Schlussbericht

Verbundprojekt:	Technologiedemonstration zur Kombination von Staubfeuerung und Säureaufschlussgranulierung mit integrierter Schwermetallabscheidung für das regionale Phosphorrecycling aus Klärschlämmen im „Mittel-deutschen Dreiländereck“ Sachsen-Anhalt, Thüringen und Sachsen **DreiSATS**
Teilprojekt:	Staubfeuerung
Zuwendungsempfänger:	Carbotechnik Energiesysteme GmbH Lauterbachstraße 12, 82538 Geretsried
Förderkennzeichen:	0WWPR1544B
Bewilligungszeitraum:	01.07.2020 – 30.12.2025
Berichtszeitraum:	01.07.2020 – 30.12.2025
Projektleitung:	Dipl. Ing. (FH) Peter Schöfmann

Geretsried, den 30.06.2026

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis I

Abkürzungsverzeichnis II

Formelzeichen III

Abbildungsverzeichnis IV

Tabellenverzeichnis V

I Kurze Darstellung 1
Aufgabenstellung 1
Kompetenzen und Ausstattung 2
Planung und Ablauf des Vorhabens 3
Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Projektbeginn 4
Trocknung 4
Stand der Technik: Mahlung und Brennstoffaufbereitung für Staubfeuerung 5
Schwermetallreduktion während der Verbrennung 6
Phosphorrecycling aus Klärschlämmen und Klärschlammaschen 6
Aufzählung der wichtigsten wissenschaftlich-technischen Ergebnisse 6

II Eingehende Darstellung 9
II.1.1 Hauptarbeitspaket 1: Bewertung der Inputstoffe Klärschlamm und Klärschlammasche 9
II.1.1.1 AP 1.1: Charakterisierung Klärschlamme 10
II.1.2 Hauptarbeitspaket 2: Adaption Staubfeuerung für die Mono-Klärschlamm-Verbrennung und In-Situ-Modifikation und Schwermetallabtrennung 14
II.1.2.1 AP 2.1: Optimierung Mono-Klärschlamm-Verbrennung mit Staubfeuerungstechnologie 14
II.1.2.2 AP 2.2: In-Situ-Modifikation und Heißgasfiltration 38
II.1.2.3 AP 2.3: Umbau und Erweiterung Pilotanlage Staubfeuerung 41
II.1.2.4 AP 2.4: Systematische Untersuchungen zur Bewertung des Dauerbetriebs und der Aschemodifikation 47
II.1.3 Hauptarbeitspaket 5: Bilanzierungen, Stakeholder und Vorbereitung Anschlussphase zur kommerziellen Umsetzung 53
II.1.3.1 AP 5.2: Ableitung eines Grundkonzeptes zur großtechnischen Umsetzung im Produktionsmaßstab 54
II.1.3.2 AP 5.4: Vorbereitung Anschlussphase zur kommerziellen Umsetzung am Modellstandort Zorbau 62
II.1.4 Hauptarbeitspaket 6: Projektkoordination und Öffentlichkeitsarbeit 65
II.2 Zahlenmäßiger Nachweis 66
II.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit 67
II.4 Nutzbarkeit der Ergebnisse 67
II.5 Fortschritte bei anderen Stellen 67
II.6 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen 68

III Literaturverzeichnis 68

Anlage A - Erfolgskontrollbericht

Abkürzungsverzeichnis

AP	Arbeitspaket
BKS	Brennbare Klärschlammstoffe / brennbare Feststoffe (Rohrleitungskennzeichnung)
CO	Kohlenmonoxid
CO_2	Kohlendioxid
DIN	Deutsches Institut für Normung
DP	Differenzdruck
DüMV	Düngemittelverordnung
EMSR	Elektro-, Mess-, Steuer- und Regeltechnik
Fe-P	Eisenphosphat
GV	Glühverlust
HGF	Heißgasfiltration / Heißgasfilter
H_2O	Wasser (chemisch)
IKTS	Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien und Systeme
KS	Klärschlamm
KSA	Klärschlammasche
Lambda (λ)	Luftverhältnis (tatsächliche Luftmenge / stöchiometrische Luftmenge)
Na_2CO_3	Natriumcarbonat
$NaHCO_3$	Natriumhydrogencarbonat
Na-P	Natriumphosphat bzw. Na-haltige Phosphatphase
NAC	Neutral-ammoncitrat (Extraktionsmethode zur Bestimmung P-löslicher Fraktionen)
NAC-P	Neutral-ammoncitratlöslicher Phosphor
NBK	Nachbrennkammer
NH_4Cl	Ammoniumchlorid
Ni	Nickel
NO_x	Stickoxide (NO + NO_2)
O_2	Sauerstoff
P	Phosphor
P_2O_5	Phosphorpentoxid
PNAC	Anteil des neutral-ammoncitratlöslichen Phosphors an Gesamt-P
RAL	Farbstandard nach DIN 2403
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition (Prozessleitsystem)
SM	Schwermetalle
SM-Thermik	Thermische Schwermetallverlagerung / Verdampfung / Kondensation
SNCR	Selective Non-Catalytic Reduction (nicht-katalytische NO_x-Reduktion)
SCR	Selective Catalytic Reduction (katalytische NO_x-Reduktion)
TS	Trockensubstanz
TSP	Triple-Superphosphat (Referenz-Düngemittel)
WK	Wendekammer
Z	Zyklon (Zyklonasche)
Zn	Zink

Formelzeichen

d_{50}	Medianer Partikeldurchmesser (Partikelgröße, bei der 50 % der Masse feinere bzw. gröbere Partikel aufweisen)
d_i	Charakteristischer Partikeldurchmesser einer Siebfraktion *i*
t	Zeit
T	Temperatur
$\dot{m}$	Massenstrom
Q	Volumenstrom
ρ	Dichte
Δp	Differenzdruck
x_i	Massenanteil der Fraktion *i*
m_i	Masse der Fraktion *i*
η	Wirkungsgrad
c	Stoffkonzentration

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Region „Mitteldeutsches Dreiländereck“ und beteiligte Projektpartner 1
Abbildung 2 Technologiekette Klärschlammverwertung Region „Mitteldeutsches Dreiländereck“ 1
Abbildung 3 Ausschnitt Klärschlammmatrix 11
Abbildung 4 Siebturm Carbotechnik 12
Abbildung 5 Grobkorn Fraktion Aussiebung IKTS031 CT046 13
Abbildung 6 Siebanalyse IKTS031 CT046 13
Abbildung 7 Forschungsanlage (Ausschnitt) **Fehler! Textmarke nicht definiert.**
Abbildung 8 Schematische Darstellung der Dosiermaschine 17
Abbildung 9 Schematische Darstellung des patentierten Staubbrenners (Impulsbrenners) 19
Abbildung 10 Prinzip-Aufbau Versuchsanlage (in Modifikation) 20
Abbildung 11 Ascheproben aus Zyklon, Wendekammer, Filter, Nachbrennkammer 21
Abbildung 12 Sieblinie Probe IKTS031_CT046_ggKS_V2 fein 23
Abbildung 13 Sieblinie Probe CT010_CT044_ggKS_V2 grob 23
Abbildung 14 Ansicht Fluidisierversuch nach Abschaltung der Fluidisierung 23
Abbildung 15 Verschiedene Stadien des Zündversuchs 25
Abbildung 16 Schematische Darstellung der Einzelkornoxidation 26
Abbildung 17 Zeitlicher Verlauf der CO-Emissionen (kontinuierliche EMI-Messung) während eines Verbrennungsversuchs mit zwei Klärschlammchargen (IKTS031 und CT010) 27
Abbildung 18 Schematische Darstellung der thermochemischen Reaktionsräume 28
Abbildung 19 Exzenterschwingmühle, Lohnmahlung 30
Abbildung 20 Redoxverhalten in der Staubfeuerungsflamme 34
Abbildung 21 Die real gefahrenen Kornbänder waren deutlich gröber als das theoretische Zielkornband, ohne negative Auswirkungen auf die Verbrennung. 35
Abbildung 22 Schematische Darstellung der Rauchgasreinigung 36
Abbildung 23 Ausschnitt Versuchsanlage mit HGF 38
Abbildung 24 Schadstoffentfrachtung einer Versuchsfahrt mit Additiv 39
Abbildung 25 Vergleich CT006 mit und ohne Additiv $NaHCO_3$ 40
Abbildung 26 Versuchsanlage Frontalansicht 42
Abbildung 27 Additivbehälter in Verbindung mit Dosierer 44
Abbildung 28 homogene Vermischung von Additiv und Klärschlammstaub in Dosierer 45
Abbildung 29 Filterdeckel Additivbehälter 47
Abbildung 30 Additiv Brückenbildung und Luftrückströmung aus Dosierer 47
Abbildung 31 Pflanzversuch mit Spezialsubstrat (RePhoR), Vergleich zum Frischmassezuwachs bezogen auf TSP (Kontrolle = 100%) 48
Abbildung 32, Asche aus Staubfeuerung, Deklaration nach DüMV 49
Abbildung 33 O2-Regelkreis 50

Abbildung 34 Granulierte Asche aus der Staubfeuerung 52
Abbildung 35 Ermittelte Emissionen bei der Staubfeuerung (beim gewählten Klärschlamm) 53
Abbildung 36 Stoffstromübersicht der Referenzanlagenkonfiguration 58
Abbildung 37 3D-Darstellung der Referenzanlagenkonfiguration 60
Abbildung 38 IFAT 2022 in München 66
Abbildung 39 Drohnenaufnahme, CT-Pilotanlage 66

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Kriterienkatalog für Probenmatrix 10
Tabelle 2 Zusammenstellung der ermittelten Parameter 24
Tabelle 3 Bewertungskatalog für Zündversuch 24
Tabelle 4 Stoffstrombilanz der Referenzanlage 57

I Kurze Darstellung

Aufgabenstellung

Motivation und Region

Die thermische Klärschlammverwertung befindet sich in Deutschland im Zuge der Novellierung der Klärschlammverordnung (AbfKlärV) in einem grundlegenden Wandel. Die Verordnung schreibt für kommunale Kläranlagen > 50.000 EW künftig eine verpflichtende Phosphorrückgewinnung vor und schränkt die bodenbezogene Verwertung zunehmend ein. Gleichzeitig steigen die Anforderungen an Emissionsminderung, Ressourceneffizienz und regionale Stoffkreisläufe. Vor diesem Hintergrund verfolgt das Verbundvorhaben DreiSATS das Ziel, eine geschlossene, regional verankerte Prozesskette zur Klärschlammverwertung aufzubauen und zu demonstrieren.

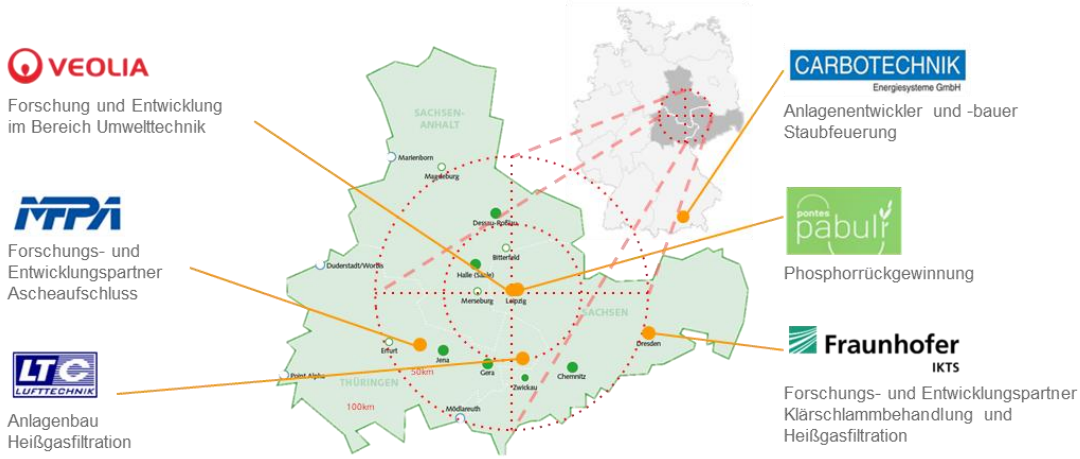


Abbildung 1 Region „Mitteldeutsches Dreiländereck“ und beteiligte Projektpartner

Zielsetzung des Verbundprojekts

Im Projekt sollen die technischen, ökologischen und wirtschaftlichen Voraussetzungen geschaffen werden, um eine regionale, geschlossene Verwertungskette zu etablieren. Diese umfasst die Klärschlammlogistik, die Trocknung, die thermische Konversion mittels Staubfeuerung, die In-situ-Schwermetallabtrennung sowie den chemischen Aufschluss und die Granulierung der Klärschlammaschen zu marktfähigen Düngeprodukten. Ziel ist es, die technische Machbarkeit, die Emissionssicherheit, die Aschequalität und die P-Verfügbarkeit entlang der gesamten Prozesskette zu bewerten und zu optimieren.

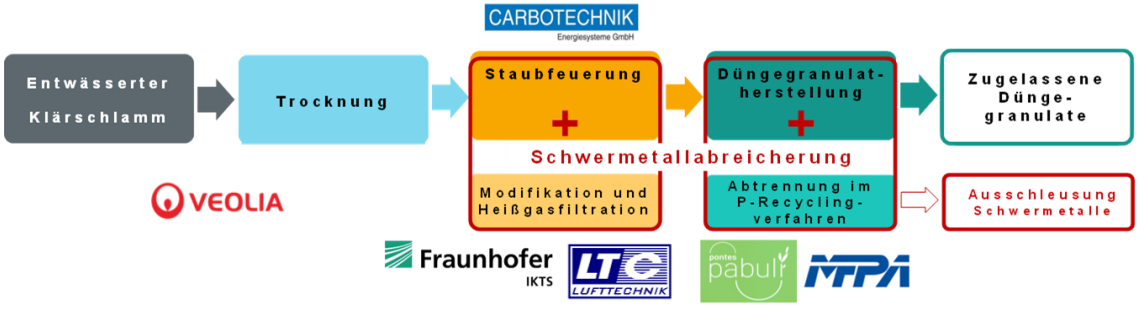


Abbildung 2 Technologiekette Klärschlammverwertung Region „Mitteldeutsches Dreiländereck“

Technologischer und logistischer Ansatz

Die im Projekt betrachtete Prozesskette umfasst die Trocknung des Klärschlamms, die staubförmige Verbrennung mit optionaler In-situ-Schwermetallabtrennung, die Heißgasfiltration sowie den nachgeschalteten Säureaufschluss und die Granulierung. Durch die Kombination dieser Prozessschritte soll ein regionales, energieeffizientes und emissionsarmes Verfahren zur Phosphorrückgewinnung demonstriert werden. Die Prozesskette ist so ausgelegt, dass sowohl zentrale als auch dezentrale Anlagenkonfigurationen bewertet werden können.

Die Carbotechnik Energiesysteme GmbH übernimmt im Verbundvorhaben die zentrale Rolle der verfahrenstechnischen Entwicklung und praktischen Erprobung der Staubfeuerung. Ziel ist es, die Staubfeuerung als innovative Technologie für die mono-thermische Klärschlammverwertung weiterzuentwickeln, ihre emissionsbezogenen und aschechemischen Eigenschaften zu bewerten und die Grundlage für eine großtechnische Umsetzung zu schaffen.

Hierzu wurde die bestehende Versuchsanlage im Projektverlauf erweitert und für die spezifischen Anforderungen der Klärschlammverbrennung angepasst. Dies umfasst:

- die Optimierung der Brennstoffdosierung und Fluidisierung,
- die Weiterentwicklung des Impulsstaubbrenners,
- die Auslegung der Nachbrennkammer gemäß 17. BImSchV,
- die Integration einer Additivdosierung,
- die Installation einer Heißgasfiltration zur In-situ-Schwermetallentfrachtung,
- sowie die Erweiterung der Messtechnik für O_2, CO, CO_2, NOx, Temperaturen und Differenzdrücke.

Die Versuchsanlage ermöglicht die detaillierte Untersuchung von Verbrennung, Ausbrand, Emissionsverhalten, Ascheentstehung, Additivwirkung und Dauerbetriebsverhalten unter realitätsnahen Bedingungen. Die gewonnenen Daten bilden die Grundlage für die Bewertung der Aschequalität, der Phosphorlöslichkeit und der Schwermetallverteilung sowie für die Erstellung eines großtechnischen Anlagenkonzeptes.

Durch die enge Zusammenarbeit mit den Verbundpartnern IKTS, VKD, LTC und DBFZ konnten alle relevanten wissenschaftlichen, technologischen und betrieblichen Aspekte in ein abgestimmtes Gesamtverfahren überführt werden. Ziel des Projekts ist es, ein emissionsarmes, verlässlich steuerbares und für die phosphorwirtschaftliche Nutzung geeignetes Staubfeuerungssystem zu entwickeln, das als Basis für eine spätere großtechnische Realisierung dienen kann.

Kompetenzen und Ausstattung

Die Durchführung des Verbundvorhabens *DreiSATS* erforderte ein eng abgestimmtes Zusammenwirken von wissenschaftlichen Einrichtungen, industriellen Partnern und kommunalen Organisationen. Die beteiligten Partner brachten komplementäre Kompetenzen und technische Ausstattungen ein, die es ermöglichten, den gesamten Prozesskreislauf der Klärschlammverwertung, von der Brennstoffcharakterisierung über die Feuerungstechnik bis hin zur Ascheanalytik und Konzeptentwicklung, vollständig abzudecken.

Die Carbotechnik Energiesysteme GmbH (CT) übernahm im Projekt die zentrale Rolle der verfahrenstechnischen Entwicklung und praktischen Erprobung der Staubfeuerung. CT verfügt über langjährige Erfahrung im Bereich der Impulsstaubfeuerung sowie über eine eigene, voll instrumentierte Versuchsanlage im Technikumsmaßstab. Diese Anlage wurde im Rahmen des Projekts mehrfach erweitert und ermöglicht die realitätsnahe Untersuchung von Brennstoffdosierung, Fluidisierung, Verbrennung, Emissionsverhalten und Ascheentstehung. Die Ausstattung umfasst unter anderem ein fluidisiertes Dosiersystem, eine optimierte Brennertechnologie, eine dreistufige Luftführung, eine Nachbrennkammer gemäß 17. BImSchV, Ascheentnahmepunkte sowie Messtechnik für O_2, CO, N_2O, NO_x, Temperaturen und Differenzdrücke. Während des Projekts wurde die Anlage zusätzlich um eine Additivdosierung und eine Heißgasfiltration erweitert, wodurch erstmals kombinierte Untersuchungen zu Additivwirkung und thermischer Schwermetallentfrachtung möglich wurden.

Das Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien und Systeme (IKTS) stellte die wissenschaftlichen Methoden zur Charakterisierung von Klärschlämmen, Aschen und deren Phosphor- und Schwermetallfraktionen bereit. Mit modernsten analytischen Verfahren, wie ICP-OES, ICP-MS, Röntgendiffraktometrie, thermogravimetrischer Analyse und P-Löslichkeitsbestimmungen nach DüMV, konnten sowohl Brennstoffeigenschaften als auch Aschemineralogien detailliert untersucht und die Auswirkungen der Verbrennungs- und Additivstrategien quantifiziert werden. Die Laborkapazitäten des IKTS bildeten die Grundlage für die Bewertung der P-Verfügbarkeit sowie der umweltrelevanten Schwermetallverteilung.

Die Veolia-Klärschlammverwertung Deutschland (VKD) stellte Zugang zu regionalen Klärschlämmen sicher und übernahm die logistischen Abläufe zur Probenbereitstellung. Damit konnten im Projekt unterschiedlichste Klärschlammqualitäten untersucht werden, die die reale Bandbreite kommunaler Herkunft widerspiegeln. Die Bereitstellung repräsentativer Proben ermöglichte belastbare Aussagen zur Eignung verschiedener Schlammtypen für die Staubfeuerung.

Die LTC (Lufttechnik Crimmitschau) unterstützte das Projekt durch Expertise in der Filtrationstechnik und war maßgeblich an der Integration und Inbetriebnahme der Heißgasfiltration beteiligt. Die LTC stellte darüber hinaus Know-how zur Abreinigungstechnik, Filterdimensionierung und Feinstaubabscheidung im Hochtemperaturbereich zur Verfügung. Die Lieferung des Additivlagers sowie die Additivdosierung in die Carbotechnik-Dosiermaschine waren ebenso im Leistungsumfang.

Durch die Verbindung dieser unterschiedlichen Kompetenzen und Infrastrukturen war es möglich, im Projekt einen vollständig durchgängigen Innovationspfad aufzubauen, von der Brennstoffcharakterisierung über die verfahrenstechnische Entwicklung bis hin zur analytischen Bewertung und der Ableitung eines großtechnischen Anlagenkonzepts. Die technische Ausstattung aller Partner ergänzte sich so, dass sämtliche Fragestellungen des Projektes bearbeitet werden konnten und die Ergebnisse auf einem breiten, belastbaren Datensatz beruhen.

Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Vorhaben *DreiSATS* wurde als mehrjähriges Verbundprojekt konzipiert, dessen Ablauf aufeinander abgestimmte analytische, verfahrenstechnische und konzeptionelle Arbeitspakete umfasst. Der Projektplan sah eine schrittweise Bearbeitung der Aufgaben vor, beginnend mit der systematischen Charakterisierung der einzusetzenden Klärschlämme, gefolgt von der Optimierung der Staubfeuerung im Technikumsmaßstab und der anschließenden Entwicklung eines großtechnischen Anlagenkonzeptes.

Zu Projektbeginn erfolgte die Zusammenstellung und Bewertung der regional verfügbaren Klärschlämme. Die wichtigsten Brennstoffparameter, wie Trockensubstanz, Mahlbarkeit, Korngrößenverteilung, Organik- und Aschegehalt, Fällmittel, Schwermetalle und Phosphorbindungen, wurden in einer umfassenden Matrix erfasst, um die Eignung der Schlämme für die Staubfeuerung zu bewerten. Parallel dazu wurden die Anforderungen an den Mahlprozess und an die Dosiertechnik definiert und die Mahlanlage bei einem externen Partner eingerichtet.

Im nächsten Schritt standen die Versuche zur Optimierung der Staubfeuerung im Vordergrund. Die Versuchsanlage von Carbotechnik wurde in mehreren Phasen erweitert, um unterschiedliche Versuchsszenarien abbilden zu können. Neben grundlegenden Verbrennungsversuchen wurden gezielte Parameterstudien zur Brennstoffdosierung, Luftstufung, O_2-Regelung und Temperaturführung durchgeführt. Die gewonnenen Daten bildeten die Basis für die Identifikation der wesentlichen Einflussgrößen auf Emissionen, Ausbrandqualität und Aschebeschaffenheit.

Ein zentraler Bestandteil des Projektplans war die Integration der In-Situ-Modifikation sowie die Erweiterung der Versuchsanlage um eine Heißgasfiltration. Diese Module ermöglichten die Untersuchung additivgestützter Verbesserungen der Phosphorlöslichkeit sowie die Bewertung der thermischen Schwermetallentfrachtung unter realen Betriebsbedingungen. Die Inbetriebnahme der neuen Komponenten erfolgte parallel zur Durchführung der Hauptversuchsreihen, wobei mehrere Iterationen notwendig waren, um eine stabile und reproduzierbare Anlagenführung sicherzustellen.

Aufbauend auf den verfahrenstechnischen Ergebnissen wurden anschließend Dauerbetriebsversuche durchgeführt, bei denen die Versuchsanlage über längere Zeiträume mit verschiedenen Klärschlammchargen betrieben wurde. Dadurch konnten Aussagen zur Betriebssicherheit, zum Verschleiß, zur Emissionsstabilität und zur langfristigen Aschequalität gewonnen werden. Die dabei gesammelten Daten lieferten die Grundlage für die Übertragung der Ergebnisse in die großtechnische Dimensionierung.

Abschließend wurden die verfahrenstechnischen Ergebnisse in ein übergreifendes Konzept zur großtechnischen Umsetzung überführt. Dieser Schritt umfasste Stoff- und Energiebilanzen, Anlagenlayouts, Anforderungen an die Trocknung und Mahlung, die Integration der Wärmeversorgung sowie die Bewertung der wirtschaftlichen und ökologischen Rahmenbedingungen. Parallel dazu erfolgte die Abstimmung mit dem geplanten Modellstandort Zorbau, an dem die Randbedingungen für eine dezentrale Staubfeuerungsanlage praxisnah geprüft wurden.

Der gesamte Projektablauf war durch enge Zusammenarbeit der Partner, regelmäßige Abstimmungen und iterative Entwicklungszyklen geprägt. Durch die aufeinander aufbauenden Arbeitspakete konnte ein konsistenter und schlüssiger Gesamtprozess entwickelt werden, der die Staubfeuerung für die mono-thermische Klärschlammverwertung technisch validiert und eine klare Grundlage für eine großtechnische Umsetzung geschaffen hat.

Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Projektbeginn

Zu Beginn des Vorhabens *DreiSATS* befand sich die thermische Klärschlammverwertung in einer Phase des technologischen Wandels. Mit Inkrafttreten der AbfKlärV und den damit verbundenen Anforderungen an die Phosphorrückgewinnung rückte die Qualität der erzeugten Aschen sowie die Möglichkeit einer gezielten Schwermetallentfrachtung zunehmend in den Fokus. Gleichzeitig bestanden im Markt vor allem großtechnische Wirbelschichtanlagen als dominierende Trockenschlamm-Verbrennungsverfahren, während die Staubfeuerung für diesen spezifischen Einsatzbereich noch nicht etabliert war.

Das DreiSATS-Projekt setzte an dieser Stelle an und untersuchte die Staubfeuerung als potenziell bessere Alternative hinsichtlich Emissionen, Steuerbarkeit, P-Verfügbarkeit und separierbarer Aschefraktionen. Der wissenschaftliche und technische Kenntnisstand war dabei geprägt durch mehrere Technologiepfade, die im Folgenden zusammengefasst werden.

Trocknung

Eine ausreichend gute Trocknung ist grundlegend, da sie die Lagerstabilität des Materials sicherstellt. Wird dieser Trocknungsbereich eingehalten, sind die Voraussetzungen für die weitere staubförmige Aufbereitung und den Einsatz in der Staubfeuerung gegeben.

Im Rahmen dieser Betrachtung wurden mehrere technische Ansätze gegenübergestellt, darunter insbesondere Dünnschichttrockner, Wirbelschichttrockner und Niedertemperatur-Bandtrockner sowie Solartrocknungsvarianten. Diese Systeme unterscheiden sich deutlich hinsichtlich Wärmeübertragung, Reaktionszeiten, Prozessstabilität, Restfeuchteführung und Umweltnebenwirkungen. Bereits früh zeigte sich, dass Trocknungssysteme mit potenziellen Abwasserströmen oder Rückbelastungen der Kläranlage nicht geeignet sind, da diese sekundäre CSB-Belastungen verursachen können und somit betrieblich unerwünscht sind. Im Projektkontext wurde daher klar definiert, dass ein geeignetes Trocknungssystem abwasserfrei arbeiten und eine reproduzierbare Restfeuchte von ≤ 10 % sicherstellen muss.

Die Bewertung ergab, dass Niedertemperatur-Bandtrockner diese Anforderungen am zuverlässigsten erfüllen. Sie gewährleisten einen stabilen und homogenen Trocknungsverlauf, besitzen keine problematischen Abwasserströme und liefern ein für die Staubfeuerung gut geeignetes Granulat. Daher wurde der Bandtrockner als Referenzsystem festgelegt. Parallel wurde ein solargetrockneter Klärschlamm bewusst in die Untersuchungen einbezogen, um die Auswirkungen stärker schwankender Trocknungsprofile auf Mahlung, Korngrößenverteilung und Verbrennung zu analysieren.

Die Trocknungsmethode hat zudem erheblichen Einfluss auf weitere Brennstoffparameter wie den NH_4-N-Gehalt. In den Analysen zeigte sich, dass je nach Trocknungstemperatur bis über 90 % des NH_4-N während der Trocknung ausgetrieben werden können, was wiederum die Emissionscharakteristik

(NO_x-Bildung) beeinflussen kann. Dies unterstreicht die Notwendigkeit einer stabilen, definierten Trocknungsführung und einer sorgfältigen Auswahl der Schlämme für die Versuchsdurchführung.

Die Ergebnisse dieser systematischen Bewertung flossen in die aufgestellte Klärschlamm-Matrix ein, welche technische Anforderungen, Analyseparameter und Auswahlkriterien zusammenfasst und als Entscheidungsgrundlage für die Versuchsplanung diente.

Stand der Technik: Mahlung und Brennstoffaufbereitung für Staubfeuerung

Die Mahlung von Klärschlamm zu einem brennfähigen Staubkorn stellt einen zentralen Schritt für den Einsatz in einer Staubfeuerung dar. Im Gegensatz zur Wirbelschichtverbrennung, bei der pelletierte oder granuliert Trockenschlämme direkt eingesetzt werden können, erfordert die Staubfeuerung ein definiertes Kornband**,** um eine stabile Fluidisierung, eine reproduzierbare Dosierung und eine vollständige thermische Oxidation sicherzustellen. Vor Projektbeginn lagen jedoch nur begrenzte praktische Erfahrungswerte zur optimalen Partikelverteilung von Klärschlammstaub vor.

Klärschlamm weist, anders als typische Staubbrennstoffe, eine heterogene Struktur mit Faser-, Folien- und Inertstoffanteilen auf. Diese Bestandteile erschweren die Zerkleinerung und führen zu breiten Sieblinien. Aufbauend auf Referenzwerten aus der Kohlenstaubtechnik wurde für die Staubfeuerung ein spezifisches Zielkornband definiert: ein Schwerpunkt der Verteilung bei $d_{50} \approx 90$ µm, geringe Anteile > 200 µm sowie ein Überkornanteil > 650 µm von < 1 %. Diese Vorgaben basieren auf den im Projekt entwickelten Auswertungsstandards und den systematisch erhobenen Siebkurven der Versuchschargen.

Da Klärschlämme je nach Herkunft und Trocknungsverfahren stark variierende Materialeigenschaften aufweisen, ergaben die ersten Untersuchungen deutliche Unterschiede hinsichtlich Restfeuchte, Faseranteil, und Agglomerationsneigung. Im Projekt erfolgte mit verschiedensten Mahlanlagenherstellern und Verfahrensgebern ein intensiver Austausch. Für ausgewählte Mahltechniken wurden Versuchsfahrten durchgeführt und entsprechend bewertet. Dabei wurden neben der Mahlbarkeit und des angesetzten Kornbandes auch der Anlagenaufwand, Automatisierungsgrad, Konformität zu ATEX-Anforderungen und die spezifischen Betriebskosten bewertet. Die erarbeiten Parameter wurden individuelle bewertet und ausgewertet. In der Auswertung wurde die Exzenterschwingmühle als favorisierte Mahltechnik gewählt.

Mit verschiedenen Herstellern wurden Mahldienstleistungen erörtert. Aus ganz unterschiedlichen Gründen konnte über einen langen Zeitraum kein geeigneter Dienstleister beauftragt werden. Zwischenzeitlich wurde daran gearbeitet eine eigene temporäre Mahlstation an einem Carbotechniknahen Standort zu errichten. Eine Exzenterschwingmühle als Leihgerät wurde zugesagt und parallel erfolgte das Engineering einer Mahlstation im Eigenbetrieb.

Tatsächlich wurde dann ein Dienstleister ausfindig gemacht, der die passenden Anlagentechnik in Deutschland errichtet und die Mahlung durchgeführt hat.

Parallel dazu wurde eine standardisierte mechanische Siebmethodik etabliert: definierte Maschenweiten, einheitliche Protokolle und Fotodokumentationen ermöglichten eine reproduzierbare Bewertung der Kornverteilung. Die Auswertungen zeigten, dass Grobkornanteile > 650 µm häufig aus Faser- und Folienfragmenten bestehen und nicht dem eigentlichen Brennstoff entsprechen, weshalb eine zuverlässige Materialvorbereitung unerlässlich war.

In ergänzenden Fluidisierungsversuchen wurden Dichte und spezifische Luftmengen ermittelt, die für eine stabile Förderung notwendig sind. Die gemessenen fluidisierten Dichten (474–539 kg/m³) und spezifischen Luftmengen (47–66 m³/m²h) unterstreichen die Notwendigkeit eines definierten Kornbandes für ein gleichmäßiges Fließverhalten.

Durch diese Schritte konnte die zuvor fehlende Datenbasis erstmals geschlossen werden. Die Kombination aus Siebanalyse, Fluidisierung und der Bewertung unterschiedlicher Mahltechniken ermöglichte die Entwicklung eines nachvollziehbaren und technisch belastbaren Vorgehens zur Brennstoffaufbereitung

für die Staubfeuerung. Damit liegt nun eine systematische Grundlage vor, die sowohl die Materialheterogenität berücksichtigt als auch den spezifischen Anforderungen der Staubbrennereitechnik gerecht wird.

Schwermetallreduktion während der Verbrennung

Die Schwermetallgehalte der bei der monothermischen Klärschlammverbrennung entstehenden Aschen stellen einen wesentlichen limitierenden Faktor für deren stoffliche Nutzung dar. Durch die starke Massenreduktion des Brennstoffs während der Verbrennung reichern sich Schwermetalle in der festen Asche an und überschreiten häufig die Grenzwerte der Düngemittelverordnung. Eine gezielte Beeinflussung der Schwermetallverteilung ist daher von zentraler Bedeutung für die spätere Verwertbarkeit der Aschen.

Vor Projektbeginn standen zur Schwermetallreduktion überwiegend nachgeschaltete thermochemische Verfahren zur Verfügung, die mit hohem Energie- und Reagenzieneinsatz verbunden sind. Im Projekt DreiSATS wurde daher der Ansatz der In-situ-Schwermetallentfrachtung während der Verbrennung untersucht, bei dem das hohe Temperaturniveau der Staubfeuerung gezielt genutzt wird, um flüchtige Schwermetallverbindungen aus der festen Aschefraktion zu verlagern.

Die Untersuchungen wurden an einer technischen Staubfeuerungs-Versuchsanlage unter realen Feuerungsbedingungen durchgeführt und gehen damit deutlich über den klassischen Labormaßstab hinaus. Ziel war es, das grundsätzliche Reduktionspotenzial einzelner Schwermetalle sowie die stofflichen und thermodynamischen Grenzen dieses Ansatzes zu bestimmen.

Die Ergebnisse zur Schadstoffentfrachtung in Kombination mit der In-situ-Aschemodifikation und dessen Potenzial wird im weiteren Bericht beschrieben. Die integrierte Schadstoffentfrachtung bietet die einmalige Chance mit geringem Aufwand Schadstoffe aus dem Stoffkreislauf auszuschleusen und sollte deshalb unbedingt genutzt werden, egal welchen Weg die Asche nimmt.

Phosphorrecycling aus Klärschlämmen und Klärschlammaschen

Phosphor gilt als endlicher und strategisch relevanter Rohstoff, dessen Rückgewinnung aus Klärschlamm und Klärschlammaschen in Deutschland durch die AbfKlärV verpflichtend wird. Der Stand der Technik umfasst thermochemische, nasschemische und mechanische Verfahren, die darauf abzielen, Phosphor aus Aschen oder Schlämmen zu extrahieren oder in pflanzenverfügbare Formen zu überführen.

