO4)18	-	-	-	-
Ca9MgNa(PO4)7	x		x	x
Na-Phosphate				
Na2.73Al0.09PO4;	-	-	-	-
NaCaFe(PO4)3	-	-	x?	-
Aluminum Phosphat ($AlPO_4$)	x	x	x	x
Anhydrit ($CaSO_4$)	x	x	(x)	-
Natriumsulfat (Na_2SO_4)	-		**x**	x
Calcite ($MgCaCO_3$)	x	-	-	-
Silikate				
Ca(Fe, Al, Mg)-Silikat	x	-	-	-
(K,Na)AlSiO4	-	-	x	-

Außer den Schwermetallgehalten wurde auch die Phasenzusammensetzung der Aschen durch die Additivzugabe beeinflusst. Wie Tabelle 8 zeigt, betrifft das hauptsächlich die Ausbildung von Natrium-haltigen Nebenphasen. Während sich als Hauptphasen in allen Aschen Hämatit (Fe_2O_3) und Quarz (SiO_2) Aluminiumphosphat ($AlPO_4$) und Ca/Mg/Fe-Phosphate mit Whitlockit-Struktur identifizieren lassen, führt die Zugabe von $NaHCO_3$ und Na_2CO_3 zur Ausbildung von Phosphaten mit eingebautem Natrium (Whitlockit-Struktur: $Na_{18}Ca_{13}Mg_5(PO_4)_{18}$ und $Ca_9MgNa(PO_4)_7$;). Diese Ergebnisse sind ähnlich zu den Laborversuchen in Kap. II.1.2.2, aus denen eine Erhöhung der Phosphorlöslichkeit resultiert ist. Darüber hinaus sind in beiden Aschen signifikante Mengen Natriumsulfat nachweisbar, was bedeutet, dass Schwefeldioxid aus dem Abgas durch die Additive gebunden wird.

II.1.3 Themenschwerpunkt Phosphorrecycling und Granulatherstellung (Hauptarbeitspaket 3)

II.1.3.1 Standortspezifische Rezepturentwicklung (AP 3.1)

Das IKTS unterstütze die Projektpartner bei der Rezepturentwicklung mit der analytischen Bewertung der Aschen sowie der Düngerprodukte. Hierfür wurden die relevanten Analysen inklusive Messvorschriften und Messtechnik aufgebaut und validiert. Nach Aufbau der Messtechnik erfolgt eine analytische Begleitung der Versuche der Projektpartner.

Für die Bewertung von Aschen und der Düngerprodukte wurde gemeinsam mit den Partnern folgender Analyseplan erarbeitet und umgesetzt. Zur Proben-, Analyse- und Versuchsdokumentation wurden eine Dokumentationsdatenbank sowie eine spezifische Probenbezeichnung erarbeitet, welche durch alle Projektpartner genutzt wird.

Tabelle 9: Analyseplan KS-Aschen und Düngerprodukte

					KS-Asche		Düngerprodukte	
Feststoff			**Benötigte Menge**	**Wer**	Standard	Optional	Standard	Optional
	Trockenrückstand / Wassergehalt	% OS		IKTS	x		x	
	Glühverlust / oTR	% TR		IKTS	x		x	
	Glührückstand / Aschegehalt	% TR		IKTS	x		x	
	TC - Feststoff (Kohlenstoff - gesamt)	mg/kg TR		IKTS	x		x	
	PGV (Laserbeugung, Bildgebend)	µm	30 ml	IKTS	x			x
	BET (Oberfläche)	m²/g	100 mg	IKTS		x		
	XRD (Phasenbestimmung)		10 mg	IKTS	x		x	
	Elementeanalyse - Gesamtgehalte (As, Pb, Cd, Cr, CrVI, Cu, Ni, Hg, Tl, Zn)	mg/kg TR		UAN		x		x
	Phosphor - gesamt	mg/kg TR		UAN	x		x	
	Schwefel - gesamt	mg/kg TR		UAN	x		x	
	Kohlenstoff - gesamt	mg/kg TR		UAN	x		x	
	RFA/XRF - Elementanalyse (P, As, K, Pb, Ca, Cd, Na, Cr, Mg, Cu, Fe, Ni, Si, Hg, S, Zn)	Ma.-%, mg/kg	10 g	UAN		x		x
	Nährstoffe und Nebenbestandteile gemäß DüngVO (Tab 1.1, 1.2 und 1.3)			UAN	x		x	
	Schwermetalle gemäß DüngVO (1.4)			UAN	x		x	
	P-Löslichkeiten			IKTS	x		x	
	Phytotox und Düngerwirkung			IKTS	x		x	
Eluat				IKTS / UAN		x		x
	pH-Wert	-				x		x
	Messtemperatur pH-Wert	°C				x		x
	el. LF	µS/cm				x		x
	Kationen	mg/L				x		x
	Anion	mg/L				x		x
	(Salzgehalt)	g/kg OS				x		x
	DOC	mg/kg TS				x		x

Um die Phosphorverfügbarkeit möglichst genau beschreiben zu können, wurden folgende Methoden für die Bestimmung des

- wasser- und neutral-ammoniumcitratlöslichen Phosphats (VDLUFA Band II, 4.1.4),
- ameisensäurelöslichen Phosphat (VDLUFA Band II, 4.1.2) und
- Citronensäurelösliches Phosphat (VDLUFA Band II, 4.1.3)

am IKTS aufgebaut.

Um die Pflanzenverfügbarkeit nasschemisch ermitteln zu können, wurde eine Methode zur Bestimmung von pflanzenverfügbarem Phosphor und Kalium mit Hilfe von Calcium-Acetat-Lactat-Auszügen (CAL) nach Schüller etabliert. Diese Methode wurde in Abstimmung mit HGoTECH GmbH (Begleitprojekt TransPhoR) ausgewählt, um die innerhalb des Vorhabens RePhoR gewonnenen P-Düngemittel im Zusammenspiel mit Böden und Substraten pflanzenwachstumsorientiert analytisch begleiten zu können.

Folgende Tabelle 10 zeigt die beispielhaft P-Löslichkeiten von Aschen aus der Staubfeuerung.

Tabelle 10: P-Löslichkeiten Klärschlammaschen aus der Staubfeuerung

	Zitronensäure-Löslichkeit	H_2O-Löslichkeit	H_2O + Neutralammoniumcitrat-Löslichkeit	CAL-Löslichkeit
KSA NBK	10,5%	0,0%	2,8%	15,6%
KSA Zyklon	7,1%	n.b.	1,8%	12,6%
KSA Filter	13,4%	0,0%	0,0%	16,1%
KSA+NH4Cl	15,0%	n.b.	n.b.	n.b.

II.1.3.2 Bewertung und Testung der Düngerprodukte (AP 3.6)

Zur Bewertung der im Projekt DreiSATS entwickelten Recyclingprodukte sowie der Zwischenprodukte wurden umfangreiche analytische und biologische Untersuchungen durchgeführt, die sowohl die regulatorisch relevante Düngemittelbewertung als auch die tatsächliche Pflanzenverfügbarkeit der enthaltenen Nährstoffe adressieren. Ziel war es, die agronomische Wirksamkeit, mögliche phytotoxische Effekte sowie die Eignung der Produkte für eine spätere Düngemittelzulassung belastbar zu bewerten.

Entwicklung und Aufbau standardisierter Methoden und Versuchsstände

Ein wesentlicher Entwicklungsschritt war der Aufbau standardisierter Versuchsstände für Pflanzenbiotests (Bioassays) am IKTS. Dieser ermöglicht die kontrollierte Einstellung zentraler Wachstumsparameter wie Luft- und Substrattemperatur, Lichtintensität, Photoperiode, Luftfeuchte sowie Wasser- und Nährstoffverfügbarkeit. Durch diese Infrastruktur inklusive der zugehörigen Methoden können Pflanzenversuche unabhängig von der Vegetationsperiode durchgeführt werden, was insbesondere für Screening-Untersuchungen und vergleichende Bewertungen unterschiedlicher Recyclingprodukte von großer Bedeutung ist.

Der Versuchsstand wurde im Projektkontext am IKTS aufgebaut, in Betrieb genommen und schrittweise qualifiziert. Im Rahmen der Methodenentwicklung wurde ein Parameterkatalog für sieben Pflanzenarten erarbeitet, der spezifische Anbaurezepturen umfasst und sich an einschlägigen internationalen Normen und Regelwerken orientiert (u. a. DIN EN ISO 11269-2, DIN EN 16086-1, BRL K10001, ISTA-Regelwerke).



Abbildung 38: Versuchsstand Phytotox im Aufbau

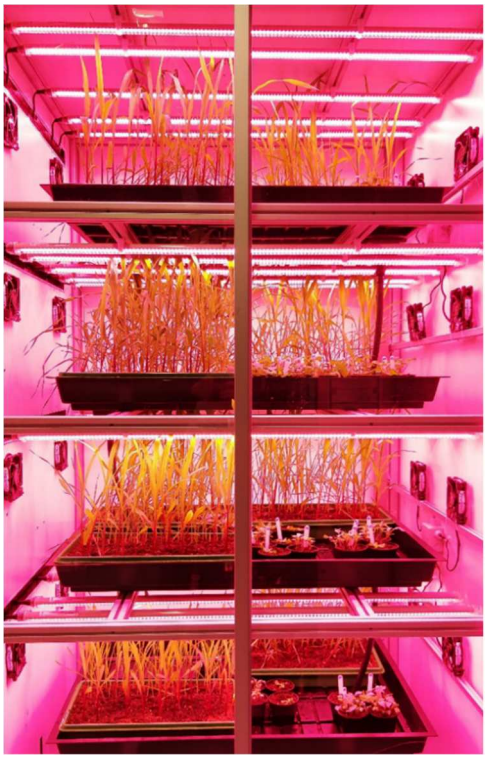


Abbildung 39: Versuchsstand Phytotox - Tastversuch

Zur standardisierten Erfassung des Pflanzenwachstums wurde der BBCH-Code in die Methodik integriert. Dieses international etablierte System erlaubt eine eindeutige Beschreibung der morphologischen Entwicklungsstadien und wurde sowohl für die laufende Bonitur als auch für die Endauswertung herangezogen.

Stadium	Beschreibung
0	Keimung / Austrieb
1	Blattentwicklung (Hauptsproß)
2	Bildung von Seitensprossen / Bestokkung
3	Längen- bzw. Rosettenwachstum des Hauptsprosses/ Triebentwicklung / Schossen (Haupttrieb)
4	Entwicklung vegetativer Pflanzenteile (Erntegut) bzw. vegetativer Vermehrungsorgane/ Ähren- bzw. Rispenschwellen
5	Erscheinen der Blütenanlage (Hauptsproß)/ Ähren- bzw. Rispenschieben
6	Blüte (Hauptsproß)
7	Fruchtentwicklung
8	Frucht- und Samenreife
9	Absterben bzw. Eintreten der Vegetationsruhe

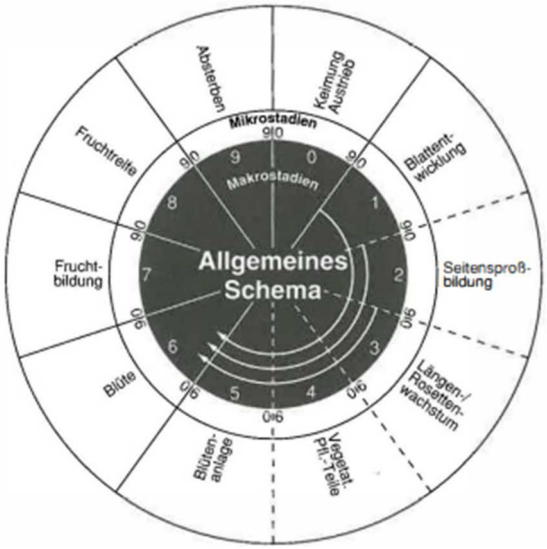


Abbildung 40: Unterteilung der pflanzlichen Entwicklungszyklen in Makro- und Mikrostadien nach dem BBCH-Code (Meier 2018)