In der thermischen Behandlung spielt die Art der Verbrennung eine entscheidende Rolle für die spätere P-Verfügbarkeit, da Temperaturführung und Aschebildungsmechanismen die mineralogische Phosphorbindung bestimmen. Insbesondere Verfahren, die eine getrennte Ascheführung erlauben, schaffen verbesserte Voraussetzungen für eine spätere stoffliche Nutzung oder Rückgewinnung. Vor diesem Hintergrund verfolgt das Projekt DreiSATS den Ansatz, über In-Situ-Modifikation und Heißgasfiltration gezielt Einfluss auf P-Löslichkeit und Aschematrix zu nehmen, um hochwertige, rückgewinnungsfähige Aschen zu erzeugen.

Aufzählung der wichtigsten wissenschaftlich-technischen Ergebnisse

1. Technische Validierung der Staubfeuerung für die Mono-Klärschlammverbrennung Es wurde nachgewiesen, dass die Staubfeuerung eine stabile, emissionsarme und steuerbare Technologie für die thermische Klärschlammverwertung darstellt. Die Verbrennung konnte über alle untersuchten Schlammqualitäten hinweg sicher geführt werden.

2. Systematische Analyse der Einflussgrößen auf Verbrennung, Emissionen und Ausbrand Die Untersuchungen zeigten, wie Kornband, Dosierung, Luftstufung, O_2-Regelung und Temperaturführung das Flammenverhalten, die CO- und NO_x-Emissionen sowie die Ausbrandqualität beeinflussen. Dadurch konnten die wesentlichen Stellgrößen für eine stabile Anlagenführung identifiziert werden.

3. Etablierung eines definierten Zielkornbandes für Klärschlammstaub Erstmals wurde ein spezifisches Kornband für die Staubfeuerung entwickelt und experimentell bestätigt. Die Kombination aus Exzenterschwingmühle, Siebmethodik und Fluidisierungsversuchen lieferte eine belastbare Grundlage für die Brennstoffaufbereitung.

4. Erweiterung und Validierung der Versuchsanlage inklusive Heißgasfiltration Die Integration der Heißgasfiltration ermöglichte erstmals kombinierte Untersuchungen zur thermischen Schwermetallentfrachtung im Staubfeuerungsprozess. Die Filterstufe wurde erfolgreich implementiert.

5. Nachweis der additivgestützten In-Situ-Modifikation der Asche Durch die Zugabe von Natriumhaltigen Additiven (Na_2CO_3, $NaHCO_3$) konnten die P-Löslichkeiten gezielt erhöht und die Aschemineralogie beeinflusst werden. Die Ergebnisse zeigen, dass die Staubfeuerung aktiv zur Verbesserung der P-Verfügbarkeit beitragen kann.

6. DüMV-Deklaration der Staubfeuerungsasche Die Aschen erfüllen die Anforderungen der DüMV-Deklaration hinsichtlich Nährstoffgehalten und Schadstoffgrenzwerten in Abhängigkeit vom Materialinput. Dies bestätigt die grundsätzliche Eignung der Asche als Dünger. Alternativ für nachgeschaltete Aufbereitungsverfahren zur Herstellung definierter Düngergranulate.

7. Pflanzversuche belegen die pflanzenbauliche Wirksamkeit der Asche Die Aschen zeigten im Vergleich zu TSP (Triple-Superphosphat) einen guten Frischmassezuwachs. Dies bestätigt die technische und agronomische Eignung der Staubfeuerung als Basis für P-Recyclingprodukte.

8. Ableitung eines großtechnischen Anlagenkonzeptes Auf Grundlage der experimentellen Daten wurden Stoff- und Energiebilanzen, Anlagenlayouts, Emissionskonzepte und wirtschaftliche Rahmenbedingungen für eine großtechnische Umsetzung entwickelt. Die Ergebnisse bilden die Grundlage für die Anschlussphase am Modellstandort.

Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die erfolgreiche Durchführung des Verbundvorhabens *DreiSATS* basierte auf einer engen, kontinuierlichen und gut strukturierten Zusammenarbeit aller beteiligten Partner. Die jeweiligen fachlichen Stärken ergänzten sich dabei komplementär, sodass sowohl analytische als auch verfahrenstechnische und konzeptionelle Aspekte des Projektes vollständig abgedeckt wurden.

Die Carbotechnik Energiesysteme GmbH übernahm die federführende Rolle bei der verfahrenstechnischen Entwicklung und dem Betrieb der Versuchsanlage. In enger Abstimmung mit den Verbundpartnern erfolgten die Planung und Durchführung der Verbrennungsversuche, die Integration neuer Anlagenteile wie der Additivdosierung und der Heißgasfiltration sowie die Auswertung der prozessrelevanten Messdaten. Die regelmäßigen fachlichen Abstimmungen, sowohl vor Ort als auch in digitalen Formaten, stellten sicher, dass planerische, messtechnische und analytische Anforderungen der Partner zeitnah in den Anlagenbetrieb einfließen konnten.

Das Fraunhofer IKTS arbeitete eng mit CT zusammen, insbesondere bei der Bereitstellung analytischer Daten zu Klärschlamm, Aschen und P-Löslichkeiten. Die Zusammenarbeit umfasste sowohl die Abstimmung der Probenahmen als auch die gemeinsame Interpretation der Laborergebnisse. Die analytischen Resultate des IKTS waren zentral für die Bewertung der Additivwirkung, der Schwermetallverteilung und der mineralogischen Aschezusammensetzung.

Der VKD unterstützte das Projekt durch die Bereitstellung regionaler Klärschlämme und übernahm die logistische Organisation von Probenahme, Transport und Dokumentation. Die enge Abstimmung zwischen VKD und CT stellte sicher, dass die für das Projekt benötigten Schlammqualitäten in der erforderlichen Menge, Qualität und zeitlichen Verfügbarkeit bereitstanden.

Das IKTS und die Firma LTC waren Entwickler und Integrator der Filtrationstechnik. Die Kooperation mit CT umfasste die Planung, Montage und Inbetriebnahme der Heißgasfiltration sowie die gemeinsame Lösung von Herausforderungen, die während der ersten Versuchsphasen auftraten. Die Zusammenarbeit war besonders für die Optimierung der Abreinigung und den stabilen Betrieb der Filteranlage im Hochtemperaturbereich entscheidend.

Insgesamt war die Zusammenarbeit der beteiligten Stellen geprägt von einer offenen, konstruktiven Kommunikation, einer klaren Aufgabenverteilung und einem kontinuierlichen fachlichen Austausch. Die komplementäre Expertise der Partner ermöglichte es, die komplexen Fragestellungen des Projektes ganzheitlich zu bearbeiten und ein belastbares Gesamtverfahren zu entwickeln, das die Grundlage für die Weiterführung in eine großtechnische Umsetzung bildet.

Fazit

Das Verbundvorhaben DreiSATS hat gezeigt, dass die Staubfeuerung eine technisch robuste, emissionsarme und verlässlich steuerbare Technologie für die mono-thermische Klärschlammverwertung darstellt. Die im Projekt durchgeführten Untersuchungen unter realen Feuerungsbedingungen lieferten erstmals einen umfassenden Datensatz zu Verbrennung, Emissionsbildung, Aschequalität, Schwermetallverteilung und Phosphorlöslichkeit im Technikumsmaßstab. Die Ergebnisse bestätigen, dass die Staubfeuerung stabile Flammenbilder, niedrige CO- und NO_x-Emissionen sowie reproduzierbare Aschequalitäten erzeugt.

Die Arbeiten verdeutlichen, dass die Partikelgrößenverteilung des Brennstoffs ein zentraler Stellhebel für die Prozessstabilität ist. Die im Projekt entwickelte Methodik zur Mahlung, Siebung und Fluidisierung bildet eine belastbare Grundlage für die spätere großtechnische Umsetzung. Ebenso konnte gezeigt werden, dass die In-Situ-Modifikation und die Heißgasfiltration einen relevanten Beitrag zur Verbesserung der Phosphorlöslichkeit und zur thermischen Schwermetallentfrachtung leisten können. Die Kombination aus additivgestützter Aschemodifikation und Hochtemperaturfiltration eröffnet neue Optionen für die Erzeugung rückgewinnungsfähiger Aschen.

Die im Projekt gewonnenen Erkenntnisse zur Aschemineralogie, zur P_{NAC}-Löslichkeit und zur Schadstoffverteilung bilden eine wichtige Grundlage für die spätere Produktentwicklung und die Bewertung der P-Rückgewinnungspfade. Die Ergebnisse der Pflanzversuche bestätigen die pflanzenbauliche Wirksamkeit der Aschen und unterstreichen die Eignung der Staubfeuerung als Baustein einer regionalen Phosphorstrategie.

Mit den erarbeiteten Stoff- und Energiebilanzen, den Anlagenlayouts und den verfahrenstechnischen Betriebsfenstern liegt ein konsistentes Konzept für die großtechnische Umsetzung vor. Die enge Zusammenarbeit der Verbundpartner IKTS, VKD, LTC und Pontes Pabuli ermöglichte die vollständige Abdeckung der Prozesskette.

Insgesamt zeigt das Projekt DreiSATS, dass die Staubfeuerung ein vielversprechender Technologiepfad für die regionale Klärschlammverwertung und das Phosphorrecycling ist. Die Ergebnisse bilden eine belastbare Grundlage für die Anschlussphase. Gleichzeitig wurden weitere Optimierungspotenziale identifiziert, insbesondere hinsichtlich der gezielten Schwermetallreduktion und der langfristigen Stabilität der P-Verwertungsoptionen. Das Projekt hat damit die wesentlichen Voraussetzungen geschaffen, um die Staubfeuerung in die großtechnische Anwendung zu überführen und einen Beitrag zur Umsetzung der AbfKlärV zu leisten.

II Eingehende Darstellung

II.1.1 Hauptarbeitspaket 1: Bewertung der Inputstoffe Klärschlamm und Klärschlammasche

Hauptarbeitspaket 1 bildet die Grundlage für alle nachfolgenden verfahrenstechnischen Untersuchungen im Projekt DreiSATS. Ziel war es, den eingesetzten Klärschlamm als Brennstoff sowie die bei der Verbrennung entstehenden Aschefraktionen umfassend zu bewerten, um einen konsistenten und belastbaren Datensatz zu schaffen, der die spätere Auslegung der Staubfeuerung ermöglicht.

Da Klärschlämme starke Variationen hinsichtlich Feuchte, Organikanteil, Fällmittel, Mineralogie, Korngrößenverteilung, Schwermetallgehalt und P-Bindungsformen aufweisen, ist eine systematische Charakterisierung unverzichtbar. Nur durch die Bewertung dieser Eingangsstoffe lässt sich der Brennstoff gezielt an die Anforderungen der Staubfeuerung anpassen und können spätere Ergebnisse aus Verbrennung, Ascheanalytik und Additivuntersuchungen korrekt interpretiert werden.

Zu diesem Zweck wurde eine umfassende Klärschlamm-Matrix erstellt, in der sämtliche relevanten chemischen, mineralischen und physikalischen Parameter erfasst wurden. Die Matrix bildet die methodische Grundlage für die Brennstoffauswahl, die Versuchsdurchführung und die Interpretation der Ergebnisse im Technikumsmaßstab. Sie enthält sowohl grundlegende Daten wie Trockensubstanzgehalt, Heizwert, Glühverlust, Hauptbestandteile und Fällmittel als auch weiterführende Parameter, die direkt den Verbrennungsprozess beeinflussen, wie Sieblinien, Fluidisiereigenschaften, Dichte, Zündverhalten und Schwermetallprofile.

Anforderung	Parameter	Ziel	Gewichtung
Trocknungsparameter	• Niedertemperatur-Bandtrockner • Solar getrocknet	Grenze Feuerungstechnik, Mahlung	+ unterschiedl. BT +++ solar getr. -**GESETZT**
Heizwert	>= 7.000 kJ/kg, 90%TS	Grenze Feuerungstechnik	+++ niedriger HW +++ hoher HW
Fällungsart	Eisenchloride ($FeCl_2$ oder $FeCl_3$) Eisenchloridsulfat ($FeClSO_4$) Eisen(II)-sulfat / Grünsalz ($FeSO_4$) Aluminiumsulfat ($Al_2(SO_4)_3$) Natriumaluminate ($NaAl(OH)_4$) Kalkmilch ($Ca(OH)_2$) biologisch	Grenze Feuerungstechnik, Einfluss Abgas, Schmelztemperatur? (wg. Chloriden? – wird nicht erwartet), P-Löslichkeit	- Einfluss Ascheschmelzpunkt sofern zu erwarten + Fällung P-Löslichk. (zur Verifizierung) -> untersch. Fällung. - Chloride Einfluss auf Schwermetallentfr.?
pH-Wert und Calcium-Gehalt	>8 und hoher $Ca(OH)_2$ Gehalt	Einfluss auf NOx, Schmelztemperatur, Grenze Feuerungstechnik	- Einfluss Ascheschmelzpunkt ++ Nox, +S
Konditionierung	Polymere Flockungsmittel, (Eisen, Kalkmilch)	Grenze Feuerungstechnik, Einfluss Abgas, P-Löslichkeit	- auf Feuerung Einfluss + P-Löslichk.
Stabilisierung	Aerobe Stabilisierung Anaerobe Stabilisierung	Grenze Feuerungstechnik, Einfluss Abgas, Einfluss auf Mahlung, Einfluss P-Löslichkeit	+ Verbrennung + ohne Faulturm + mit Faulturm
Ascheanteil	>> 60%	Grenze Feuerungstechnik	+++ möglichst hoch +++ möglichst niedrig

NH4-Stickstoff	>> NH4-N und << NH4-N	Einfluss auf NOx	+ Verbrennung +++ Einfluss Trocknung
Stickstoff Gesamt	>> hoch	Einfluss auf NOx	++ Verbrennung ++ Abgas NOx
Blei, Kupfer, Zink	Blei >> 150 mg/kg TS Zink >> 4.000 mg/kg TS Kupfer >> 900 mg/kg TS	Klärung Ziel. Temperaturniveau (Siedetemp.) vermutlich für uns zu hoch!	Vermutlich um 1.700°C Einfluss möglich ++ Blei; ++ Zink
Schwermetalle	Ab sinnvoller Siedetemperatur	Aschequalitäten, Schwermetallentfr. je Entnahmestelle	++ Schwermetall-entfrachtung

Tabelle 1 Kriterienkatalog für Probenmatrix

Durch die strukturierte Aufnahme dieser Daten wurde sichergestellt, dass im Projektverlauf ein kosistenter Vergleich zwischen verschiedenen Brennstoffen möglich ist und dass Veränderungen im Verbrennungsverhalten direkt auf Veränderungen in der Eingangsmaterialqualität zurückgeführt werden können. Darüber hinaus ermöglicht die Matrix, potenzielle Problemstoffe zu identifizieren, geeignete Brennstoffkombinationen auszuwählen und Analysen zur Schwermetallentfrachtung im späteren Prozess korrekt zu bewerten.

Obwohl die formale Erstellung der Klärschlamm-Matrix beim Fraunhofer IKTS lag, wirkte Carbotechnik maßgeblich an deren inhaltlicher Ausgestaltung mit. Auf Grundlage der eigenen verfahrenstechnischen Expertise untersuchte CT jene Parameter, die das Brenn- und Ascheverhalten in der Staubfeuerung wesentlich beeinflussen können. Dazu gehörten insbesondere Merkmale wie Korngrößenverteilung, Fluidisierbarkeit, Zündverhalten, Faser- und Inertstoffanteile sowie Parameter, die für die thermische Schwermetallentfrachtung oder die Phosphorverfügbarkeit relevant sein könnten.

Carbotechnik bewertete diese Parameter hinsichtlich ihrer Bedeutung für den Verbrennungsprozess und leitete daraus eine Gewichtung und Priorisierung ab. Ziel war es, in den späteren Verbrennungsversuchen eine möglichst breite Variabilität sowie gezielte Extremfälle zu berücksichtigen. Auf Basis dieser Bewertung entstand ein parameterorientiertes Auswahlraster, das die Struktur und inhaltliche Tiefe der Matrix wesentlich prägte.

Die Matrix ermöglichte es anschließend, aus der parallel durch das IKTS aufgebauten Klärschlamm-Datenbasis gezielt jene Schlämme auszuwählen, die repräsentativ für unterschiedliche Trocknungsverfahren, Fällmittelkombinationen, Stickstoff- und Organikgehalte sowie Asche- und Schwermetallprofile waren.

Durch diese enge Zusammenarbeit wurde sichergestellt, dass die Klärschlamm-Matrix nicht nur analytisch vollständig, sondern auch verfahrenstechnisch auf die Anforderungen der Staubfeuerung abgestimmt ist und somit eine belastbare Grundlage für die Versuchsauswahl und Interpretation aller weiteren Arbeitspakete bildet.

Mit der Erstellung und fortlaufenden Ergänzung dieser Matrix wurde der Grundstein für eine nachvollziehbare, analytisch abgesicherte Versuchsdurchführung gelegt. Die im Rahmen von AP 1 ermittelten Parameter dienen als direkte Datengrundlage für alle weiteren technischen Arbeitspakete.

II.1.1.1 AP 1.1: Charakterisierung Klärschlamme

Die Charakterisierung der Klärschlämme ist der zentrale Bestandteil des ersten Hauptarbeitspakets und bildet die technische Grundlage für die gesamte weitere Forschungstätigkeit im Projekt. Das Ziel von AP 1.1 bestand darin, die Brennstoffeigenschaften der Klärschlämme so vollständig zu erfassen, dass ein klar definiertes Prozessfenster für die Staubfeuerung entsteht und die Variabilität der Eingangsstoffe beherrschbar wird.

Da die im Projekt eingesetzten Klärschlämme aus verschiedenen Kommunen und Anlagen stammten und unterschiedliche Behandlungs- und Trocknungsprozesse durchlaufen hatten, war eine detaillierte Bewertung notwendig. Die wichtigsten Einflussgrößen: Trocknungsmethode, Fällmittel, Kornspektrum,

mineralische Zusammensetzung, Phosphorbindung, Schwermetallgehalt, Stickstoffgehalt und Restfeuchte, bestimmen maßgeblich das Verhalten des Brennstoffs in der Staubfeuerung.

Ein zentrales Ziel des Arbeitspaketes war es, Schlämme auszuwählen, die das gesamte Spektrum möglicher Brennstoffvariationen abbilden. Dadurch sollte sichergestellt werden, dass die Staubfeuerung unter realistischen Bedingungen untersucht wird und dass die späteren Prozessoptimierungen für eine breite Palette an Eingangsmaterialien geeignet sind. Dieser Ansatz erwies sich als erfolgreich, da die im Projekt untersuchten Schlämme in Heizwert, Fällmittel, Kornband, Mineralik und Schwermetallen teils erhebliche Unterschiede aufwiesen.

Die Charakterisierung erfolgte sowohl über standardisierte Analysen gemäß AbfKlärV und Brennstoffanalytik als auch über erweiterte Untersuchungen, die speziell auf die Anforderungen der Staubfeuerung abgestimmt waren. Dazu gehörten Korngrößenverteilungen nach der Mahlung, Fluidisier- und Fließverhalten, Zündverhalten, morphologische Analysen sowie die Identifikation potenzieller Inertstoffe in der Grobfraktion.

Wichtig für die spätere Auswahl der Brennstoffe waren insbesondere der Heizwert und die Aschesschmelzpunkte der Klärschlämme. Um die feuerungstechnischen Grenzen der Staubfeuerung realistisch bestimmen zu können, wurde gezielt angestrebt, möglichst extreme Brennstoffkennwerte in die Versuchsreihen einzubeziehen. Die Heizwertanalysen zeigten dabei teilweise deutliche Schwankungen sogar innerhalb einer einzigen Charge, was die natürliche Variabilität des Klärschlamms und die Herausforderung für eine präzise Prozessführung verdeutlicht. Trotz dieser Unterschiede konnte die O_2-Regelung der Versuchsanlage den Verbrennungsprozess stabil halten, sodass selbst stark divergierende Heizwerte ohne Betriebsstörungen verarbeitet wurden. Die Berücksichtigung extremer Heizwerte und Schmelzpunkte trug wesentlich dazu bei, robuste Betriebsfenster für die späteren Verbrennungsversuche zu definieren.

Diese detailreiche Aufnahme der Brennstoffparameter ermöglichte eine präzise Prozessführung im späteren Technikumsbetrieb und war essenziell für die Interpretation der Ergebnisse aus AP 2.1 (Verbrennung), AP 2.2 (Additivwirkung) und AP 2.4 (Dauerbetrieb). Gleichzeitig diente AP 1.1 als Grundlage für die spätere großtechnische Auslegung, da die Brennstoffparameter entscheidend für Dimensionierungsfragen sind.

Durch AP 1.1 wurde ein vollständiges Bild des Brennstoffs „Klärschlamm“ geschaffen, das sowohl die Variabilität als auch die prozesstechnisch relevanten Konstanzfaktoren abbildet. Damit bildet AP 1.1 die methodische Basis für das gesamte DreiSATS-Projekt.

AP 1.1.1 Untersuchung regional verfügbarer Klärschlämme für Versuchsdurchführung Staubfeuerung

Ein wesentlicher Bestandteil der im Projekt erstellten Klärschlamm-Matrix ist die detaillierte Erfassung der Korngrößenverteilung der eingesetzten Brennstoffe. Diese umfasst sowohl den ursprünglichen Klärschlamm in getrockneter beziehungsweise granuliert vorliegender Form als auch den nach der Mahlung erzeugten Klärschlammstaub sowie die aus den Verbrennungsversuchen gewonnenen Aschefraktionen. Die Analyse des Kornspektrums liefert zentrale Informationen über die späteren Verbrennungseigenschaften, die CO-Bildung, die Dosier- und Fluidisierbarkeit und letztlich die Aschequalität.

DreiSATS Probennummer	U-Nummer IKTS	d10 in µm	d50 in µm	d90 in µm	d10 in µm	d50 in µm	d90 in µm
IKTS031_gKS_Original	U5639						
IKTS030_ggKS	U5380	17,27	179,15	447,02	17,38	200,80	489,40
IKTS031_ggKS	U5519	14,63	73,07	248,68	17,68	98,32	367,40
IKTS031_ggKS	U5636				13,28	129,90	598,00

Abbildung 3 Ausschnitt Klärschlammmatrix

Die im Verlauf des Projektes durchgeführten Untersuchungen verdeutlichten, dass die Ergebnisse der Korngrößenanalyse stark von der verwendeten Messmethode, der Siebführung, der Fraktionierung und der Probenvorbereitung abhängen. Selbst bei identischer Probe können je nach Analyseverfahren deutliche Unterschiede auftreten. Die Ursachen hierfür sind vielfältig:

- verwendete Siebanalysetechnik (Vibration, Amplitude, Messdauer)
- Siebturmgeometrie und verwendete Maschenweiten
- Vorsiebung bzw. Endagglomeration
- Feuchtigkeitsgehalt und statische Aufladung
- unterschiedliche Laborstandards zwischen den beteiligten Institutionen (Carbotechnik, IKTS, externe Mahlanlagen)

Um eine maximale Vergleichbarkeit sicherzustellen, führte Carbotechnik daher sämtliche Siebanalysen im eigenen Labor durch. Zum Einsatz kommt ein Siebturm bis 630 µm, der für alle Proben unter identischen Bedingungen betrieben wird. Dieses Vorgehen garantiert, dass systematische Fehler bei allen Materialien, Klärschlamm, Staub und Aschen, in gleicher Weise auftreten und somit eine konsistente Vergleichbarkeit gewährleistet bleibt.



Abbildung 4 Siebturm Carbotechnik

Ein weiterer Vorteil dieser einheitlichen Systematik besteht darin, dass die Bewertung der Siebdurchgänge regelmäßig auf interne Referenzstäube abgestützt werden kann. Dieser Vergleich ist nur möglich, wenn derselbe Siebturm und dieselbe Prüftechnik für alle Materialien verwendet werden. Dadurch konnte CT die Qualität der Mahlung, die Stabilität der Kornbandverteilung sowie die Reproduzierbarkeit der Fraktionierung verlässlich beurteilen und Abweichungen eindeutig identifizieren.

Das IKTS setzt hingegen ein anderes Siebverfahren ein, was naturgemäß zu abweichenden Resultaten führen kann. Bereits im Projektverlauf wurde vereinbart, die beiden Methoden zu vergleichen. Eine solche Gegenüberstellung würde den gemeinsamen Erfahrungsschatz erweitern und die Interpretation unterschiedlicher Messergebnisse erleichtern.

Bedeutung der Kornfraktionen für die Verbrennung:

Für die Bewertung der Verbrennungseigenschaften haben sich insbesondere die Grobfraktionen oberhalb von 200 µm als relevant herausgestellt. Aus den Zwischenberichten ergibt sich dabei ein konsistentes Bild:

Die Fraktion > 200 µm enthält häufig Fasern, Haare, Folienreste und andere strukturell größere Partikel. Diese Bestandteile sind zwar im Sieb technisch als „Grobkorn“ sichtbar, verhalten sich im Feuerraum jedoch nicht identisch.

Fasern und faserartige Bestandteile beeinflussen die CO-Bildung nicht direkt, da sie trotz ihrer geometrischen Länge relativ schnell verbrennen. Durch die unterstöchiometrische Fahrweise der Staubfeuerung ($\lambda < 1$) und die hohe Turbulenz im Impulsbrenner werden selbst größere Faserfragmente rasch aufgeheizt und oxidiert, sodass sie nicht für CO-Transienten verantwortlich sind.

CO-Relevanz besitzen hingegen die brennbaren organischen Agglomerate innerhalb der Grobfraktion. Diese kompakten Partikel weisen eine deutlich langsamere Aufheiz- und Oxidationskinetik auf. Dadurch entstehen lokal verzögerte Abbrandzonen, die unter reduzierenden Bedingungen kurzzeitig CO-Erhöhungen auslösen können. Genau dieses Verhalten wurde in mehreren Versuchsreihen beobachtet und beschrieben.

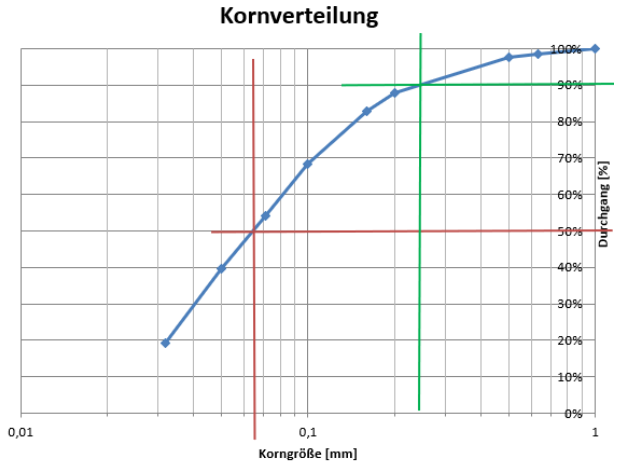


Abbildung 6 Siebanalyse IKTS031 CT046



Abbildung 5 Grobkorn Fraktion Aussiebung IKTS031 CT046

Notwendigkeit weiterführender Untersuchungen

Die Ergebnisse aus AP 1.1.1 bilden die Grundlage für mehrere weiterführende Fragestellungen, die für die Staubfeuerung von zentraler Bedeutung sind:

- Wie hoch ist der tatsächliche inerte Anteil in der Grobfraktion?
- Wie stark beeinflusst der brennbare Restanteil die CO-Bildung im Detail?

- Wie verändern sich die Grobfraktionen abhängig vom Mahlverfahren und den Parametereinstellungen der Mühle?
- In welchem Umfang lassen sich Fasern, Folien und andere Störstoffe bereits vor dem Mahlprozess aus dem Material entfernen?

Es wurde daher vorgeschlagen, eine vertiefende Siebreihe mit variierender Mahlparameterführung durchzuführen sowie eine separate thermogravimetrische Analyse zur Bestimmung des inert/brennbaren Anteils aufzubauen.

- Relevanz für den weiteren Projektverlauf
- Die einheitliche Sieb- und Messmethodik ist für das Projekt von besonderer Bedeutung, da die Korngrößenverteilung unmittelbar Einfluss hat auf:
- die Verbrennungsstabilität,
- die CO- und NO_x-Emissionen,
- das Fluidisierverhalten,
- die Dosierbarkeit,
- die Flammenbildung,
- sowie die Korngröße der erzeugten Aschen.

AP 1.1.1 liefert damit die entscheidenden Eingangsinformationen für alle nachfolgenden Arbeitspakete, insbesondere:

- AP 2.1 Verbrennung,
- AP 2.2 Additive / In-Situ-Modifikation,
- AP 2.4 Aschemodifikation und Dauerbetrieb,
- AP 5 großtechnische Auslegung.

II.1.2 Hauptarbeitspaket 2: Adaption Staubfeuerung für die Mono-Klärschlamm-Verbrennung und In-Situ-Modifikation und Schwermetallabtrennung

Das Hauptarbeitspaket 2 umfasst die umfassende Weiterentwicklung, Anpassung und Optimierung der Staubfeuerungstechnologie für die mono-thermische Behandlung von Klärschlamm. Der Schwerpunkt liegt darauf, den Prozess so auszulegen, dass er zuverlässig, emissionsarm und stabil arbeitet und gleichzeitig Aschen erzeugt, die sowohl stofflich hochwertig als auch geeignet für anschließende Phosphorrückgewinnungsverfahren sind.

Die Arbeiten in AP 2 beinhalten daher nicht nur die Verbrennungsoptimierung, sondern auch die technische Integration der In-Situ-Modifikation, die Einbindung der Heißgasfiltration, den Umbau und die Erweiterung der Versuchsanlage, sowie schließlich die systematische Bewertung des Dauerbetriebs.

AP 2 stellt damit das zentrale technische Arbeitspaket des Projektes dar, in dem wissenschaftliche Analysen, verfahrenstechnische Optimierungen, Engineering-Arbeiten sowie praktische Erprobung zusammengeführt werden.

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

Die im Rahmen des Arbeitspakets 2.1 durchgeführten Verbrennungsversuche bilden das technologische Zentrum des Gesamtprojektes. Ziel dieser Arbeiten war es, die Staubfeuerung unter realitätsnahen Bedingungen systematisch zu charakterisieren, die wesentlichen Einflussgrößen auf den Verbrennungsprozess zu identifizieren und daraus konkrete Optimierungsmaßnahmen für einen stabilen, emissionsarmen und verfahrenstechnisch zuverlässigen Betrieb abzuleiten.

Über den gesamten Projektzeitraum hinweg wurden mehrere aufeinander aufbauende Versuchskampagnen durchgeführt, beginnend mit grundlegenden Einstellfahrten, über parametergesteuerte Untersuchungen, bis hin zu mehrtägigen Dauerbetriebsfahrten. Diese breit angelegte Versuchsstrategie ermöglichte es, die Auswirkungen unterschiedlicher Klärschlammqualitäten, variierender Kornbänder, differenzierter Luftstufungen sowie unterschiedlicher Additivzugaben auf Flammenverhalten, Ausbrand, Emissionen und Aschebildung präzise zu erfassen.

Eine zentrale Rolle spielte dabei die Versuchsanlage der Carbotechnik Energiesysteme GmbH, die im Projektverlauf schrittweise erweitert wurde und im Pilotmaßstab sämtliche wesentlichen Komponenten einer potenziellen dezentralen Großanlage abbildet. Die Anlage umfasst die vollständige Prozesskette der Staubfeuerung, von der Brennstoffvorhaltung über die fluidisierte Dosierung, den Impulsstaubbrenner, die Nachbrennkammer gemäß 17. BImSchV, bis hin zur mehrstufigen Abgas- und Aschebehandlung. Dadurch konnten sämtliche Versuche unter Bedingungen durchgeführt werden, die hinsichtlich Temperaturführung, Strömungscharakteristik und Emissionsverhalten denen großtechnischer Anlagen sehr nahekommen.

Verbrennungscharakteristik der Staubfeuerung

Die Verbrennung von Klärschlammstaub folgt dem Prinzip der Einzelkornoxidation. Jeder Partikel durchläuft im Impulsstrahl sehr ähnliche thermische und strömungsmechanische Bedingungen, wodurch ein praktisch vollständiger Ausbrand begünstigt wird. Dieses charakteristische Verhalten unterscheidet sich von Rost- und Wirbelschichtfeuerungen, bei denen Pelletgrößen, Schütthöhen und Bettmaterialien zu stärker ausgeprägten Temperaturinhomogenitäten und komplexeren Reaktionsräumen führen können.

Für das Projekt ergab sich daraus ein wesentlicher verfahrenstechnischer Vorteil: Die P-Aschen zeigten über die verschiedenen Versuchskampagnen hinweg eine hohe Reproduzierbarkeit hinsichtlich ihrer Mineralogie bei gleichzeitig nahezu vollständigem Ausbrand. Die Ergebnisse weisen insgesamt auf eine geringe Streuung zwischen den Versuchen und eine stabile Prozessführung hin.

Einfluss der Partikelgröße auf Ausbrand und Emissionen

Die im Vorfeld stattgefundenen Untersuchungen zur Kornverteilung zeigten, dass insbesondere brennbare Überkornanteile (> 200 µm) das CO-Verhalten stark beeinflussen. Während inert wirkendes Grobkorn, wie Fasern, Folienreste oder mineralische Fragmente. kaum Einfluss auf die Verbrennung hatte, führten organische Agglomerate zu zeitversetzt auftretenden CO-Spitzen. Feinere Staubbänder hingegen begünstigten eine stabile Flugstaubwolke, homogene Brennerdurchströmung und niedrige CO-Werte.

Betrieb bei leichter Unterstöchiometrie

Ein zentrales Ergebnis der Verbrennungsversuche war die Erkenntnis, dass eine leicht unterstöchiometrische Betriebsweise ($\lambda < 1$) im Staubbrenner, entgegen klassischen Verbrennungsmodellen, zu einer stabileren Flammenführung und niedrigeren CO-Emissionen führt. Die reduzierte Sauerstoffführung erzeugt einen kompakteren, heißen Flammenkern mit gleichmäßigeren Temperaturprofilen und begünstigt den vollständigen Ausbrand der Staubpartikel. Gleichzeitig entstehen in Teilbereichen leicht reduzierende Bedingungen, die die Volatilisierung flüchtiger Schwermetalle fördern und zur ausgeprägten Schwermetallentfrachtung der Hauptasche beitragen.

Die zusätzliche Möglichkeit der Luftstufung über die Sekundär- und Tertiärluft bringt weitere Vorteile für eine saubere emissionsarme Verbrennung die sich auch in niedrigen NOx-Werten zeigt.

Strömungsmechanische Stabilität und Flugstaubcharakteristik

Im Projektverlauf zeigte sich, dass die strömungsmechanische Qualität der Flugstaubflamme entscheidend für einen stabilen Anlagenbetrieb ist. Homogene Staubflamme mit klar ausgeprägtem Brennerkern führten zu einem gleichmäßigen Ausbrand, einer geringen NO_x-Bildung und niedrigen CO-Werten. Dieser Betriebszustand wurde insbesondere durch optimierte Kornbänder, eine stabile Fluidisierung der Brennstoffsilofracht sowie eine sanft unterstöchiometrische Regelung der Verbrennung erreicht.