Bioassays sind geeignet, die ökotoxikologischen Gefahren von verschiedenen Ausgangsstoffen besser einzuschätzen. Entsprechend wurden durch das europäische Komitee für Normung (CEN) zahlreiche Vorschriften für die Durchführung von Bioassays erstellt, um die Phytotoxizität von Chemikalien, Böden, Düngern, Bodenhilfsstoffen, Substraten etc. besser bewerten zu können. Des Weiteren gibt es private Unternehmen, Industrieverbände und wissenschaftliche Organisationen, die Bioassays erstellen oder Vorgaben dafür festlegen. Einige dieser Bioassays sind für die breite Anwendung geeignet, während andere in ihren Anforderungen und in Bezug auf die Ausgangsstoffe explizit sind. Im Projekt wurden die bekannten Durchführungsvorschriften zur Phytotoxizitätsprüfung von Chemikalien, Erden und Substraten auf Landpflanzen weiter systematisiert. Um eine materialgerechte Anwendung der Vorschriften zu erreichen, wurde eine Entscheidungshilfe in Form eines Flussdiagrammes (Entscheidungsbaum, Abbildung 41) erstellt. Diese Unterlage wird genutzt, um bei Probeneingang im Sinne des Qualitätsmanagements nachvollziehbar die jeweils zweckmäßigsten Methoden anzuwenden. Um die Durchführung zu unterstützen, wurde zudem auf Grundlage der Vorschriften, der Erfahrungen bei der Durchführung und unter Zuhilfenahme weiterer Literatur ein IKTS-interner Leitfaden zur Durchführung einer Phytotoxizitätsprüfung erstellt (Abbildung 42). Die Nutzbarkeit der Unterlagen wurde anhand eines Versuchs mit Materialproben aus dem DreiSATS-Vorhaben überprüft. Diese Arbeiten wurden maßgeblich durch eine Masterarbeit in Kooperation mit der Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden, Fakultät Landbau, Umwelt und Chemie unterstützt.

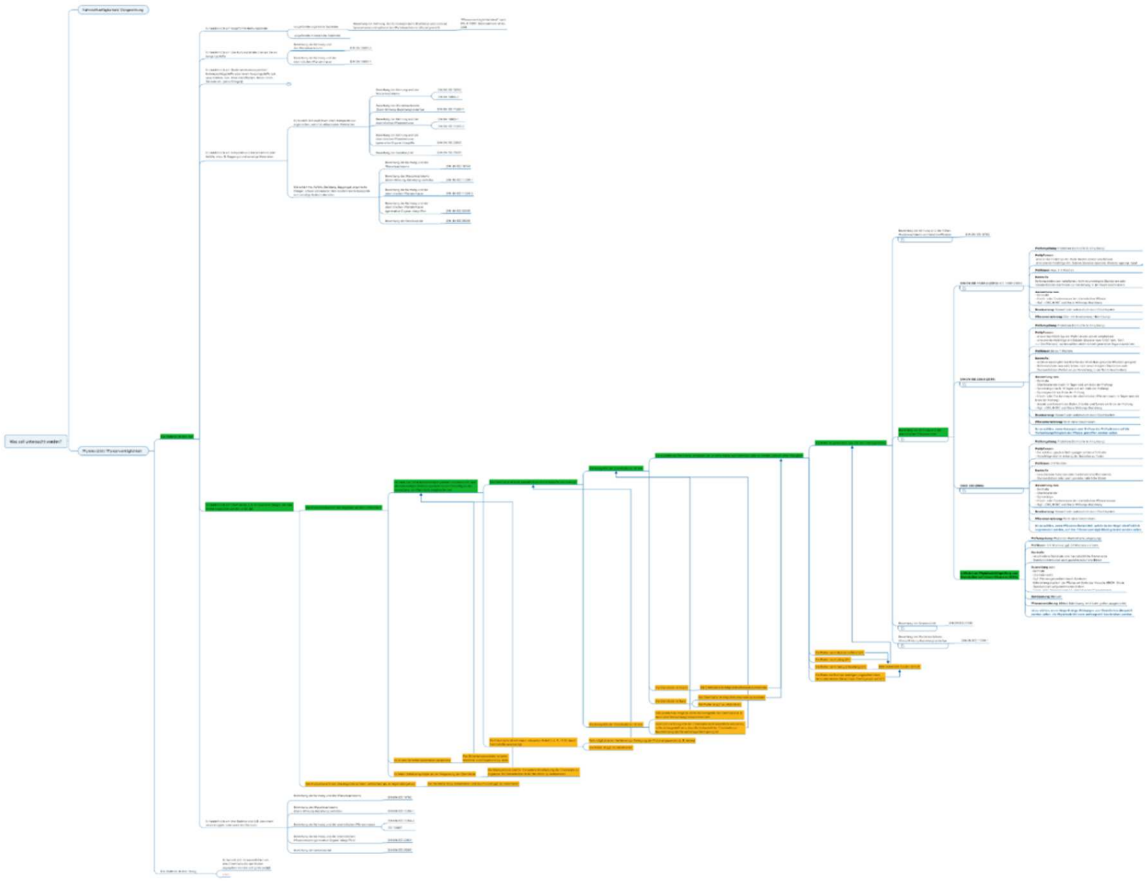


Abbildung 41: Entscheidungsbaum zur materialgerechten Anwendung von Bioassay-Vorschriften

Fraunhofer IKTS

FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR KERAMISCHE TECHNOLOGIEN UND SYSTEME IKTS

Leitfaden zur Phytotoxizitätsprüfung von Chemikalien bei höheren Pflanzen

Niels Kaiser

Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden (HTWD)
Fakultät LUC • Pillnitzer Platz 2 • 01326 Dresden

Nico Domurath

Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien und Systeme IKTS
Winterbergstraße 28 • 01277 Dresden

Vertraulichkeit: intern

Dresden, 19.02.2024

TÜVRheinland ZERTIFIZIERT Management System ISO 9001:2015 ISO 14001:2015 www.tuv.com ID 1100009194

Inhaltsverzeichnis

1 Kurzbeschreibung des Bioassays ... 1
2 Materialien ... 1
2.1 Prüfpflanzen ... 1
2.2 Kontrollboden/-substrat ... 2
2.3 Prüfgefäße ... 3
2.4 Phytotron/ Pflanzenkulturraum ... 4
2.5 Gängige Laborausrüstung ... 4
2.6 Waagen ... 4
2.7 Sonstige Materialien ... 4
3 Durchführung des Bioassays ... 5
3.1 Vorbereitende Prüfung zur Ermittlung eines geeigneten Konzentrationsbereiches der Prüfchemikalie (Range-Finding-Test) (fakultativ) ... 5
3.2 Konzentration der Prüfchemikalie ... 5
3.3 Einmischen der Chemikalie in den Kontrollboden ... 5
3.4 Befüllung der Prüfgefäße mit den Boden- /Chemikaliengemischen und Aussaat ... 7
3.5 Kulturbedingungen während der Prüfung ... 9
3.6 Ernährung und Bewässerung der Versuchspflanzen ... 10
3.7 Ausdünnen der Pflanzen ... 12
4 Gültigkeit der Prüfung ... 13
5 Messung der Endpunkte ... 14
5.1 Bestimmung der Keimrate ... 14
5.2 Bonitur des Pflanzenwuchses (Chlorosen, Nekrosen, Deformationen) ... 14
5.3 Bonitur der Entwicklungsstadien der Pflanzen mithilfe des BBCH-Codes ... 16
5.4 Aufnahme von Fotos zum optischen Vergleich ... 16
5.5 Erfassung der pflanzlichen Biomasse ... 16
5.6 Probegewinnung für die Pflanzensaftanalyse ... 17
5.7 Längenmessung einzelner Pflanzenorgane (fakultativ) ... 18
6 Literaturverzeichnis ... 19
7 Checkliste ... 21

Abbildung 42: Titelblatt und Inhaltsverzeichnis des internen Leitfadens

Das am IKTS etablierte pflanzenbauliche Versuchswesen ist entlang der Produktentwicklung von Düngeprodukten strukturiert und ermöglicht eine schrittweise Bewertung von Rohstoffen, Zwischenprodukten und Endprodukten (Abbildung 43).

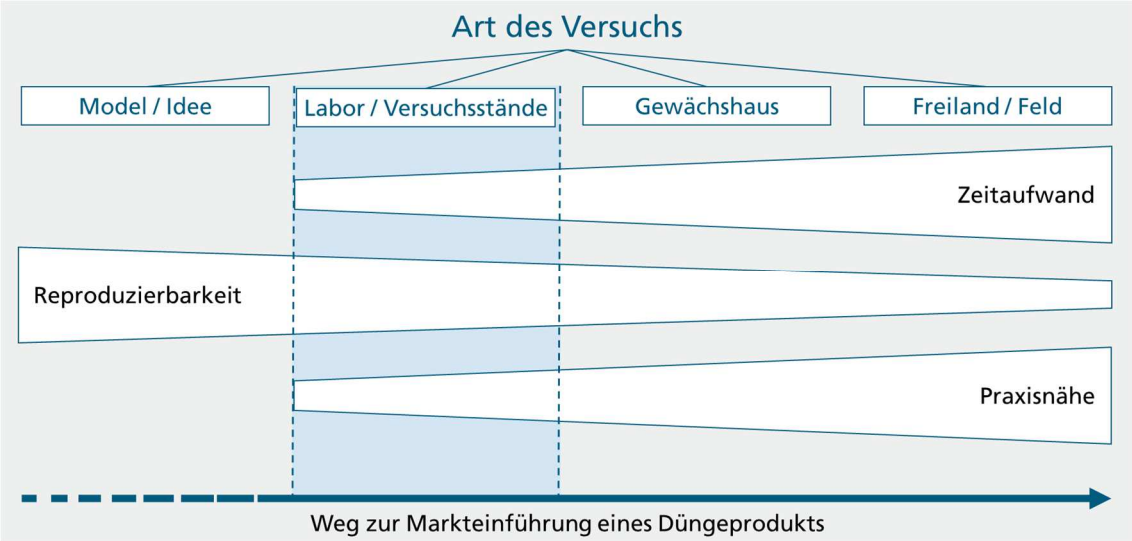


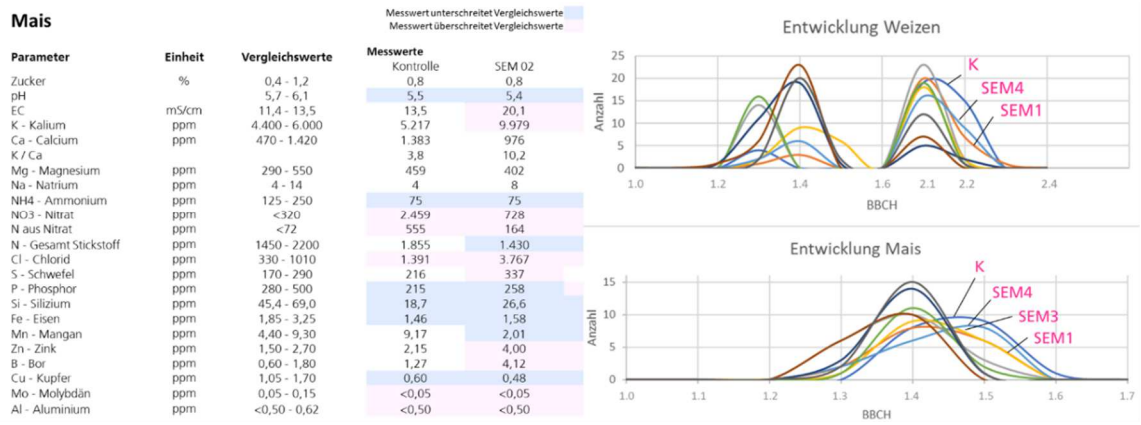
Abbildung 43: Pflanzenbauliches Versuchswesen entlang der Produktentwicklung von Düngeprodukten; IKTS-Ansatz blau hinterlegt

Eine Bewertung von jeweiligen Aschen, Düngemittelprodukte, Bodenhilfsstoffen, Erden oder Substrate läuft in folgenden Schritten ab:

- Auswahl geeigneter Pflanzenarten und Anzuchtsubstrate
- Berechnung und Bereitstellung notwendiger Nährstoffe als Feststoff oder Nährlösung aus Einzeldüngern
- tägliche Bewertung in frühen Entwicklungsphasen (BBCH ≤1)
- zweitägliche Bewertung für spätere Entwicklungsphasen (BBCH >1)
- Bewässerung und ggf. Nachdüngung
- ggf. Zwischenernten, z.B. bei Luzerne, zur Ermittlung und Bewertung der Pflanzenmasse und zur Beurteilung der Langzeitdüngerwirkung
- Zwischenauswertungen umfassen BBCH-Dokumentation, phänotypische Beurteilung, Dokumentation von Verfärbungen (Chlorosen und Nekrosen)
- Endauswertung mit Frischmasse, Trockenmasse und Wuchshöhe sowie Analyse der Nährstoffe in Anzuchtsubstrat und Pflanzengewebe
- vollständige Dokumentation und Auswertung



Abbildung 44: Auszug aus dem Ergebnis eines Tastversuchs: Bedeckungsgrade Kohlrabi (links) und Salat (rechts)



Mais

Messwert unterschreitet Vergleichswerte
Messwert überschreitet Vergleichswerte

Parameter	Einheit	Vergleichswerte	Messwerte Kontrolle	Messwerte SEM 02
Zucker	%	0,4 - 1,2	0,8	0,8
pH		5,7 - 6,1	5,5	5,4
EC	mS/cm	11,4 - 13,5	13,5	20,1
K - Kalium	ppm	4.400 - 6.000	5.217	9.979
Ca - Calcium	ppm	470 - 1.420	1.383	976
K / Ca			3,8	10,2
Mg - Magnesium	ppm	290 - 550	459	402
Na - Natrium	ppm	4 - 14	4	8
NH4 - Ammonium	ppm	125 - 250	75	75
NO3 - Nitrat	ppm	<320	2.459	728
N aus Nitrat	ppm	<72	555	164
N - Gesamt Stickstoff	ppm	1450 - 2200	1.855	1.430
Cl - Chlorid	ppm	330 - 1010	1.391	3.767
S - Schwefel	ppm	170 - 290	216	337
P - Phosphor	ppm	280 - 500	215	258
Si - Silizium	ppm	45,4 - 69,0	18,7	26,6
Fe - Eisen	ppm	1,85 - 3,25	1,46	1,58
Mn - Mangan	ppm	4,40 - 9,30	9,17	2,01
Zn - Zink	ppm	1,50 - 2,70	2,15	4,00
B - Bor	ppm	0,60 - 1,80	1,27	4,12
Cu - Kupfer	ppm	1,05 - 1,70	0,60	0,48
Mo - Molybdän	ppm	0,05 - 0,15	<0,05	<0,05
Al - Aluminium	ppm	<0,50 - 0,62	<0,50	<0,50

Abbildung 45: Auszug aus dem Ergebnis eines Tastversuchs: Pflanzensaftuntersuchung (links) und BBCH-Code (rechts)

Ergebnisse der Pflanzenversuche und Screening-Untersuchungen

In Tast- und Screeningversuchen wurden Aschen aus der Staubfeuerung sowie Zwischenprodukte und Düngergranulate aus der Säureaufschluss-Granulierung untersucht. Insgesamt wurden 92 Phosphorquellen in Pflanzenversuchen betrachtet. Je nach Fragestellung kamen unterschiedliche Modellpflanzen zum Einsatz. Während Luzerne (*Medicago sativa* L.) insbesondere für Exaktversuche zur Bewertung der Phosphorverfügbarkeit geeignet ist, wurde Chinakohl (*Brassica rapa* subsp. *pekinensis*) aufgrund seiner kurzen Kulturzeit und hohen Sensitivität gegenüber Störstoffen bevorzugt für Screening-Untersuchungen eingesetzt. Zur Minimierung von Pufferwirkungen des Substrats wurde ein inertes, nährstoffarmes Spezialsubstrat verwendet.

Zur wiederholten, standardisierten Bewertung des Pflanzenwachstums sowie zur P-Verfügbarkeit und Phytotoxizität wurden folgende Datensätze erfasst und ausgewertet:

- Entwicklungsbonitur und Vereinzelung
- Frischmassenbestimmung und Pflanzensaftanalysen zur Endbonitur
- Stickstoff-, Phosphorgehalte und weitere essenziellen Nährstoffe im Pflanzensaft
- deskriptive Versuchsauswertung (phänotypische Bewertung)

In den folgenden Abbildungen sind ausgewählte Ergebnisse dargestellt. Den Projektpartnern wurde eine vollständige Versuchsdokumentation übergeben.

Die Ergebnisse zeigten, dass sich die Recyclingprodukte hinsichtlich Pflanzenwachstum, Nährstoffaufnahme und Verträglichkeit differenziert bewerten lassen. Mehrere Materialien erreichten in Kurzzeitversuchen von 34 Tagen Frischmassen und Entwicklungsstadien, die mit mineralischen Referenzdüngern vergleichbar waren.



Abbildung 46: Frischmassen der oberirdischen Pflanzenteile [g]



Abbildung 47: TSP-Kontrolle und 0-Kontrolle



Abbildung 48: Versuchspflanzen der Variante J24, Beispiele für aufgetretene Chlorosen

Die Aussagekraft der Pflanzenversuche ergibt sich aus der gemeinsamen Betrachtung von Entwicklungsverlauf, Biomassebildung, sichtbaren Symptomen und Nährstoffaufnahme. Die Frischmasse der oberirdischen Pflanzenteile beschreibt zunächst die kurzfristige Wachstumsleistung und ermöglicht den Vergleich der geprüften Recyclingprodukte mit der TSP-Kontrolle sowie der 0-Kontrolle. Erst in Verbindung mit BBCH-Bonituren, Bedeckungsgrad und visuellen Beobachtungen lässt sich einordnen, ob vergleichbare Frischmassen auf einer gleichmäßigen, physiologisch stabilen Entwicklung beruhen oder ob Wachstumsleistungen durch verzögerte Entwicklung, Chlorosen, Nekrosen oder andere Stress-symptome relativiert werden müssen. Pflanzensaftanalysen ergänzen diese Bewertung. Sie zeigen, in welchem Umfang Phosphor und weitere Makro- und Mikronährstoffe tatsächlich aufgenommen wurden und ob Hinweise auf Nährstoffimbalancen oder antagonistische Effekte bestehen. Hohe Aussagekraft entsteht, wenn die im Pflanzensaft nachgewiesenen Phosphorgehalte mit der erreichten Frischmasse verknüpft werden, da so nicht nur die momentane P-Konzentration, sondern auch die in der Pflanzenmasse abgebildete nutzbare P-Menge abgeschätzt werden kann. Ergänzend liefern pH-Wert, Salzgehalt, Phosphorlöslichkeit und granulometrische bzw. stoffliche Eigenschaften der geprüften Aschen und Düngerzwischenprodukte Hinweise darauf, ob beobachtete Unterschiede eher auf eine unzureichende P-Verfügbarkeit, auf Freisetzungsdynamiken, auf Begleitionen oder auf materialspezifische Verträglichkeitsgrenzen zurückzuführen sind. Die Screening-Versuche erlauben damit vor allem eine schnelle, reproduzierbare Einordnung des eher kurzfristig pflanzenverfügbaren Phosphoranteils und möglicher phytotoxischer Risiken. Sie ersetzen keine längerfristigen Gefäß- oder Freilandversuche zur Bewertung der P-Nachlieferung,

bieten aber eine belastbare Grundlage, um geeignete Varianten für weiterführende Prüfungen auszuwählen und weniger geeignete Materialien frühzeitig auszuschließen.

Je weiter fortgeschritten ein Material auf dem Weg zum Düngemittel ist, es also weniger um grundlegende Entwicklungsentscheidungen geht, sondern viel mehr die genauere Betrachtung weniger, ausgewählter Varianten im Vordergrund steht, desto relevanter werden Versuche mit längerer P-Bevorratung und Pflanzen, die sich für einen Mehrfachschnitt eignen. Hier empfiehlt es sich, auch mehr als eine Pflanzenart und möglichst Vertreter der Pflanzenklassen der Mono- oder Dikotyledonae einzusetzen. Deren Wurzelsysteme weisen nicht nur in der Architektur, sondern auch in den Wirkungswegen für die Verfügbarmachung von Pflanzennährstoffen Unterschiede auf.

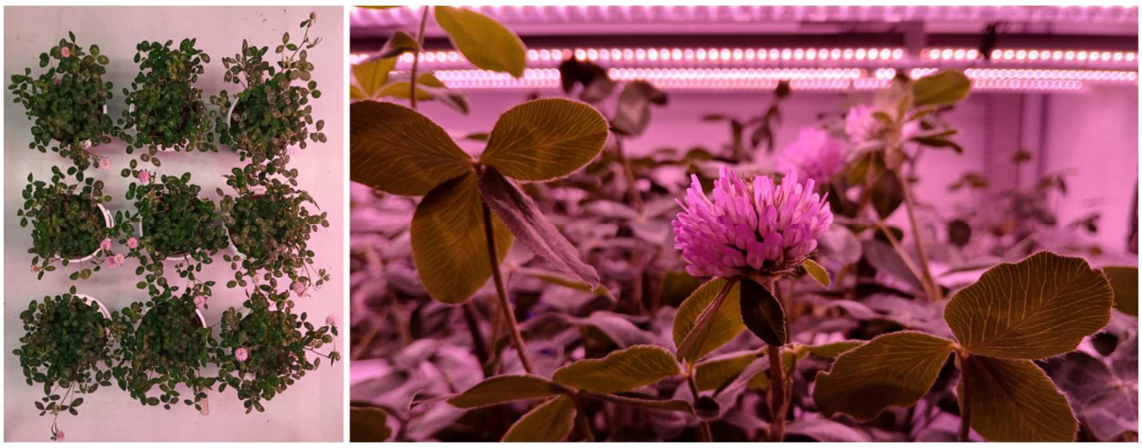


Abbildung 49: Rotklee im Versuch 2025 mit Düngemittelvorprodukten

Ein Beispiel dafür, dass die Prüfung mehrerer Arten aus den beiden Pflanzenklassen sinnvoll ist, boten die 2025 durchgeführten Versuche mit Rotklee und Weidelgras, die mit gleichen Testmaterialien versorgt wurden. Während die Datensätze im Rotklee dicht beieinander und an den Werten der mit Triplesuperphosphat versorgen Kontrollvariante erzeugten (Abbildung 49), zeigten sich im Weidelgras auch optisch deutliche Unterschiede (Abbildung 50).

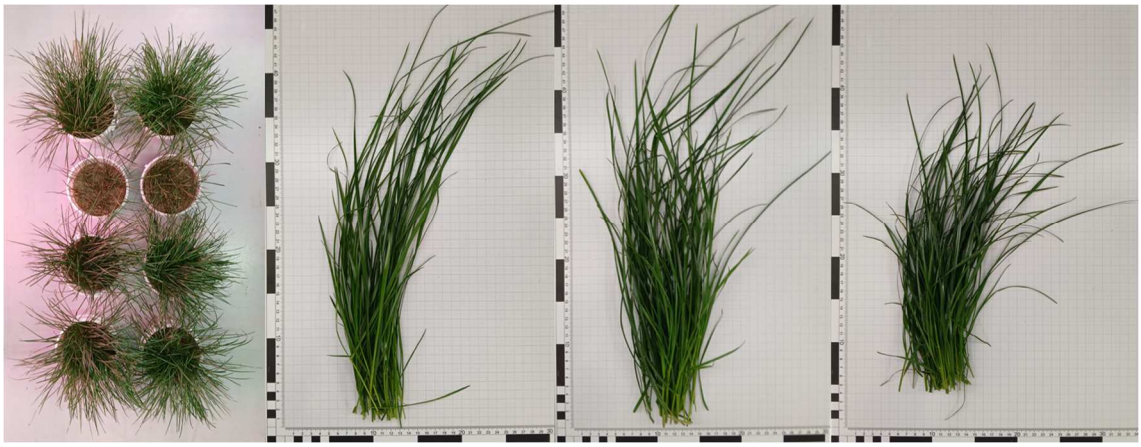


Abbildung 50: Weidelgras im Versuch 2025 mit Düngemittelvorprodukten

Die erhobenen Datensätze erwiesen sich als gut reproduzierbar und wiesen eine für pflanzenbauliche Versuche geringe Varianz auf. Trotz der etablierten methodischen Ansätze bestehen weiterhin Wissenslücken, um den Umgang der Pflanzen mit den Recyclingprodukten erklären und das spezifische Potenzial der Materialien im Feldeinsatz genauer beschreiben zu können. Der Umgang mit dem Substrat ist anspruchsvoll, da hohe pH-Werte die Nährstoffverfügbarkeit, die Pflanzenverträglichkeit und die Vergleichbarkeit einzelner Prüfvarianten beeinflussen können. Hinzu kommt, dass das Mikrobiom in den verwendeten

Substraten fehlt oder nur unzureichend charakterisiert ist, wodurch biologische Wechselwirkungen nur begrenzt berücksichtigt werden können. Hier besteht weiterhin Forschungs- und Entwicklungsbedarf.