Thermochemische Reaktionsräume

Die Staubfeuerung weist drei thermochemische Reaktionszonen auf:

Brennermuffel:

In der Brennermuffel erfolgen Zündung und Primäroxidation der Einzelpartikel. Aufgrund der relativ kurzen Aufenthaltszeiten bestehen hier nur begrenzte Möglichkeiten zur vollständigen Umwandlung von Eisen- und Aluminiumphosphaten.

Nachbrennkammer (ca. 2 s bei > 850 °C):

In der Nachbrennkammer findet der vollständige Ausbrand statt. Gleichzeitig beginnt die Bildung stabiler Mineralphasen sowie die thermische Verlagerung flüchtiger Schwermetalle.

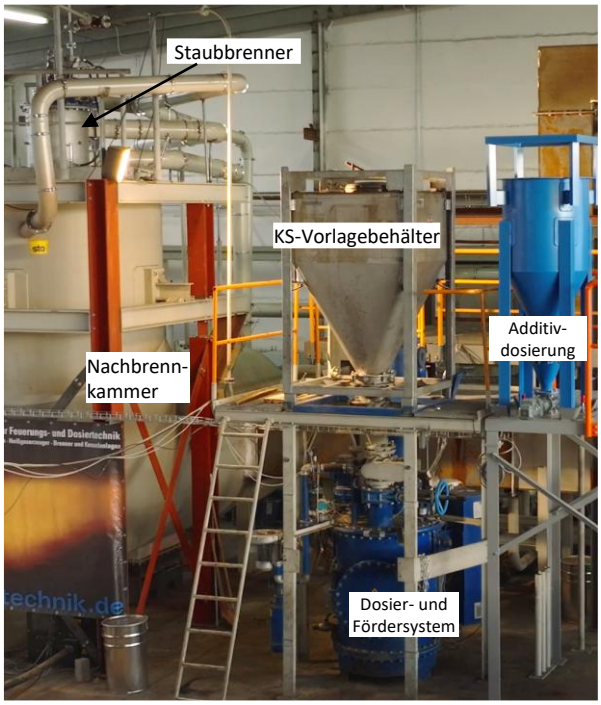
Schnelle Abkühlung in der Abgasstrecke:

Die rasche Abkühlung führt zum „Einfrieren“ der mineralogischen Struktur und ermöglicht eine klare Fraktionstrennung zwischen Nachbrennkammer-, Zyklon- und Filterasche.

Diese Reaktionsführung erklärt, warum die P_{NAC}-Werte der Staubfeuerung typischerweise im Bereich von 60–80 % liegen und nicht die Werte tiefthermischer Rostfeuerungen (> 90 %) erreichen, da hierfür deutlich längere Hochtemperaturhaltezeiten erforderlich wären.

AP 2.1.1, Verbrennungsversuche mit der vorhanden Versuchsanlage Staubfeuerung zur Ermittlung von Prozessparametern

Die im Rahmen des Arbeitspakets 2.1.1 durchgeführten Verbrennungsversuche bildeten den experimentellen Kern des Projektes. Ziel dieser Untersuchungen war es, die maßgeblichen Einflussgrößen der Staubfeuerung systematisch zu analysieren und zu bewerten, wie unterschiedliche Schlammqualitäten, Kornbänder, Dosierbedingungen und Betriebsparameter das Flammenverhalten, den Ausbrand, die Temperaturführung sowie die CO- und NO_x-Emissionen beeinflussen.



Die Versuchsreihen umfassten eine Vielzahl von Testfahrten, beginnend mit Einstellversuchen zur Brennerkonfiguration, gefolgt von systematischen Parameterstudien. Die im Laufe des Projekts kontinuierlich erweiterte Versuchsanlage der Carbotechnik ermöglichte es, die vollständige Prozesskette der Staubfeuerung, einschließlich fluidisierter Dosierung, Verbrennung, Abgasführung und Ascheentnahme unter praxisnahen Bedingungen abzubilden. Dadurch konnten sowohl die verfahrenstechnischen Zusammenhänge als auch die betrieblichen Einflussgrößen realitätsnah bewertet und die wesentlichen Stellgrößen für eine stabile und emissionsarme Anlagenführung identifiziert werden.

Abbildung 7 Forschungsanlage (Ausschnitt)

Vorlagebehälter

Der gemahlene Klärschlamm wird im Vorfeld in einen Vorlagebehälter gefüllt und über dem Dosiersystem positioniert. Der Austrag des Gutes erfolgt über eine Zellenradschleuse, die an den Dosiererfüllstand gekoppelt ist.

Dosiermaschine



1 Förderluftgebläse
2 Dosierbehälter
3 Produktaustrag
4 Zellenradschleuse mit Handschieber
5 Bevorratungssilo
6 Dosierscheibenantrieb
7 Rührwerksantrieb
8 Aufsatzfilter
9 Fluidisierluftgebläse
10 Fluidisiertes Schüttgut
11 Dosierscheibe

Abbildung 8 Schematische Darstellung der Dosiermaschine

Die Brennstoffaufgabe in die Staubfeuerungsanlage erfolgt über eine speziell für staubförmige Brennstoffe ausgelegte Dosiermaschine, die einen gleichmäßigen, reproduzierbaren und pulsationsarmen Eintrag des Klärschlammstaubes in den Verbrennungsprozess sicherstellt. Die Dosiertechnik stellt dabei eine zentrale Schnittstelle zwischen Brennstoffaufbereitung und Verbrennung dar und hat maßgeblichen Einfluss auf Flammenstabilität, Ausbrand und Emissionsverhalten.

Der gemahlene Klärschlamm wird zunächst in einen oberhalb der Dosiermaschine angeordneten Vorlagebehälter eingebracht. Der Austrag aus diesem Behälter erfolgt über eine Zellenradschleuse, die sowohl einen definierten Materialeintrag als auch eine sichere Trennung gegenüber Lager und Dosierung gewährleistet. Der Füllstand der Dosiermaschine wird kontinuierlich überwacht und der Materialnachschub entsprechend angepasst.

Innerhalb der Dosiermaschine befindet sich ein fluidisierter Materialraum mit einem fein perforierten Boden. Über diesen Boden wird dem Klärschlammstaub kontinuierlich eine geringe, definierte Luftmenge zugeführt. Ziel dieser Fluidisierung ist es, das Schüttgut homogen aufzuschließen, Entmischungen zu verhindern und ein gleichmäßiges, fließfähiges Staubbett zu erzeugen. Insbesondere bei Klärschlammstäuben mit erhöhtem Faseranteil oder breiter Kornverteilung ist diese Fluidisierung entscheidend, um Kanalbildung und pulsierende Materialabzüge zu vermeiden.

Die eigentliche Dosierung des Brennstoffs erfolgt über eine horizontal angeordnete Dosiereinheit in Form einer rotierenden Dosierscheibe mit definierten Hohlräumen. Das fluidisierte Material strömt gleichmäßig in diese Hohlräume ein und wird beim Drehen der Scheibe in exakt bestimmter Menge ausgetragen. Die Drehzahl der Dosierscheibe ist variabel einstellbar und stellt die maßgebliche Stellgröße

zur Regelung des Brennstoffmassenstroms dar. Dadurch ist die Dosiermenge direkt proportional zur eingestellten Motordrehzahl, was eine präzise und reproduzierbare Brennstoffaufgabe ermöglicht.

Der Übergang des dosierten Staubes in den pneumatischen Förderstrang erfolgt kontrolliert über ein Zusammenspiel aus Dosierscheibe und Gleitstücken. In dieser Zone wurde die Dosiermaschine im Projektverlauf mehrfach angepasst und optimiert, um eine saubere Übergabe des Staubes in die Förderluft sicherzustellen. Diese Anpassungen trugen wesentlich zur Betriebssicherheit und zur Stabilisierung des Dosierverhaltens über längere Versuchsdauern bei. Mit den Anpassungen konnte auch auf die starken Heizwertschwankungen des Klärschlamms reagiert werden.

Nach dem Austrag aus der Dosiermaschine wird der Klärschlammstaub pneumatisch zum Impulsstaubbrenner gefördert. Die Förderluftmenge ist so ausgelegt und abgestimmt, dass ein stabiler kontinuierlicher Brennstoffeintrag in die Rückströmung und ohne Materialdurchschlag in den Brennerkopf (Grobkorn kann sonst in die Kaltluftschicht gelangen) erreicht werden. Die gleichmäßige Dosierung in Kombination mit der stabilen pneumatischen Förderung ist dabei eine wesentliche Voraussetzung für die homogene Einzelkornverbrennung im Brenner.

Im Rahmen der Verbrennungsversuche in AP 2.1.1 zeigte sich, dass die Dosiermaschine über einen breiten Betriebsbereich hinweg zuverlässig arbeitet und auch bei variierenden Klärschlammqualitäten eine konstante Brennstoffzufuhr gewährleistet. Insbesondere die Kombination aus Fluidisierung und drehzahlgeregelter Dosierscheibe erwies sich als robust gegenüber Schwankungen in Kornverteilung, Faseranteil und Schüttdichte. Damit bildete die Dosiermaschine eine wesentliche Grundlage für die reproduzierbare Durchführung der Versuchsreihen und die belastbare Ermittlung der maßgeblichen Prozessparameter der Staubfeuerung.

Impulsstaubbrenner, Luftstufung und Nachbrennkammer

Der Verbrennungsprozess der Versuchsanlage basiert auf einem Impulsstaubbrenner, der speziell für die staubförmige Verbrennung von Klärschlämmen ausgelegt ist. Der Brenner bildet den zentralen Reaktionsraum der Anlage und ist maßgeblich für Flammenstabilität, Ausbrandverhalten und Emissionsbildung verantwortlich. Durch die Kombination aus pulsationsfreiem Staubeintrag, intensiver Turbulenzzonen zur optimalen Vermischung von Brennstoff und Luft im Brennraum, sowie gestufter Luftführung wird eine kontrollierte Verbrennung unter reproduzierbaren thermischen Randbedingungen realisiert.

Der aufbereitete Klärschlammstaub wird über das Dosiersystem gleichmäßig in die Förderleitung eingetragen und mittels Förderluft pneumatisch in den Brennraum transportiert.

Die erste Verbrennungsluftstufe ist die Primärluft, die brennernah axial in den Brennerkopf eingetragen wird. Zusammen mit dem Staubeintrag bildet sie einen impulshaften, beschleunigten Strahl, der den Flammenkern ausprägt und die schnelle Aufheizung sowie Zündung der Staubpartikel ermöglicht. Aufgrund der geringen Partikelgrößen und der hohen Strömungsgeschwindigkeiten erfolgt die Zündung und

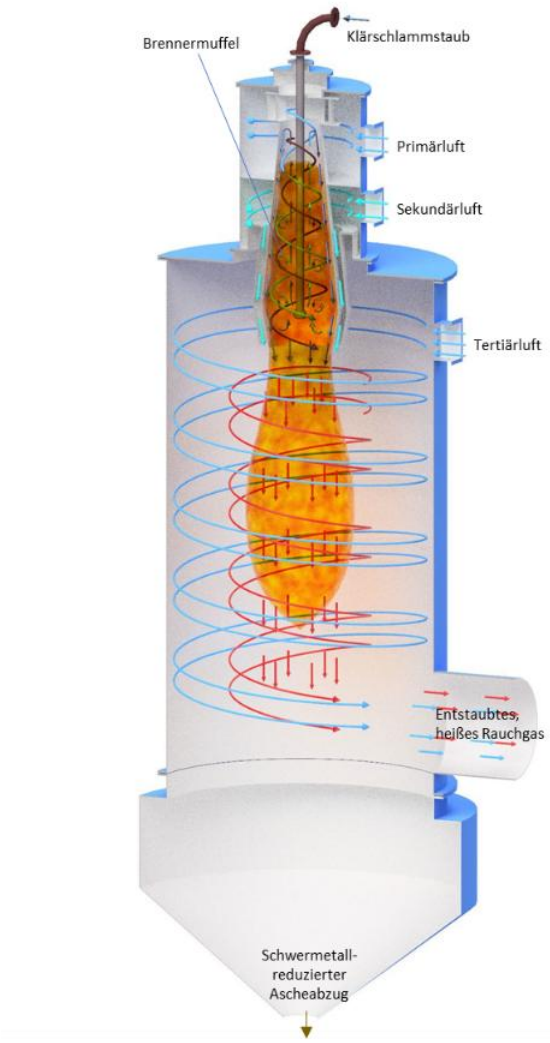


Abbildung 9 Schematische Darstellung des patentierten Staubbrenners (Impulsbrenners)

primäre Oxidation der Partikel unmittelbar im Flammenkern im Millisekundenbereich. Dieses Verbrennungsregime stellt sicher, dass die einzelnen Staubpartikel vergleichbaren thermischen Bedingungen ausgesetzt sind und unterstützt einen homogenen Ausbrand.

Zur Stabilisierung der Flamme und zur weiteren Durchmischung der Reaktionsgase ist dem Brenner eine Sekundärluftstufe nachgeschaltet. Die Sekundärluft wird tangential in den Reaktionsraum eingeblasen und erzeugt einen definierten Drall. Dieser führt zu einer helikalen Strömung der Staub- und Rauchgasphase und stabilisiert die Staubflamme über den gesamten Brennerquerschnitt. Die verbesserte Durchmischung fördert die vollständige Oxidation der Verbrennungsprodukte und trägt zur Reduzierung von CO-Emissionen bei.

Eine zusätzliche Tertiärluftstufe wird weiter stromabwärts ebenfalls tangential in den Reaktionsraum eingetragen. Sie verstärkt den durch die Sekundärluft erzeugten Drall bei gleicher Drehrichtung und verlängert die effektive Verweilzeit der Partikel und Gase im Hochtemperaturbereich. Über die getrennte Regelbarkeit der Luftstufen kann das Sauerstoff- und Temperaturprofil gezielt beeinflusst und an unterschiedliche Brennstoffqualitäten angepasst werden. Im Projektverlauf zeigte sich, dass sich durch diese Luftstufung ein sehr stabiles, gleichmäßiges Strömungsbild mit ruhigem Flammenverlauf einstellen lässt.

Der Brenner wird bevorzugt in einer leicht unterstöchiometrischen Betriebsweise im Flammenkern gefahren. Unter diesen Bedingungen bildet sich ein kompakter, heißer Reaktionsbereich mit lokal reduzierenden Zonen. Die vollständige Oxidation der Verbrennungsprodukte wird dabei bewusst nicht im Brenner selbst abgeschlossen, sondern in den nachfolgenden Aufenthaltszonen fortgeführt.

Im Anschluss an den Brenner strömen die Reaktionsgase in die Nachbrennkammer. Diese ist hochtemperaturfest ausgekleidet und konstruktiv sowie strömungstechnisch so ausgelegt, dass bei Temperaturen im Bereich von etwa 850 bis 900 °C eine ausreichende Verweilzeit im Hochtemperaturbereich gewährleistet ist.

Die Auslegung orientiert sich dabei an den Anforderungen der 17. BImSchV hinsichtlich Temperatur- und Verweilzeitbedingungen zur Sicherstellung eines weitgehenden Ausbrandes und einer emissionsarmen Betriebsweise.

Eine direkte messtechnische Bestimmung der Verweilzeit erfolgte im Rahmen der Untersuchungen nicht.

In der Nachbrennkammer erfolgt der weitgehende Ausbrand verbleibender brennbarer Bestandteile sowie die thermische Stabilisierung der mineralischen Aschephasen.

Darüber hinaus stellt die Nachbrennkammer einen entscheidenden Reaktionsraum für die thermische Umverteilung flüchtiger Schwermetalle dar. In Verbindung mit der nachgeschalteten Abgasführung und

schnellen Abkühlung entstehen klar abgegrenzte Aschefraktionen entlang der Prozesskette. Das integrierte Zusammenspiel aus Impulsstaubbrenner, gestufter, gleichsinnig tangentialer Luftführung und Nachbrennkammer bildete die Grundlage für einen über alle Versuchsreihen hinweg stabilen Anlagenbetrieb mit reproduzierbaren Verbrennungsbedingungen, vollständigem Ausbrand und niedrigen Emissionen im Rahmen von AP 2.1.1.

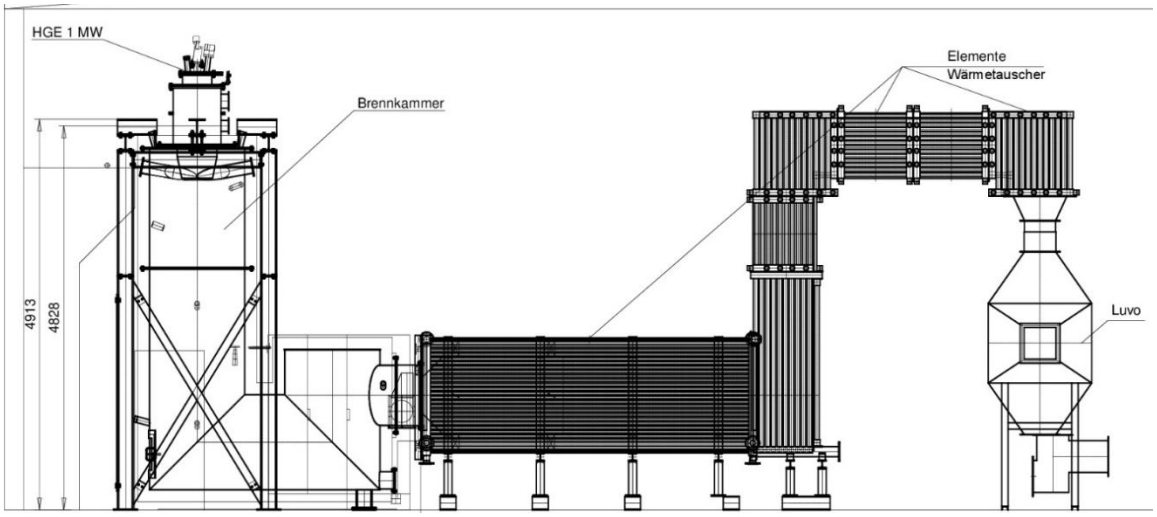


Abbildung 10 Prinzip-Aufbau Versuchsanlage (in Modifikation)

Ascheaustrag und Abscheidestufen

Die im Brenner und in der Nachbrennkammer gebildeten Aschepartikel werden entlang der Abgasstrecke in mehreren Stufen abgeschieden. Ziel des mehrstufigen Abscheidekonzepts ist einerseits die sichere Trennung der Feststoffe aus dem Rauchgasstrom und andererseits die Gewinnung klar definierter Aschefraktionen mit unterschiedlicher thermischer und stofflicher Prägung. Dies ist insbesondere für die Bewertung der Aschequalität sowie der Schwermetallverteilung von zentraler Bedeutung.

Der erste Ascheaustrag erfolgt unmittelbar unterhalb der Nachbrennkammer. In diesem Bereich setzen sich grobe und thermisch stark beanspruchte Partikel infolge der reduzierten Strömungsgeschwindigkeit und der schweren Partikelmasse ab. Diese Fraktion wird als NBK-Asche bezeichnet. Aufgrund der hohen Verweilzeiten und Temperaturen in der Nachbrennkammer ist diese Asche weitgehend ausgebrannt, weist niedrige Glühverluste auf und zeigt eine stabile, überwiegend oxidische Mineralphase. Die NBK-Asche stellt die mengenmäßig wichtigste Feststofffraktion dar und wird getrennt ausgetragen.

Nach Verlassen der Nachbrennkammer strömt das heiße Rauchgas in eine Wendekammer, in der die Strömungsrichtung abrupt geändert wird. Durch diese Umlenkung werden weitere grobe Partikel abgeschieden, die dem Rauchgas aufgrund ihrer Trägheit nicht mehr folgen können. Die Wendekammerasche stellt eine Übergangsfraktion dar, die sowohl hinsichtlich Partikelgröße als auch thermischer Vorgeschichte zwischen NBK-Asche und Feinstaubfraktionen liegt. Sie wird separat gesammelt und analysiert.

Im Anschluss an die Wendekammer erfolgt die Abscheidung feinerer Partikel in einem Zyklon. Der Zyklon nutzt die Zentrifugalkräfte des rotierenden Gasstroms, um staubförmige Partikel aus dem Rauchgas abzutrennen. Die hier abgeschiedene Zyklonasche besteht überwiegend aus feinkörnigen Partikeln, die im Brenner teilweise bereits gebildet wurden oder durch Fragmentierung größerer Partikel entstanden sind. Aufgrund der geringeren thermischen Beanspruchung im Vergleich zur NBK-Asche weist diese Fraktion ein anderes Mineralgefüge auf und ist stärker für kondensierte und mittransportierte Elemente anfällig.

Die letzte Abscheidestufe bildet ein nachgeschalteter Filter, der den verbleibenden Feinstaub aus dem Rauchgasstrom entfernt. In dieser Filterasche reichern sich insbesondere sehr feine Partikel sowie gasförmig verdampfte und anschließend kondensierte Bestandteile an. Sie stellt die schwermetallreichste Fraktion dar und unterscheidet sich deutlich von den gröberen Aschen aus den vorgelagerten Abscheidestufen.

Durch die räumlich und thermisch abgestufte Führung der Aschetrennung entlang der Rauchgasstrecke entsteht eine klare Differenzierung der Aschefraktionen. Während die NBK-Asche überwiegend aus stabilen, hochtemperaturgebildeten Mineralphasen besteht, enthalten Zyklon- und Filterasche zunehmend feinkörnige und kondensationsgeprägte Bestandteile. Diese Trennung ermöglichte im Rahmen der Verbrennungsversuche eine gezielte Untersuchung der Stoffverteilung, insbesondere im Hinblick auf Schwermetalle und die Phosphorphasen.

Das mehrstufige Ascheaustrags- und Abscheidekonzept erwies sich über alle Versuchskampagnen hinweg als betriebssicher und reproduzierbar. Es bildete die Grundlage für die Bewertung der Aschequalitäten sowie für weiterführende Untersuchungen zur Schwermetallentfrachtung und zur stofflichen Nutzbarkeit der unterschiedlichen Aschefraktionen im Rahmen der nachfolgenden Arbeitspakete.



Abbildung 11 Ascheproben aus Zyklon, Wendekammer, Filter, Nachbrennkammer

Messtechnik und Datenerfassung

Zur Überwachung des Anlagenbetriebs sowie zur Auswertung der Verbrennungsversuche ist die Versuchsanlage mit einer umfassenden Mess- und Datenerfassungstechnik ausgestattet. Ziel der Messtechnik ist die kontinuierliche Erfassung aller relevanten Prozessgrößen, um stabile Betriebszustände sicherzustellen und gleichzeitig belastbare Datengrundlagen für die Ableitung der maßgeblichen Prozessparameter zu erhalten.

Die Erfassung der gasförmigen Emissionen erfolgt kontinuierlich im Abgasstrom. Gemessen werden unter anderem die Sauerstoffkonzentration (O_2), Kohlenmonoxid (CO), Kohlendioxid (CO_2), Lachgas (N_2O) sowie Stickoxide (NO_x). Diese Messgrößen dienen sowohl der Überwachung des Verbrennungszustands als auch der Bewertung der Emissionscharakteristik bei unterschiedlichen Betriebsweisen. Die O_2-Messung bildet dabei die zentrale Führungsgröße zur Beurteilung der stöchiometrischen Verhältnisse, während CO als sensibler Indikator für unvollständigen Ausbrand und lokale Sauerstoffunterversorgung herangezogen wird.

Zusätzlich zur Gasanalytik sind entlang der Anlage mehrere Temperaturmessstellen installiert. Temperatursonden befinden sich im Bereich des Brenners, im Flammenraum, in der Nachbrennkammer sowie im nachgeschalteten Abgasstrang. Die Temperaturprofile erlauben Rückschlüsse auf den Reaktionsverlauf, die Stabilität des Hochtemperaturbereichs sowie auf die Einhaltung der geforderten Mindesttemperaturen und Verweilzeiten in der Nachbrennkammer. Ergänzend dazu werden Differenzdrücke über ausgewählte Anlagenteile erfasst, um den Strömungszustand und mögliche Ablagerungen frühzeitig zu erkennen.

Alle Messsignale werden zentral erfasst und über ein Prozessleitsystem visualisiert. Die Anlage ist hierzu mit einer speicherprogrammierbaren Steuerung (SPS) ausgestattet, die sowohl die Regelung der Anlagenteile als auch die kontinuierliche Datenerfassung übernimmt. Die wesentlichen Betriebsparameter wie Brennstoffmassestrom, Luftmengen der einzelnen Luftstufen, Temperaturen, Druckverluste und Emissionswerte werden synchron aufgezeichnet und zeitlich aufgelöst gespeichert.

Die Datenerfassung erfolgt kontinuierlich über den gesamten Versuchszeitraum, sodass sowohl kurzfristige Effekte, beispielsweise während Einstellfahrten, als auch stationäre Betriebszustände im Dauerbetrieb ausgewertet werden können. Die Verknüpfung der Messdaten ermöglicht eine gezielte Zuordnung von Emissions- und Temperaturverläufen zu spezifischen Betriebsparametern wie Luftverteilung, Brennstoffqualität oder Dosiermenge.

Zur Ergänzung der kontinuierlichen Messungen werden im Rahmen der Versuchskampagnen regelmäßig diskrete Proben entnommen. Dazu zählen insbesondere Ascheproben aus den verschiedenen Abscheidestufen sowie ausgewählte Brennstoffproben. Diese Proben werden außerhalb der Anlage analysiert und dienen der Validierung der Online-Messdaten sowie der tiefergehenden stofflichen Bewertung, etwa im Hinblick auf Mineralphasen, Phosphorverfügbarkeit und Schwermetallverteilung.

Die eingesetzte Messtechnik und Datenerfassung erwies sich im Projektverlauf als zuverlässig und ausreichend genau, um die relevanten Prozesszusammenhänge der Staubfeuerung abzubilden. Sie bildete die Grundlage für die systematische Variation der Betriebsparameter, die Bewertung der Verbrennungscharakteristik und die Ableitung belastbarer Aussagen zur Übertragbarkeit der Ergebnisse auf größere Anlagenmaßstäbe im Rahmen von AP 2.1.1.

Siebanalyse

Hinweis zur Methodik:

Die im Projekt erhobenen Sieblinien von Carbotechnik und Fraunhofer IKTS unterscheiden sich in einzelnen Fraktionen, obwohl identisches Material untersucht wurde. Diese Abweichungen sind methodisch bedingt und resultieren aus den unterschiedlichen eingesetzten Siebverfahren. Carbotechnik verwendet einen technischen Siebturm mit größeren Siebflächen und höheren Beschleunigungen, der auf die Bewertung prozessrelevanter Kornbandbreiten im Anlagenbetrieb ausgelegt ist. Das IKTS arbeitet hingegen mit analytischen Laborsieben gemäß DIN-Norm, die kleinere Probenmengen und eine andere Siebdynamik aufweisen. Die beobachteten Unterschiede spiegeln daher keine materialbedingten Effekte wider, sondern ausschließlich methodische Unterschiede. Für die verfahrenstechnische Bewertung der Staubfeuerung sind die CT-Sieblinien maßgeblich, während die IKTS-Analysen die mineralogische und chemische Charakterisierung ergänzen.

Die Siebanalyse bildete einen zentralen Bestandteil der Untersuchungen im Arbeitspaket 2.1.1, da sie die Grundlage für die Bewertung des Brennstoffverhaltens in der Staubfeuerung liefert. Untersucht wurde getrockneter und gemahlener Klärschlamm, dessen Partikelgrößenverteilung einen wesentlichen Einfluss auf Fluidisierung, Dosierverhalten und Abbrand besitzt.

Die Siebanalyse wurde mit einem mechanischen Siebturm (bis 630 µm) durchgeführt. Dieses Verfahren entspricht dem im Projekt etablierten Standard und wurde bewusst gewählt, um eine konsistente Vergleichbarkeit der Ergebnisse innerhalb der eigenen Messmethodik sicherzustellen. Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass der Siebturm gegenüber anderen Verfahren systematische methodische Effekte aufweist. Insbesondere werden Fasern, Folienfragmente und andere im Klärschlamm enthaltene Störstoffe als Grobfraktion erfasst, während alternative Messverfahren (z. B. Lasergranulometrie) diese Anteile teilweise anders bewerten.

Die Ergebnisse der im Rahmen der Mahlversuche durchgeführten Siebanalysen zeigen, dass die Einhaltung des angestrebten Kornbandes stark von der jeweiligen Schlammcharge abhängt. Gleichzeitig wird deutlich, dass die Bewertung der Kornverteilung wesentlich von der eingesetzten Messmethode beeinflusst ist. Während einzelne Parameter wie d_{50} teilweise im Zielbereich liegen, weichen insbesondere die ermittelten Grobanteile je nach Messverfahren voneinander ab.

Die Auswertung der unterschiedlichen Chargen zeigt, dass wiederholte Messungen mit identischer Methodik reproduzierbare Ergebnisse liefern. Unterschiede zwischen Proben sind daher als reale materialspezifische Effekte zu bewerten. Gleichzeitig verdeutlichen die Ergebnisse, dass ein direkter Vergleich von Siebanalysen mit Resultaten aus anderen Messverfahren nur eingeschränkt möglich ist, da methodenspezifische Abweichungen systematisch auftreten.

Vor diesem Hintergrund wurde im Projekt festgestellt, dass unterschiedliche Messverfahren zu abweichenden Kornbandbewertungen führen können. Eine Harmonisierung auf ein einheitliches Verfahren hätte jedoch den Nachteil, dass etablierte und validierte Messroutinen der einzelnen Projektpartner verlassen werden müssten.

Daher wurde festgelegt, dass jeder Projektpartner seine etablierte Messmethode beibehält, wobei die Interpretation der Ergebnisse stets im Kontext der jeweiligen Methodik zu erfolgen hat. Der Schwerpunkt der Bewertung liegt somit nicht auf einem absoluten methodenübergreifenden Vergleich, sondern auf der konsistenten relativen Einordnung innerhalb der jeweiligen Versuchsdurchführung.

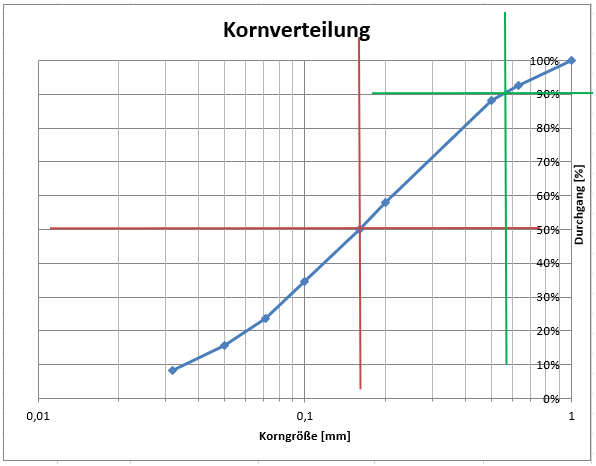


Abbildung 13 Sieblinie Probe CT010_CT044_ggKS_V2 grob

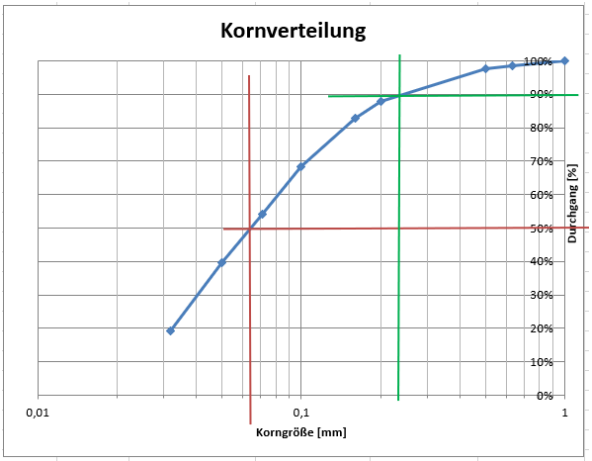


Abbildung 12 Sieblinie Probe IKTS031_CT046_ggKS_V2 fein

Die Siebanalysen dienen damit primär der internen Bewertung von Mahlgüte, Prozessstabilität sowie dem Einfluss der Kornverteilung auf Fluidisierung und Verbrennungsverhalten. Ihre Aussagekraft liegt insbesondere im Vergleich innerhalb gleicher Messmethodik und weniger im direkten Abgleich unterschiedlicher analytischer Verfahren.

Die systematische Erfassung der Kornverteilungen bildete somit eine zentrale Grundlage für alle weiteren Arbeitsschritte in AP 2, insbesondere für Fluidisierung, Dosierverhalten, CO-Bildung und Ascheanalytik.

Fluidisierversuch

Das Fluidisierungsverhalten der Klärschlammstäube stellt einen zentralen Parameter für die Stabilität des gesamten Staubfeuerungsprozesses dar. Eine gleichmäßige, pulsationsfreie Brennstoffabgabe ist nur möglich, wenn sich der Staub unter definiertem Luftvolumenstrom homogen auflockert und ein stabiles „fließfähiges Staubbett“ bildet. Aus diesem Grund wurden alle untersuchten Klärschlämme im Anschluss an die Siebanalyse fluidmechanisch bewertet.

Hierzu wurden jeweils fünf Liter Staub in einen zylindrischen Prüfstand eingebracht und über einen perforierten Boden mit variablen Luftmengen fluidisiert. Die Messung erfolgte bis zum Übergang vom ruhenden Pulverbett in den vollständig fluidisierten Zustand. Parallel wurde das Verhalten bei erhöhter Luftzufuhr dokumentiert, um mögliche Kanalbildung oder Agglomerataufbruch zu erkennen.

Die Ergebnisse zeigten deutliche Unterschiede zwischen den Schlammchargen. Fein gemahlene Proben mit geringem Faser- und Grobanteil bildeten bereits bei niedrigen Luftvolumenströmen ein stabiles Fluidbett aus, während Schlämme mit höheren Grobanteilen (> 200 µm) oder erhöhtem Faseranteil dazu

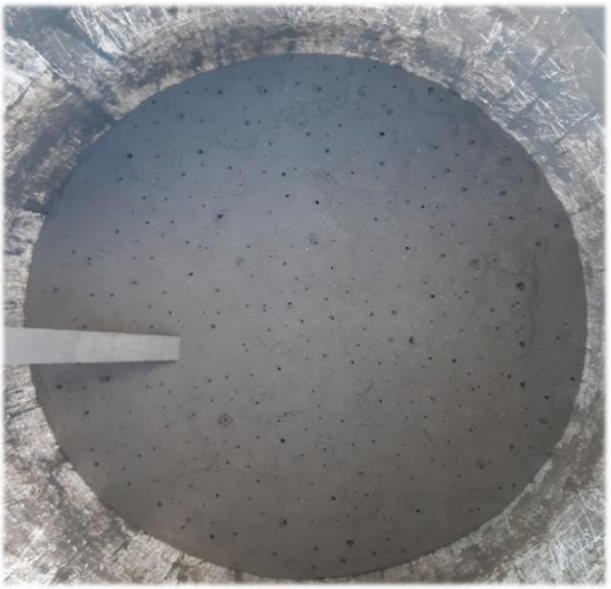


Abbildung 14 Ansicht Fluidisierversuch nach Abschaltung der Fluidisierung

neigten, Luftkanäle auszubilden. Diese Kanalbildung führt im praktischen Dosierbetrieb zu Pulsationen des Materialstroms und beeinträchtigt die Reproduzierbarkeit der Brennstoffgabe.

Zur Bewertung der Fluidisierbarkeit wurde für jede Probe die fluidisierte Dichte sowie das erforderliche spezifische Luftvolumen bestimmt. Dabei zeigte sich bei allen Materialien eine typische Charakteristik: Nach Erreichen einer definierten Luftmenge nahm die Dichte des aufgegebenen Staubbettmaterials kaum noch ab, während gleichzeitig die Oberflächenbewegung auf ein homogenes Niveau überging.

Quelle	Dichte [kg/m³]	Fluidisierte Dichte [kg/m³]	spez. Luftmenge [m³/m²h]
IKTS031	743	508	55
IKTS033	808	539	47
IKTS034	787	538	61
CT10	632	474	66

Tabelle 2 Zusammenstellung der ermittelten Parameter

Die im Projekt durchgeführten Untersuchungen verdeutlichen, dass das Fluidisierverhalten nicht allein vom Kornband abhängt. Besonders Restfeuchte, Fasergehalt, Agglomerationsneigung und das Verhältnis feiner zu grober Partikel beeinflussen das Bettverhalten maßgeblich. Schlämme mit vergleichbarer Sieblinie zeigten daher teils unterschiedliche Fluidisationskurven, wenn ihr Faser- oder Folienanteil höher war.

Das Fluidisierungsverhalten bildet eine wesentliche Grundlage für die Dosierstabilität, die homogene pneumatische Förderung und das CO-Verhalten in der Feuerung. Die gewonnenen Ergebnisse aus AP 2.1.1 lieferten damit wichtige Eingangsgrößen für die spätere Optimierung der Dosierparameter und des Brennerbetriebs in den folgenden Arbeitspaketen.

Zündversuch

Das Zündverhalten der Klärschlammstäube wurde untersucht, um die Reaktivität der Brennstoffe und ihr Verhalten im Anfangsstadium der Verbrennung zu charakterisieren. Die Zündtemperatur und das Zündverhalten sind zentrale Kenngrößen für die Stabilität des Staubfeuerungsprozesses, da sie maßgeblich beeinflussen, wie schnell und vollständig die Staubpartikel im Impulsbrenner umgesetzt werden.

Für die Untersuchungen wurden repräsentative Staubproben in einem beheizten Prüfstand unter definiertem Temperaturanstieg analysiert. Dabei wurde die Temperatur des Gasungseintritts, erste Rauchentwicklung, Flammenansatz sowie eventuelle Agglomerationen oder Anbackungen dokumentiert.

Verhalten Staub	Gasen	Zünden	Anbackungen
leichte Bläschenbildung	leichtes Gasen	Durchzünden	erste Anbackungen
leichte Blasen	stärkeres Gasen	brennt selbständig	leichte Anbackungen
	starker Rauch	Begin des Glühens	zunehmende Anbackungen
starke Blasen	sehr starkes Gasen	kein zünden	keine Anbackungen
Begin Fluidisierung	kein gasen	erstes glimmen	
schwimmt	stärkeres Gasen + Geruch	vereinzelt Funken	
Staub	Gasen mit grauem Rauch + Geruch		
schwimmt + Blasenbildung	deutlich grauer Rauch	kurzes zünden	
flüssig	starker Rauch, grau + gelb		
brodelt	Gasen wird weniger		
	Rauch weg		

Tabelle 3 Bewertungskatalog für Zündversuch

Die Ergebnisse zeigten, dass die meisten untersuchten Klärschlammstäube sehr niedrige Zündtemperaturen zwischen 190 °C und 220 °C aufweisen. Diese niedrigen Werte sind für Staubfeuerungsprozesse



Abbildung 15 Verschiedene Stadien des Zündversuchs

vorteilhaft, da sie zu einem schnellen Reaktionsbeginn beitragen und einen stabilen Flammenaufbau unterstützen. Lediglich einzelne Chargen, beispielsweise Schlämme mit höherem Mineralstoffanteil oder verdichteter Struktur, zeigten leicht erhöhte Zündtemperaturen im Bereich um 250–280 °C, ohne dass daraus relevante Nachteile für den Feuerungsprozess entstanden.

Besonders wichtig war die Beobachtung, dass keine der untersuchten Proben zu Anbackungen oder unerwünschten Reaktionen im Zündversuch neigte. Auch bei raschem Temperaturanstieg traten keine Verklebungen oder schmelzenden Randzonen auf. Damit bestätigten die Versuche, dass Klärschlammstaub, unabhängig von der Herkunft, eine ausreichend hohe thermische Stabilität sowie ein gutmütiges Reaktionsverhalten aufweist.

Das insgesamt reaktive Zündverhalten der Klärschlammstäube ist ein wesentlicher Vorteil gegenüber anderen biogenen oder abfallstämmigen Stäuben, die häufig deutlich höhere Zündtemperaturen aufweisen. Für die Staubfeuerung bedeutet dies:

- einen schnellen und stabilen Flammenaufbau,
- kurze Reaktionszeiten,
- hohe Ausbrandgrade schon im Brennerkern,
- geringe Neigung zu CO-Bildung im Zündbereich.

Damit bildet das Zündverhalten einen wichtigen Baustein für die Bewertung des gesamten Feuerungsprozesses und fließt unmittelbar in die Optimierung von Luftstufung, Dosiermengen und Brennerparametern in den weiteren Arbeitspaketen ein.

Verbrennungscharakteristik: Einzelkornverbrennung

Die Einzelkornverbrennung ist ein charakteristisches Merkmal der Staubfeuerung und wurde durch die im Projekt erhobenen Mess- und Beobachtungsdaten eindeutig bestätigt. In diesem Verbrennungsregime wird jedes Staubpartikel unabhängig von benachbarten Partikeln oxidiert und erfährt aufgrund der hohen Turbulenz im Flammenkern annähernd identische thermische und strömungsmechanische Randbedingungen.

Die individuelle Oxidation der Partikel führt zu einem sehr homogenen Ausbrand. Dies erklärt die über den gesamten Projektzeitraum hinweg beobachtete konstante Morphologie der Nachbrennkammeraschen, die geringen Glühverluste sowie die reproduzierbare Ausbildung stabiler Mineralphasen. Im Gegensatz zu Feuerungssystemen mit partikelkollektiven Reaktionsräumen erlaubt die Einzelkornverbrennung eine präzise und belastbare Bewertung der Aschequalität.

Einfluss der Partikelgröße auf CO-Verhalten und Flammenstabilität

Eine der wesentlichen Erkenntnisse des Projekts ist der direkte Zusammenhang zwischen der Partikelgrößenverteilung des Klärschlammstaubs und dem CO-Emissionsverhalten der Staubfeuerung. Insbesondere der Anteil brennbarer Grobfraktionen erwies sich als entscheidender Einflussfaktor für das Auftreten kurzzeitiger CO-Transienten.

Die Siebanalyse zeigt, dass die Klärschlammcharge IKTS031 ein feines und eng definiertes Kornband aufweist, während CT010 durch einen höheren Anteil grober Partikel charakterisiert ist. Ein feines Kornband führte zu einer stabilen Staubflamme, einer gleichmäßigen Durchströmung des Brenners und entsprechend konstant niedrigen CO-Werten.

Organische Agglomerate mit Partikelgrößen oberhalb von etwa 200 µm zeigten hingegen eine verzögerte Abbrandkinetik. Diese Partikel erreichen den vollständigen Ausbrand teilweise erst in kühleren Zonen, was lokal zu erhöhten CO-Spitzen führen kann.

Inertes Überkorn, beispielsweise mineralische Fragmente oder andere nicht brennbare Bestandteile, wirkte sich dagegen nicht auf das CO-Verhalten aus, da diese Fraktionen nicht zur CO-Bildung beitragen.

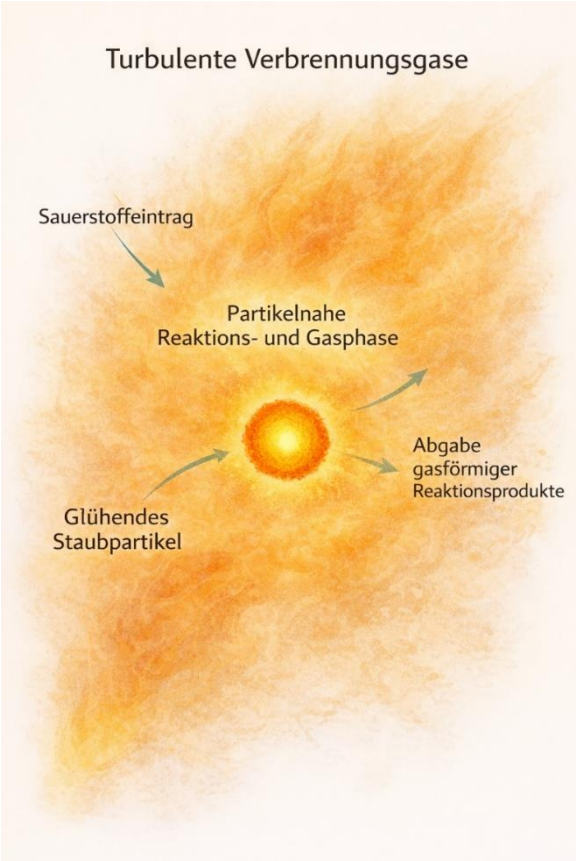


Abbildung 16 Schematische Darstellung der Einzelkornoxidation

Im stationären Betriebszustand zeigt die Klärschlammcharge IKTS031 deutlich geringere CO-Emissionen als die Charge CT010. Nach Abklingen der Anfahrphase liegt der CO-Gehalt bei IKTS031 auf einem niedrigen und stabilen Niveau, während CT010 ein höheres CO-Grundniveau mit ausgeprägteren Schwankungen aufweist. Dies weist auf eine günstigere Abbrandcharakteristik von IKTS031 unter den gewählten Betriebsbedingungen hin.

Die schematische Abbildung 16 verdeutlicht dieses Prinzip anhand eines einzelnen glühenden Staubpartikels:

Die Oxidation erfolgt in einer partikelnahen Reaktions- und Gasphase, die von turbulenten Verbrennungsgasen umgeben ist. Sauerstoff wird kontinuierlich aus dem Flammenraum zugeführt, während gasförmige Reaktionsprodukte unmittelbar an die Umgebung abgegeben werden.

Abweichende CO-Verläufe zwischen verschiedenen Versuchsfahrten sind auf unterschiedliche Betriebszustände (Anfahr- gegenüber stationärem Betrieb) sowie auf variierende Brennstoffeigenschaften zurückzuführen.

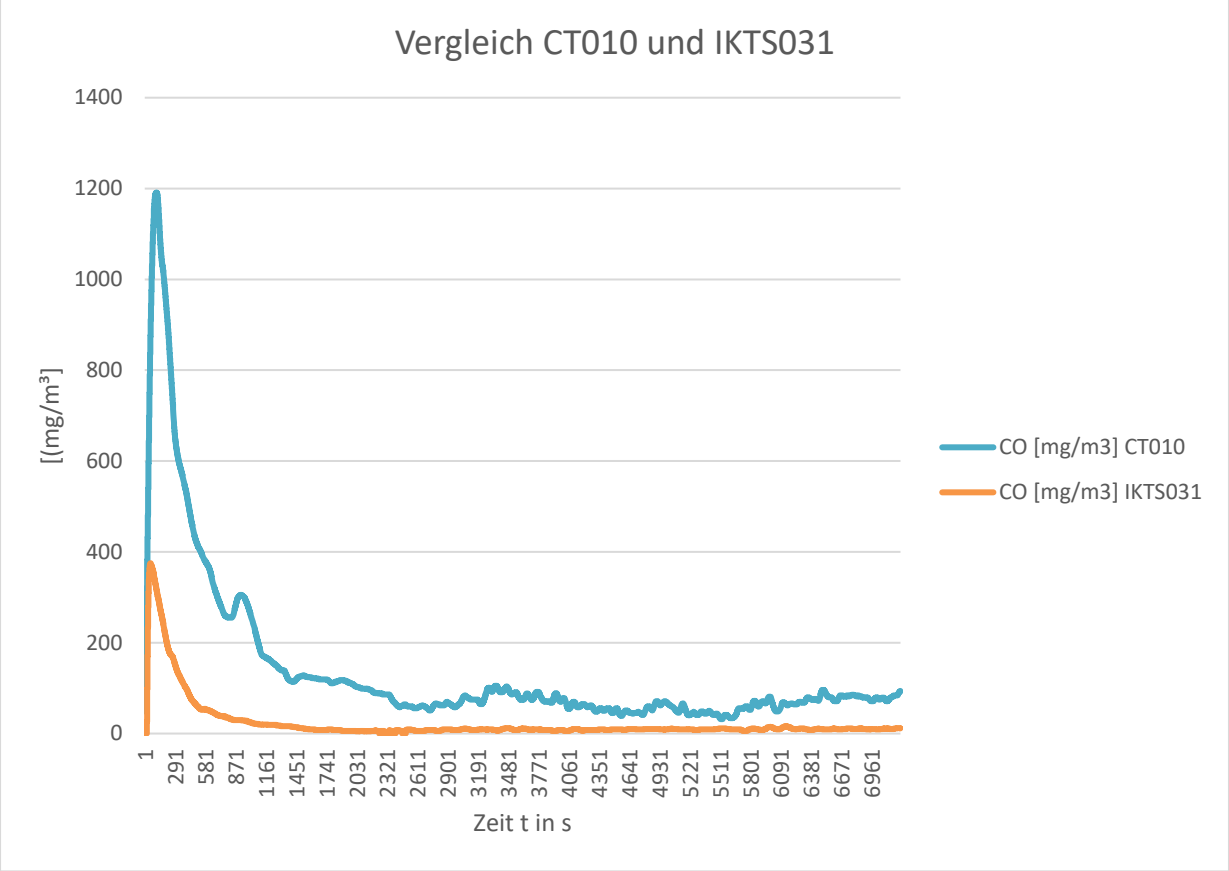


Abbildung 17 Zeitlicher Verlauf der CO-Emissionen (kontinuierliche EMI-Messung) während eines Verbrennungsversuchs mit zwei Klärschlammchargen (IKTS031 und CT010)

Im stationären Betriebszustand zeigt die Klärschlammcharge IKTS031 deutlich geringere CO-Emissionen als die Charge CT010. Nach Abklingen der Anfahrphase liegt der CO-Gehalt bei IKTS031 auf einem niedrigen und stabilen Niveau, während CT010 ein höheres CO-Grundniveau mit ausgeprägteren Schwankungen aufweist.

Dies weist auf eine günstigere Abbrandcharakteristik von IKTS031 unter den gewählten Betriebsbedingungen hin.

Abweichende CO-Verläufe zwischen verschiedenen Versuchsfahrten sind auf unterschiedliche Betriebszustände (Anfahr- vs. stationärer Betrieb) sowie auf variierende Brennstoffeigenschaften zurückzuführen.

Einfluss der unterstöchiometrischen Fahrweise (λ < 1)

Die im Projekt durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass die Staubfeuerung unter leicht unterstöchiometrischen Bedingungen (λ < 1) ein stabiles Verbrennungsverhalten aufweisen kann. In diesem Betriebsbereich bildet sich ein kompakter Flammenkern mit hoher Energiedichte, der von einer turbulenten, weitgehend gleichmäßigen Strömung umgeben ist.

Unter den untersuchten Bedingungen resultierten daraus:

- stabile CO-Verläufe ohne ausgeprägte Schwankungen,
- gleichmäßige Temperaturprofile im Brenner,
- sowie eine ruhige und reproduzierbare Staubflamme.

Diese Beobachtungen deuten darauf hin, dass eine unterstöchiometrische Fahrweise im vorliegenden System einen stabilen Betriebszustand unterstützen kann.

Gleichzeitig ist zu berücksichtigen, dass unter solchen Bedingungen lokal begrenzte Redoxgradienten auftreten können. Insbesondere im Flammenkern und in Übergangsbereichen können zeitweise reduzierte Mikrobedingungen entstehen. Diese sind grundsätzlich geeignet, das Reaktionsverhalten einzelner Elemente zu beeinflussen, beispielsweise im Hinblick auf CO- und NO_x Bildung oder die Mobilität bestimmter Schwermetalle.

Eine eindeutige quantitative Zuordnung dieser Effekte allein zur unterstöchiometrischen Fahrweise ist jedoch auf Basis der vorliegenden Daten nicht möglich, da zusätzlich Partikelstruktur, Luftstufung und Brennstoffeigenschaften einen maßgeblichen Einfluss ausüben.

Thermochemische Reaktionsräume in der Staubfeuerung

Abbildung 18 zeigt schematisch die zeitliche Abfolge der maßgeblichen thermochemischen Reaktionsräume der Staubfeuerung. Im Flammenkern erfolgen Zündung, Pyrolyse und Primäroxidation der Brennstoffpartikel bei extrem kurzen Aufenthaltszeiten und sehr hohen Temperaturen. In der Nachbrennkammer wird bei längerer Verweilzeit der vollständige Ausbrand sichergestellt und die Ausbildung der relevanten Aschemineralphasen eingeleitet.

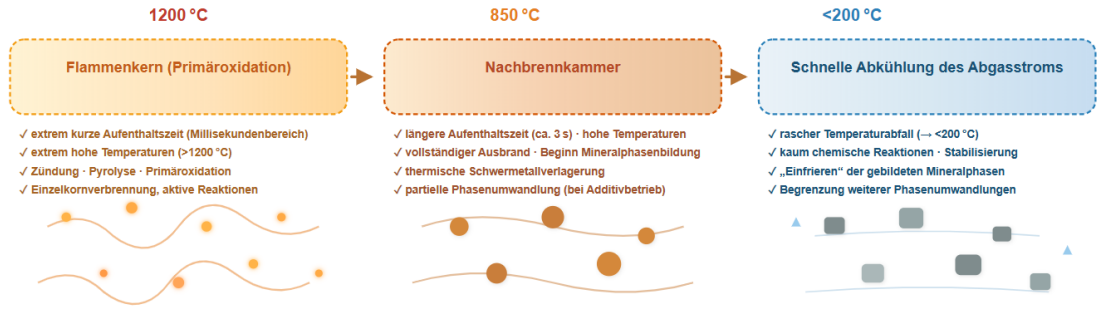


Abbildung 18 Schematische Darstellung der thermochemischen Reaktionsräume

Die anschließende schnelle Abkühlung des Abgasstroms begrenzt weitere Phasenumwandlungen und führt zum „Einfrieren" der gebildeten Mineralogie. Die Dauer und die Redoxbedingungen in diesen Reaktionsräumen beeinflussen unmittelbar das Emissionsverhalten, die Schwermetallverteilung sowie die Phosphorverfügbarkeit der resultierenden Asche.

Die Staubfeuerung ist durch eine klar strukturierte, jedoch zeitlich begrenzte Abfolge thermochemischer Reaktionsräume gekennzeichnet. Diese unterscheiden sich hinsichtlich Verweilzeit, Temperaturniveau und Reaktionsintensität und beeinflussen maßgeblich das Verhalten von Phosphor- und Schwermetallphasen im Prozess.

Im Flammenkern erfolgt die schnelle Aufheizung der Partikel sowie Pyrolyse und Primäroxidation. Die Aufenthaltszeiten liegen in diesem Bereich in einem sehr kurzen Zeitfenster (Millisekunden bis wenige Sekunden), sodass vor allem kinetisch schnelle Reaktionen dominieren. Eine ausgeprägte Umwandlung bestehender Mineralphasen ist unter diesen Bedingungen nur eingeschränkt zu erwarten.

In der nachgeschalteten Nachbrennzone erfolgt bei erhöhter Verweilzeit der weitere Ausbrand sowie die Ausbildung relevanter Aschephasen. Für Anlagen der Klärschlammverbrennung wird gemäß 17. BImSchV gefordert, dass Rauchgase bei Temperaturen von mindestens 850 °C über eine Mindestverweilzeit im Sekundenbereich geführt werden. Diese Vorgaben dienen als Referenz für eine vollständige Oxidation und emissionsarme Betriebsweise.

Die Nachbrennkammer des vorliegenden Versuchssystems wurde entsprechend konstruktiv und strömungstechnisch ausgelegt. Die tatsächlich realisierten Verweilzeiten sind anlagenspezifisch und wurden im Rahmen der Untersuchungen nicht direkt bestimmt. Sie liegen jedoch plausibel im Bereich vergleichbarer Systeme.

In dieser Reaktionszone erfolgt neben einem weitgehenden Ausbrand auch die Ausbildung und Umwandlung mineralischer Phasen. Gleichzeitig setzt die temperaturabhängige Umverteilung flüchtiger Schwermetalle ein. Bei Additivbetrieb können zusätzlich Modifikationsreaktionen der Phosphatphasen auftreten.

In der anschließenden Abkühlphase kommt es zu einer raschen Absenkung der Gastemperatur, wodurch laufende Reaktionsprozesse zunehmend kinetisch gehemmt werden. Die zuvor gebildeten mineralogischen Zustände werden dabei weitgehend „eingefroren“, sodass nachfolgende Umwandlungen nur noch eingeschränkt stattfinden.

AP 2.1.2, Untersuchungen Einfluss und Anpassung Partikelgröße auf Verbennungsprozess

Die Untersuchungen im Arbeitspaket 2.1.2 widmeten sich der zentralen Frage, wie die Partikelgrößenverteilung des Klärschlammstaubes die Verbrennungscharakteristik im Staubbrenner beeinflusst. Bereits die Ergebnisse aus AP 2.1.1 zeigten deutlich, dass die Kornstruktur zu den dominierenden Einflussgrößen der Staubfeuerung zählt: Sie bestimmt nicht nur die Dosierbarkeit und Fluidisierung, sondern steuert auch Flammenbild, Reaktionskinetik sowie CO- und NO_x-Bilanz. Im Rahmen von AP 2.1.2 wurden daher unterschiedliche Kornbänder systematisch untersucht und Maßnahmen zur Optimierung des Mahlprozesses abgeleitet, um eine reproduzierbare Staubqualität sicherzustellen.

Herstellung des Staubkorns und Qualitätssicherung

Für die Herstellung des Staubkorns wurde zu Projektbeginn eine umfassende, technologieoffene Analyse durchgeführt, um geeignete Mahlverfahren für die Zerkleinerung getrockneter Klärschlämme zu identifizieren. Aufgrund der heterogenen Materialeigenschaften, variierende Restfeuchte, organische und mineralische Bestandteile, Faser- und Folienfragmente, wurden sowohl klassische als auch spezialisierte Mahltechnologien in die Betrachtung einbezogen. Hierzu gehörten unter anderem Prall- und Schlagmühlen, Prallstrom- und Prallsichtermühlen, Turborotoren, Gutbettwalzenmühlen, Kugelmühlen verschiedener Hersteller sowie Exzenterschwingmühlen. Die Bewertung erfolgte auf Basis technischer Daten, Herstellerangaben, ATEX-Einstufungen, Verschleißverhalten, Automatisierbarkeit, Energiebedarf und der Möglichkeit eines kontinuierlichen Betriebs. Ergänzend wurden Gespräche mit Anlagenbauern und Technikumsbetreibern geführt, um die praktische Eignung der Verfahren für Klärschlamm zu verifizieren.

Die durchgeführten Vorversuche bestätigten die theoretischen Einschätzungen: Während einige Verfahren prinzipiell funktionsfähig sind, zeigten sich deutliche Unterschiede hinsichtlich erreichbarer Feinheit, Kornbandbreite, Verschleißanfälligkeit und Prozessstabilität. Insbesondere Verfahren mit stark prall- oder schlagdominiertem Zerkleinerungsmechanismus erwiesen sich aufgrund des hohen Verschleißes oder der begrenzten erreichbaren Feinheit als weniger geeignet. Andere Systeme, wie Gutbettwalzenmühlen, erforderten zusätzliche Prozessschritte (z. B. Desagglomeration) oder komplexe Kreislaufkonfigurationen, was den Anlagenaufwand erheblich erhöhte. Kugelmühlen zeigten zwar gute Feinheiten, waren jedoch vereinzelt nur im Batchbetrieb verfügbar und wiesen herstellerabhängig Einschränkungen hinsichtlich ATEX-Konformität auf bzw. erforderten einen vergleichsweise hohen Aufwand zur Umsetzung des Explosionsschutzes.

Im Ergebnis dieser systematischen Analyse und der praktischen Versuche stellte sich die Exzenterschwingmühle als das technisch und betrieblich günstigste Verfahren heraus. Sie ermöglicht eine reproduzierbare Erzeugung eines engen Kornbandes, erfüllt die Anforderungen an die Zielkorngröße und zeigt ein günstiges Verschleißverhalten. Durch den schwingungsinduzierten Mahlmechanismus werden die Partikel effizient zerkleinert, ohne die hohen Rotordrehzahlen prallbasierter Systeme. Maßnahmen zum Explosionsschutz sind beherrschbar und mit überschaubarem Aufwand umsetzbar. Die kompakte Bauform, der moderate Energiebedarf und die Möglichkeit eines kontinuierlichen Betriebs erleichtern zudem die Integration in die Gesamtanlage. Die im Projekt durchgeführten Vorversuche bestätigten, dass mit der Exzenterschwingmühle die definierten Zielkornverteilungen zuverlässig erreicht werden können.

Die Qualitätssicherung des erzeugten Staubkorns erfolgte über standardisierte Siebanalysen, Fluidisierungsversuche und Zündtests. Diese Methoden erlauben eine belastbare Bewertung der

Brennstoffqualität hinsichtlich Dosierbarkeit, Fluidisierung und Verbrennungseigenschaften. Abweichungen in der Kornverteilung konnten durch Anpassung der Mahlparameter oder einen zweiten Mahlgang gezielt korrigiert werden. Damit steht ein robustes, wissenschaftlich fundiertes Verfahren zur Herstellung eines staubförmigen Brennstoffs zur Verfügung, das die spezifischen Anforderungen der Staubfeuerung erfüllt und eine reproduzierbare Aschequalität sicherstellt.

Mahlung und Trockensubstanzgehalt

Zur Bewertung der Mahlbarkeit wurden Klärschlammproben sowohl direkt aus der Trocknung als auch nach vollständiger Trocknung und anschließender Wiederbefeuchtung untersucht. Ziel war es zu prüfen, ob sich aus wiederbefeuchtetem Material Rückschlüsse auf einen minimal erforderlichen Trockensubstanzgehalt (TS) ableiten lassen.

Die Ergebnisse zeigen ein uneinheitliches Bild: Bei 80 % TS führte die Wiederbefeuchtung zu einer besseren Mahlbarkeit, bei 84 % TS dagegen zu einer leicht schlechteren. Ein systematischer Zusammenhang zwischen TS-Gehalt und Mahlverhalten ließ sich daher nicht ableiten. Zudem wiesen wiederbefeuchtete Proben aufgrund von Oberflächenfeuchte deutlich geringere Feinanteile auf, was auf Agglomeration zurückzuführen ist.

Fazit: Wiederbefeuchtete Proben sind nicht repräsentativ für real getrockneten Klärschlamm und erlauben keine Ableitung eines minimalen TS-Gehalts. Für belastbare Aussagen zur Mahlbarkeit und zur Auslegung der Brennstoffaufbereitung sind ausschließlich Proben direkt aus der Trocknung geeignet.

Herausforderungen bei der Lohnmahlung

Die Suche nach einer geeigneten Lohnmahlung stellte sich im Projektverlauf als deutlich anspruchsvoller heraus als ursprünglich angenommen. Obwohl zu Projektbeginn davon ausgegangen wurde, dass mehrere industrielle Anbieter über geeignete Mahltechnik verfügen, zeigte sich rasch, dass die spezifischen Anforderungen der Klärschlammvermahlung, insbesondere ATEX-Konformität, Umgang mit heterogenen Stoffsystemen, notwendige Feinheiten < 200 µm sowie die sichere Handhabung größerer Chargen, von vielen Dienstleistern nicht erfüllt werden konnten. Zahlreiche Hersteller und Technikumsbetreiber wurden kontaktiert, jedoch lehnten viele eine Verarbeitung von Klärschlamm aufgrund von Geruchsbelastung, Verschleißrisiken, fehlender ATEX-Zulassung oder mangelnder Erfahrung mit diesem Material ab. Carbotechnik und IKTS stimmten sich hierzu eng miteinander ab und suchten gemeinsam nach geeigneten Partnern, um die Lohnmahlung im Projekt sicherzustellen.

Vor diesem Hintergrund wurde parallel intensiv an alternativen Lösungswegen gearbeitet. Beide Partner diskutierten gemeinsam die Möglichkeit, die Mahlung eigenständig durchzuführen. Carbotechnik übernahm dabei die technische und organisatorische Vorprüfung und identifizierte einen geeigneten Standort mit der erforderlichen Infrastruktur, einschließlich ausreichender elektrischer Anschlussleistung, geeigneter Lärmschutzbedingungen, Staplerlogistik sowie verfügbarer personeller Ressourcen. Auf dieser Basis wurde die erforderliche Anlagentechnik weitgehend vorgeplant und konstruktiv ausgearbeitet. Ein Hersteller von Exzenterschwingmühlen signalisierte zudem die Bereitschaft, eine Mühle temporär zur Verfügung zu stellen, sodass eine Eigenmahlung grundsätzlich realisierbar gewesen wäre. In gemeinsamer Abstimmung wurde vereinbart, dass Carbotechnik diese technischen Optionen weiter ausarbeitet, während parallel die Suche nach einer externen Lohnmahlung fortgeführt wird.


Abbildung 19 Exzenterschwingmühle, Lohnmahlung

Die Suche nach einem geeigneten Lohnmahler wurde daher weiter intensiviert. Schließlich konnte durch Recherchen und direkte Ansprache seitens Carbotechnik die Firma CheMill als potenzieller Partner identifiziert werden. Carbotechnik führte die ersten technischen Vorgespräche und klärte die grundsätzliche Eignung der dort eingesetzten Exzenterschwingmühle. CheMill betreibt eine leistungsfähige Technikumsanlage, die jedoch am Standort

Bulgarien installiert ist. Der grenzüberschreitende Transport von getrocknetem Klärschlamm stellte sich aufgrund regulatorischer Vorgaben und logistischer Risiken als erhebliche Hürde heraus, sodass eine Verarbeitung vor Ort nicht möglich war. In enger Abstimmung wurde daher die Option entwickelt, eine Mahlanlage temporär in Deutschland zu errichten.

Die Errichtung der temporären Mahlanlage am Standort Sangerhausen, einschließlich Big-Bag-Handling, Exzenterschwingmühle, Absaugung und Filtertechnik, erfolgte anschließend in gemeinsamer Projektarbeit. Die wesentlichen technischen Abstimmungen, die Definition der Anforderungen sowie die Schnittstellenklärung mit CheMill wurden dabei maßgeblich durch Carbotechnik erarbeitet. Die Materiallogistik, also die Bereitstellung, der Transport und die Verteilung der Klärschlammchargen, erfolgte anschließend durch die beteiligten Projektpartner. Die erfolgreiche Inbetriebnahme der Anlage und die Herstellung der erforderlichen Chargen zeigen, dass die Kombination aus wissenschaftlicher Bewertung (IKTS), technischer Umsetzungskompetenz (Carbotechnik) und der operativen Unterstützung durch CheMill entscheidend für das Gelingen dieses Projektabschnitts war. gibt.

Die vor Ort erzeugten Mahllose wurden von Carbotechnik unmittelbar nach der Herstellung beprobt und mittels mechanischer Siebung bewertet. Der Grobanteil lag deutlich über dem ursprünglich definierten Benchmark, insbesondere im Bereich zwischen 200 µm und 650 µm. Diese Abweichung war im Wesentlichen auf die provisorische Auslegung der eingesetzten temporären Mahlanlage sowie auf den vereinfachten Anlagenaufbau zurückzuführen und stellt keine grundsätzliche Einschränkung der Mahlbarkeit von Klärschlamm dar.

In gemeinsamer Abstimmung wurde entschieden, sowohl feinere als auch bewusst gröbere Fraktionen herzustellen. Dieses Vorgehen entsprach zudem dem Projektinhalt, da die Untersuchung unterschiedlicher Kornbänder und deren Einfluss auf die Verbrennung ausdrücklich vorgesehen war. Die so erzeugten Fraktionen wurden anschließend in den Verbrennungsversuchen systematisch getestet.

Eine zentrale Erkenntnis aus diesen Verbrennungsversuchen war, dass das ursprünglich angesetzte Zielkornband deutlich zu fein gewählt war. Auch gröbere Fraktionen konnten im Impulsstaubbrenner sicher und stabil umgesetzt werden. Trotz des erhöhten Überkornanteils zeigten die Testfahrten ein ruhiges Flammenbild, vollständigen Ausbrand und überraschend niedrige CO-Werte. Gleichzeitig reduzierte die Verarbeitung gröberer Brennstofffraktionen den energetischen Aufwand für die Brennstoffaufbereitung erheblich, da der Mahlgrad entsprechend angepasst werden kann.

Diese Ergebnisse hatten entscheidenden Einfluss auf die spätere Definition des optimalen Kornbandes und belegen die hohe Robustheit der Staubfeuerung gegenüber variierenden Brennstoffqualitäten. Die Erkenntnis, dass gröbere Fraktionen ohne Einschränkungen eingesetzt werden können, führte zu einer signifikanten Reduzierung des erforderlichen Mahlaufwandes und damit zu einer deutlichen Vereinfachung der Brennstoffaufbereitung im Gesamtsystem.

Organik- und Ascheanteile je Siebfraktion

Die reine Partikelgrößenverteilung erlaubt nur begrenzte Rückschlüsse auf das Verbrennungsverhalten. Die durchgeführte Siebanalyse zeigt zwar eine deutliche Massenkonzentration im mittleren Kornbereich (insbesondere 0,2 mm mit ca. 38 %), lässt jedoch keine direkte Aussage über die thermische Reaktivität zu.

Daher wurden die einzelnen Siebfraktionen zusätzlich verascht, um den organischen und mineralischen Anteil zu bestimmen. Die Ergebnisse zeigen, dass über einen weiten Korngrößenbereich ein Massenverlust von etwa 70 % auftritt, was einem entsprechenden Organikanteil entspricht. Der verbleibende Ascheanteil liegt damit bei etwa 30 %. Im Feinstkorn (< 0,032 mm) reduziert sich der Massenverlust auf etwa 64 %, wodurch der Ascheanteil auf rund 36 % ansteigt.

Damit wird deutlich, dass mit abnehmender Korngröße der mineralische Anteil zunimmt, während gröbere Fraktionen tendenziell organikreicher sind.

Gleichzeitig zeigen die Ergebnisse des Zündversuchs, dass das Material trotz seines hohen Organikanteils ein ausgeprägtes Ausgasungs- und Isolationsverhalten aufweist. Es kommt zu starker Blasenbildung, Fluidisierungseffekten sowie verzögerter Zündung erst bei ca. 240 °C. Dieses Verhalten weist auf transportlimitierte Reaktionsprozesse innerhalb der Partikel hin.