Zur langfristigen Nutzung und für mögliche Meta-Auswertungen wurde eine Versuchsdatenbank aufgebaut. Ergänzend zu den Pflanzenversuche wurden die Aschen und Dünger(zwischen)produkte auch hinsichtlich der P-Löslichkeit sowie der Partikelgrößenverteilung bewertet.

Methoden zur Phosphorlöslichkeit und Produkteigenschaften

Zur belastbaren Bewertung der Phosphorverfügbarkeit der im Projekt erzeugten Aschen, Zwischenprodukte und Düngergranulate wurden am IKTS mehrere nasschemische Methoden zur Bestimmung der Phosphorlöslichkeit aufgebaut, etabliert und aufeinander abgestimmt. Ziel war es, sowohl regulatorisch relevante Kenngrößen für die Düngemittelbewertung als auch pflanzenbaulich aussagekräftige Parameter für die agronomische Einordnung der Produkte abzubilden. Hierzu wurden Methoden zur Bestimmung des wasser- und neutralammoniumcitratlöslichen Phosphats sowie des durch Ameisensäure aufgeschlossenen Phosphats gemäß den einschlägigen VDLUFA-Vorschriften (Band II) (VDLUFA 2019) implementiert und in die projektinterne Analytik integriert. Ergänzend zu den Pflanzenversuchen wurde die Phosphorlöslichkeit der Aschen systematisch nach der Calcium-Acetat-Lactat-Methode (CAL) untersucht, da diese Kenngröße sowohl für die Düngemittelzulassung als auch für die agronomische Bewertung von zentraler Bedeutung ist. Die CAL-Methode wurde gezielt etabliert, um den Einfluss unterschiedlicher Prozessbedingungen und Additivstrategien auf die potenziell pflanzenverfügbare Phosphorfraktion vergleichend bewerten zu können. Die Methoden wurden hinsichtlich Probenaufbereitung, Extraktionsbedingungen, Analytik und Dokumentation standardisiert und bilden eine wesentliche Grundlage für die vergleichende Bewertung der Prozessprodukte sowie für die Vorbereitung einer späteren Düngemittelzulassung.

Einordnung und Bedeutung der Ergebnisse

Standardisierte Pflanzentests stellen ein zentrales Instrument zur schnellen, versuchsbegleitenden Bewertung von Zwischenprodukten und Düngerprodukten dar und ermöglichen damit eine zeitnahe Anpassung relevanter Prozessparameter. Die Ergebnisse zeigen, dass durch die Kombination aus chemischer Modifikation der Aschen und standardisierten Pflanzenversuchen eine belastbare Bewertung der entwickelten Recyclingprodukte möglich ist. Der aufgebaute Versuchsstand erlaubt eine reproduzierbare und jahreszeitenunabhängige Untersuchung der Pflanzenverfügbarkeit und Phytotoxikologie und stellt damit ein wesentliches Werkzeug für die Produktentwicklung, Qualitätssicherung und Vorbereitung der Düngemittelzulassung dar. Insbesondere die Identifikation geeigneter Additive zur gezielten Erhöhung der Phosphorlöslichkeit liefert wichtige Ansatzpunkte für die Weiterentwicklung marktfähiger Recyclingdünger.

II.1.4 Bilanzierungen, Stakeholder und Vorbereitung Anschlussphase zur kommerziellen Umsetzung (Hauptarbeitspaket 5)

II.1.4.1 Begleitende Bilanzierung und Wirtschaftlichkeitsbetrachtung (AP 5.1)

Im Rahmen des Arbeitspakets AP 5.1 wurden durch das IKTS die methodischen und inhaltlichen Grundlagen für die ökologische Bewertung der im Projekt DreiSATS entwickelten Prozesskette geschaffen und schrittweise umgesetzt. Ziel war es, belastbare Stoff-, Energie- und Emissionsdaten zu erheben, geeignete Modellierungsansätze zu entwickeln und diese in eine vergleichbare Life-Cycle-Assessment-(LCA-) und Ökobilanzmethodik zu überführen. Die Arbeiten bilden zugleich die Grundlage für weiterführende Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen der beteiligten Partner und die Vorbereitung einer kommerziellen Umsetzung.

TransPhor-Abstimmungen und methodische Harmonisierung der Ökobilanzierung

Das IKTS hat sich sehr intensiv an den Abstimmungsrunden, Workshops und fachlichen Diskussionen des Begleitvorhabens TransPhor beteiligt und die Ausgestaltung der methodischen Leitplanken für die ökologische Bewertung aktiv mitgestaltet. Ziel dieser Aktivitäten war die Sicherstellung einer belastbaren Vergleichbarkeit der Ökobilanzen für die unterschiedlichen technologischen Ansätze der RePhoR-Fördermaßnahme. Die Ergebnisse dieses projektübergreifenden Abstimmungsprozesses wurden in einem veröffentlichten Statusbericht 2025 zusammengefasst und bilden die methodische Grundlage für die im Projekt DreiSATS durchgeführten Life Cycle Assessments.

Modellbildung und qualitative Bewertung des Gesamtverfahrens

Über mehrere Iterationsstufen wurde über die Projektlaufzeit zunächst ein Modell für den gesamten Prozess erstellt. Das LCA-Gesamtmodell sowie die resultierenden Massen- und Energieflüsse für ein beispielhaftes Einzugsgebiet von 100.000 EGW ist in Abbildung 51 dargestellt. Abbildung 52 zeigt die daraus abgeleiteten Treibhausgas-Potenziale (CO_2-Äquivalente) qualitativ anhand der Dicke der Sankey- Pfeile.

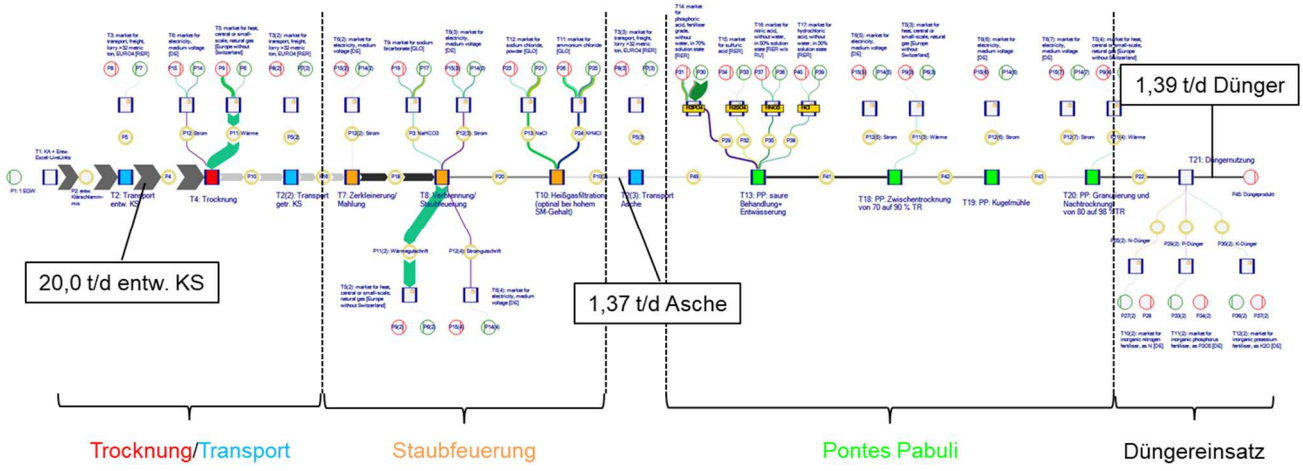


Abbildung 51: LCA-Modell DreiSATS - Massen- und Energieflüsse (für 100.000 EGW)

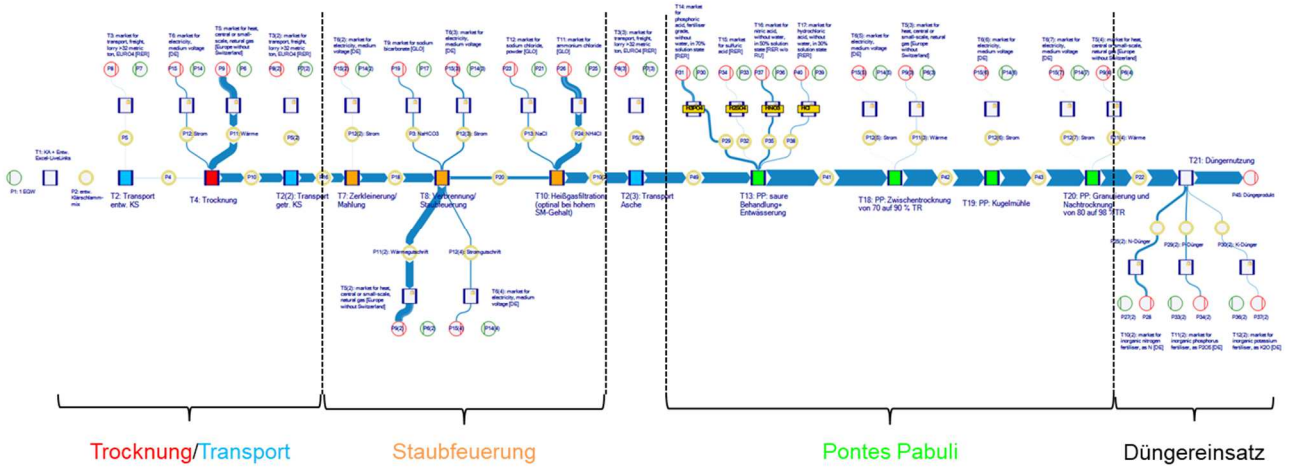


Abbildung 52: LCA-Modell DreiSATS - THG-Potenzial (in CO_2-äq.) (für 100.000 EGW)

Diese ersten abgeschätzten Ergebnisse zeigten, dass der überwiegende Anteil des bei der Verbrennung entstehenden CO_2 biogenen Ursprungs (Klärschlamm) ist und damit nicht zu einer Klimaerwärmung beiträgt. Wesentliche Beiträge zum THG-Potenzial resultierten hingegen aus dem Einsatz von fossil erzeugter Wärme für die notwendige Klärschlammtrocknung, aus dem Einsatz von Strom, von Chemikalien deren Herstellung wiederrum

fossile Ressourcen benötigt sowie aus der Bildung von Lachgas (N_2O) während der Verbrennung. Im Gegenzug kann durch die sinnvolle Nutzung der Abwärme eine große Menge an fossiler Wärme kompensiert und gutgeschrieben werden. Daher kommt der Wärmebilanz der Verfahrenskette und der Nutzung von Abwärme eine zentrale Bedeutung zu. Die Gutschrift von Düngeprodukten führt ebenfalls zu Verringerung der THG-Belastung.