Differenzierte Betrachtung der Grobfraktion

Die visuelle Analyse der Grobfraktionen (> 200 µm) zeigt, dass diese nicht homogen sind, sondern aus unterschiedlichen Partikeltypen bestehen:

- Faserige und textile Bestandteile
  → hohe Oberfläche, schnelle Reaktion
  → trotz hohen Organikanteils thermisch unkritisch
- Folienartige Fragmente
  → ebenfalls schnelle Aufheizung und Verbrennung
  → kaum Einfluss auf CO-Bildung
- Inerte bzw. mineralische Bestandteile
  → erhöhen den Grobanteil in der Siebanalyse
  → sind jedoch reaktiv irrelevant
- Kompakte organische Agglomerate
  → entscheidende Fraktion
  → langsame Aufheizung, diffusionslimitiert
  → verzögerte Oxidation und lokale CO-Transienten

Feinkornfraktion

Die Feinkornfraktion weist einen erhöhten mineralischen Anteil auf und ist gleichzeitig durch eine feine, gut durchmischte Struktur gekennzeichnet. Dies führt zu:

- schneller und homogener Umsetzung
- geringerer lokaler Sauerstoffzehrung
- überwiegend oxidierenden Bedingungen

Redoxverhalten: Einfluss auf CO, Schwermetalle und Phosphorlöslichkeit

Allgemeine Zusammenhänge gemäß Literatur und Stand der Technik

Das Redoxverhalten in der Staubfeuerung wird durch das Zusammenspiel von lokaler Sauerstoffverfügbarkeit, Partikelgröße, Temperaturführung sowie der Reaktionskinetik des Brennstoffs bestimmt. Der grundlegende Einfluss dieser Parameter ist in der Literatur zur Feststoffverbrennung und Staubfeuerung umfassend beschrieben.

Demnach weisen feinkörnige und strukturhomogene Partikel aufgrund ihrer geringen thermischen Masse ein schnelles Aufheiz- und Reaktionsverhalten auf und werden überwiegend unter oxidierenden Bedingungen umgesetzt. Dies begünstigt eine gleichmäßige Reaktionsführung und stabile Flammenbedingungen.

Größere oder kompakter aufgebaute Partikel können hingegen zu verzögerten Reaktionsverläufen führen. In solchen Fällen kann es insbesondere in der Aufheiz- und Entgasungsphase lokal zu eingeschränkter Sauerstoffverfügbarkeit kommen, wodurch temporär reduzierte Mikrobedingungen entstehen können. Diese können sich auf die CO-Bildung sowie auf die Ausbildung lokaler Reaktionszonen auswirken.

Weiterhin wird in der Literatur beschrieben, dass unter reduzierenden Bedingungen sowohl die CO-Bildung begünstigt als auch die thermische Mobilität bestimmter Schwermetalle (z. B. Zn, Pb, Cd) beeinflusst werden kann. Diese Effekte sind in der Regel mit temperaturabhängigen Verdampfungs- und Rekondensationsprozessen gekoppelt und hängen neben dem Redoxzustand insbesondere von Temperatur, Verweilzeit und Gaszusammensetzung ab.

Auch die Phosphorchemie kann durch die jeweiligen Reaktionsbedingungen beeinflusst werden. So ist bekannt, dass sich unter veränderten Redoxbedingungen Verschiebungen in der Stabilität eisengebundener Phosphatphasen ergeben können, was sich auf deren Löslichkeit auswirken kann. Die tatsächliche Ausprägung dieser Effekte ist jedoch stark systemabhängig und wird durch mehrere parallel ablaufende Reaktionsmechanismen bestimmt.

Beobachtungen und Ergebnisse aus den CT-Versuchsreihen

Die im Projekt durchgeführten Messreihen zeigen ein insgesamt konsistentes Bild im Hinblick auf diese Zusammenhänge, wobei sich der Einfluss der Partikelstruktur klar abzeichnet.

Für Proben mit homogener, feiner Struktur (z. B. CT142) wurde ein stabiles Verbrennungsverhalten beobachtet. CO-Transienten traten nur in geringem Umfang auf, und die Flamme zeigte ein ruhiges und gleichmäßiges Verhalten. Die Ascheanalysen weisen überwiegend oxidierte Mineralphasen auf, darunter Fe(III)-Phosphate sowie Ca-reiche Phasen mit erhöhter NAC-Löslichkeit.

Bei Proben mit erhöhtem Anteil kompakter organischer Agglomerate (z. B. CT141) zeigte sich hingegen ein abweichendes Verhalten. In diesen Fällen wurden wiederholt lokale CO-Transienten registriert, was auf temporäre Inhomogenitäten im Reaktionsverlauf hindeutet. Diese Effekte sind plausibel mit einem verzögerten Aufheizen und einer zeitweise eingeschränkten Sauerstoffverfügbarkeit in Verbindung zu bringen.

Parallel dazu wurden Verschiebungen in der Schwermetallverteilung beobachtet, insbesondere eine stärkere Anreicherung in feinen Fraktionen (HGF- und Filteraschen). Dies kann ein Hinweis auf intensivierte Verdampfungs- und Rekondensationsprozesse sein, wobei neben dem Redoxzustand auch Temperatur- und Stofftransportprozesse eine wesentliche Rolle spielen.

Auch hinsichtlich der Phosphorfraktionen zeigen sich Unterschiede zwischen den Proben. Aschen aus Versuchsreihen mit stabileren oxidierenden Bedingungen weisen tendenziell höhere NAC-lösliche Phosphoranteile auf als Proben aus stärker inhomogenen Verbrennungsbedingungen. Eine eindeutige quantitative Zuordnung dieser Effekte ausschließlich zum Redoxverhalten ist jedoch auf Basis der vorliegenden Daten nicht möglich.

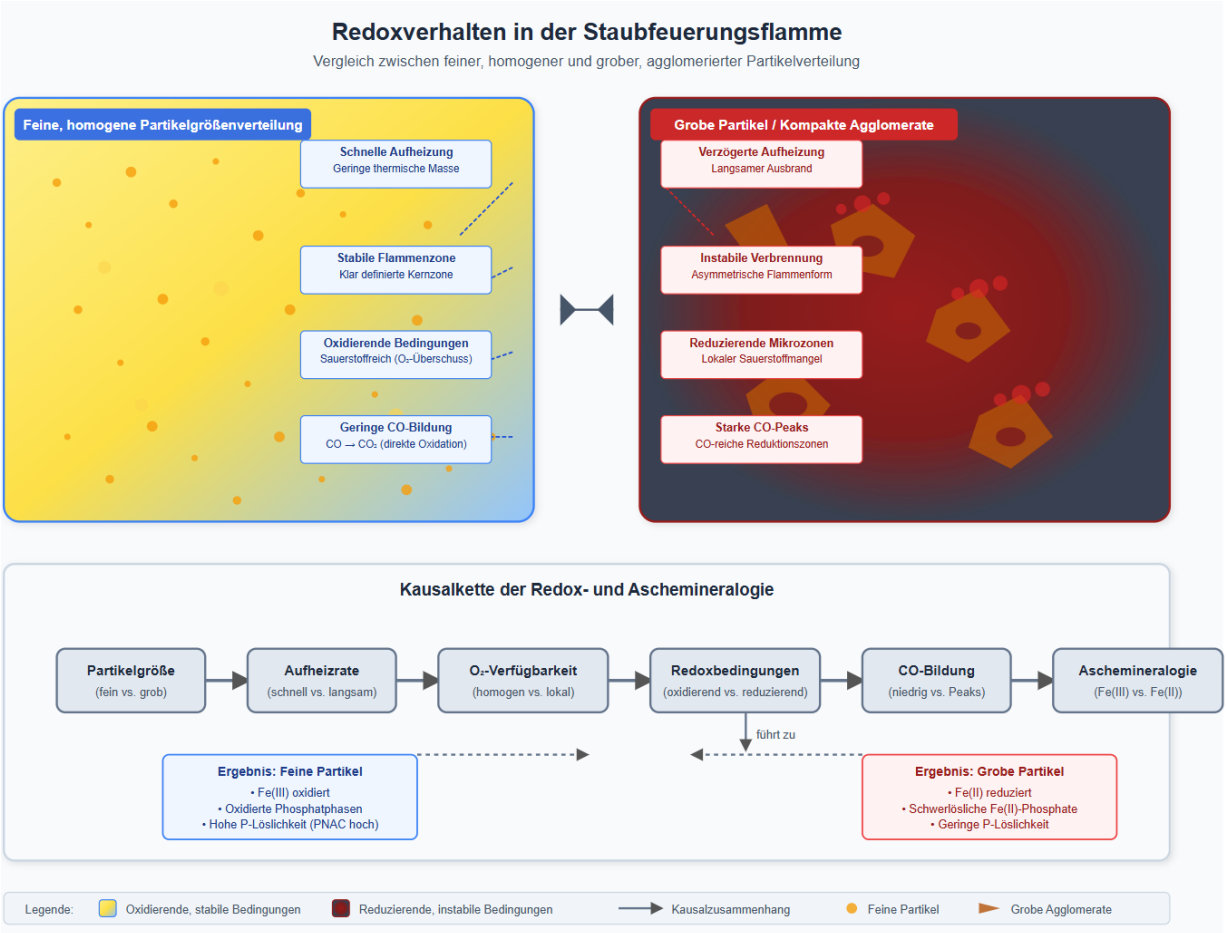


Abbildung 20 Redoxverhalten in der Staubfeuerungsflamme

Abbildung 20 verdeutlicht schematisch den Einfluss der Partikelgrößenverteilung auf das Redoxverhalten in der Staubfeuerungsflamme. Feine, homogene Partikel heizen sich schnell auf und verbrennen unter überwiegend oxidierenden Bedingungen, was zu einer stabilen Flammenausbildung und geringen CO-Emissionen führt.

Grobe Partikel bzw. kompakte Agglomerate weisen hingegen eine verzögerte Aufheizung auf. Dadurch entstehen lokal reduzierte Mikrozonen mit Sauerstoffmangel, die zu instabilen Verbrennungszuständen und erhöhten CO-Transienten führen können. Diese unterschiedlichen Redoxbedingungen wirken sich direkt auf die Aschemineralogie und die Phosphatlöslichkeit aus.

Einfluss der Partikelgrößenverteilung auf Verbrennungsführung und Emissionsverhalten

Die Partikelgrößenverteilung stellt neben der chemischen Zusammensetzung einen relevanten Einflussfaktor auf die makroskopische Verbrennungsführung dar. Ein feines und eng definiertes Kornband wird in der Literatur und aus Erfahrungen mit anderen staubförmigen Brennstoffen häufig als günstig beschrieben. Auf dieser Basis wurde zu Projektbeginn ein theoretisches Zielkornband abgeleitet.

Die im Projekt DreiSATS durchgeführten Versuchsreihen zeigen jedoch, dass die tatsächlich erzeugten Kornbänder deutlich gröber waren als das theoretisch definierte Zielkornband und dennoch ohne Einschränkungen zu stabilen Verbrennungsbedingungen führten. Die Flammenbilder waren ruhig und symmetrisch, die Temperaturverteilung homogen und die CO- und NO_x-Verläufe lagen im erwarteten Bereich. Dauerhaft instabile Flammen oder systematische Asymmetrien wurden nicht beobachtet.

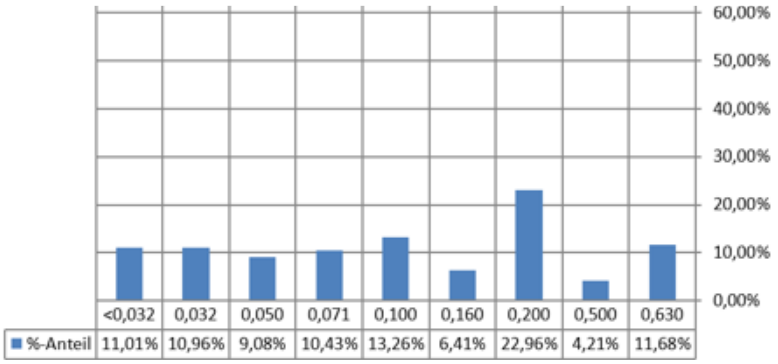


Abbildung 21 Die real gefahrenen Kornbänder waren deutlich gröber als das theoretische Zielkornband, ohne negative Auswirkungen auf die Verbrennung.

Ein erhöhter Grobanteil führte nicht zu verfahrenstechnisch kritischen Zuständen. Faserige oder inerte Grobpartikel erwiesen sich dagegen als weitgehend unkritisch.

Auf Grundlage externer Erfahrungswerte wurde eingangs ein theoretisches Zielkornband definiert (d_{50} ≈ 90 ± 10 µm, < 16 % > 200 µm, < 1 % > 650 µm). Die Projektversuche zeigen jedoch, dass dieses Zielkornband nicht zwingend erforderlich ist, um einen stabilen und emissionsarmen Betrieb zu gewährleisten. Die positiven Effekte der Mahloptimierung beruhen primär auf einer verbesserten Homogenität und der Vermeidung von Agglomeraten, nicht auf einer maximalen Verfeinerung des Kornbandes.

Fazit: Die Partikelgrößenverteilung beeinflusst die Verbrennungsführung, ist jedoch kein dominanter Steuerparameter. Auch gröbere Kornbänder ermöglichen einen stabilen Betrieb, solange keine Agglomerate auftreten. Das theoretische Zielkornband dient als Orientierung, wurde jedoch durch die Versuchsergebnisse nicht als zwingend notwendig bestätigt.

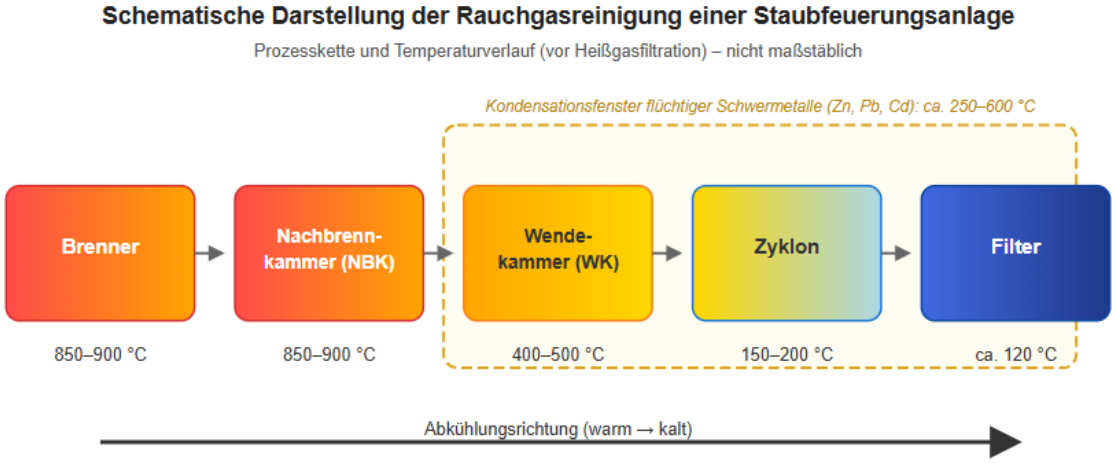
AP 2.1.3, Bewertung der vorhanden Rauchgasreinigung und Ableitung von notwendigen Erweiterungsmaßnahmen

Abbildung 22 verdeutlicht den schematischen Aufbau der Rauchgasreinigung sowie den Temperaturverlauf entlang der einzelnen Aggregate. Mit zunehmender Abkühlung des Rauchgases werden flüchtige Schwermetalle wie Zink, Blei und Cadmium im Temperaturbereich zwischen etwa 250 und 600 °C aus der Gasphase abgeschieden und rekondensieren bevorzugt an feinen Staubpartikeln.

Die dargestellten Kondensationsfenster erklären die Anreicherung dieser Elemente in der Filterasche und bestätigen die prozessbedingte Trennung zwischen nicht flüchtigen Schwermetallen in den heißen Aschefraktionen und flüchtigen Elementen im Feinpartikelstrom.

Die Bewertung der ursprünglich vorhandenen Rauchgasreinigung bildete einen zentralen Bestandteil des Arbeitspakets 2.1.3. Ziel war es, die thermischen und strömungstechnischen Bedingungen der Versuchsanlage so präzise zu erfassen, dass daraus die Anforderungen für weiterführende wissenschaftliche Untersuchungen, insbesondere zur Additivwirkung, zur Schwermetallverlagerung und zur mineralogischen Bewertung der Aschen, abgeleitet werden konnten.

Die Versuchsanlage war im Ausgangszustand mit einer klassischen Abgaslinie bestehend aus Nachbrennkammer (NBK), Wendekammer (WK), Zyklonabscheider und nachgeschaltetem Gewebefilter ausgerüstet. Diese Konfiguration war für den sicheren Anlagenbetrieb ausreichend, zeigte jedoch für analytische Fragestellungen mehrere systemimmanente Einschränkungen.



Typische Kondensationstemperaturen ausgewählter Schwermetalle

Metall	Kondensationstemperatur
Zn	~450–600 °C
Pb	~300–500 °C
Cd	~250–400 °C

Abbildung 22 Schematische Darstellung der Rauchgasreinigung

Im bestehenden System standen zunächst zwei thermisch klar definierte Ascheentnahmestellen zur Verfügung: die Nachbrennkammer als stabilster Hochtemperaturbereich der Anlage sowie die Wendekammer als strömungsgeprägte Übergangszone zwischen heißen und mittelheißen Bereichen. Die Nachbrennkammer erfüllte dauerhaft die Anforderungen der 17. BImSchV und erlaubte die Erzeugung einer vollständig oxidierten, mineralogisch stabilen Hauptasche. Diese NBK-Asche erwies sich im Projektverlauf als äußerst reproduzierbare Referenzfraktion und wurde daher für den überwiegenden Teil der mineralogischen und chemischen Untersuchungen herangezogen.

Die Wendekammer bildete eine Zwischenfraktion, in der durch Umlenkströmungen größere, nur teilweise durchoxidierte Partikel abgeschieden wurden. Sie stellte damit eine wichtige Übergangsfraktion dar, die thermisch zwischen der NBK-Asche und der Zyklonasche liegt.

Die Bewertung der nachgeschalteten Abscheidestufen zeigte jedoch, dass die bestehende Kombination aus Zyklon und Gewebefilter nicht die für wissenschaftliche Untersuchungen notwendige thermische Trennschärfe aufwies. Zwischen Nachbrennkammer und Filter trat im Abgas ein deutlicher Temperaturabfall auf. Flüchtige Schwermetalle, insbesondere Zink, Blei, Cadmium und Quecksilber, gehen im Hochtemperaturbereich der Verbrennung teilweise in die Gasphase über. Aufgrund der Abkühlung entlang der Abgasstrecke kondensierten diese Elemente bereits vor dem Filter und lagerten sich unkontrolliert an Rohrwandungen, abgekühlten Staubpartikeln oder in strömungstechnischen Toträumen ab.

Diese thermisch unkontrollierte Kondensation führte dazu, dass weder die Zyklonasche noch die Filterasche eindeutig einer definierten Temperaturzone zugeordnet werden konnten. Eine klare Bewertung temperaturabhängiger Schwermetallpfade war damit nicht möglich. Die mineralogischen Untersuchungen bestätigten diese thermische Vermischung: Die Zyklonfraktion zeigte sowohl warm abgeschiedene als auch bei niedrigeren Temperaturen rekondensierte Schwermetallverbindungen, während die Filterasche eine Mischung aus kondensierten Metallphasen und feinsten mineralischen Brennstoffrückständen darstellte.

Thermodynamische Betrachtungen zeigten, dass insbesondere die Kondensationsfenster von Zn, Pb und Cd im Temperaturbereich von etwa 250–600 °C liegen. Da die Abgasstrecke der Altanlage genau in diesem Temperaturbereich eine ausgeprägte Abkühlung aufwies, kam es verstärkt zu Wandablagerungen und Partikelrekondensation, die eine wissenschaftlich belastbare Zuordnung verhinderten. Für weiterführende Untersuchungen zur Additivwirkung und Schwermetallverlagerung war es jedoch zwingend erforderlich, eine definierte Hochtemperatur-Feinstaubfraktion getrennt erfassen zu können, eine Voraussetzung, die mit der vorhandenen Abgaslinie nicht erfüllt werden konnte.

Aus der Analyse ergaben sich folgende zentrale Systemgrenzen:

- Die Filterasche enthielt sowohl kondensierte Schwermetalle als auch feine mineralische Restpartikel und stellte keine thermisch klar definierte Fraktion dar.
- Die Zyklonasche war durch Wandkondensate thermisch überprägt und keiner eindeutigen Temperaturzone zuzuordnen.
- Die Wirkung von Additiven ($NaHCO_3$, Na_2CO_3) konnte keiner klar definierten Temperatur- oder Reaktionszone zugeordnet werden.
- Eine eigenständige Hochtemperatur-Feinstaubfraktion fehlte vollständig.
- Der wissenschaftliche Anspruch einer temperaturgeführten, fraktionierten Ascheanalytik war mit der bestehenden Abgasführung nicht erfüllbar.

Aus diesen Ergebnissen ergaben sich zwingende Erweiterungsmaßnahmen. Als zentrale technische Maßnahme wurde die Integration einer Heißgasfiltration (HGF) identifiziert. Die HGF ermöglicht die Abscheidung von Feinstäuben bei hohen Temperaturen (ca. 600–850 °C) durch eine direkte Heißgasentnahme aus der Nachbrennkammer, noch bevor eine relevante Abkühlung des Rauchgases einsetzt. Dadurch steht erstmals eine eindeutig definierte Hochtemperatur-Feinstaubfraktion zur Verfügung, die für die Bewertung der Schwermetallverlagerung, der Additivwirkung und der Aschemineralogie unverzichtbar ist.

Die ursprüngliche Abgaslinie der Versuchsanlage (NBK → WK → Zyklon → Filter) blieb dabei als separater Abgaspfad bestehen und wurde flankierend optimiert. Ergänzend erfolgten Anpassungen der Abgasführung und der Probenahmetechnik, unter anderem durch optimierte Rohrgeometrien, zusätzliche thermische Isolierungen, die Reduzierung strömungstechnischer Toträume sowie die Installation zusätzlicher Temperatur- und Differenzdruckmessstellen. Diese Maßnahmen stellten sicher, dass sowohl der Heißgasstrom zur HGF als auch die nachgeschalteten Aschefraktionen reproduzierbar und wissenschaftlich belastbar erfasst werden konnten.

Zusammenfassend zeigte die Bewertung der Altanlage, dass Nachbrennkammer und Wendekammer bereits zwei thermisch sehr gut definierte Aschefraktionen lieferten, während Zyklon- und Filterasche aufgrund unkontrollierter Abkühlung keine ausreichende thermische Trennschärfe aufwiesen. Erst durch die Integration der Heißgasfiltration und die gezielte Optimierung der Abgasstrecke wurden die verfahrenstechnischen Voraussetzungen geschaffen, um die wissenschaftlichen Fragestellungen der nachfolgenden Arbeitspakete, insbesondere zur In-situ-Modifikation (AP 2.2), zur Schwermetallabscheidung und zur Aschemineralogie, vollständig, reproduzierbar und belastbar bearbeiten zu können.

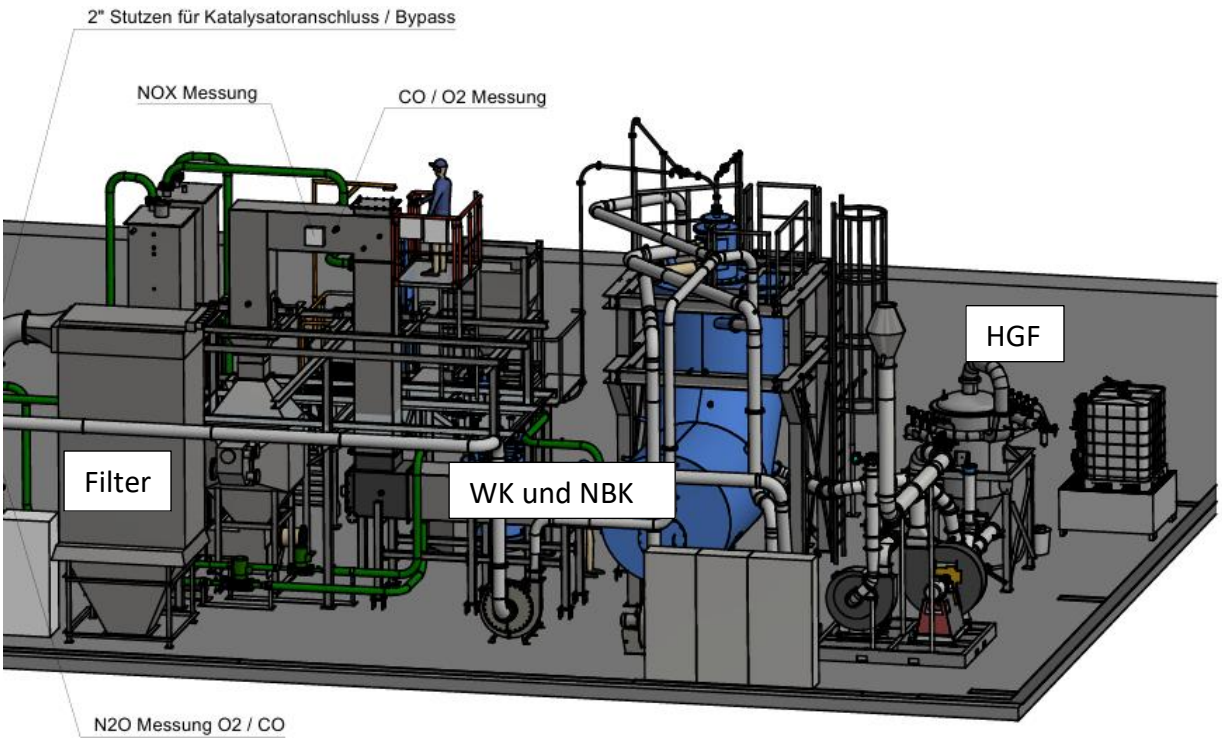


Abbildung 23 Ausschnitt Versuchsanlage mit HGF

Abbildung 23 zeigt ein 3D-Modell der Staubfeuerungs-Versuchsanlage mit den wesentlichen Aggregaten entlang der Prozesskette. Zusätzlich sind die Positionen der Emissionsmessstellen sowie die Asche- und Stoffentnahmestellen entlang der Rauchgasführung dargestellt. Die räumliche Zuordnung der Entnahmestellen dient der besseren Nachvollziehbarkeit der in den folgenden Kapiteln dargestellten Emissions-, Schwermetall- und Ascheanalysen.

Fazit:

Die Untersuchungen in AP 2.1 zeigen, dass die Staubfeuerung für die mono-thermische Klärschlammverwertung technisch stabil und reproduzierbar betrieben werden kann. Die Optimierung der Dosierung, Fluidisierung und Luftführung führte zu einem verlässlichen Verbrennungsverhalten und einem hohen Ausbrandniveau. Die gewonnenen Erkenntnisse bilden die Grundlage für die sichere Anlagenführung im Dauerbetrieb und schaffen die technischen Voraussetzungen für die nachfolgenden Prozessschritte der Aschemodifikation und Heißgasfiltration.

II.1.2.2 AP 2.2: In-Situ-Modifikation und Heißgasfiltration

Die In-Situ-Modifikation in der Staubfeuerung umfasst sowohl die Mobilisierung ausgewählter Schwermetalle als auch die Beeinflussung der Phosphorfraktionen im Ascheverbund. Durch das Zusammenspiel aus hohen Temperaturen, intensiver Durchmischung und der nachgeschalteten Abscheidungseinrichtungen ergeben sich günstige Bedingungen für Veränderungen in der Aschezusammensetzung. Im Folgenden werden die beiden zentralen Wirkmechanismen, die Schwermetallentfrachtung und die Erhöhung der P-Löslichkeiten, getrennt dargestellt.

In-Situ-Modifikation und Heißgasfiltration zur Schwermetallentfrachtung

Die Schwermetallentfrachtung in der Staubfeuerung erfolgt durch das Zusammenspiel aus hohen Temperaturen, intensiver Durchmischung und der nachgeschalteten Heißgasfiltration bzw. Schwerkraftabscheidung unterhalb der Nachbrennkammer. In der Brennermuffel werden Temperaturen von etwa 1.300 °C erreicht. Die dort vorherrschenden turbulenten Strömungen sorgen für eine sehr gute Vermischung von Brennstoff und Additiv. Bis zum Austritt aus der Nachbrennkammer liegt das Temperaturniveau weiterhin bei mindestens 850 °C.

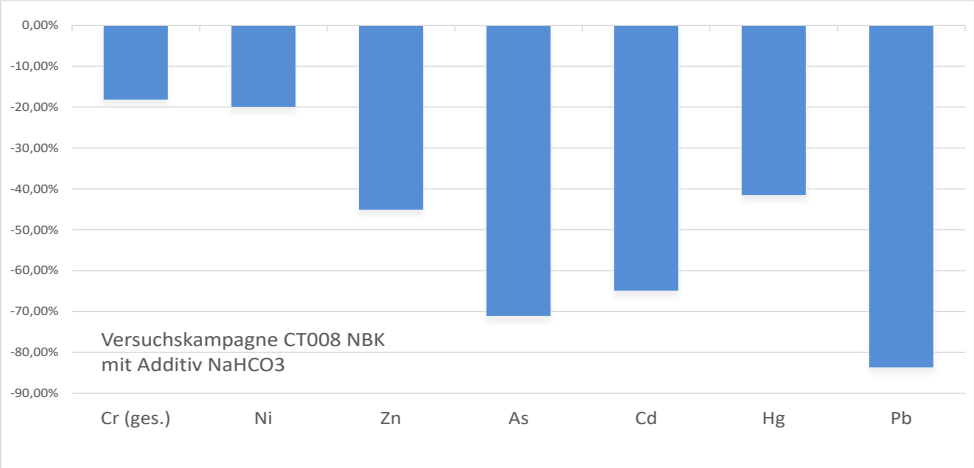


Abbildung 24 Schadstoffentfrachtung einer Versuchsfahrt mit Additiv

Diese Kombination aus hoher Temperatur und homogener Reaktionsführung ermöglicht Teilmobilisierung bzw. die Verdampfung leichtflüchtiger Schwermetalle. Die im Abgas transportierten Metallverbindungen werden in der nachgeschalteten Anlage abgeschieden. Aschen der Nachbrennkammer bzw. Heißgasfilter haben deutlich geringere Konzentrationen an Schadstoffen.

Die Abbildung 24 zeigt die Schadstoffentfrachtung aus einer Messfahrt. Aufgrund des hohen Temperaturniveaus in der Brennermuffel wäre bei Quecksilber eine nahezu vollständige Entfrachtung zu erwarten. Für die Elemente As, Cd, Hg und Pb lagen die gemessenen Konzentrationen in den Aschepro-ben jedoch unterhalb der analytischen Nachweisgrenzen.

Für die Bewertung wurde daher der konservativste Ansatz gewählt: Die Nachweisgrenze wurde als möglicher Restgehalt angesetzt. Dadurch ergibt sich rechnerisch die geringstmögliche Entfrachtung, während die tatsächliche Entfrachtung höher liegen kann, da die realen Gehalte unterhalb der Nachweisgrenze liegen.

Neben der Mobilisierung und Abscheidung leichtflüchtiger Schwermetalle zeigt die In-Situ-Modifikation in Verbindung mit der Additivzugabe auch Auswirkungen auf die Phosphorfraktionen der Asche. Die im Projekt durchgeführten Versuchsreihen belegen, dass sich unter den gegebenen Prozessbedingungen Veränderungen in der P-Löslichkeit einstellen können, die im folgenden Abschnitt beschrieben werden.

Erhöhung der P-Löslichkeiten durch In-Situ-Modifikation und Additivzugabe

Die im Projekt durchgeführten Versuchsreihen zeigen, dass die Staubfeuerung in Kombination mit der Additivzugabe zu einer Erhöhung der P-Löslichkeiten (P_{NAC}) führt. Dieser Effekt wurde in einer Vielzahl von Versuchen beobachtet und stimmt mit den analytischen Ergebnissen des Fraunhofer IKTS überein, dass ebenfalls eine gesteigerte Pflanzenverfügbarkeit der Phosphorfraktionen nachweisen konnte.

Die hohen Temperaturen in der Brennermuffel von etwa 1.300 °C sowie die ausgeprägten turbulenten Strömungen sorgen für eine sehr gute Durchmischung von Brennstoff und Additiv. Bis zum Austritt aus der Nachbrennkammer liegt das Temperaturniveau weiterhin bei mindestens 850 °C. Diese Kombination aus hohem Temperaturniveau, intensiver Durchmischung und feiner Aschestruktur schafft günstige Voraussetzungen für Reaktionen zwischen Additiv und Aschematrix, die zu einer Verbesserung der P-Löslichkeit beitragen können.

Im Projekt wurden unterschiedliche Additive und Additivmengen getestet. Aufgrund der Vielzahl der Versuche konnten die P-Löslichkeiten jedoch nicht für alle Varianten vollständig analytisch erfasst werden. Eine abschließende Quantifizierung der Abhängigkeit zwischen Additivtyp, Additivmenge und erreichbarer Löslichkeitssteigerung ist daher im Rahmen dieses Projekts nicht möglich. Die vorliegenden Ergebnisse zeigen jedoch eindeutig, dass die Additivzugabe im Staubfeuerungsprozess zu einer Erhöhung der P_{NAC}-Werte führt.

Die vom IKTS durchgeführten Untersuchungen bestätigen darüber hinaus, dass die Aschen aus der Staubfeuerung aufgrund ihrer feinen, homogenen Struktur, des geringen Sandanteils und der hohen spezifischen Oberfläche besonders gut für weiterführende Aufschluss- und Veredelungsverfahren geeignet sind. Die Aschen wurden gemäß Düngemittelverordnung untersucht und erfüllen die Anforderungen hinsichtlich der Schadstoffgrenzwerte. Die Pflanzenverfügbarkeit wurde im Versuchsstand des IKTS nachgewiesen.

Darüber hinaus bietet die im Staubfeuerungsprozess erzeugte Asche auch sehr gute Voraussetzungen für eine weitergehende Behandlung durch Säureaufschluss bzw. Veredelung zu definierten Düngeprodukten. Die im Projekt beobachtete Schadstoffentfrachtung und die Erhöhung der P-Löslichkeiten stellt hierfür einen wichtigen ersten Schritt dar.

Zusammenfassend zeigt AP 2.2, dass die Staubfeuerung in Kombination mit der In-Situ-Modifikation sowohl zur Schwermetallentfrachtung als auch zur Verbesserung der P-Löslichkeiten beiträgt. Die erzeugten Aschen erfüllen die Anforderungen der Düngemittelverordnung und weisen gleichzeitig Eigenschaften auf, die sie für weiterführende Aufschluss- und Veredelungsverfahren besonders geeignet machen. Damit bildet die Staubfeuerung eine solide Grundlage für nachgelagerte Prozessschritte zur Herstellung definierter Düngeprodukte oder zur weitergehenden Phosphorrückgewinnung.