Ergebnisse der LCA-Analyse

Im weiteren Verlauf des Projektes wurde im Konsortium entschieden, den Gesamtprozess aufzutrennen in den Bereich Klärschlammbehandlung inkl. Staubfeuerung sowie den Bereich Aschebehandlung mittels pontes pabuli-Verfahren. Letzteres ist hinsichtlich der Ökobilanz stark abhängig von den Schlammeigenschaften und insbesondere vom daraus notwendigen Einsatz von Chemikalien für die Aufbereitung der Düngeprodukte. Daher wurde seitens der Verfahrensinhaber entschieden, die Grundlagen und Modelle der LCA für die kundenspezifische Bewertung einzusetzen, aber keine konkrete Ökobilanz zu veröffentlichen.

Für die Klärschlammbehandlung inklusive der Staubfeuerung wurden die Verfahrensparameter durch den Projektpartner Carbotechnik zur Verfügung gestellt. Im Abschlussbericht von Carbotechnik ist die Auslegung der entsprechenden Anlage (6722 t getrockneter Klärschlamm mit 90 % TR-Gehalt) dargestellt. Gemäß TransPhor-Methodik wurden alle Aufwendungen und Gutschriften (negatives Vorzeichen) auf die Entsorgung von entwässertem Klärschlamm (TR=25 %) von einer Person (ein Einwohnergleichwert (EGW)) pro Jahr bezogen. Abbildung 53 zeigt alle einbezogenen Stoff- und Energieflüsse. Für den Transport des entwässerten Klärschlammes zu einer dezentralen Trocknung und Verbrennung wurden beispielhaft 100 km angesetzt. Bei der Klärschlammtrocknung wird auf ein sehr effizientes Verfahren der Firma SludgeDryingSystems GmbH & Co.KG gesetzt, welches mit großen Luftmengen und vergleichsweise geringer thermischer Energie trocknet. Dies führt dazu, dass die auskoppelbare Nutzwärme bei der Schlammverbrennung deutlich größer ist als die benötigte Wärme für die Trocknung. Der Überschuss kann aufgrund des dezentralen Konzeptes von DreiSATS zum Beheizen von Industrieprozessen oder Haushalten genutzt werden.

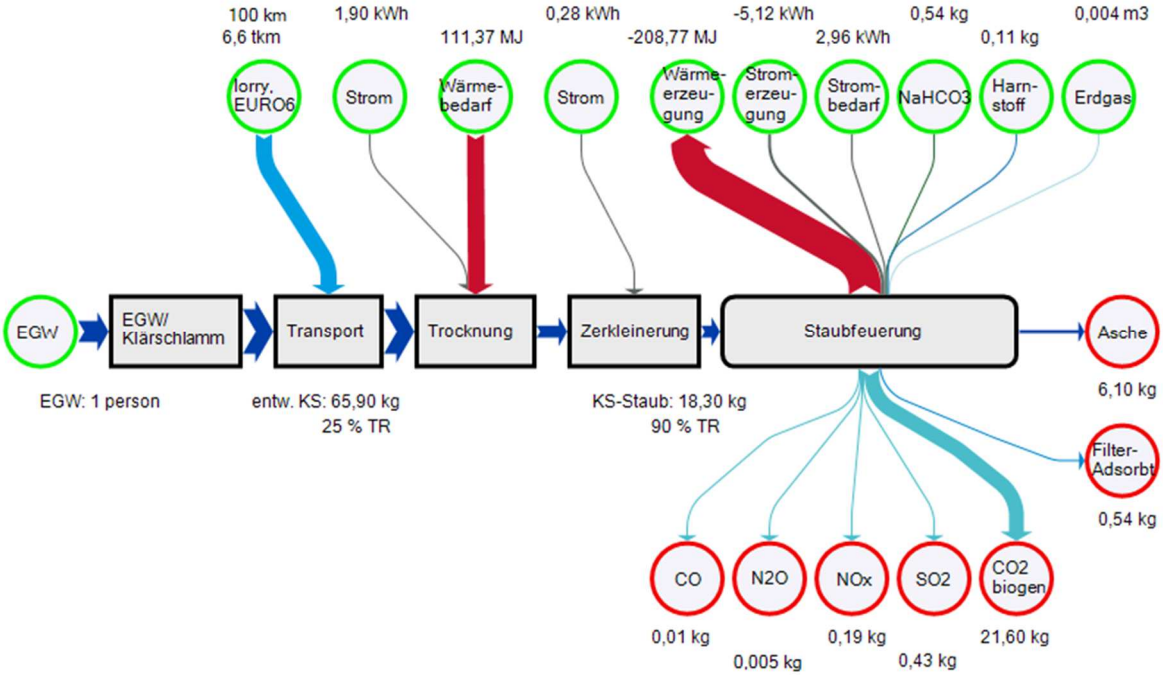


Abbildung 53: Stoff- und Energieflüsse für Trocknung und Staubfeuerung – pro EGW und Jahr

Die positive Wärmebilanz sowie deutlich geringere Lachgasemissionen und ein sehr kleiner Bedarf an Erdgas zum Start der Anlage führen zu einer deutlich besseren THG-Bilanz als bei

einer zentralen Klärschlamm-Monoverbrennung. Für diese wurde in Abstimmung mit allen anderen Verbundvorhaben eine Bilanz als Vergleichsgrundlage erstellt, welche pro EGW und Jahr für die Verbrennung von entwässerten Klärschlamm ein THG-Potenzial von ca. 3,9 kg CO2-eq zusätzlich freisetzt.

In Abbildung 54 sind die THG-Potenziale des DreiSATS-Verfahrens als Sankey-Diagramm dargestellt. Gut sichtbar ist auch hier der Effekt von Wärmebedarf und Wärmeerzeugung. Nach Ausgleich aller Freisetzungen und Gutschriften (bei 100 % Wärmenutzung) werden pro EGW und Jahr bilanziell 2,1 kg CO_2-eq eingespart. Diese Einsparung entsteht, weil Erdgas für die Wärmebereitstellung durch regenerative Abwärme ersetzt wird, sowie Strom des deutschen Mixes durch die Stromerzeugung bei der Klärschlammverbrennung. Selbst wenn weniger Abwärme genutzt werden kann, stellt das DreiSATS-Verfahren bis zur Erzeugung der Asche eine vergleichsweise nachhaltige Strategie dar.

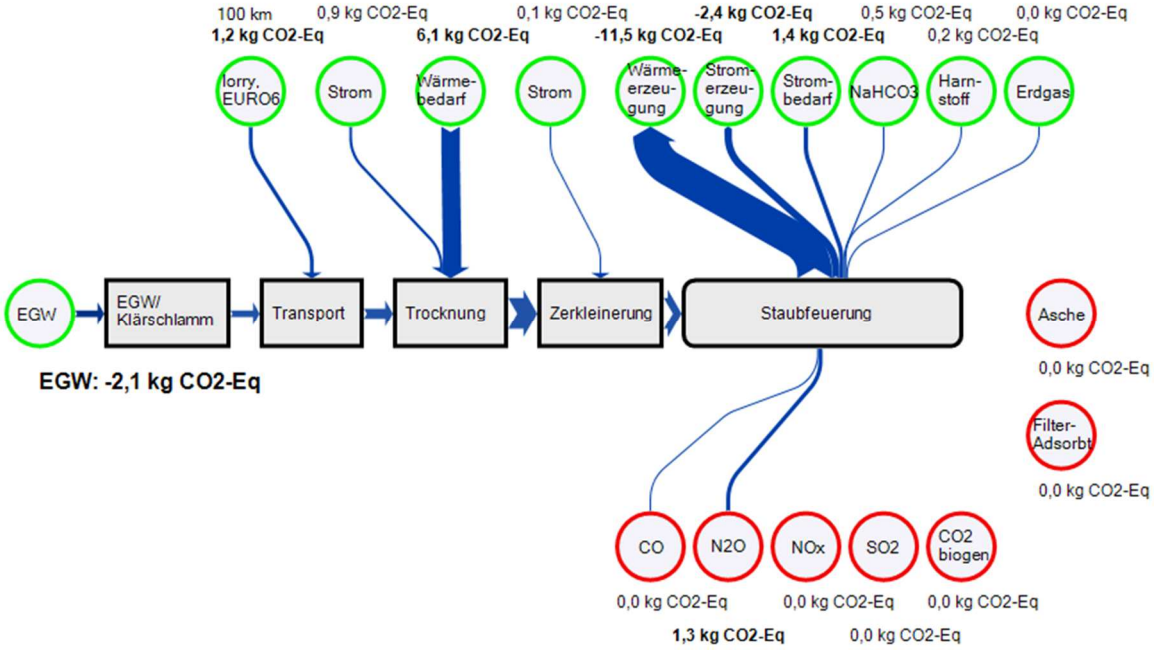


Abbildung 54: THG-Bilanz für Trocknung und Staubfeuerung – pro EGW und Jahr

Zusammenfassung und Einordnung

Im Ergebnis von AP 5.1 liegen alle notwendigen Daten, Modelle und methodischen Festlegungen für die Durchführung der Ökobilanzierung und der weiterführenden Wirtschaftlichkeitsanalysen vor. Die erarbeiteten LCA-Modelle ermöglichen sowohl die Bewertung der DreiSATS-Verfahrenskette als auch den Vergleich mit alternativen Phosphorrecycling-Ansätzen. Die Ergebnisse dienen darüber hinaus als fundierte Entscheidungsgrundlage für die Ableitung von Grundkonzepten, die Kommunikation mit Stakeholdern sowie die Vorbereitung einer kommerziellen Umsetzung in der Anschlussphase.

II.1.4.2 Stakeholdermanagement und -analyse für Zorbau und weitere Standorte (AP 5.3)

Zielsetzung und Einordnung

Ein zentrales Ziel des Projekts DreiSATS war es, neben der technologischen Entwicklung einer integrierten Prozesskette zur thermischen Klärschlammverwertung mit Phosphorrückgewinnung auch die Voraussetzungen für eine spätere praktische Umsetzung und Anschlussfähigkeit zu schaffen. Vor diesem Hintergrund kam dem Stakeholdermanagement eine besondere Bedeutung zu. Ziel war es, relevante Akteursgruppen frühzeitig einzubinden, deren Anforderungen, Erwartungen und Vorbehalte systematisch zu erfassen sowie potenzielle Hemmnisse für eine spätere Umsetzung frühzeitig zu identifizieren und zu adressieren.

Das Stakeholdermanagement wurde im Projekt DreiSATS nicht als rein begleitende Kommunikationsmaßnahme verstanden, sondern als integraler Bestandteil der Projektbearbeitung. Es diente dazu, die im Projekt entwickelten technischen und organisatorischen Konzepte kontinuierlich mit den Perspektiven potenzieller Anwender, Abnehmer, Genehmigungsbehörden sowie weiterer relevanter Akteure abzugleichen. Damit leistete es einen wesentlichen Beitrag zur Erhöhung der Praxisnähe, Akzeptanz und Umsetzbarkeit der Projektergebnisse.

Inhaltlich knüpft dieser Ansatz unmittelbar an die im Projekt verfolgte Zielsetzung an, tragfähige, regulatorisch anschlussfähige und marktnahe Lösungsansätze für das Phosphorrecycling aus kommunalen Klärschlämmen zu entwickeln und für eine weiterführende Demonstrations- und Umsetzungsphase vorzubereiten.

Umfang und Struktur der Stakeholderbeteiligung

Über die gesamte Projektlaufzeit hinweg wurden insgesamt neun strukturierte Stakeholderworkshops durchgeführt. Diese begleiteten das Projekt von der frühen Konzeptphase bis zum Abschluss und dienten der kontinuierlichen Rückkopplung zwischen technischer Entwicklung und Akteursperspektiven. Die Workshops deckten dabei unterschiedliche Stakeholdergruppen und Themenfelder ab, darunter Klärschlammerzeuger, Düngemittelabnehmer, Technologieanbieter, Landwirtschaft, Genehmigungs- und Fachbehörden sowie übergreifende Akteursgruppen.