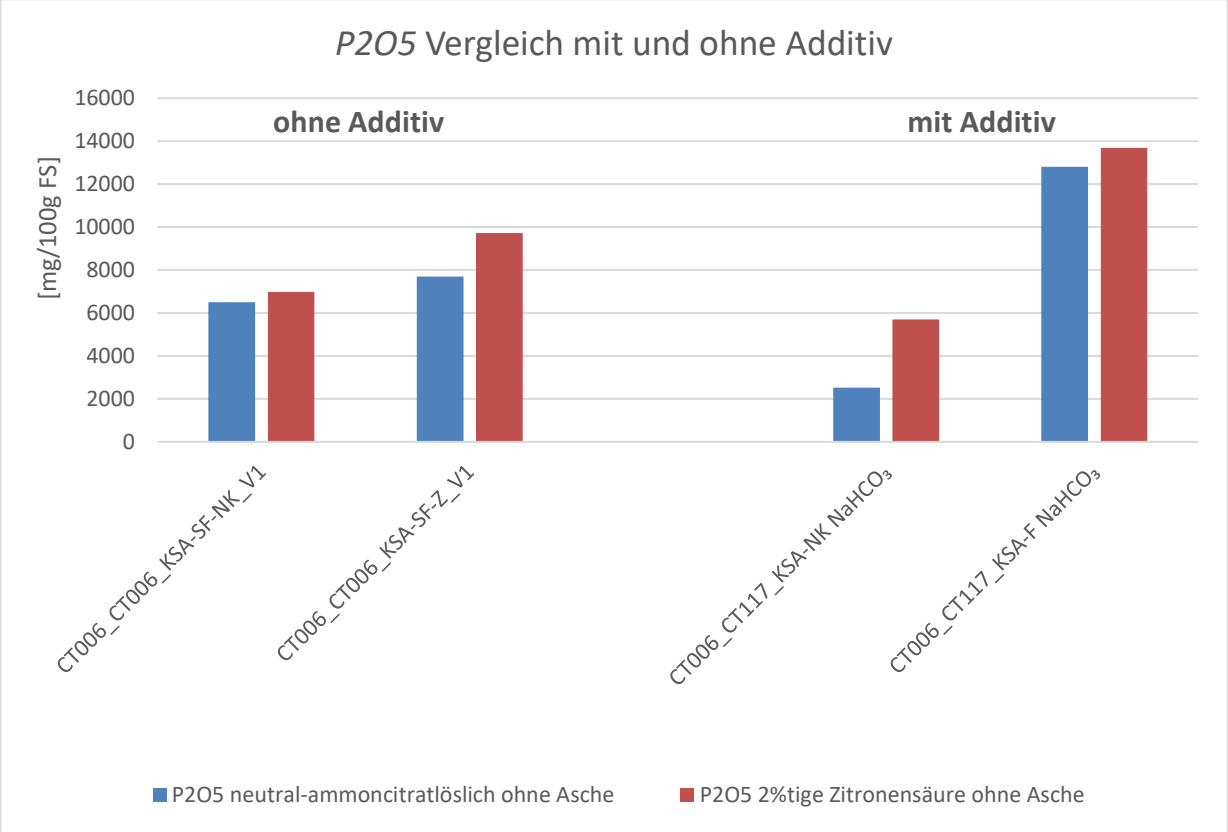


Abbildung 25 Vergleich CT006 mit und ohne Additiv $NaHCO_3$

Abbildung 25 zeigt den Einfluss der In-situ-Additivzugabe von Natriumhydrogencarbonat ($NaHCO_3$) auf die Phosphorverfügbarkeit der resultierenden Klärschlammaschen. Im Vergleich zu den Versuchen ohne Additiv ist bei Zugabe von $NaHCO_3$ eine deutliche Erhöhung sowohl des neutral-ammoncitratlöslichen als auch des 2-%-igen zitronensäurelöslichen P_2O_5-Anteils zu beobachten.

Die Ergebnisse belegen, dass durch die Additivzugabe während der Staubfeuerung eine gezielte Umwandlung schwerlöslicher Phosphatphasen in besser pflanzenverfügbare Phosphatverbindungen erfolgt.

Fazit:

Die Arbeiten in AP 2.2 bestätigen, dass die Kombination aus In-situ-Modifikation und Heißgasfiltration ein wirkungsvolles Verfahren zur gezielten Beeinflussung der Aschequalität darstellt. Die Versuche zeigen, dass Additive und Temperaturführung die Phosphorfraktionen und Schwermetallverteilung beeinflussen können und dass die Heißgasfiltration zuverlässig arbeitet. Damit wurde ein wichtiger technologischer Baustein validiert, der sowohl zur Verbesserung der Aschequalität als auch zur Einhaltung emissionsrechtlicher Anforderungen beiträgt.

II.1.2.3 AP 2.3: Umbau und Erweiterung Pilotanlage Staubfeuerung

AP 2.3.1, Genehmigungsprozess, Detailengineering Anpassung Versuchsanlage für Klärschlammverbrennung und Aschemodifikation

Für die geplante Anlage zur Verbrennung von Klärschlamm am Standort in Magdeburg ist eine behördliche Genehmigung erforderlich. Hierzu wurden die notwendigen Unterlagen zusammengestellt. Im weiteren Austausch mit der Behörde konnten Rückfragen geklärt werden. Der Anlagenbetrieb wurde vom zuständigen Referat genehmigt.

Zu Projektbeginn zeigte sich, dass die ursprüngliche Anlage zwar für Kleinversuche ausgelegt war, jedoch hinsichtlich Funktionalität, Regelbarkeit und thermischer Stabilität deutlich erweitert werden musste. Die Engineering Leistungen sind im nachfolgenden AP beschrieben.

AP 2.3.2, Umbau und Erweiterung Versuchsanlage Staubfeuerung

Für die Durchführung der im Projekt vorgesehenen Untersuchungen zur In-Situ-Modifikation, zur Additivzugabe und zur Heißgasfiltration war eine umfassende Anpassung der bestehenden Anlage erforderlich. Die ursprüngliche Anlagenkonfiguration war nicht auf die Verbrennung von Klärschlammstaub und die damit verbundenen Anforderungen an Temperaturführung, Additivdosierung und Feinpartikelabscheidung ausgelegt.

Aus den Ergebnissen der vorangegangenen Arbeitspakete ergaben sich klare technische Anforderungen an den Umbau: eine stabile und reproduzierbare Verbrennung des Klärschlammstaubs (AP 2.1), die Möglichkeit zur gezielten Additivzugabe sowie die Integration eines Heißgasfilters zur Abscheidung feiner Partikel und mobilisierter Schwermetalle (AP 2.2). Ziel von AP 2.3 war es daher, die Pilotanlage so zu erweitern und umzubauen, dass alle für die In-Situ-Modifikation relevanten Prozessschritte unter realen Betriebsbedingungen untersucht werden können.

Die folgende Abbildung zeigt die im Rahmen des Projekts umgebaute und erweiterte Versuchsanlage.



Abbildung 26 Versuchsanlage Frontalansicht

Ausgangssituation

Die vorhandene Staubfeuerungsanlage war ursprünglich für die Verbrennung von Braunkohlenstäuben ausgelegt. Für den Einsatz von Klärschlammstaub ergaben sich daraus mehrere technische Einschränkungen, insbesondere hinsichtlich Partikelgröße, Aschegehalt und Staubbeladung des Abgases.

Weder eine geeignete Additivdosierung noch ein Heißgasfiltersystem standen zur Verfügung, sodass die im Projekt geplanten Untersuchungen zur Schwermetallentfrachtung und Aschemodifikation nicht durchgeführt werden konnten. Auch die vorhandene Mess-, Steuer- und Regeltechnik war nicht auf einen kontinuierlichen Betrieb mit variierenden Klärschlämmen ausgelegt.

Vor diesem Hintergrund war ein umfassender Umbau notwendig, um die technischen Voraussetzungen für die Verbrennung von Klärschlammstaub, die Additivzugabe, die Heißgasfiltration sowie die nachfolgenden Dauerbetriebsuntersuchungen zu schaffen.

Anforderungen an die Umbauten

Die Anforderungen an den Umbau ergaben sich aus den Erkenntnissen der vorangegangenen Arbeitspakete:

- Sicherstellung einer stabilen und reproduzierbaren Verbrennung des Klärschlammstaubs (AP 2.1), insbesondere hinsichtlich Brennstoffdosierung, Strömungsführung und Temperaturstabilität.
- Möglichkeit zur gezielten und regelbaren Additivzugabe zur Unterstützung der In-Situ-Modifikation (AP 2.2).
- Integration eines Heißgasfilters zur Abscheidung feiner Partikel und mobilisierter Schwermetalle.
- Erweiterung der Mess-, Steuer- und Regeltechnik zur kontinuierlichen Erfassung aller relevanten Prozessdaten, einschließlich zusätzlicher Temperatur- und Druckmessstellen sowie sicherheitsrelevanter Überwachungseinrichtungen.

Dieses Anforderungsprofil bildete die Grundlage für das Engineering und den anschließenden Umbau.

Engineering und Detailplanung

Im Rahmen des Engineerings wurden die mechanische und thermische Auslegung der neuen Komponenten sowie die Anpassung der Strömungsführung, der Additivdosierung und der Abgasbehandlung vorgenommen.

Ein Schwerpunkt war die Integration des Heißgasfilters. Verschiedene Filterkonzepte wurden hinsichtlich Bauraum, Temperaturbeständigkeit, Druckverlust und Reinigungsmechanismen bewertet. Die Auswahl erfolgte unter Berücksichtigung der projektspezifischen Betriebsbedingungen und der Anforderungen an Probenahme und Analytik.

Parallel wurde die Additivdosierung ausgelegt. Dies umfasste die Auswahl geeigneter Dosieraggregate, die Festlegung der Einbringposition sowie die Auslegung der Regelungstechnik für eine reproduzierbare und prozessstabile Additivzugabe.

Die Strömungsführung im Bereich der Brennermuffel und der Nachbrennkammer wurde hinsichtlich Temperaturverteilung, Verweilzeiten und Durchmischung überprüft und an die Anforderungen der In-Situ-Modifikation angepasst.

Ein weiterer Schwerpunkt lag auf der Erweiterung der Mess-, Steuer- und Regeltechnik. Zusätzliche Temperatur- und Druckmessstellen, eine erweiterte Prozessdatenerfassung sowie Überwachungs- und Sicherheitseinrichtungen wurden spezifiziert und in das bestehende Anlagenkonzept integriert.

Umbau und mechanische Integration

Auf Grundlage der Detailplanung wurde die Anlage umfassend umgebaut. Die mechanische Integration umfasste sowohl den Einbau neuer Komponenten als auch die Anpassung bestehender Anlagenteile.

Ein zentraler Schritt war die Installation des Heißgasfilters in der Abgasstrecke zwischen Nachbrennkammer und bestehender Abscheidetechnik. Hierfür waren bauliche Anpassungen an der Abgasführung erforderlich, einschließlich neuer Anschlussstücke, Stützstrukturen und Revisionsöffnungen.

Die Additivdosierung wurde mechanisch in die Brennstoffzuführung integriert. Dies umfasste die Montage der Dosieraggregate, die Herstellung der Einbringstelle sowie Anpassungen der Fördertechnik zur Sicherstellung einer gleichmäßigen Additivzugabe.

Darüber hinaus wurden Anpassungen an Brennkammer und Nachbrennkammer vorgenommen, um Strömungsführung und Temperaturverteilung an die Anforderungen der Klärschlammverbrennung anzupassen. Die Abgasstrecke wurde erweitert und hinsichtlich thermischer Entkopplung und Betriebssicherheit optimiert.

Ergänzende Optimierungsmaßnahmen

Im Zuge des Umbaus und der Inbetriebnahme wurden weitere Optimierungen durchgeführt:

- Maßnahmen zur Reduzierung der NOx-Emissionen wurden ausgearbeitet und mit einem Hersteller von SNCR-Systemen diskutiert. Eine Umsetzung war im Projektzeitraum jedoch nicht mehr möglich.
- Die Abluftleitung des Dosierers wurde ins Freie verlegt, um Geruchsemissionen in der Halle zu reduzieren.
- Sensorik, Trassenführungen und Verkabelung wurden nachgeführt und an die erweiterten Anforderungen angepasst. Hardware, Software und Visualisierung wurden entsprechend erweitert.
- Die Kühlung der Schaltschränke wurde verbessert, indem Frischluft aus einem kühleren Bereich angesaugt wurde bzw. ein Klimagerät integriert wurde.
- Zur Verbesserung des Korrosionsschutzes wurde die Anlage neu beschichtet. Die Farbgebung der Leitungen wurde gemäß DIN 2403 und TRGS 201 zur Stoffkennzeichnung umgesetzt.

AP 2.3.3, Einbau Modul Modifikation, Heißgasfiltration und Inbetriebnahme

Der Einbau des Moduls zur In-situ-Modifikation sowie die Integration der Heißgasfiltration (HGF) bildeten den zentralen technischen Kern des Arbeitspakets 2.3.3. Erst durch diese Erweiterungen wurde die Versuchsanlage in die Lage versetzt, unter realen Betriebsbedingungen Additive präzise zu dosieren, homogene Brennstoff-Additiv-Gemische zu erzeugen und hochtemperaturgeführte Feinstaubfraktionen gezielt abzutrennen. Das Arbeitspaket stellt damit die technische Schnittstelle zwischen dem grundlegenden Anlagenumbau (AP 2.3.1 / AP 2.3.2) und den wissenschaftlichen Untersuchungen der Folgearbeitspakete, insbesondere AP 2.4, dar.

Der Fokus lag dabei auf drei zentralen Herausforderungen:

- der prozesstechnischen Integration einer reproduzierbaren Additivzugabe,
- der Entwicklung und Bewertung des Misch- und Entmischungsverhaltens im fluidisierten Brennstoffpfad,
- der vollständigen Inbetriebnahme der Heißgasfiltration unter stabilen thermischen und strömungstechnischen Randbedingungen.
- Nur durch das abgestimmte Zusammenspiel dieser Komponenten konnten die späteren Untersuchungen zur Phosphormodifikation und Schwermetallabscheidung technisch korrekt und wissenschaftlich belastbar durchgeführt werden.

I. Additivzugabe und Bewertung der Misch- bzw. Entmischungsneigung

Konzept der Additivzufuhr

Für die In-situ-Modifikation wurde ein separates Additivdosiersystem in die bestehende Brennstoffförderkette integriert. Ziel war es, das Additiv möglichst frühzeitig und definiert in den Prozess einzubringen, sodass über den gesamten pneumatischen Förderweg eine homogene Durchmischung mit dem Klärschlammstaub erreicht wird.

Die technische Umsetzung umfasste:

- einen Additivvorlagebehälter als Zwischenspeicher,
- einen fein regelbare Zellenradschleuse,
- den gezielten Eintrag in den fluidisierten Bereich der Brennstoffdosierung,
- sowie einen ausreichend langen Misch- und Förderweg.
- Das Konzept nutzt die Fluidisierung als effektiven Mischmechanismus. Durch die gleichmäßige Luftverteilung wird der Staub in Schwebe gehalten, wodurch Additive mit vergleichbarer Korngröße und Schüttdichte effizient mitgeführt und verteilt werden können.



Abbildung 27 Additivbehälter in Verbindung mit Dosierer

Additivwahl und laborseitige Grundlage

Nach umfangreichen Labor- und Vorversuchen wurde die Additivauswahl auf zwei karbonatbasierte Substanzen eingegrenzt:

- Natriumcarbonat (Na_2CO_3) – Produkt *Soda Solvay Light*,
- Natriumhydrogencarbonat ($NaHCO_3$) – Produkt *SolvAir 350* (feine Körnung)

Chloridhaltige Additive (z. B. NaCl, NH_4Cl) wurden aufgrund erhöhter Korrosions- und Ablagerungsrisiken sowie eingeschränkter Übertragbarkeit in eine großtechnische Anwendung ausgeschlossen.

Alle Additive wurden einer Siebanalyse sowie Fluidisierungstests unterzogen. Dabei zeigte sich:

- Natriumcarbonat weist eine stabile, mittel- bis feinkörnige Struktur mit guter Fluidisierbarkeit auf,
- Natriumhydrogencarbonat (SolvAir 350) zeigte die günstigsten Eigenschaften hinsichtlich Feinheit, Staubaktivität und Mischverhalten

Auf dieser Grundlage wurde festgelegt, Natriumhydrogencarbonat als Hauptadditiv einzusetzen und Natriumcarbonat für Vergleichsfahrten vorzusehen.

Bewertung der Entmischungsneigung im Dosierer

Zur Bewertung des realen Mischverhaltens wurde der Dosierer im Rahmen mehrerer Versuchsfahrten geöffnet und das Brennstoff-Additiv-Gemisch visuell sowie haptisch beurteilt.

Dabei ergaben sich folgende Beobachtungen:

- über die Schütthöhe hinweg eine weitgehend homogene Verteilung des Additivs im Brennstoff,
- keine ausgeprägte Ausbildung additivreicher Zonen,
- Vereinzelt größere Additivkörner infolge hygroskopischer Effekte von $NaHCO_3$.

Leichte Agglomerationen traten insbesondere bei längerer Verweilzeit im Vorlagebehälter oder erhöhter Feuchte der Fluidisierluft auf.

Insgesamt erwies sich die Mischqualität unter den untersuchten Betriebsbedingungen als stabil und reproduzierbar. Das definierte Mischungsverhältnis von 10 : 1 (Klärschlamm : Additiv) konnte im Versuchszeitraum zuverlässig eingehalten werden.

Bewertung der Entmischungsneigung im Dosierer

Zur Bewertung der Misch- und Entmischungsneigung wurde der Dosierer im Rahmen mehrerer Versuchsfahrten geöffnet und das Brennstoff-Additiv-Gemisch visuell sowie haptisch beurteilt. Dabei zeigte sich:

- eine über die gesamte Schütthöhe homogene Verteilung des Brennstoff-Additiv-Gemisches,
- keine Ausbildung additivreicher Zonen, wie sie für entmischte Schüttgüter typisch wären,
- vereinzelt auftretende größere Additivkörner infolge der hygroskopischen Eigenschaften von $NaHCO_3$.

Die beobachteten leichten Agglomerationen traten überwiegend bei längeren Verweilzeiten im Vorlagebehälter oder bei erhöhter Feuchte der Fluidisierluft auf. Insgesamt erwies sich die Mischqualität jedoch als stabil und reproduzierbar. Das definierte Mischungsverhältnis von 10 : 1 (Klärschlamm : Additiv) konnte unter den untersuchten Betriebsbedingungen zuverlässig eingehalten werden.



Abbildung 28 homogene Vermischung von Additiv und Klärschlammstaub in Dosierer

Inbetriebnahme der Heißgasfiltration (HGF) und Additivmodifikation

Vorlaufbetrieb zur thermischen Stabilisierung

Da die Heißgasfiltration einen stabilen Hochtemperatur-Abgasstrom erfordert, erfolgte die Erstinbetriebnahme zunächst im Vorlaufbetrieb mit Braunkohlenstaub als einen für Carbotechnik bekannten Brennstoff. Auf diese Weise konnten Filtermodul und Abgasführung materialschonend vorgewärmt, strömungsstabil beaufschlagt und unter realen thermischen Randbedingungen getestet werden, ohne bereits Einflüsse aus Klärschlamm oder Additivzugabe zu überlagern.

Der Vorlaufbetrieb diente insbesondere dazu, die thermische Belastbarkeit der Filterelemente zu überprüfen, Temperaturgradienten zu homogenisieren und einen reproduzierbaren Ausgangszustand für die nachfolgenden Additiv- und Klärschlammversuche herzustellen.

Prüfung der Mess- und Regelsysteme

Für den Betrieb der Heißgasfiltration wurden zusätzliche Mess- und Regelkreise implementiert und systematisch überprüft. Dazu zählten insbesondere:

- die BUS-Kommunikation zwischen CT-Schaltschrank, HGF-Steuerung und Datenerfassung,
- die Prüfung sämtlicher Signalpfade (Temperatur, Differenzdruck, Strömung),
- Anpassungen der Brennstoff- und Luftzuordnung,
- Erweiterungen der Visualisierung im SCADA-System,
- die Implementierung neuer sicherheitsrelevanter Grenzwerte.

Diese Maßnahmen waren essenziell, da die Heißgasfiltration nur unter temperatur-, druck- und strömungsstabilen Bedingungen zuverlässig und betriebssicher betrieben werden kann. Erst nach erfolgreicher Prüfung aller Mess- und Regelkreise wurde der Übergang in den kombinierten Betrieb mit Klärschlamm und Additiv vorgenommen.

Materialhandling, Reinigung und Einfahrbetrieb

Während der Einfahrphase wurden sämtliche Materialströme kontinuierlich begleitet. Dies umfasste die Nachbefüllung der Vorratsbehälter, die Überwachung des Additivverhaltens im Dosier- und Förderbereich, das Absaugen und Sammeln der unterschiedlichen Aschefraktionen sowie die Reinigung der Anlageninnenräume zwischen den einzelnen Versuchsfahrten.

Diese Arbeitsschritte waren erforderlich, um reproduzierbare Ausgangsbedingungen für die Additiv-Versuchsfahrten sicherzustellen und unerwünschte Beeinflussungen durch Restmaterialien oder Ablagerungen auszuschließen. Der strukturierte Einfahr- und Reinigungsbetrieb trug wesentlich dazu bei, stabile Betriebszustände zu erreichen und die Vergleichbarkeit der nachfolgenden Versuchsergebnisse zu gewährleisten.

Problemerkennung und Optimierung der Additivdosierung

In den ersten Versuchen zeigte sich ein geringerer Additivaustrag als erwartet. Die Ursachenanalyse identifizierte Brückenbildungen im Austragsbereich, potenzielle Restfeuchten im Klärschlamm sowie lokale Verdichtungen durch Luftströmungen als maßgebliche Einflussfaktoren.

In Zusammenarbeit mit dem Projektpartner LTC wurden daraufhin mehrere Optimierungsmaßnahmen umgesetzt, darunter mechanische Impulsgeber, modifizierte Austragsgeometrien, angepasste Fluidisierluftströme sowie Maßnahmen zur Reduktion der Additivfeuchte. Nach diesen Anpassungen stabilisierte sich der Additivaustrag, und die Dosierung verlief reproduzierbar.

Mit Abschluss von AP 2.3.3 standen eine technisch stabil betriebene Heißgasfiltration sowie eine reproduzierbare In-situ-Additivmodifikation zur Verfügung. Damit waren die verfahrenstechnischen



Abbildung 30 Additiv Brückenbildung und Luftrückströmung aus Dosierer



Abbildung 29 Filterdeckel Additivbehälter

Voraussetzungen geschaffen, um in AP 2.4 systematische Untersuchungen zum Dauerbetrieb, zur Aschemodifikation und zur Schwermetallfraktionierung unter praxisnahen Bedingungen durchführen zu können.

Fazit:

Die Dauerbetriebsversuche in AP 2.4 zeigen, dass die Staubfeuerung über längere Zeiträume stabil betrieben werden kann und dabei eine konstante Aschequalität liefert. Die ergänzenden pflanzenbaulichen Untersuchungen bestätigen, dass die erzeugten Aschen bereits im Rohzustand ein beachtliches Düngepotenzial besitzen und zur pflanzlichen Phosphorversorgung beitragen. Die Ergebnisse liefern wertvolle Hinweise für die Prozessoptimierung und bestätigen die Eignung der Staubfeuerungsasche als Ausgangsmaterial für die nachgeschaltete Aufbereitung im DreiSATS-Verfahren.

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

Systematische Untersuchungen unter kontinuierlichen, praxisnahen Betriebsbedingungen an der technischen Versuchsanlage

Das Arbeitspaket 2.4 stellte die abschließende und anwendungsorientierteste Stufe der gesamten verfahrenstechnischen Entwicklung im Rahmen von Hauptarbeitspaket 2 dar. Aufbauend auf den in AP 2.1 (Verbrennungsoptimierung), AP 2.2 (In-situ-Modifikation und Heißgasfiltration) sowie AP 2.3 (Umbau und Erweiterung der Versuchsanlage) gewonnenen Erkenntnissen war es Ziel dieses Arbeitspakets, den Anlagenbetrieb unter kontinuierlichen, praxisnahen Bedingungen an der technischen Staubfeuerungs-Versuchsanlage zu validieren.

Im Fokus standen dabei insbesondere die Prozessstabilität bei erhöhtem Durchsatz, die Betriebssicherheit der Heißgasfiltration, die Langzeitwirkung der In-situ-Aschemodifikation sowie das Verhalten der Gesamtanlage unter hoher thermischer und mechanischer Belastung. Die Untersuchungen dienten der Ableitung belastbarer Aussagen zur Übertragbarkeit der Ergebnisse auf größere Anlagenmaßstäbe, ohne dabei einen industriellen Dauerbetrieb vorwegzunehmen.

Im Einzelnen wurden folgende Fragestellungen adressiert:

- Wie stabil lässt sich die Staubfeuerung bei erhöhtem Durchsatz über längere, zusammenhängende Versuchszeiträume betreiben?
- Wie zuverlässig arbeitet die Heißgasfiltration unter dauerbetriebsnaher thermischer und stofflicher Belastung?
- Wie wirkt die In-situ-Aschemodifikation unter realen Langzeit-Versuchsbedingungen?
- Wie verhält sich die Gesamtanlage bei Leistungsfahrten von > 1 t/d unter variierenden Brennstoffqualitäten, einschließlich einer qualitativen Verschleißbewertung?

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Unterarbeitspakete AP 2.4.1 bis AP 2.4.4 dargestellt.

Bewertung der Aschen im Pflanzenversuch (IKTS und CT)

Im Rahmen von AP 2.4 wurden die im Dauerbetrieb erzeugten Aschen der Staubfeuerung durch das Fraunhofer IKTS in standardisierten Luzerne-Pflanzversuchen bewertet. Die Untersuchungen zeigen,

dass die Aschen grundsätzlich zur pflanzlichen Phosphorversorgung beitragen und im Vergleich zu den mineralischen Referenzdüngern ein überraschend hohes Leistungsniveau erreichen. Dies spiegelt sich

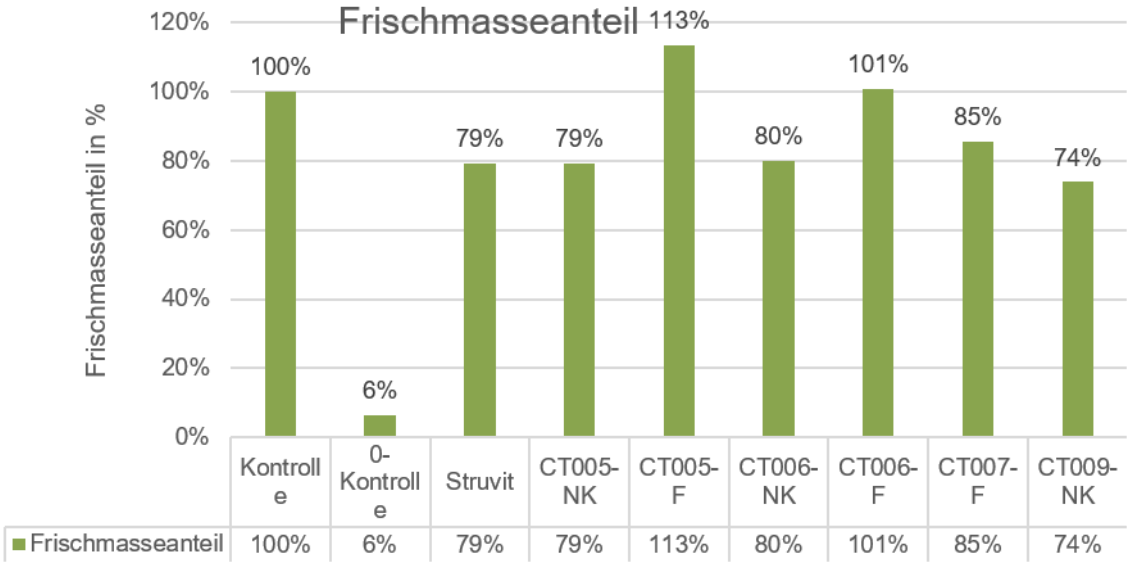
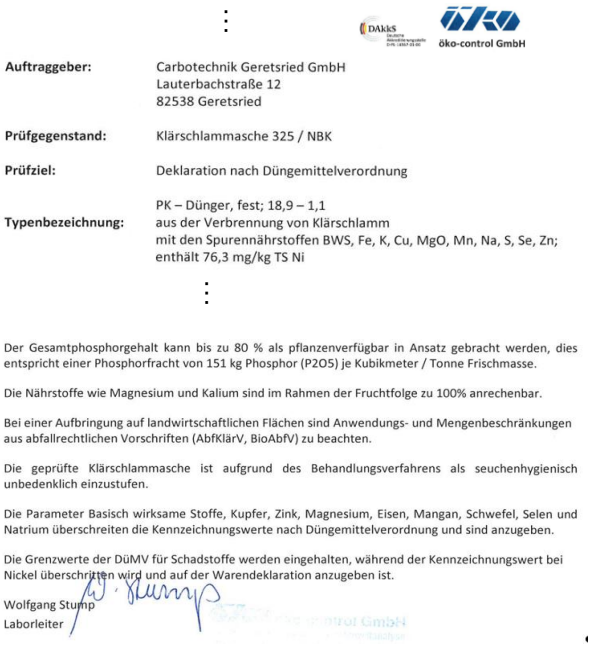


Abbildung 31 Pflanzversuch mit Spezialsubstrat (RePhoR), Vergleich zum Frischmassezuwachs bezogen auf TSP (Kontrolle = 100%)

insbesondere im Frischmassezuwachs wider: Mehrere Aschen erzielten im Mittel 80 % bis über 110 % der Frischmasseleistung der TSP-Referenz. Damit bestätigen die Versuche, dass die Staubfeuerungsasche bereits ohne Additivzugabe und ohne chemischen Aufschluss ein beachtliches pflanzenbauliches Potenzial besitzt.

Die Ergebnisse zeigen zugleich, dass die Aschen je nach Herkunft und Zusammensetzung unterschiedliche Wirkprofile aufweisen. Diese Unterschiede sind erwartbar und liefern wertvolle Hinweise für die weitere Optimierung der Prozessführung sowie für die spätere Auslegung der nachgeschalteten Aufbereitungsschritte. Insgesamt belegen die Versuche, dass die Staubfeuerungsasche eine solide Basis für die Weiterverarbeitung im DreiSATS-Verfahren darstellt und bereits im Rohzustand relevante Düngewirkung entfalten kann.

Ergänzend zu den pflanzenbaulichen Ergebnissen wurde die Asche aus der Staubfeuerung durch ein externes Labor gemäß den Vorgaben der Düngemittelverordnung (DüMV) analysiert und bewertet. Die Deklaration bestätigt, dass die Staubfeuerungsasche nicht nur pflanzenbaulich wirksam ist, sondern auch eine klare und nachvollziehbare Nährstoffcharakterisierung aufweist. Die ermittelte Analytik entspricht den Vorgaben der DüMV und zeigt, dass die in der Asche enthaltenen Phosphorfraktionen über die Fruchtfolge hinweg pflanzenverfügbar bleiben. Damit liefert die Staubfeuerung eine Aschequalität, sowohl technisch als auch regulatorisch eine belastbare Grundlage für den direkten Einsatz als Düngemittel.



⋮

öko-control GmbH

Auftraggeber: Carbotechnik Geretsried GmbH
Lauterbachstraße 12
82538 Geretsried

Prüfgegenstand: Klärschlammasche 325 / NBK

Prüfziel: Deklaration nach Düngemittelverordnung

Typenbezeichnung: PK – Dünger, fest; 18,9 – 1,1
aus der Verbrennung von Klärschlamm
mit den Spurennährstoffen BWS, Fe, K, Cu, MgO, Mn, Na, S, Se, Zn;
enthält 76,3 mg/kg TS Ni

⋮

Der Gesamtphosphorgehalt kann bis zu 80 % als pflanzenverfügbar in Ansatz gebracht werden, dies entspricht einer Phosphorfracht von 151 kg Phosphor (P2O5) je Kubikmeter / Tonne Frischmasse.

Die Nährstoffe wie Magnesium und Kalium sind im Rahmen der Fruchtfolge zu 100% anrechenbar.

Bei einer Aufbringung auf landwirtschaftlichen Flächen sind Anwendungs- und Mengenbeschränkungen aus abfallrechtlichen Vorschriften (AbfKlärV, BioAbfV) zu beachten.

Die geprüfte Klärschlammasche ist aufgrund des Behandlungsverfahrens als seuchenhygienisch unbedenklich einzustufen.

Die Parameter Basisch wirksame Stoffe, Kupfer, Zink, Magnesium, Eisen, Mangan, Schwefel, Selen und Natrium überschreiten die Kennzeichnungswerte nach Düngemittelverordnung und sind anzugeben.

Die Grenzwerte der DüMV für Schadstoffe werden eingehalten, während der Kennzeichnungswert bei Nickel überschritten wird und auf der Warendeklaration anzugeben ist.

Wolfgang Stump
Laborleiter

Abbildung 32, Asche aus Staubfeuerung, Deklaration nach DüMV

AP 2.4.1, Vorbereitung und Validierung dauerbetriebsnaher Versuchsfahrten

(Steigerung Durchsatz auf 800kg/d)

AP 2.4.1 Vorbereitung und Validierung des Dauerbetriebs

Die Vorbereitung der dauerbetriebsnahen Versuchsfahrten stellte einen entscheidenden Schritt dar, um die Staubfeuerung im projektintern definierten Ziel-Durchsatz von 800 kg Klärschlammstaub pro Tag zu validieren. Dieser Durchsatz bedeutete eine deutliche Steigerung gegenüber zuvor durchgeführten Einzel- und Parameterfahrten und bildete die Grundlage für belastbare Aussagen zur Prozessstabilität unter kontinuierlicher Belastung.

Die Untersuchungen zielten darauf ab, einen stabilen, reproduzierbaren Anlagenbetrieb im Dauerbetrieb unter praxisnahen Randbedingungen sicherzustellen.

Anpassung der Brennstofflogistik und des Dosiersystems

Für die dauerbetriebsnahen Versuchsfahrten wurde die Brennstoffbereitstellung so ausgelegt, dass ein kontinuierlicher und unterbrechungsfreier Materialfluss sichergestellt werden konnte. Hierzu wurde eine Big-Bag-gestützte Versorgung implementiert, die es erlaubte, größere Mengen Klärschlammstaub vorzuhalten und den Vorlagebehälter während des laufenden Betriebs zu wechseln, ohne die Feuerung abschalten zu müssen.

Parallel dazu wurde die Dosiermaschine gezielt für den kontinuierlichen Betrieb optimiert. Die Anpassungen betrafen insbesondere die Strömungsgüte innerhalb der Dosierzonen, die Stabilität der Fluidisierung, die Robustheit gegenüber Schwankungen im Kornband sowie die Vermeidung stoßender oder pulsierender Förderung. Durch die zusätzliche Implementierung dieser Maßnahmen konnte ein

stabiler und reproduzierbarer Durchsatz von 800 kg/d über längere Versuchszeiträume realisiert werden.

Anpassung der Brennstoff- Luftzuordnung

Eine weitere zentrale Stellgröße stellte die Verbrennungsluftführung dar. Das Verhältnis von Primär-, Sekundär- und Tertiärluft wurde neu justiert, um trotz erhöhter Brennstoffmassenströme ein stabiles Flammenbild, eine vollständige Einzelkornoxidation sowie eine gleichmäßige Temperaturverteilung im Brenner und in der Nachbrennkammer sicherzustellen. Da die Staubfeuerung konzeptbedingt in einer leicht unterstöchiometrischen Betriebsweise gefahren wird, kam der präzisen Regelung der Verbrennungsluft eine besondere Bedeutung zu. Ziel war es, einerseits die NO_x-Bildung zu minimieren und andererseits CO-Spitzen zu vermeiden, die insbesondere bei erhöhtem Durchsatz auftreten können.

Ergänzend zur Luftführung wurde der O_2-Regelkreis für den Brennstoffeintrag implementiert, der sich während der dauerbetriebsnahen Versuchsfahrten als zentrale Führungsgröße erwies. Die Anlage erfasst kontinuierlich den Sauerstoffgehalt im Abgas und passt darauf basierend die Drehzahl der Dosiermaschine an. Auf diese Weise wird der Brennstoffeintrag dynamisch an den aktuellen Heizwert und die Materialinhomogenität angepasst. Durch die Kopplung von Verbrennungsluftmenge und Brennstoffdosierung konnte das Brennstoff-Luft-Verhältnis über den gesamten Leistungsbereich hinweg stabil gehalten werden. Dies führte zu einer sehr robusten Verbrennung, einem engen niedrigen Emissionsband und einer durchgängig oberhalb der 850 °C liegenden Temperatur in der Nachbrennkammer gemäß 17. BImSchV.



Abbildung 33 O2-Regelkreis

Die Abbildung zeigt die prinzipielle Funktionsweise der Regelung nach O2 und der Nachsteuerung der Dosierscheibendrehzahl um den Brennstoffeintrag anzupassen. Grundsätzlich wäre auch eine Regelung der Luftmengen möglich. Aufgrund der höheren Trägheit der Gebläse die mit der Größe der Anlage mitwächst hat sich die Vorgehensweise mit der Variante der Brennstoffnachführung als robuster und sehr zuverlässig erwiesen.

Mit der erfolgreichen Umsetzung von AP 2.4.1 wurde damit die technische Grundlage für die weiterführenden Untersuchungen der nachfolgenden Unterarbeitspakete geschaffen.

AP 2.4.2 Untersuchung und Optimierung der Heißgasfiltration in der Staubfeuerung

Im Arbeitspaket 2.4.2 wurde die Heißgasfiltration erstmals unter dauerbetriebsnahen Versuchsbedingungen an der technischen Staubfeuerungs-Versuchsanlage systematisch untersucht. Die Heißgasfiltration stellt ein zentrales Element des DreiSATS-Prozesses dar, da sie die gezielte Abscheidung thermisch flüchtiger Schwermetalle im Hochtemperaturbereich ermöglicht und damit eine klare stoffliche Trennung entlang der Prozesskette unterstützt.

Integration und thermisches Verhalten des HGF-Moduls

Die Heißgasfiltration wurde als Bypass in den Abgasstrom der Nachbrennkammer integriert. Dadurch können Schwermetalle, die bei den dort vorherrschenden Temperaturen in flüchtige Verbindungen übergehen, abgeschieden werden, bevor es im nachgeschalteten, kühleren Abgastrakt zu einer unkontrollierten Rekondensation kommt.

Die kontinuierlich erfassten Temperaturverläufe am Eintritt der Heißgasfiltration, innerhalb des Filtermoduls sowie im Abgasabzug zeigten über die gesamte Versuchsdauer hinweg geringe Temperaturschwankungen, eine stabile Filtercharakteristik, keinen signifikanten Anstieg des Differenzdrucks sowie ein zuverlässig arbeitendes Abreinigungssystem. Damit konnte ein stabiler Betrieb der Heißgasfiltration auch unter dauerbetriebsnaher thermischer Belastung nachgewiesen werden.

Die Bewertung der Schwermetallverteilung im Rahmen der dauerbetriebsnahen Versuchsfahrten bei einem Ziel-Durchsatz von 800 kg/d bestätigte die in den vorangegangenen Arbeitspaketen gewonnenen Erkenntnisse. Die Verlagerung thermisch flüchtiger Schwermetalle, insbesondere von Zink, Blei und Cadmium**,** erwies sich auch unter kontinuierlicher Belastung der technischen Versuchsanlage als stabil und reproduzierbar**.**

Für weniger thermisch flüchtige Schwermetalle wie Nickel und Chrom zeigte sich erwartungsgemäß geringe relevante Entfrachtung. Diese Elemente verbleiben überwiegend in der festen Aschematrix und sind durch den gewählten Ansatz gering beeinflussbar. Die Ergebnisse unterstreichen damit, dass die Schwermetallreduktion im DreiSATS-Prozess gezielt, elementabhängig und an die thermodynamischen Eigenschaften der jeweiligen Schwermetalle gebunden ist und keine pauschale Abreicherung aller Elemente darstellt.

AP 2.4.3, Untersuchung und Bewertung der in-Situ Aschemodifikation

Im Rahmen von AP 2.4.3 wurde die In-Situ-Modifikation der Klärschlammasche unter stabilen, dauerbetriebsnahen Bedingungen erneut bewertet. Ziel war es, die in den vorangegangenen Erkenntnissen zur Additivwirkung unter realistischen Betriebsbedingungen zu überprüfen und deren Übertragbarkeit auf längere Betriebszeiträume abzusichern.

Die Versuche zeigten, dass die Zugabe von Natriumadditiven auch im Dauerbetrieb eine stabile und reproduzierbare Wirkung entfaltet. Die in AP 2.2 beschriebenen Effekte, insbesondere die Erhöhung der neutralammoncitrat-löslichen Phosphorfraktionen sowie die Entfrachtung ausgewählter Schwermetalle, konnten unter den Bedingungen des Dauerbetriebs bestätigt werden.

Die modifizierten Aschen zeigten zudem eine homogenere Struktur und eine feine, gleichmäßige Korngrößenverteilung. Diese Eigenschaften sind insbesondere für nachgeschaltete Verwertungsschritte wie Granulierung oder Pelletierung von Vorteil und unterstützen die Weiterverarbeitung im Rahmen des Gesamtprozesses.

Wesentlich ist, dass die Additivzugabe im Dauerbetrieb keine negativen Auswirkungen auf den Verbrennungsprozess hatte. Weder das Flammenbild noch die Emissionswerte für NO_x und CO oder die Temperaturführung im Brenner und in der Nachbrennkammer wurden beeinträchtigt. Die Prozessstabilität blieb über die gesamte Versuchsdauer erhalten.

Damit konnte die In-Situ-Aschemodifikation unter realen Betriebsbedingungen als robustes und verfahrenstechnisch geeignetes Konzept bestätigt werden. Die Ergebnisse aus AP 2.4.3 zeigen, dass die im Projekt verfolgte Additivstrategie auch im Dauerbetrieb zuverlässig wirkt und die Deklaration nach DüMV möglich ist. Weiter bietet die feine und seiner spezifisch hohen Oberfläche beste Voraussetzungen weiterführende Veredelungsprozesse wie z.B. Säureaufschluss zur Herstellung eines definierten Düngergranulates.

Aschegranulierung

Im Anschluss an die Bewertung der In-Situ-Modifikation wurde ergänzend untersucht, inwieweit die im Dauerbetrieb erzeugten Aschen für nachgeschaltete Verwertungsschritte geeignet sind. Hintergrund dieser Betrachtung war die Frage, ob die durch die Additivzugabe erreichte Homogenität und Feinheit der Asche eine weitergehende Formgebung ermöglicht und damit eine potenzielle Ausbringung als Düngemittel unterstützt.



Abbildung 34 Granulierte Asche aus der Staubfeuerung

Zu diesem Zweck wurde eine Kleinmengen-Granulierung der modifizierten Aschen durchgeführt. Die Versuche zeigten, dass die erzeugte Asche aufgrund ihrer feinen und gleichmäßigen Struktur ein gutes Formgebungsverhalten aufweist und stabile Granulate gebildet werden konnten. Dies bestätigt die im Rahmen der In-Situ-Modifikation erreichten Verbesserungen der Aschequalität und unterstreicht die grundsätzliche Eignung des Materials für eine spätere Nutzung im landwirtschaftlichen Bereich.

Die Abbildung zeigt das im Rahmen der Versuche hergestellte granulierte Material.

AP 2.4.4, Kontinuierlicher Betrieb unter Einsatzbedingungen (> 800 kg/d, Leistungsfahrt) mit variierenden Schlämmen und inkl. Verschleißbewertung

Die Leistungsfahrten mit über 1 t Klärschlammstaub pro Tag belegten eindrucksvoll, dass die im Vorfeld umgesetzten Maßnahmen zur Anlagenoptimierung erfolgreich waren. Selbst unter hoher thermischer und mechanischer Belastung zeigte die Staubfeuerung ein stabiles Betriebsverhalten und erfüllte die angestrebten Leistungsparameter zuverlässig.

Betriebsverhalten unter hoher Belastung

Der Dauerbetrieb diente dazu, die Wirksamkeit der zuvor implementierten verfahrenstechnischen und MSR-technischen Maßnahmen unter realitätsnahen Bedingungen zu überprüfen. Über längere Betriebsphasen hinweg wurde die Anlage mit unterschiedlichen Klärschlammqualitäten und variierenden Brennstoffmassenströmen gefahren, um die Robustheit der Verbrennung, der Luftstufung sowie der O_2-geführten Brennstoffdosierung zu validieren.

Die Versuchsreihen zeigten, dass die eingeleiteten Optimierungen im Zusammenspiel aus Verbrennungsluftführung, O_2-Regelung und Brennstoffdosierung zuverlässig arbeiten. Die Anlage konnte über den gesamten Zeitraum stabil betrieben werden, wobei sowohl Emissionsverhalten als auch Temperaturführung innerhalb der angestrebten engen Toleranzbänder lagen. Insbesondere die dynamische Anpassung des Brennstoffeintrags über den O_2-Regelkreis erwies sich als zentraler Baustein für einen ruhigen, reproduzierbaren Anlagenbetrieb.

Damit wurde im Dauerbetrieb nachgewiesen, dass die umgesetzten Maßnahmen nicht nur im Versuchsbetrieb, sondern auch unter kontinuierlichen Bedingungen technisch belastbar sind und eine robuste Grundlage für die weiteren Untersuchungen der nachfolgenden Arbeitspakete bilden.

Verschleißbewertung

Im Rahmen des Dauerbetriebs wurde eine systematische Verschleißbewertung der für die Staubfeuerung relevanten Komponenten durchgeführt. Aufgrund des hohen Ascheanteils im Brennstoff war insbesondere an der Dosierscheibe sowie an der Umlenkung der Brennerlanze mit erhöhtem abrasivem Verschleiß zu rechnen. Die Untersuchungen zeigten jedoch, dass die tatsächlichen Abnutzungserscheinungen deutlich geringer ausfielen als ursprünglich angenommen. Die beobachteten Standzeiten bewegen sich in einer Größenordnung, wie sie auch aus dem Betrieb mit anderen mineralisch geprägten Brennstoffen bekannt ist.

Eine lokal begrenzte Verschleißstelle trat an einem thermisch besonders exponierten Bauteil auf. Diese Erscheinung ist jedoch auf eine konstruktionsbedingte Besonderheit der Pilotanlage zurückzuführen, die aus den räumlichen Gegebenheiten des Bestandsgebäudes resultierte. Für eine großtechnische Anlage würde an dieser Stelle eine andere konstruktive Ausführung gewählt, sodass dieser Befund nicht als systemimmanent zu bewerten ist.

Insgesamt bestätigen die Ergebnisse, dass die Anlage auch unter realitätsnahen Dauerbetriebsbedingungen eine hohe mechanische und thermische Robustheit aufweist. Je nach Anlagengröße und

spezifischen Anforderungen können einzelne Komponenten materialseitig weiter optimiert werden, ohne dass grundlegende Anpassungen am Verfahren erforderlich wären.

II.1.3 Hauptarbeitspaket 5: Bilanzierungen, Stakeholder und Vorbereitung Anschlussphase zur kommerziellen Umsetzung

AP 5.1.2 Durchführung Life-Cycle-Assessment und Ökobilanzierung

Im Rahmen der Erstellung der Emissionsdaten für die Ökobilanzierung (AP 5.1.2) wurde eine Abstimmung mit dem Kompetenzzentrum Wasser Berlin (KWB) durchgeführt. Ziel war es, der Vorgabe des Projektträgers folgend, die Emissionsdaten an einer Referenzanlage auszurichten. Im Gespräch stellte sich jedoch heraus, dass die vom KWB bereitgestellten Werte überwiegend auf Planungsunterlagen der KS-Monoverbrennungsanlage Waßmannsdorf basieren und keine realen Betriebsdaten darstellen. Mehrere Schadstoff- und Emissionsangaben beruhen auf Annahmen oder Hochrechnungen aus Aschebilanzen und weisen teils erhebliche technische Widersprüche auf. KWB bestätigte, dass diese Werte nicht für eine belastbare Ökobilanzierung geeignet sind.

Aufgrund dieser Unstimmigkeiten wurde entschieden, für die LCA die im Projekt ermittelten bzw. realistisch abgeleiteten Emissionsdaten der Staubfeuerung zu verwenden. Diese basieren auf den tatsächlichen Stoffströmen, dem gemessenen Kohlenstoff- und Schwefelgehalt des Klärschlamms sowie den realen Abgasparametern. Die höheren spezifischen CO_2- und Abgasvolumenwerte im Vergleich zur Referenzanlage ergeben sich folgerichtig aus den unterschiedlichen Bilanzgrenzen, dem höheren Trockensubstanzgehalt des eingesetzten Brennstoffs und der realen Verbrennungscharakteristik der Staubfeuerung.

Im Zuge der Zusammenarbeit wurden dem IKTS zudem sämtliche angeforderten Betriebs-, Prozess- und Stoffstromdaten vollständig zur Verfügung gestellt. Diese umfassen u. a. Durchsatzdaten, Energieverbräuche, Abgasvolumenströme sowie die analytischen Ergebnisse der eingesetzten Klärschlämme und Aschen. Die entsprechenden Informationen sind in den fachlichen Ausarbeitungen des Schlussberichts an den jeweils thematisch passenden Stellen dokumentiert und bilden die Grundlage für die vom IKTS durchgeführte Ökobilanzierung.

Die verwendeten Emissionsdaten sind technisch plausibel, konsistent und für die Ökobilanzierung geeignet. Die Abweichungen zur Referenzanlage wurden dokumentiert und begründet. Entsprechend der Empfehlung des KWB werden die Emissionen zusätzlich in g/kg TM ausgewiesen.

Emission	Messwert mg/Nm³ * (11 % O_2)	Grenzwert 17. BImSchV	Angestrebter Wert	Spezifische Emission mg/kg TM
CO	40	100	90	371
SO_2	1.728**	150	140	1.298
N_2O	20	–	–	185
NOx	750	150	140	1.298
NH_3	0	–	–	-
CO_2	1,311 g/Nm³***	–	–	12.156 g/kg TM

Abbildung 35 Ermittelte Emissionen bei der Staubfeuerung (beim gewählten Klärschlamm)

* gerechnet auf Bezugssauerstoff nach 17. BImSchV = 11 %
**bei einem angenommen Mittelwert von S = 0,9 % im KS trocken
***= Rechenwert bei 31 % C auf TS (Quelle: Material LAV / Zorbau – Analyse JenaBios)

Zusätzlich ist zu berücksichtigen, dass Lachgas (N_2O) ein besonders klimaschädliches Spurengas ist. Mit einem Treibhauspotenzial von rund dem 273-fachen von CO_2 trägt es erheblich zur Treibhausbildung bei. Die im Projekt ermittelten N_2O-Emissionen der Staubfeuerung liegen mit 185 mg/kg TM um den Faktor 14 niedriger als bei der Rostfeuerung (2.529 mg/kg TM) und um den Faktor 5 niedriger als bei der

Wirbelschichtfeuerung (1.000 mg/kg TM). Aufgrund der hohen CO_2-Äquivalenz von Lachgas führt diese Reduktion zu einem überproportionalen Vorteil im Treibhauspotenzial der Staubfeuerung.

II.1.3.1 AP 5.2: Ableitung eines Grundkonzeptes zur großtechnischen Umsetzung im Produktionsmaßstab

Ziel des Arbeitspakets AP 5.2 war es, die im Projekt DreiSATS gewonnenen verfahrenstechnischen, emissionsbezogenen und aschechemischen Erkenntnisse in ein konsistentes, realitätsnahes Grundkonzept für eine großtechnische Staubfeuerungsanlage zur monothermen Klärschlammverwertung zu überführen. Der Fokus lag dabei nicht auf einer detaillierten Ausführungsplanung, sondern auf der Ableitung einer technisch belastbaren Anlagenkonfiguration, deren Dimensionierung und Betriebsweise bereits einem möglichen realen Anwendungsfall entsprechen.

Die Entwicklung dieses Grundkonzeptes erfolgte in einem iterativen Engineering-Prozess, in dem Stoff- und Energiebilanzen, Prozessschaubilder, Simulationsrechnungen und eine räumliche Anlagenkonfiguration eng miteinander verknüpft wurden. Die Stoffstromsystematik wurde im Projektverlauf schrittweise weiterentwickelt und zum Projektende aktualisiert, um den zuletzt festgelegten Anlagenaufbau sowie die konkretisierte Anlagengröße vollständig abzubilden. Die dargestellten Stoffströme stellen damit keinen Zwischenstand, sondern die abschließende Referenzkonfiguration der betrachteten großtechnischen Anlage dar.

Ergänzend wurden ein verknüpftes Prozessschaubild in Form einer Excel-basierten Stoffstromübersicht sowie ein 3D-Modell der Referenzanlage erstellt, in denen alle relevanten Input-, Output- und Kreislaufströme sowie die räumliche Anordnung der Haupt- und Nebenaggregate konsistent abgebildet sind. Diese Arbeiten verdeutlichen den hohen konzeptionellen und ingenieurtechnischen Aufwand, der in die Ableitung eines realitätsnahen, standortunabhängigen Referenzkonzeptes eingeflossen ist.

Prozessstruktur der Referenzanlagenkonfiguration

Das im Rahmen von AP 5.2 entwickelte Anlagenkonzept basiert auf einer klar strukturierten, modularen Prozessführung, die eine stabile Betriebsweise, hohe Anlagenverfügbarkeit und eine gezielte stoffliche wie energetische Nutzung der Prozessströme ermöglicht. Die Prozessstruktur wurde im Projektverlauf iterativ verfeinert und mehrfach mit den Ergebnissen aus den verfahrenstechnischen Untersuchungen abgeglichen, um eine realitätsnahe und technisch belastbare Referenzkonfiguration abzuleiten.

Zur systematischen Darstellung wurde der Gesamtprozess in vier funktional getrennte, jedoch über definierte Schnittstellen miteinander verknüpfte Teilprozesse gegliedert. Diese Struktur bildet die Grundlage für die Stoff- und Energiebilanzen sowie für die räumliche Anlagenkonfiguration:

- Teilprozess 1: Klärschlammverwertung (Hauptprozess) Umfasst Annahme, Pufferung, Mischung, Trocknung, Mahlung, Staubfeuerung und mehrstufige Ascheabtrennung. Die im Projekt gewonnenen Erkenntnisse zu Verbrennungsführung, Partikelgrößenverteilung, Additivzugabe und Aschequalität fließen direkt in die Auslegung ein.
- Teilprozess 2: Energetische Verwertung (Nebenprozess) Nutzt die im Hauptprozess freigesetzte thermische Energie zur Eigenversorgung der Anlage und zur potenziellen externen Nutzung. Die Auslegung ist bewusst flexibel gehalten, um unterschiedliche Standortbedingungen abbilden zu können.
- Teilprozess 3: Prozessluftbereitstellung und Abluftbehandlung (Hilfsprozess) Beinhaltet Prozessluftführung, Abluftbehandlung aus der Trocknung sowie die Vermeidung von Rückbelastungen der Kläranlage. Die Auslegung folgt dem im Projekt definierten Grundsatz einer abwasserfreien Prozessführung.
- Teilprozess 4: Brennluftbereitstellung und Rauchgasreinigung (Hilfsprozess) Umfasst Brennluftführung, Nachbrennkammer gemäß 17. BImSchV, mehrstufige Staub- und Ascheabscheidung, Heißgasfiltration sowie nachgeschaltete Abgasreinigung. Die Entscheidung für eine SCR-Stufe basiert auf den im Projekt gewonnenen Emissionsdaten.

Die Gliederung in Teilprozesse ermöglicht eine transparente Darstellung der Stoff- und Energieströme, eine klare Abgrenzung von Haupt-, Neben- und Hilfsfunktionen sowie eine modulare Skalierbarkeit einzelner Anlagenteile. Sie bildet damit die konzeptionelle Grundlage für die großtechnische Umsetzung.

Systemgrenzen der Betrachtung

Die in AP 5.2 betrachtete Systemgrenze umfasst sämtliche stofflichen und energetischen Ströme von der Klärschlammannahme bis zur gereinigten Abluft. Dazu gehören die Erzeugung und Abtrennung aller relevanten Aschefraktionen sowie die interne Nutzung und potenzielle externe Abgabe von Energie. Die Systemgrenze wurde im Projektverlauf mehrfach überprüft und angepasst, um sicherzustellen, dass alle wesentlichen Prozesspfade der großtechnischen Referenzanlage vollständig abgebildet werden.

Nicht Bestandteil der Betrachtung sind standortspezifische Genehmigungsprozesse, konkrete Anbindungsinfrastrukturen externer Netze oder Detailengineering einzelner Komponenten. Diese Abgrenzung ist bewusst gewählt, um ein standortunabhängiges, aber technisch realitätsnahes Anlagenkonzept zu entwickeln, das als Grundlage für weiterführende Planungs- und Entscheidungsprozesse dienen kann.

Die definierte Systemgrenze bildet damit den Rahmen für die Stoff- und Energiebilanzen, die räumliche Anlagenkonfiguration sowie die funktionale Einordnung der Haupt- und Hilfsprozesse. Sie stellt sicher, dass das entwickelte Konzept sowohl vollständig als auch konsistent ist und alle für eine großtechnische Umsetzung relevanten Prozessschritte berücksichtigt.

Stoffstromkonzept und Bilanzannahmen der Referenzanlage

Die Auslegung der Referenzanlagenkonfiguration basiert auf einer konsistenten Stoffstrombilanz, die sämtliche relevanten Input-, Output- und Kreislaufströme der Anlage abbildet. Die Stoffstromsystematik wurde im Projektverlauf iterativ weiterentwickelt und zum Projektende finalisiert, sodass sie den zuletzt definierten Anlagenaufbau sowie die konkretisierte Anlagengröße vollständig widerspiegelt. Damit stellt die Bilanzierung keinen Zwischenstand, sondern die abschließende Referenzkonfiguration der großtechnischen Anlage dar.

Eingangsstoffe

Zur realitätsnahen Abbildung dezentraler Rahmenbedingungen berücksichtigt die Referenzbilanz mehrere Klärschlammfraktionen:

- mechanisch entwässerter Klärschlamm aus dem Eigenbetrieb,
- mechanisch entwässerter, extern angelieferter Klärschlamm,
- extern vorgetrockneter Klärschlamm (z. B. solar getrocknet).

Die Aufteilung der Stoffströme wurde so gewählt, dass typische Schwankungen in Verfügbarkeit und Trockensubstanz berücksichtigt werden und ein kontinuierlicher Anlagenbetrieb gewährleistet bleibt. Die Eingangsmengen bilden die Grundlage für die Dimensionierung von Annahme- und Pufferkapazitäten, Trocknung, Mahlung und Staubfeuerung.

Interne Stoffströme

Innerhalb der Anlage entstehen mehrere interne Stoffströme, die für die Prozessführung und Bilanzierung relevant sind, darunter:

- getrockneter Klärschlamm mit definierter Restfeuchte,
- gemahlener Klärschlammstaub im Zielkornband,
- Rückführ- und Austragsströme aus Trocknung und Abluftbehandlung,
- Aschefraktionen aus den jeweiligen Abscheidestufen

Die Bilanzierung berücksichtigt typische Betriebsunterbrechungen, variierende Lieferprofile sowie Pufferfunktionen zwischen den Prozessstufen. Diese Aspekte wurden im Projektverlauf detailliert analysiert und in die Auslegung integriert, um eine robuste und realitätsnahe Prozessführung sicherzustellen.

Outputströme

Die wesentlichen Outputströme der Referenzanlage umfassen:

- Klärschlammaschen aus Nachbrennkammer, Zyklon, Heißgasfilter und Filter,
- gereinigte Abluft nach Rauchgasreinigung,
- thermische und elektrische Energie zur internen Nutzung oder externen Abgabe,
- Nebenprodukte aus der Abluftreinigung (z. B. Ammoniumsulfatlösung).

Die getrennte Erfassung der Aschefraktionen ist ein zentrales Element des Anlagenkonzeptes, da sie die gezielte Schwermetallentfrachtung ermöglicht und unterschiedliche Verwertungs- bzw. Weiterverarbeitungspfade unterstützt.

Stoffstromtabelle

Die Stoffstromtabelle fasst die wesentlichen Stoffströme der Referenzanlage quantitativ zusammen und bildet die Grundlage für:

- die energetische Bilanzierung,
- die Auslegung der Hauptaggregate,
- die Bewertung von Rückhalte- und Abscheideleistungen.

Sie ist vollständig mit dem Prozessschaubild verknüpft und wurde im Projektverlauf mehrfach aktualisiert, um die finale Anlagenkonfiguration konsistent abzubilden.

Eckdaten	Volllast		pro Jahr	
Betriebsstunden pro Jahr	8.000	h		
Input mechanisch entwässerter Klärschlamm				
Klärschlamm, mechanisch getrocknet	2.125	kg/h	17.000	to/a
enthaltene Trockensubstanz	25	% TS		
Heizwert des getrockneten Klärschlamms	13.475	kJ/kg		
Aschegehalt in der Trockensubstanz	37	%		
Input extern getrockneter Klärschlamm				
extern getrockneter Klärschlamm	250	kg/h	2.000	to/a
enthaltene Trockensubstanz	90	% TS		
Heizwert extern getrockneter Klärschlamm	13.475	kJ/kg		
Aschegehalt in der Trockensubstanz	37	%		
Zusatzbrennstoff				
Erdgas (keine Stützflamme erforderlich, Zündgasmenge nicht relevant)	0,0	Nm³/h	0	Nm³/a
Gasverbrauch zum hochfahren aus völlig kaltem Zustand				
Anzahl der Starts pro Jahr aus dem völlig kaltem Zustand	4	Stück		
Gasmenge, Annahme 1 Stunde bei voller Leistung	324	Nm³	324	Nm³/a
Prozess **Trocknung:**				
Restfeuchte nach Trockner	10	%		
angesetzter spezifischer elektrischer Energieverbrauch	0,04	kWh/kgH2O		
angesetzter spezifischer thermischer Energieverbrauch	0,65	kWh/kgH2O		

thermischer Leistungsbedarf für Trocknung auf angesetzte Restfeuchte	995	kW	7.956	MWh/a
durch Trockner getrockneter Klärschlamm mit geplanter Restfeuchte	590	kg/h	4.722	to/a
Turbine:				
erzeugte elektrische Leistung	235	kW	1.882	MWh/a
"thermische Energiebilanz":				
Überschüssige Energie (+), Fehlende Energie (-)	1.304	kW	10.436	MWh/a
Asche und Rauchgas:				
Asche/Dünger nach Verbrennung	279	kg/h	2.232	to/a
Zugabe von Sorptionsmittel NaHCO3	36	kg/h	287	to/a
Zugabe Harnstofflösung (40%ige Lösung)	13	kg/h	104	to/a
Abgasmenge	11.525	Nm³/h		
Gewählte Betriebskosten:				
Elektrischer Leistungsbezug	199	kW	1.592	MWh/a
davon entfällt auf die Trocknung	55	kW		
davon entfällt auf die Mahlung	13	kW		

Tabelle 4 Stoffstrombilanz der Referenzanlage

Energetische Bilanz und Eigenenergieversorgung

Die im Rahmen von AP 5.2 erstellte Stoff- und Energiebilanz zeigt, dass die betrachtete Referenzanlagenkonfiguration sowohl thermisch als auch elektrisch grundsätzlich eigenständig betreibbar ist. Die Bilanzierung wurde iterativ entwickelt, mehrfach mit den verfahrenstechnischen Ergebnissen abgeglichen und bildet den finalen Stand der großtechnischen Auslegung ab.

Der elektrische Eigenbedarf der Anlage ergibt sich aus den wesentlichen Verbrauchern der Prozesskette und beläuft sich in der bilanzierten Konfiguration auf rund 199 kW. Davon entfallen:

- ca. 55 kW auf den Trocknungsprozess,
- ca. 13 kW auf die Mahlung,
- der verbleibende Leistungsbedarf auf Fördertechnik, Abluft- und Rauchgasbehandlung sowie weitere Hilfsaggregate.

Dem gegenüber steht eine ermittelte elektrische Erzeugungsleistung von rund 235 kW, sodass sich bereits auf Basis konservativer Annahmen ein positiver elektrischer Saldo ergibt. Die Anlage wäre in dieser Konfiguration in der Lage, ihren elektrischen Bedarf vollständig aus dem eigenen Prozess zu decken.

Die zugrunde gelegte elektrische Erzeugungsleistung basiert auf einer bewusst robust ausgelegten Kombination aus Dampferzeugung und Turbine. Die Auslegung wurde nicht auf maximale Effizienz optimiert, sondern auf Betriebssicherheit, technische Reserve und Übertragbarkeit. Eine weitergehende Feinoptimierung, etwa durch Anpassung der Dampfdruck- und Temperaturniveaus oder durch eine anwendungsoptimierte Turbinenkonfiguration, könnte die elektrische Ausbeute zusätzlich erhöhen. Dies war jedoch nicht Ziel von AP 5.2, da der Schwerpunkt auf der Ableitung eines realitätsnahen, belastbaren Referenzkonzeptes lag.

Unabhängig davon belegt die Bilanz, dass das entwickelte Anlagenkonzept bereits in der betrachteten Grundkonfiguration die Voraussetzungen für einen energetisch autarken Betrieb erfüllt. Die Kombination aus stabiler thermischer Verwertung, interner Nutzung der Prozessenergie und bedarfsgerechter

Stromerzeugung stellt einen wesentlichen Vorteil der Staubfeuerung im dezentralen Einsatz dar und unterstreicht die technische Reife des entwickelten Konzepts.

Stoffstromübersicht (grafische Darstellung)

Zur besseren Nachvollziehbarkeit der komplexen Stoffbeziehungen wurde ergänzend zur tabellarischen Bilanz eine grafische Stoffstromübersicht erstellt. Diese Darstellung visualisiert die Haupt- und Nebenstoffströme entlang der gesamten Prozesskette, die Kopplung der vier Teilprozesse sowie die mengenmäßigen Relationen zwischen Input-, internen und Outputströmen.

Die grafische Übersicht ist vollständig mit der Stoffstromtabelle und dem zugrunde liegenden Berechnungsmodell verknüpft. Änderungen an Stoffströmen oder Betriebsparametern wirken sich dadurch unmittelbar auf die grafische Darstellung aus. Diese enge Kopplung zwischen Bilanzierung, Prozessmodell und Visualisierung verdeutlicht den hohen konzeptionellen und ingenieurtechnischen Aufwand, der in die Entwicklung der Referenzanlagenkonfiguration eingeflossen ist.

Die Stoffstromübersicht bildet damit ein zentrales Element des Anlagenkonzeptes: Sie stellt die finalen Stoffbeziehungen der großtechnischen Referenzanlage konsistent dar und dient als Grundlage für die energetische Bewertung, die räumliche Anlagenkonfiguration sowie die funktionale Einordnung der Prozessschritte.

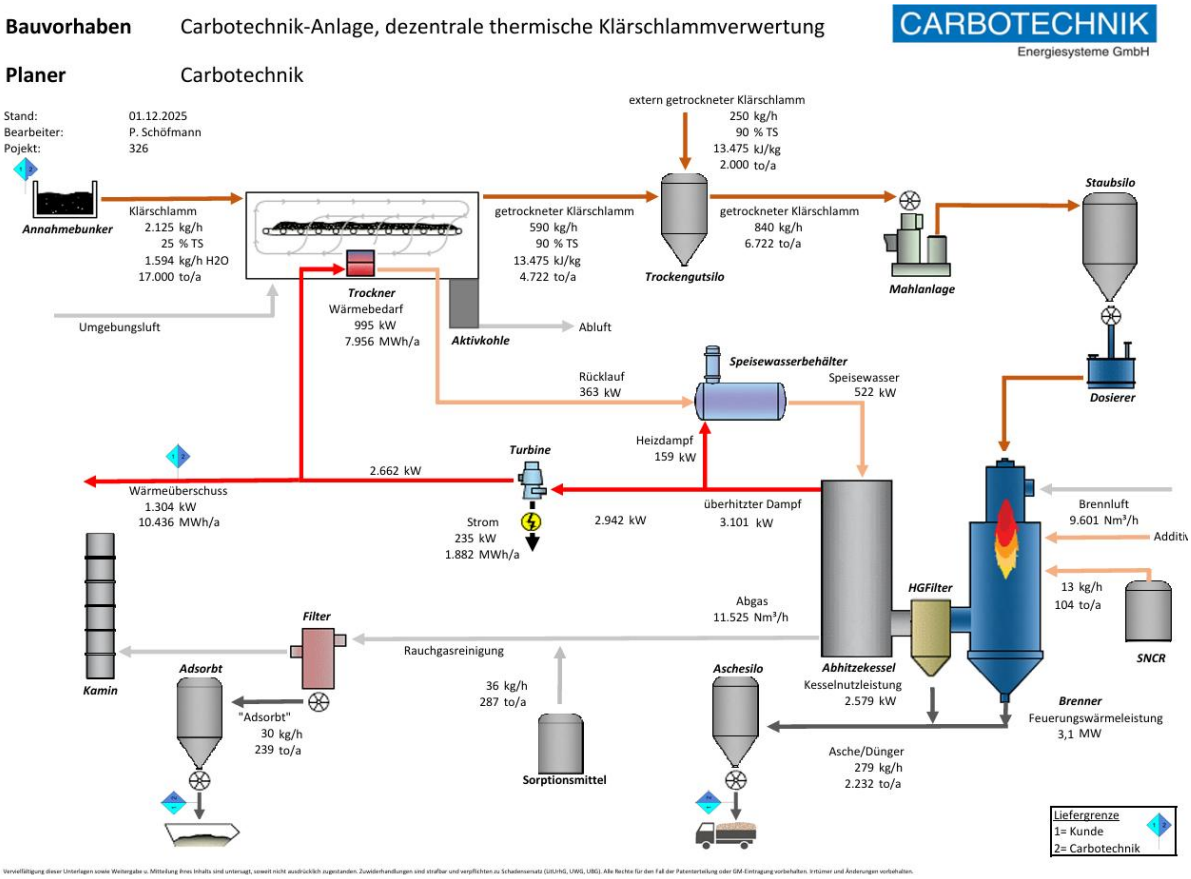


Abbildung 36 Stoffstromübersicht der Referenzanlagenkonfiguration

Dezentraler Ansatz und Herleitung der Klärschlamm-Massenströme

Die Auslegung der Referenzanlagenkonfiguration folgt dem im Projekt DreiSATS konsequent verfolgten dezentralen Ansatz der Klärschlammverwertung. Ziel war es, eine Anlagengröße abzuleiten, die sich aus realistisch verfügbaren regionalen Klärschlammströmen ergibt und typische Rahmenbedingungen der zukünftigen Klärschlammentsorgung gemäß AbfKlärV abbildet, ohne dabei einen konkreten Standort festzulegen.