Die Workshopformate reichten von frühen Konzeptions- und Anforderungsworkshops über themenspezifische Fachworkshops bis hin zu Demonstrator- und Abschlussformaten. Neben klassischen Diskussions- und Austauschformaten wurden dabei auch Vor-Ort-Demonstrationen technischer Teilprozesse sowie Labor- und Anlagenbesichtigungen integriert. Ergänzt wurden die Workshops durch bilaterale Gespräche und fachliche Abstimmungen, sodass ein kontinuierlicher und belastbarer Dialog mit den relevanten Akteursgruppen über die gesamte Projektlaufzeit sichergestellt war.

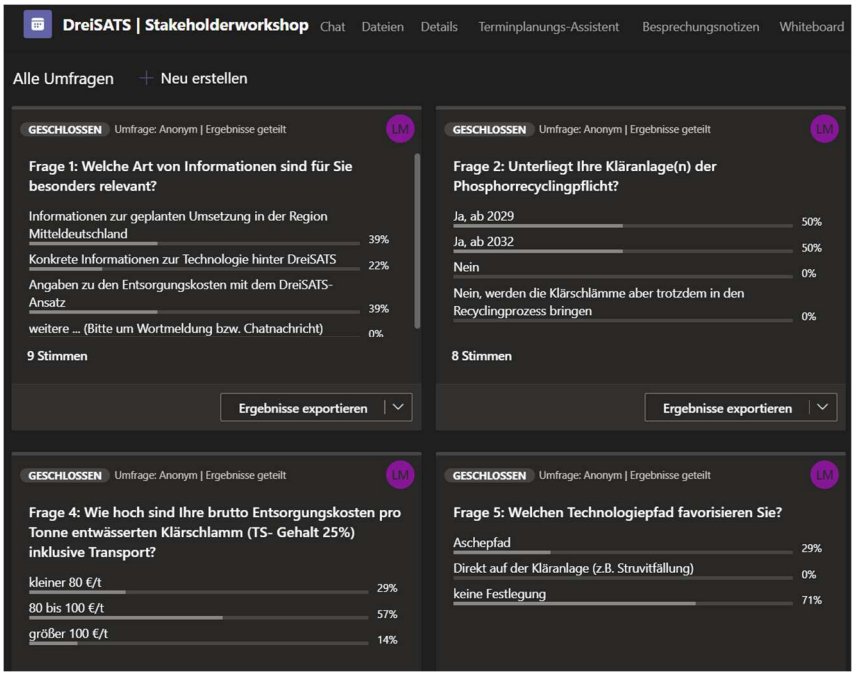


Abbildung 55: Auszug digitale Umfrage 2. Stakeholderworkshop

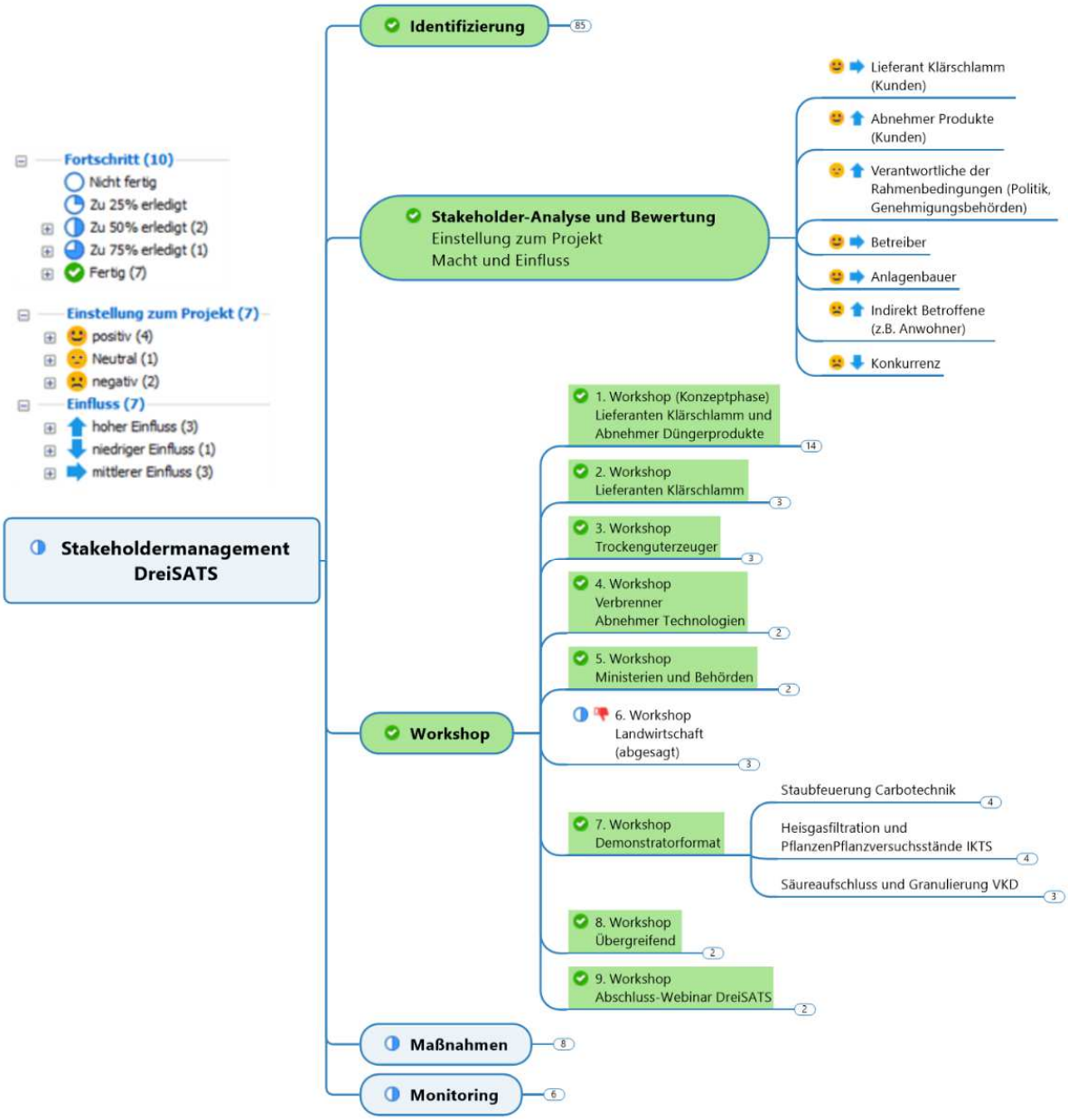


Abbildung 56: Stakeholdermanagement MindMap

Diese langfristig angelegte, iterative Beteiligungsstruktur stellte sicher, dass sich das Stakeholdermanagement nicht auf punktuelle Ereignisse beschränkte, sondern als kontinuierlicher Prozess wirksam wurde und die Projektbearbeitung nachhaltig beeinflusste.

Einbindung in überregionale Stakeholderformate

Über die regionale Stakeholderarbeit im mitteldeutschen Raum hinaus war das Projekt DreiSATS aktiv in überregionale fachliche Austausch- und Vernetzungsformate eingebunden, insbesondere im Rahmen der Deutschen Phosphorplattform (DPP). Die regelmäßige Teilnahme an Veranstaltungen, Arbeitsformaten und fachlichen Diskussionen der DPP stellte einen wichtigen Baustein des Stakeholdermanagements dar, um die Projektergebnisse in einen bundesweiten fachlichen und strategischen Kontext einzuordnen.

Durch diese aktive Mitwirkung konnte das Projekt DreiSATS seine technischen und konzeptionellen Ansätze mit Akteuren aus Wissenschaft, Industrie, Verwaltung und Politik disku-

tieren und spiegeln. Gleichzeitig wurden aktuelle Entwicklungen, regulatorische Fragestellungen sowie Erfahrungen aus parallellaufenden Projekten frühzeitig in die Projektbearbeitung zurückgespielt. Dies trug dazu bei, die entwickelten Lösungsansätze nicht nur regional, sondern auch im Hinblick auf bundesweite Rahmenbedingungen und Trends im Phosphormanagement weiterzuentwickeln und abzusichern.

Die Einbindung in die Deutsche Phosphorplattform stärkte zudem die Sichtbarkeit und Anschlussfähigkeit der Projektergebnisse über den unmittelbaren Projektkontext hinaus. Sie unterstützte den Wissenstransfer, förderte die Vernetzung mit potenziellen Akteuren für Folge- und Demonstrationsprojekte und leistete damit einen wesentlichen Beitrag zur strategischen Vorbereitung einer späteren Umsetzung und Übertragbarkeit der im Projekt DreiSATS entwickelten Konzepte.

Im Rahmen des Branchendialogs „Phosphor-Rückgewinnung aus Klärschlamm“ des Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMU) am 09.05.2024 beteiligte sich das Projekt DreiSATS am überregionalen fachlichen Austausch zu Technologien, Umsetzungsständen und regulatorischen Rahmenbedingungen der Phosphorrückgewinnung. Die Veranstaltung bot eine zentrale Plattform zur Vernetzung von Akteuren aus Ministerien, Behörden, Forschung, Kommunen sowie Industrie und unterstützte die Einordnung der Projektergebnisse in den bundesweiten Transformationsprozess.

Erhöhung der Akteursakzeptanz und Erwartungsklarheit

Ein wesentliches Ergebnis des Stakeholdermanagements im Projekt DreiSATS war die spürbare Erhöhung der Akteursakzeptanz gegenüber den entwickelten Projektansätzen. Durch die frühzeitige und wiederholte Einbindung relevanter Stakeholder konnten Informationsdefizite abgebaut und ein gemeinsames Verständnis für Zielsetzung, Randbedingungen und Entwicklungsschritte des Projekts geschaffen werden. Insbesondere auf Seiten der Klärschlammerzeuger und potenziellen Anwender bestand zu Projektbeginn ein hoher Informationsbedarf hinsichtlich technischer Machbarkeit, regulatorischer Anforderungen sowie wirtschaftlicher Rahmenbedingungen der Phosphorrückgewinnung. Die Workshops und begleitenden Gespräche ermöglichten es, diese Erwartungen systematisch zu erfassen und transparent mit den im Projekt verfolgten Lösungsansätzen abzugleichen. Gleichzeitig konnten Unsicherheiten und Vorbehalte offen adressiert und im Projektkontext eingeordnet werden. Durch den kontinuierlichen Dialog wurde die Nachvollziehbarkeit technischer und organisatorischer Entscheidungen erhöht. Die Akteure erhielten frühzeitig Einblick in Entwicklungsstände, Bewertungsansätze und Entscheidungslogiken. Dies trug wesentlich dazu bei, Vertrauen in die Projektergebnisse aufzubauen und die Bereitschaft zur weiteren Auseinandersetzung mit einer möglichen Umsetzung zu stärken.

Beitrag zur technischen und organisatorischen Weiterentwicklung

Das Stakeholdermanagement leistete einen konkreten und nachvollziehbaren Beitrag zur Weiterentwicklung der im Projekt DreiSATS erarbeiteten technischen und organisatorischen Konzepte. Rückmeldungen aus den Workshops, Fachgesprächen und bilateralen Abstimmungen wurden systematisch ausgewertet und in die Projektbearbeitung integriert. Auf diese Weise konnten praxisrelevante Anforderungen frühzeitig berücksichtigt werden. Dies betraf unter anderem Fragen der Skalierbarkeit der Prozessketten, der Einbindung in bestehende Entsorgungs- und Logistikstrukturen, der Produktqualitäten sowie der Anforderungen an Vermarktungs- und Verwertungswege der erzeugten Phosphorprodukte. Die iterative Rückkopplung mit den Stakeholdern trug dazu bei, die entwickelten Lösungen nicht nur technisch zu optimieren, sondern auch organisatorisch und regulatorisch realistisch auszugestalten.

Besonders wirkungsvoll erwiesen sich dabei die Demonstrator- und Vor-Ort-Formate, in denen technologische Teilprozesse im Betrieb oder im Laborumfeld vorgestellt und diskutiert wurden. Diese Formate ermöglichten eine fundierte, praxisnahe Bewertung der ent-

wickelten Ansätze und förderten den fachlichen Austausch zwischen Forschung, Industrie, Behörden und potenziellen Anwendern.

Ein zentraler Mehrwert des Stakeholdermanagements im Projekt DreiSATS lag in der gezielten Vorbereitung der Anschluss- und Umsetzungsphase. Durch die strukturierte Einbindung relevanter Akteure konnten nicht nur technische Fragestellungen bearbeitet, sondern auch wesentliche Aspekte der späteren Umsetzung adressiert werden. Hierzu zählten insbesondere die Identifikation relevanter Akteurskonstellationen für mögliche Folge- und Demonstrationsprojekte, die Klärung von Rollen und Verantwortlichkeiten sowie die Einordnung regulatorischer und genehmigungsrechtlicher Rahmenbedingungen. Die Workshops mit Behörden, Ministerien und weiteren institutionellen Akteuren trugen dazu bei, regulatorische Anforderungen frühzeitig zu reflektieren und in die Bewertung der Projektansätze einzubeziehen. Darüber hinaus ermöglichte das Stakeholdermanagement eine realistische Einschätzung von Umsetzungshemmnissen und Erfolgsfaktoren, etwa im Hinblick auf Akzeptanzfragen, Wirtschaftlichkeit oder organisatorische Komplexität. Diese Erkenntnisse bilden eine belastbare Grundlage für die Planung und Bewertung möglicher Anschluss- und Demonstrationsvorhaben. Flankierend wurde das Projekt in übergeordnete fachliche Diskurse eingebunden, unter anderem durch die Vernetzung mit relevanten Fachplattformen und Projektzusammenhängen im Bereich Phosphorrecycling. Dadurch wurde die Sichtbarkeit der Projektergebnisse erhöht und deren Einbettung in den aktuellen fachlichen und politischen Kontext unterstützt.

II.1.4.3 Vorbereitung Anschlussphase zur kommerziellen Umsetzung (AP 5.4)

Das IKTS unterstützte den Projektpartner VKD bei der fortlaufenden Aktualisierung der Anlagenkonzeption, der Einordnung neuer Versuchsergebnisse sowie bei der Bewertung marktseitiger Randbedingungen für die spätere Umsetzung an Modellstandorte.

II.1.5 Projektkoordination und Öffentlichkeitsarbeit (Hauptarbeitspaket 6)

II.1.5.1 Öffentlichkeitsarbeit (AP 6.1)

Im Projektverlauf wurden die Forschungsergebnisse und technologischen Entwicklungen des Projektes DreiSATS durch das Fraunhofer IKTS kontinuierlich einer breiten Fachöffentlichkeit vorgestellt. Ziel der Öffentlichkeitsarbeit war die Verbreitung der im Projekt gewonnenen Erkenntnisse zur thermischen Klärschlammverwertung, zur in-situ Schwermetallabtrennung sowie zum Phosphorrecycling und die Förderung des Wissenstransfers zwischen Forschungseinrichtungen, Anlagenbauern, Kläranlagenbetreibern und potenziellen Anwendern. Die Öffentlichkeitsarbeit erfolgte insbesondere durch die Präsentation des Projekts auf nationalen und internationalen Fachmessen und Tagungen, die Mitwirkung an projektübergreifenden Aktivitäten des RePhoR-Begleitvorhabens sowie durch die Bereitstellung wissenschaftlicher und technischer Inhalte für Veröffentlichungen.

Darüber hinaus beteiligte sich das IKTS aktiv an der Erstellung eines Projektfilms, der im Rahmen des Begleitvorhabens TransPhoR umgesetzt wurde. Der Film dokumentiert die Projektziele, die technologischen Entwicklungen sowie die Zusammenarbeit der Verbundpartner und trägt zur langfristigen Verbreitung der Projektergebnisse bei. Zusätzlich wirkte das IKTS an der Erstellung des projektübergreifenden Statusberichts mit und stellte hierfür technische und wissenschaftliche Inhalte bereit.

Insgesamt leistete die Öffentlichkeitsarbeit einen wichtigen Beitrag zur Verbreitung der Projektergebnisse und zur Steigerung der Sichtbarkeit des Vorhabens. Die kontinuierliche Kommunikation der erzielten Fortschritte unterstützte den Wissenstransfer in die Praxis und förderte die Vernetzung mit relevanten Akteuren entlang der gesamten Wertschöpfungskette des Phosphorrecyclings.

Tabelle 11: Veröffentlichungen des IKTS

Jahr	Titel	Veranstaltung o. Journal / Art	Autoren
2020	DreiSATS Technologiedemonstration zur Kombination Staubfeuerung und Säureaufschlussgranulierung mit integrierter Schwermetallentfernung	Projektblatt	
2021	Klärschlammmonoverbrennung durch Staubfeuerung – Prozessintegrierte Schwermetallentfrachtung und Aschequalität	Berliner Klärschlammkonferenz Vortrag und Tagungsbeitrag,	Eder, E.; Köhl, L.F.; Lincke, M.; Petasch, U.; Schöfmann, P.
2022	Decentralised phosphorus recycling from sewage sludge using dust firing and in-situ heavy metal separation (DreiSATS)	ESPC4 (Wien) Konferenzvortrag	Köhl, L.
2022	Development and Validation of Standardised Evaluation Method for the Effect of Phosphorus Recyclates on Plant Growth	18th International Scientific Days (Ungarn) Wissenschaftlicher Vortrag	Domurath, N.; Lincke, M.
2022	Dezentrale thermische Klärschlammverwertung mit Aschemodifikation für ein regionales P-Recycling	Berliner Klärschlammkonferenz Vortrag und Tagungsbeitrag	Lincke, M.; Köhl, L.F.; Petasch, U.; Eder, E.; Schöfmann, P.
2022	Präsentation des DreiSATS Projektes auf der IFAT	Messstand FhG SysWasser	Lincke, M.; Faßauer, B.
2022	DreiSATS - Technologiedemonstration für das regionale Phosphorrecycling mit Staubfeuerung und Säureaufschlussgranulierung mit integrierter Schwermetallabscheidung	1. Mitteldeutschen Bioökonomie-Kongress Poster	
2023	Dezentrale thermische Klärschlammverwertung mit Aschemodifikation für ein regionales P-Recycling	Wasser und Abfall Fachartikel	Lincke, M.; Eder, E.
2023	Entwicklung und Validierung einer standardisierten Bewertungsmethodik für die Wirkung von Rezyklaten auf das Pflanzenwachstum	RePhoR-Statusseminar Vortrag,	Domurath, N.; Lincke, M.
2023	Herausforderungen bei der Ökobilanzierung des Phosphorrecyclings aus Abwasser und Klärschlamm	DPP-Forum Vortrag	Schwarz, B.
2023	Standardisierte Bewertungsmethode für die Wirkung von Nährstoff-Rezyklaten auf das Pflanzenwachstum	Jahresbericht IKTS Beitrag	Domurath, N.; Lincke, M.
2023	DreiSATS - Technologiedemonstration zur Kombination von Staubfeuerung und Säureaufschlussgranulierung mit integrierter Schwermetallabscheidung für das regionale Phosphorrecycling im „Mitteldeutschen Dreiländereck“ Sachsen-Anhalt, Thüringen und Sachsen	Tagungsband RePhoR	
2023	Projektpräsentation bei DPP vor Ort	DPP vor Ort in Markranstädt Vortrag	Köhl, Lasse Fabian
2024	Hannover Messe	Fachmesse	Fraunhofer IKTS
2024	Präsentation des DreiSATS Projektes auf der IFAT	Messstand FhG SysWasser	Lincke, M.; Faßauer, B.
2024	ACHEMA Frankfurt	Fachmesse	Fraunhofer IKTS
2024	DreiSATS-Projektfilm (TransPhoR)	Medienbeitrag	Fraunhofer IKTS

Jahr	Titel	Veranstaltung o. Journal / Art	Autoren
2024	RePhoR-Statusbericht	Projektbericht	Fraunhofer IKTS
2025	Wie Phosphor regional recycelt werden kann	WWT Themenspecial Klärschlamm Fachartikel	Kidszun, C.; Lincke, M.; Schöffmann, P.
2026	Webinar: Vom Abwasser zum Rohstoff	Webinar-Reihe RePhoR Vortrag	Kidszun, C.; Lincke, M.; Schöffmann, P.

II.1.5.2 Projektkoordination und Berichtswesen (AP 6.2)

Das Fraunhofer IKTS unterstützte die VKD in der Projektkoordination über die gesamte Laufzeit des Verbundvorhabens sowohl fachlich-wissenschaftlich als auch organisatorisch. Neben der Bearbeitung der eigenen Forschungsaufgaben erfolgte eine kontinuierliche Abstimmung mit den Verbundpartnern zur Sicherstellung eines zielgerichteten Projektfortschritts und einer konsistenten technischen Weiterentwicklung der Gesamtprozesskette. Hierzu wurden regelmäßige Projektbesprechungen, Arbeitstreffen und bilaterale Abstimmungen durchgeführt, in denen Versuchsergebnisse diskutiert, Schnittstellen zwischen den Arbeitspaketen abgestimmt und das weitere Vorgehen festgelegt wurden. Einen besonderen Schwerpunkt bildete die Koordination der projektübergreifenden Arbeiten zur Staubfeuerung, Heißgasfiltration und Aschebewertung, da hierfür eine enge Abstimmung zwischen den Partnern Carbotechnik, LTC, VKD und IKTS erforderlich war.

Im Rahmen der regelmäßigen JourFix-Termine unterstützte das IKTS die Verbundpartner bei der Interpretation von Messdaten, der Ableitung notwendiger Optimierungsmaßnahmen und der Bewertung der Auswirkungen auf die Gesamtprozesskette. Dies betraf insbesondere die Entwicklung und Optimierung der Staubfeuerung, die großtechnische Mahlung der Klärschlämme, die Untersuchungen zur Heißgasfiltration und Aschemodifikation sowie die Bewertung der erzeugten Aschen und Recyclingprodukte.

II.2 Zahlenmäßiger Nachweis

Die im Vorhaben vorgesehenen Arbeiten wurden entsprechend der bewilligten Arbeits-, Ressourcen- und Finanzplanung durchgeführt. Die Projektlaufzeit betrug einschließlich einer sechsmonatigen Verlängerung insgesamt 5,5 Jahre. Die Verlängerung wurde zur abschließenden Umsetzung verzögerter Arbeiten, insbesondere durch die Bereitstellung geeigneter Klärschlämme sowie zur Inbetriebnahme und Erprobung der Versuchsanlage, genutzt. Die bereitgestellten Mittel wurden zweckentsprechend zur Bearbeitung der wissenschaftlich-technischen Arbeitspakete eingesetzt. Trotz einzelner technischer Herausforderungen, insbesondere bei der Bereitstellung geeigneter Versuchstechnik und der großtechnischen Klärschlammmahlung, konnten die geplanten Arbeiten im Wesentlichen umgesetzt werden. Allerdings kam es infolgedessen zu Mittelverschiebungen zwischen einzelnen Kostenpositionen, diese wurden mit dem Projektträger abgestimmt und entsprechend freigegeben. Der zahlenmäßige Nachweis der projektbezogenen Ausgaben und Aufwendungen wird gesondert entsprechend den Vorgaben des Fördermittelgebers vorgelegt.

II.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die im Projekt durchgeführten Arbeiten waren für die Erreichung der angestrebten Projektziele erforderlich und standen in einem angemessenen Verhältnis zu den eingesetzten personellen, sachlichen und finanziellen Ressourcen. Die Arbeiten orientierten sich an der im Projektantrag definierten Arbeitsplanung und umfassten die Entwicklung und Erprobung

von Verfahren zur Klärschlammstaubfeuerung, zur in-situ-Schwermetallabtrennung, zur Heißgasfiltration sowie zur Bewertung der erzeugten Aschen und Recyclingprodukte. Im Projektverlauf konnten die geplanten Labor-, Technikums- und Demonstrationsversuche durchgeführt und die wissenschaftlich-technischen Fragestellungen weitgehend bearbeitet werden. Auftretende Herausforderungen, beispielsweise bei der großtechnischen Trocknung und Mahlung der Klärschlämme sowie der Inbetriebnahme der Versuchstechnik, insbesondere der Heißgasfiltration, machten teilweise zusätzliche Abstimmungen und Anpassungen erforderlich, führten jedoch nicht zu einer grundlegenden Erweiterung sondern eher einer Verschiebung des Arbeitsumfangs. Die eingesetzten Ressourcen erwiesen sich insgesamt als ausreichend und zweckmäßig, um die Projektziele zu erreichen und belastbare Ergebnisse für die weitere technische Entwicklung und großtechnische Umsetzung des DreiSATS-Konzeptes bereitzustellen. Die gewonnenen Erkenntnisse bilden eine wesentliche Grundlage für die Weiterentwicklung der Technologie im Rahmen zukünftiger Demonstrations- und Umsetzungsprojekte

Die durchgeführten Arbeiten sowie die dafür aufgewandten Ressourcen waren notwendig und angemessen, da sie der im Projektantrag detailliert dargelegten Planung entsprachen und alle im Arbeitsplan formulierten Aufgaben erfolgreich bearbeitet wurden. Darüber hinaus mussten keine zusätzlichen Ressourcen zur Durchführung des Vorhabens aufgewandt werden.

II.4 Nutzbarkeit der Ergebnisse

Die im Projekt erzielten Ergebnisse werden als belastbar und für die weitere technologische Entwicklung gut nutzbar eingeschätzt. Durch die umfangreichen Labor-, Technikums- und Demonstrationsversuche konnten wesentliche Erkenntnisse zur Klärschlammmahlung, zur in-situ-Schwermetallabtrennung, zur Heißgasfiltration sowie zur Qualität und Verwertbarkeit der erzeugten Aschen gewonnen werden. Insbesondere konnte die grundsätzliche technische Machbarkeit einer dezentralen thermischen Klärschlammverwertung mit der Staubfeuerungstechnik des Projektpartner Carbotechnik nachgewiesen werden. Darüber hinaus wurden wichtige Erfahrungen zur Brennstoffaufbereitung, zum Additiveinsatz während der Verbrennung und zur Auslegung der Heißgasfiltration gewonnen. Die erarbeiteten Daten bilden eine belastbare Grundlage für die Dimensionierung und Auslegung zukünftiger Anlagen im größeren Maßstab. Die Ergebnisse fließen bereits in weiterführende Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten der Projektpartner ein und dienen als Basis für die Konzeption nachfolgender Demonstrations- und Umsetzungsprojekte. Für eine industrielle Anwendung sind jedoch weitere Untersuchungen unter großtechnischen Bedingungen erforderlich, insbesondere zur Langzeitstabilität, zum kontinuierlichen Betrieb sowie zur wirtschaftlichen Umsetzung der Gesamtprozesskette erforderlich.

Die im Projekt aufgebauten Versuchsstände und entwickelten Bewertungsmethoden zur Bestimmung der Phosphorpflanzenverfügbarkeit und Phytotoxizität stellen eine wichtige Grundlage für die Bewertung zukünftiger Recyclingdünger aus Reststoffen dar. Durch die Kombination standardisierter Pflanzenversuche, ökotoxikologischer Bioassays sowie chemisch-physikalischer Analysen konnte ein ganzheitlicher Ansatz zur Beurteilung der Düngewirkung und potenzieller Schadwirkungen etabliert werden. Die entwickelten Methoden sind auf weitere nährstoffhaltige Recyclingprodukte übertragbar und können für die Produktentwicklung, Qualitätssicherung und Zulassungsbewertung zukünftiger Düngemittel genutzt werden. Die im Projekt gewonnenen Daten tragen dazu bei, die agronomische Wirksamkeit und Umweltverträglichkeit von Recyclingprodukten belastbar zu bewerten und deren Markteinführung zu unterstützen.

II.5 Fortschritte bei anderen Stellen

Es existieren zahlreiche laufende Projekte zum Phosphorrecycling aus Klärschlamm und Klärschlammasche, sowohl innerhalb als auch außerhalb der Fördermaßnahme RePhoR.

Im Bereich der prozessintegrierten Schwermetallminderung während der thermischen Klärschlammbehandlung wurden in den letzten Jahren verschiedene Ansätze untersucht. Im RePhoR-Projekt R-Rhenania wurde die thermochemische Modifikation von Klärschlammaschen durch die Zugabe von Natriumadditiven direkt in die Monoverbrennung integriert (FiW e. V. 2023). Dabei konnten pflanzenverfügbare Calcium-Natrium-Phosphate erzeugt und gleichzeitig die Gehalte flüchtiger Schwermetalle wie Arsen, Cadmium und Blei reduziert werden. Die Ergebnisse bestätigen das Potenzial einer Additivzugabe zur Verbesserung der Aschequalität bereits während der Verbrennung. Die im Projekt DreiSATS verfolgte in-situ-Modifikation im Staubfeuerungsprozess stellt jedoch einen eigenständigen Ansatz dar, bei dem die Schwermetallminderung gezielt mit der Ascheentstehung und der nachgeschalteten Heißgasfiltration gekoppelt wird.

Im Bereich der Heißgasfiltration existieren zahlreiche Arbeiten zur Abscheidung staubförmiger Emissionen aus Verbrennungs- und Vergasungsprozessen. Die Anwendung keramischer Filter für hohe Gastemperaturen ist grundsätzlich Stand der Technik. Spezifische Untersuchungen zur Kombination von Klärschlammstaubfeuerung, Additivzugabe, Schwermetalltransfer und Heißgasfiltration im technisch relevanten Maßstab sind den Projektpartnern nicht bekannt. Die im Projekt gewonnenen Erkenntnisse zur Abscheideleistung, zum Filterverhalten sowie zur Wechselwirkung zwischen Additivzugabe und Schadstoffabscheidung stellen daher einen wichtigen Beitrag zum aktuellen Stand der Technik dar.

Für die Bewertung phosphorhaltiger Recyclate und Düngemittel wurden sowohl innerhalb der RePhoR-Fördermaßnahme als auch in weiteren Forschungsvorhaben Pflanzenversuche und chemisch-analytische Untersuchungen zur Bestimmung der Düngewirkung durchgeführt. Die Ergebnisse verschiedener RePhoR-Projekte zeigen, dass zahlreiche P-Rezyklate eine gute bis sehr gute Düngewirkung erreichen können. Diese Untersuchungen erfolgen dabei jedoch unter Gewächshaus- oder Freilandbedingungen und unterliegen damit standort- und klimabedingten Einflüssen sowie unterschiedlichen Bodeneigenschaften. Am Fraunhofer IKTS wurde daher ein standardisierter Pflanzenversuchsstand mit kontrollierbaren Klima- und Wachstumsbedingungen aufgebaut, der reproduzierbare und direkt vergleichbare Versuchsdurchläufe ermöglicht. Durch den Einsatz nährstoffarmer bzw. nährstofffreier Substrate, die durch das RePhoR-Begleitvorhaben bereitgestellt wurden, können die Nährstoffgehalte gezielt eingestellt und die Wirkung einzelner Recyclingprodukte belastbar bewertet werden. Ergänzend wurden für unterschiedliche Fragestellungen, insbesondere zur Bestimmung der Phosphorverfügbarkeit, der Düngewirkung und der Phytotoxizität, spezifische Prüfmethoden und Versuchsprotokolle entwickelt. Die im Projekt DreiSATS aufgebauten Versuchsstände und Bewertungsmethoden leisten damit einen wichtigen Beitrag zur Standardisierung der Bewertung von Nährstoff-Rezyklaten und sind auf weitere Recyclingdünger und phosphorhaltige Sekundärrohstoffe übertragbar.

II.6 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen

Eine Auflistung und Beschreibung kann dem Abschnitt II.1.5.1 sowie der Tabelle 11 entnommen werden.

III Literaturverzeichnis

Adam, C.; Peplinski, B.; Michaelis, M.; Kley, G.; Simon, F-G (2009): Thermochemical treatment of sewage sludge ashes for phosphorus recovery. In: *Waste management (New York, N.Y.)* 29 (3), S. 1122–1128. DOI: 10.1016/j.wasman.2008.09.011.

FiW e. V. (Hg.) (2023): BMBF-Fördermaßnahme - Regionales Phosphor-Recycling. Statusseminar RePhoR. Frankfurt am Main, 03.05.2023. Forschungsinstitut für Wasserwirtschaft und Klimazukunft an der RWTH Aachen (FiW) e. V.

Gaderer, Matthias; Spliethoff, Hartmut (2011): Thermische Nutzung von Biomasse und Reststoffen in Deutschland. In: *Chemie Ingenieur Technik* 2011, 2011 (11), S. 1897–1911. Online verfügbar unter https://mediatum.ub.tum.de/doc/1161128/1161128.pdf.

Grove, Anne Kristin; Vodegel, Stefan (2012): Hot Gas Filtration in Biomass-Based Synthesis Gas. In: *Chemie Ingenieur Technik* 84 (9), S. 1545–1550. DOI: 10.1002/cite.201100056.

Heidenreich, Steffen (2013): Hot gas filtration – A review. In: *Fuel* 104, S. 83–94. DOI: 10.1016/j.fuel.2012.07.059.

Krüger, Oliver; Adam, Christian (2014): Monitoring von Klärschlammmonoverbrennungsaschen. hinsichtlich ihrer Zusammensetzung zur Ermittlung ihrer Rohstoffrückgewinnungspotentiale und zur Erstellung von Referenzmaterial für die Überwachungsanalytik. Hg. v. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau.

Lorenz, Tom (2018): Recycling Seltener Erden aus Permanentmagneten und Leuchtstoffabfällen mittels Feststoffchlorierung. Dissertation. Technischen Universität Bergakademie Freiberg.

Meier, Uwe (2018): Entwicklungsstadien mono- und dikotyler Pflanzen: BBCH Monografie. Unter Mitarbeit von Bundesbehörden und Einrichtungen im Geschäftsbereich des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL).

Petasch, U.; Schlotza, S.; Faßauer, B.; Adler, J. (2015): Anwendung von Heißgasfiltrationsprozessen für die Phosphorrückgewinnung bei der Klärschlammverbrennung. DWA-Landesverbandstagung Sachsen/Thüringen 2015 – Phosphor – Problem oder Chance?, 2015.

Schlotza, S.; Petasch, U.; Epperlein, J.; Wagner, R. (2014): Untersuchungen zur thermochemischen Modifikation von Klärschlammaschen mit dem Ziel der Anwendung in Heißgasfiltrationsprozessen. Westsächsische Hochschule Zwickau.

Schnell, Matthias (2023): Integration des additivgestützten thermochemischen Phosphor-Recyclings in die Klärschlammverbrennung. Dissertation. Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen. Aachen. Online verfügbar unter https://publications.rwth-aachen.de/record/974487/files/974487.pdf.

VDLUFA (2019): Methodenbuch Band II.1: Die Untersuchung von Düngemitteln. 4. Aufl. Hg. v. Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten e.V. (VDLUFA).

Vodegel, Stefan; Müller, F. (2017): DBU-Grundsatzstudie: Technologiebewertung thermo-chemischer Konversionsverfahren von Klärschlamm als Alternative zur Verbrennung unter besonderer Berücksichtigung der Potenziale zur Nährstoffrückgewinnung. CUTEC-Institut.

Vogel, Christian; Adam, Christian (2011): Heavy metal removal from sewage sludge ash by thermochemical treatment with gaseous hydrochloric acid. In: *Environmental science & technology* 45 (17), S. 7445–7450. DOI: 10.1021/es2007319.

Voigt, Ingolf; Adler, Jörg; Weyd, Marcus; Kriegel, Ralf (2013): Ceramic Filters and Membranes. In: Ralf Riedel und I-Wei Chen (Hg.): Ceramics Science and Technology: Wiley, S. 117–167.

Westerheide, R.; Adler, J.; Buhl, H.; Fister, D.; Walch, A. (1999): Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben Nr. 326832: Filter aus Hochleistungskeramik für Energietechnik.

Westerheide, R.; Adler, J.; Wehd, C. von der; Baumgarten, J.; Rehak, P. (2003): Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben Nr 0326866F: Material- und Bauteilqualifizierung keramischer Heißgasfilterelemente.