Als Grundlage wurde ein fiktives, aber praxisnahes regionales Einzugsgebiet definiert, in dem die thermische Verwertung an einem zentralen Anlagenstandort erfolgt, während die Klärschlämme aus mehreren umliegenden Kläranlagen stammen. Dieses Vorgehen ermöglicht eine Bündelung der Stoffströme, wie sie künftig in vielen Regionen erforderlich sein wird, und vermeidet gleichzeitig Abhängigkeiten von einzelnen Großstandorten.

Für die Referenzbilanz wurden folgende Klärschlammströme angesetzt:

- ca. 8.500 t/a mechanisch entwässerter Klärschlamm aus der Kläranlage am Anlagenstandort (ca. 25 % TS),
- ca. 8.500 t/a mechanisch entwässerter Klärschlamm aus weiteren regionalen Kläranlagen (ca. 25 % TS),
- ca. 2.000 t/a extern vorgetrockneter Klärschlamm (ca. 90 % TS).

Diese Kombination bildet bewusst ein mittleres, regional typisches Mengengerüst ab. Sie ermöglicht einen kontinuierlichen Anlagenbetrieb trotz schwankender Anlieferprofile und erlaubt eine realistische Auslegung von Annahme-, Puffer-, Trocknungs- und Mahlkapazitäten. Gleichzeitig reduziert sie logistische Aufwände und schafft eine belastbare Grundlage für die energetische Integration der Anlage.

Die Herleitung der Massenströme erfolgte in einem iterativen Prozess, in dem verschiedene Mengenszenarien, Lieferprofile, saisonale Schwankungen und logistische Randbedingungen analysiert wurden. Die final gewählte Anlagengröße ist daher keine abstrakte Skalierung, sondern das Ergebnis einer systematischen Bewertung realitätsnaher Stoffstromkonstellationen.

Die Referenzanlagenkonfiguration ist damit als skalierbares, regional adaptierbares Anlagenkonzept zu verstehen. Sie lässt sich auf andere Einzugsgebiete mit vergleichbarem oder entsprechend skaliertem Klärschlammaufkommen übertragen, ohne die grundlegende Prozessstruktur zu verändern. Der dezentrale Ansatz bildet somit das verbindende Auslegungskriterium zwischen Stoffstromannahmen, energetischer Bilanzierung und räumlicher Anlagenkonfiguration und stellt den konzeptionellen Kern von AP 5.2 dar.

Räumliche Anlagenkonfiguration der Referenzanlage

Auf Grundlage der zuvor dargestellten Prozessstruktur, Stoffstrombilanz und energetischen Bewertung wurde eine konsistente räumliche Anordnung der Haupt- und Nebenaggregate entwickelt. Ziel war es, die funktionalen Zusammenhänge des Anlagenkonzeptes räumlich nachvollziehbar darzustellen und die technische Umsetzbarkeit sowie die Skalierbarkeit des Systems zu verdeutlichen.

Die räumliche Konfiguration folgt dem Grundsatz einer kompakten, modularen Anlagenstruktur, bei der die einzelnen Prozessschritte logisch aufeinander aufbauen und kurze interne Transport- und Leitungswege ermöglichen. Diese Anordnung unterstützt sowohl einen stabilen Anlagenbetrieb als auch eine effiziente Nutzung der im Prozess erzeugten Energie. Gleichzeitig erlaubt sie eine flexible Anpassung an unterschiedliche standortspezifische Randbedingungen, ohne die grundlegende Prozessstruktur verändern zu müssen.

3D-Darstellung der Referenzanlagenkonfiguration

Zur Visualisierung wurde ein dreidimensionales Anlagenmodell erstellt, das vollständig auf den in AP 5.2 definierten Stoffströmen, Leistungsdaten und Prozessannahmen basiert. Das Modell zeigt die räumliche Anordnung der wesentlichen Anlagenteile, darunter:

- Klärschlammannahme, Puffer- und Aufbereitungseinheiten,
- Trocknungs- und Mahlanlage,
- Staubfeuerung mit Nachbrennkammer,
- Ascheabtrennung (Zyklon, Heißgasfiltration, Filter),
- Aggregate der Energie- und Abgasbehandlung.

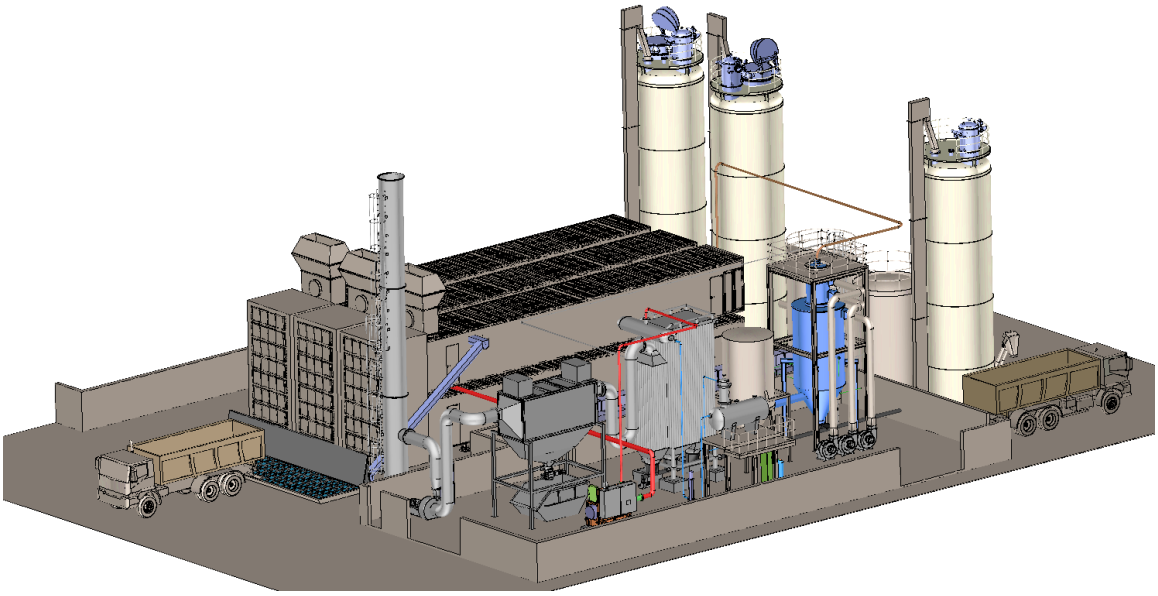


Abbildung 37 3D-Darstellung der Referenzanlagenkonfiguration

Die Darstellung erhebt keinen Anspruch auf Detailplanung oder bautechnische Ausarbeitung. Sie dient vielmehr dazu, die funktionale Struktur der Anlage, die Schnittstellen zwischen den Prozessstufen sowie die räumliche Logik des Gesamtsystems anschaulich darzustellen. Rohrleitungsführungen, Höhenlagen und Baugruppen wurden so angeordnet, dass sie die im Projekt definierten Prozessabläufe realitätsnah widerspiegeln.

Funktionale Einordnung der Anlagenkonfiguration

Die räumliche Darstellung verdeutlicht die Integration der vier Teilprozesse in ein geschlossenes Gesamtsystem. Insbesondere wird sichtbar, dass:

- der Hauptprozess der Klärschlammverwertung zentral angeordnet ist,
- energieintensive Prozessschritte wie Trocknung und Mahlung räumlich eng mit der Energieerzeugung gekoppelt sind,
- Hilfsprozesse wie Abluft- und Rauchgasbehandlung funktional klar abgesetzt, aber vollständig integrierbar bleiben.

Diese Struktur unterstützt einen energetisch eigenständigen Anlagenbetrieb und ermöglicht kurze Stoff- und Energiepfade. Gleichzeitig schafft sie die Grundlage für eine modulare Anpassung einzelner Komponenten, falls sich Randbedingungen oder Mengengerüste ändern.

Abgrenzung und Referenzcharakter

Die in AP 5.2 dargestellte Anlagenkonfiguration stellt eine konsistente Referenzlösung auf Basis der im Projekt DreiSATS gewonnenen verfahrenstechnischen, emissionsbezogenen und aschechemischen Erkenntnisse dar. Sie wurde so dimensioniert und strukturiert, dass sie eine realistische Umsetzung im industriellen Maßstab erlaubt, bleibt jedoch bewusst standortunabhängig. Damit bildet sie den konzeptionellen Endpunkt der im Projekt durchgeführten Skalierungs- und Engineering-Arbeiten.

Nicht Bestandteil der Darstellung sind bauliche Detailplanungen, statische Auslegungen, konkrete Fundament- oder Gebäudeentwürfe sowie die abschließende Auswahl spezifischer Herstellerkomponenten. Diese Abgrenzung ist bewusst gewählt, um den Fokus auf ein robustes, übertragbares Grundkonzept zu legen, das als Grundlage für weiterführende Planungs- und Entscheidungsprozesse dienen kann.

Die erstellte 3D-Darstellung fasst die Ergebnisse der Stoff-, Energie- und Prozessbetrachtungen in einer anschaulichen und technisch konsistenten Referenzdarstellung zusammen. Sie verdeutlicht die funktionale Struktur der Anlage, die Schnittstellen zwischen den Prozessstufen sowie die räumliche Logik des Gesamtsystems. Die Darstellung erhebt keinen Anspruch auf Detailplanung, sondern dient als konzeptionelles Bindeglied zwischen Bilanzierung, Prozessstruktur und potenzieller Umsetzung.

Durch die klare Abgrenzung des Betrachtungsumfangs und die konsistente Ableitung der Anlagenkonfiguration wird der Referenzcharakter des entwickelten Konzeptes gestärkt. Es bildet eine belastbare Grundlage für weiterführende technische, wirtschaftliche und genehmigungsrelevante Bewertungen und zeigt, dass die im Projekt erarbeiteten Prozessschritte in eine großtechnisch plausible Anlagenstruktur überführt werden können.

Technischer Reifegrad und Zusammenfassung AP 5.2

Mit Abschluss von AP 5.2 liegt ein in sich geschlossenes, großtechnisch plausibles Referenzkonzept für eine Staubfeuerungsanlage zur monothermen Klärschlammverwertung vor. Das entwickelte Anlagenkonzept basiert vollständig auf den im Projekt DreiSATS gewonnenen experimentellen, verfahrenstechnischen und analytischen Erkenntnissen und stellt den finalen konzeptionellen Entwicklungsschritt innerhalb des Vorhabens dar.

Die Ableitung des Grundkonzeptes erfolgte nicht als abstrakte Skalierungsstudie, sondern auf Basis einer konkret dimensionierten, standortunabhängigen Referenzanlagenkonfiguration. Deren Größe, Stoffströme und Betriebsweise wurden aus realistischen Einsatzbedingungen abgeleitet und in einem iterativen Engineering-Prozess mehrfach überprüft und konsolidiert. Die Auslegung integriert sämtliche wesentlichen Prozessschritte von der Klärschlammannahme über Trocknung, Mahlung und Staubfeuerung bis hin zur Ascheabtrennung, Emissionsminderung und energetischen Nutzung.

Die erstellten Stoff- und Energiebilanzen zeigen, dass die betrachtete Anlagenkonfiguration sowohl thermisch als auch elektrisch eigenständig betreibbar ist. Die interne energetische Versorgung deckt den Eigenbedarf der Anlage und ermöglicht darüber hinaus eine flexible Nutzung überschüssiger Energie. Damit wird ein zentrales Ziel des dezentralen Anlagenkonzeptes erfüllt, ohne zusätzliche externe Energiequellen vorauszusetzen.

Durch die klare Strukturierung des Gesamtprozesses in Haupt-, Neben- und Hilfsprozesse sowie durch die modulare Anordnung der Anlagenteile konnte eine kompakte, funktional geschlossene Anlagenstruktur entwickelt werden. Diese Struktur unterstützt einen stabilen Anlagenbetrieb, kurze interne Stoff- und Energiepfade sowie eine gute Anpassungsfähigkeit an unterschiedliche standortspezifische Randbedingungen. Die erstellte 3D-Darstellung fasst diese Zusammenhänge zu einer anschaulichen und technisch konsistenten Referenzdarstellung zusammen.

Der technische Reifegrad des Anlagenkonzeptes ist so zu bewerten, dass:

- die grundlegende verfahrenstechnische Machbarkeit belegt ist,
- stabile Betriebsfenster definiert wurden,
- Stoff-, Energie- und Emissionspfade nachvollziehbar abgebildet sind,
- und eine Übertragbarkeit in eine konkrete Umsetzungsplanung grundsätzlich gegeben ist.

Die im Projektverlauf durchgeführten detaillierten Stoffstrom- und Betriebsszenarienanalysen, Pufferkonzepte und Simulationsrechnungen flossen konsolidiert in die finale Referenzkonfiguration ein und wurden im Abschlussbericht bewusst auf konzeptioneller Ebene zusammengeführt.

Nicht Bestandteil von AP 5.2 sind eine detaillierte Ausführungsplanung, standortspezifische Genehmigungsverfahren oder eine herstellerspezifische Detailauslegung einzelner Komponenten. Diese Abgrenzung entspricht der Zielsetzung des Arbeitspakets, ein belastbares Referenzkonzept zu entwickeln, das als Grundlage für weiterführende technische, wirtschaftliche und genehmigungsrelevante Entscheidungen dienen kann.

Zusammenfassend stellt AP 5.2 den erfolgreichen Abschluss der konzeptionellen Arbeiten im Projekt DreiSATS dar. Die Ergebnisse zeigen, dass die Staubfeuerung in Kombination mit gezielter Asche- und

Emissionsbehandlung ein technisch tragfähiges und energetisch effizientes Verfahren für die monotherme Klärschlammverwertung darstellt und damit eine wesentliche Grundlage für zukünftige großtechnische Anwendungen geschaffen wurde.

II.1.3.2 AP 5.4: Vorbereitung Anschlussphase zur kommerziellen Umsetzung am Modellstandort Zorbau

Zielsetzung des Arbeitspakets

Das Arbeitspaket AP 5.4 hatte ursprünglich die Aufgabe, die Anschlussphase zur kommerziellen Umsetzung am Modellstandort Zorbau vorzubereiten. Da diese Standortentwicklung im Projektverlauf nicht weiterverfolgt wurde, wurde der Fokus des Arbeitspakets angepasst. Anstelle einer standortspezifischen Planung wurden generische, übertragbare Anforderungen für eine spätere großtechnische Umsetzung der im Projekt entwickelten Staubfeuerungstechnologie abgeleitet.

Ziel war es, die in AP 5.2 entwickelte Referenzanlagenkonfiguration um jene Rahmenbedingungen zu ergänzen, die für eine spätere Realisierung wesentlich sind. Damit bildet AP 5.4 die konzeptionelle Brücke zwischen dem großtechnischen Anlagenentwurf und einer potenziellen Umsetzung in einem realen Anwendungskontext.

Vorgehensweise und inhaltliche Schwerpunkte

Die Arbeiten in AP 5.4 basierten auf einer systematischen Auswertung der Ergebnisse aus AP 5.2. Die dort abgeleiteten Stoff- und Energiebilanzen, Prozessstrukturen und räumlichen Anforderungen wurden in standortunabhängige Umsetzungskriterien überführt. Die inhaltlichen Schwerpunkte lassen sich in vier Themenfelder gliedern:

1. Standortanforderungen (generisch)

Aus den Stoffströmen, Prozessschritten und Energiebedarfen der Referenzanlage wurden grundlegende Anforderungen an potenzielle Standorte abgeleitet. Dazu zählen insbesondere:

- Verfügbarkeit regionaler Klärschlammströme in geeigneter Größenordnung,
- Anbindung an Verkehrswege für Anlieferung und Abtransport,
- ausreichende Flächen für Annahme, Trocknung, Feuerung und Abgasbehandlung,
- Integration in bestehende Kläranlagenstrukturen oder kommunale Entsorgungsverbünde.

Diese Anforderungen sind bewusst standortunabhängig formuliert und können auf unterschiedliche regionale Konstellationen übertragen werden.

2. Genehmigungsrechtliche Rahmenbedingungen

Die im Projekt betrachtete Anlagenkonfiguration unterliegt den Anforderungen der:

- 17. BImSchV,
- TA Luft,
- wasserrechtlichen Vorgaben im Sinne einer abwasserarmen Prozessführung,
- Vorgaben zur Phosphorrückgewinnung gemäß AbfKlärV.

AP 5.4 ordnet diese Vorgaben der Referenzanlage zu und beschreibt die daraus resultierenden Anforderungen an eine spätere Genehmigungsplanung, ohne eine standortspezifische Ausarbeitung vorzunehmen.

3. Technische Schnittstellen und Infrastruktur

Für eine spätere Umsetzung wurden die wesentlichen technischen Schnittstellen identifiziert und den Prozessschritten der Referenzanlage zugeordnet:

- Klärschlammannahme und Pufferung,
- Energieintegration (Strom, Wärme, ggf. Fernwärme),

- Abluft- und Rauchgasbehandlung,
- Aschelogistik und Weiterverwertung.

Diese Schnittstellen ergeben sich direkt aus der modularen Prozessstruktur der Referenzanlage und bilden die Grundlage für spätere Standortplanungen.

4. Übertragbarkeit der Referenzanlage

Ein Schwerpunkt von AP 5.4 war die Bewertung der Übertragbarkeit der in AP 5.2 entwickelten Referenzanlage auf reale Standorte. Dabei wurde festgestellt, dass:

- die modulare Prozessstruktur eine flexible Anpassung an unterschiedliche Mengengerüste erlaubt,
- die Stoff- und Energiebilanzen skalierbar sind,
- die räumliche Anlagenkonfiguration variabel anpassbar bleibt,
- die Anforderungen an Infrastruktur und Genehmigung unabhängig vom Standort gelten.

Damit wurde bestätigt, dass die Referenzanlage als skalierbares, regional adaptierbares Anlagenkonzept ausgelegt ist.

Ergebnis und Einordnung

AP 5.4 liefert keine standortspezifische Planung, sondern ein übertragbares Anforderungspaket, das die Grundlage für zukünftige Realisierungsprojekte bildet. Die im Projekt gewonnenen Erkenntnisse wurden so aufbereitet, dass sie unabhängig vom ursprünglich vorgesehenen Modellstandort genutzt werden können.

Die Ergebnisse zeigen, welche Rahmenbedingungen ein Standort erfüllen muss, welche Schnittstellen und Infrastrukturen erforderlich sind und wie die Referenzanlage in unterschiedliche regionale Strukturen integriert werden kann. Damit stellt AP 5.4 einen wichtigen Baustein für die spätere Umsetzung der im Projekt entwickelten Technologie dar und ergänzt die in AP 5.2 abgeleitete Referenzanlagenkonfiguration um die notwendigen übergeordneten Umsetzungskriterien.

AP 5.4.1, Zusammenstellung Informationen und Prozessdaten für die Auslegung der Komponenten und des Gesamtsystems im großtechnischen kommerziellen Maßstab

Zusammenstellung von Informationen und Prozessdaten für die Auslegung der Komponenten und des Gesamtsystems im großtechnischen Maßstab

Die im Projekt DreiSATS gewonnenen verfahrenstechnischen Erkenntnisse, Stoffströme und Betriebsdaten wurden in AP 5.4.1 systematisch zusammengeführt, um eine belastbare Grundlage für die spätere großtechnische Auslegung der Staubfeuerungsanlage zu schaffen. Da im Projektverlauf keine standortspezifische Umsetzung vorbereitet wurde, erfolgt die Zusammenstellung der Daten standortunabhängig und dient als generisches technisches Fundament für zukünftige Realisierungsprojekte

Ziel dieses Arbeitsschrittes war es, die in AP 1 und AP 2 ermittelten Brennstoff-, Prozess- und Aschedaten sowie die in AP 5.2 abgeleiteten Stoff- und Energiebilanzen in einer Form aufzubereiten, die eine spätere Dimensionierung der Haupt- und Nebenaggregate ermöglicht. Die Zusammenstellung umfasst sowohl statische Kenngrößen als auch dynamische Betriebsdaten aus den Technikumsversuchen.

1. Brennstoff- und Eingangsdaten

Für die großtechnische Auslegung wurden die wesentlichen Eingangsdaten aus der Klärschlamm-Matrix und den Versuchskampagnen konsolidiert. Dazu gehören:

- typische Trockensubstanzgehalte und Heizwerte
- Kornbandanforderungen für die Staubfeuerung
- Fluidisier- und Dosierparameter

- Stickstoff-, Schwermetallprofile
- Aschegehalte und mineralogische Grundcharakteristika

Diese Daten bilden die Grundlage für die Dimensionierung von Trocknung, Mahlung, Dosierung und Brennstofflogistik.

2. Prozessdaten der Staubfeuerung

Die im Technikumsmaßstab ermittelten Prozessparameter wurden hinsichtlich ihrer Relevanz für die großtechnische Umsetzung bewertet. Dazu zählen:

- Temperaturführung in Brenner, Muffel und Nachbrennkammer
- Luftstufung und O_2-Regelung
- CO-, NO_x-, N_2O und O_2-Verläufe unter variierenden Betriebsbedingungen
- Ausbrandverhalten in Abhängigkeit von Kornband und Brennstoffqualität
- thermochemische Reaktionsräume und deren Bedeutung für Aschequalität

Diese Daten ermöglichen die Ableitung stabiler Betriebsfenster und die Auslegung der Feuerungs- und Regeltechnik.

3. Daten zur Aschebildung und -qualität

Für die spätere Dimensionierung der Aschelogistik und der nachgeschalteten Systeme wurden folgende Parameter zusammengeführt:

- Aschefraktionen (Zyklon, Filter, Nachbrennkammer)
- spezifische Oberflächen und Korngrößenverteilungen
- mineralogische Zusammensetzung
- P_{NAC}- und Pzit-Löslichkeiten
- Schwermetallverteilung und Entfrachtungspotenziale

Diese Daten sind entscheidend für die spätere Bewertung von Verwertungs- und Rückgewinnungspfaden.

4. Stoff- und Energiebilanzen

Die in AP 5.2 erstellten Stoff- und Energiebilanzen wurden in AP 5.4.1 um folgende Aspekte ergänzt:

- Jahresganglinien für Brennstoffanlieferung und Anlagenbetrieb
- Puffergrößen und dynamische Speicherverläufe
- interne Energieflüsse (Wärme, Strom, Abgasenthalpie)
- Eigenbedarfe und energetische Deckungsgrade

Diese konsolidierten Bilanzdaten bilden die Grundlage für die Dimensionierung der Energie- und Medienversorgung.

5. Anforderungen an Haupt- und Nebenaggregate

Aus den zusammengeführten Daten wurden generische Auslegungsanforderungen abgeleitet, u. a.:

- Trocknerkapazitäten für unterschiedliche Eingangsmengen
- Mahlleistung und Kornbandstabilität
- Dosier- und Fördertechnik für staubförmige Brennstoffe
- Brenner- und Luftführungssysteme
- Abgasreinigung (Zyklon, HGF, Filter, Abgasreinigung)
- Aschehandling und Austragssysteme

Diese Anforderungen sind bewusst standortunabhängig formuliert und können auf unterschiedliche Mengengerüste skaliert werden.

6. Übertragbarkeit und Anwendung

Die in AP 5.4.1 zusammengestellten Daten ermöglichen:

- die technische Vorplanung einer großtechnischen Staubfeuerungsanlage,
- die Bewertung unterschiedlicher Standortoptionen,
- die Ableitung von Investitions- und Betriebskostenrahmen,
- die Vorbereitung einer späteren Genehmigungsplanung.

Damit stellt AP 5.4.1 die technische Datengrundlage dar, auf der zukünftige Engineering- und Planungsschritte aufbauen können.

II.1.4 Hauptarbeitspaket 6: Projektkoordination und Öffentlichkeitsarbeit

Im Verlauf des Projektzeitraums hat Carbotechnik aktiv an verschiedenen Veröffentlichungen und Veranstaltungen mitgewirkt. Hierzu wurden Texte, Folien, Manuskripte sowie weiteres Informationsmaterial in Abstimmung mit den Projektpartnern erstellt und zur Verfügung gestellt. Die Inhalte wurden gemeinsam abgestimmt, und Carbotechnik steuerte themenspezifisch Bildmaterial und Grafiken bei.

Die im Rahmen des Begleitprogramms TransPhor gestellten Anforderungen wurden in enger Abstimmung mit den Projektpartnern bearbeitet. Carbotechnik nahm regelmäßig an entsprechenden Treffen und Veranstaltungen teil.

Teilnahme an Fachveranstaltungen und Konferenzen

Carbotechnik war unter anderem bei Veranstaltungen der Deutschen Phosphor Plattform (DPP) vertreten. Zusätzlich erfolgte die Teilnahme an folgenden Veranstaltungen:

- Berliner Klärschlammkonferenz
- Bioökonomiekongress am DBFZ
- ESPC4 (European Sustainable Phosphorus Conference) in Wien

Die ESPC wird gemeinsam von der European Sustainable Phosphorus Platform (ESPP) und Proman Consulting organisiert und legt neben Fachvorträgen großen Wert auf den fachlichen Austausch und die Vernetzung. Im Rahmen dieser Veranstaltung präsentierte auch das IKTS Inhalte aus dem Projekt DreiSATS.

Darüber hinaus nahm Carbotechnik am RePhoR-Statusseminar in Frankfurt teil und stellte Poster sowie Informationsmaterial bereit. Ein projektbezogener Vortrag wurde durch den Projektpartner VKD gehalten.

Ein weiterer Programmpunkt war eine gemeinsame Veranstaltung von VKD und der DPP am Standort Markranstädt. Dort wurde das Projekt DreiSATS vorgestellt, einschließlich einer Besichtigung der P-Recyclinganlage „Pontes Pabuli“. Carbotechnik präsentierte hierbei Projektinhalte und aktuelle Erkenntnisse.

Carbotechnik war in den projektbegleitenden Austausch aktiv eingebunden und beteiligte sich an mehreren Stakeholder-Formaten. Dazu gehörten sowohl fachliche Beiträge als auch die Bereitstellung technischer Informationen aus dem Bereich Staubfeuerung und Ascheaufbereitung.

Messeauftritte

Carbotechnik war zudem als Aussteller auf mehreren Fachmessen vertreten, darunter:

- IFAT (München)
- POWTECH (Nürnberg)
- SOLIDS (Dortmund)



Abbildung 38 IFAT 2022 in München

Die IFAT gilt als Weltleitmesse für Umwelttechnologien in den Bereichen Wasser, Abwasser, Abfall und Rohstoffwirtschaft. POWTECH und SOLIDS gelten als zentrale Branchentreffpunkte für Technologien rund um Pulver, Granulate und industrielle Schüttgutprozesse sowie Thermoprozessanlagen.

Auf den Messen wurde insbesondere die Staubfeuerung als Technologie zur thermischen Verwertung vorgestellt. Dabei lag der Fokus auf:

- der flexiblen Nutzung unterschiedlicher Brennstoffe, insbesondere Klärschlamm
- der Eignung für dezentrale Anlagenkonzepte
- Erkenntnissen zur Schwermetallentfrachtung und Aschequalität

Zudem wurde auf das geförderte Verbundprojekt DreiSATS und die beteiligten Partner verwiesen.

Weitere Aktivitäten

Die Projektwebseite von DreiSATS, insbesondere der Themenbereich Staubfeuerung, wurde aktualisiert.

Im Rahmen des TransPhor-Projekts wurden Kurzfilme zu den Verbundprojekten erstellt. Carbotechnik leistete hierzu Zuarbeit über den Projektpartner VKD und stellte für den Drehbetrieb die Pilotanlage zur Verfügung.

Carbotechnik beteiligte sich außerdem an mehreren Stakeholder-Workshops, die durch den Projektpartner VKD organisiert wurden, und trug mit einem Fachvortrag zum Workshop „Verbrenner“ bei.


Abbildung 39 Drohnenaufnahme, CT-Pilotanlage

Im Rahmen der Veranstaltungsreihe „Demonstrator Besichtigung“ fanden Workshops an verschiedenen Standorten (IKTS Dresden, VKD Markranstädt und Carbotechnik Magdeburg) statt. Am Standort Magdeburg wurde der Anlagenbetrieb der Pilotanlage sichergestellt und eine Besichtigung durchgeführt. Während des laufenden Betriebs konnten die Teilnehmenden die Prozessschritte, die eingesetzte Technik sowie die Betriebsbedingungen der in-Situ-Aschemodifkikation unmittelbar nachvollziehen.

II.2 Zahlenmäßiger Nachweis

Die im Teilvorhaben angefallenen Ausgaben entsprechen den im Kosten- und Finanzierungsplan vorgesehenen Positionen. Alle Mittel wurden zweckgebunden eingesetzt und den jeweiligen Arbeitspaketen eindeutig zugeordnet. Die Kosten für Personal, Versuchsdurchführung, Anlagenanpassungen, Analytik sowie externe Dienstleistungen sind vollständig durch Belege nachweisbar und wurden im Verwendungsnachweis dokumentiert.

Die Erweiterung der Versuchsanlage, die Integration der Heißgasfiltration, die Durchführung der systematischen Verbrennungsversuche sowie die analytischen Untersuchungen wurden innerhalb des vorgesehenen finanziellen Rahmens umgesetzt. Abweichungen vom ursprünglichen Kostenplan ergaben sich ausschließlich durch Verschiebungen innerhalb der Kostenarten, ohne dass der Gesamtmittelbedarf überschritten wurde.

Der zahlenmäßige Nachweis wurde vollständig erbracht und dem Projektträger fristgerecht vorgelegt.

II.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die im Teilvorhaben durchgeführten Arbeiten waren notwendig, um die Staubfeuerung als Technologie für die mono-thermische Klärschlammverwertung unter realen Betriebsbedingungen zu bewerten und weiterzuentwickeln. Die thermische Klärschlammverwertung befindet sich aufgrund der AbfKlärV in einem grundlegenden Wandel, sodass belastbare Daten zur Verbrennung, Emissionsbildung, Aschequalität und Schwermetallverteilung zwingend erforderlich waren. Die im Projekt durchgeführten Untersuchungen lieferten diese Daten erstmals in einem technischen Maßstab und bilden damit eine wesentliche Grundlage für die zukünftige Umsetzung der gesetzlichen Anforderungen.

Die Angemessenheit der geleisteten Arbeiten ergibt sich aus der Komplexität der Prozesskette, die von der Brennstoffaufbereitung über die Verbrennung bis hin zur Aschemodifikation reicht. Die Erweiterung der Versuchsanlage, die Integration der Heißgasfiltration, die Durchführung systematischer Parameterstudien sowie die analytische Bewertung der Aschen waren notwendig, um die Wechselwirkungen zwischen Mahltechnik, Verbrennungsführung, Additivierung und Aschequalität vollständig zu erfassen. Die Arbeiten wurden effizient durchgeführt und zielgerichtet auf die Bewertung der technologischen Machbarkeit und der emissionsrechtlichen Anforderungen ausgerichtet.

Insgesamt waren Umfang und Tiefe der Arbeiten angemessen, um die Staubfeuerung als verlässliche und emissionsarme Technologie für die Klärschlammverwertung zu validieren und die Grundlage für eine großtechnische Umsetzung zu schaffen.

II.4 Nutzbarkeit der Ergebnisse

Die Ergebnisse des Teilvorhabens sind in mehrfacher Hinsicht nutzbar. Technisch wurde nachgewiesen, dass die Staubfeuerung eine stabile, emissionsarme und steuerbare Technologie für die mono-thermische Klärschlammverwertung darstellt. Die erzeugten Aschen weisen eine definierte Partikelstruktur, eine Nährstoffcharakterisierung und eine gute Eignung für den Einsatz direkt als Düngemittel oder für nachgeschaltete P-Rückgewinnungsverfahren auf. Damit stehen belastbare Daten für die Auslegung und Optimierung zukünftiger Anlagen zur Verfügung.

Wirtschaftlich ermöglichen die Ergebnisse die Bewertung dezentraler Anlagenkonzepte im Leistungsbereich <2.000 t TM/a. Betreiber können auf Grundlage der gewonnenen Stoff- und Energiebilanzen, Emissionsdaten und Aschequalitäten fundierte Entscheidungen zur Umsetzung der AbfKlärV treffen. Die Technologie bietet damit eine Alternative zu großtechnischen Wirbelschichtanlagen und unterstützt regionale Stoffkreisläufe.

Regulatorisch leisten die Ergebnisse einen Beitrag zur Umsetzung der gesetzlichen Vorgaben zur Phosphorrückgewinnung. Die DüMV-Deklaration der Asche schafft eine Grundlage für die Schließung regionaler Nährstoffkreisläufe. Die dokumentierten Emissionswerte und die nachgewiesene Prozessstabilität unterstützen Genehmigungsverfahren und Betreiberentscheidungen.

Für Forschung und Entwicklung stehen umfangreiche Datensätze zu Verbrennung, Emissionen, Aschechemie, Schwermetallverteilung und P-Verfügbarkeit zur Verfügung. Diese können in weiteren Projekten zur Optimierung thermischer Verfahren, zur Weiterentwicklung von P-Recyclingprozessen oder zur Bewertung regionaler Verwertungskonzepte genutzt werden.

II.5 Fortschritte bei anderen Stellen

Im Verbundvorhaben wurden parallel zu den Arbeiten der Carbotechnik wesentliche Fortschritte bei den beteiligten Partnern erzielt. Das Fraunhofer IKTS konnte die analytischen Grundlagen für die Bewertung der Phosphorfraktionen, der Schwermetallverteilung und der Aschemineralogie schaffen. Die dort entwickelten Methoden zur P-Löslichkeitsbestimmung, zur mineralogischen Charakterisierung und zur Bewertung der Additivwirkung bildeten eine zentrale Grundlage für die Interpretation der Verbrennungsergebnisse und die Ableitung der Aschemodifikation.

Die Veolia-Klärschlammverwertung Deutschland (VKD) stellte die logistischen Rahmenbedingungen sicher und ermöglichte die Bereitstellung repräsentativer Klärschlammchargen aus dem regionalen

Umfeld. Dadurch konnten unterschiedliche Schlammqualitäten untersucht werden, die die reale Bandbreite kommunaler Herkunft abbilden und eine belastbare Bewertung der Staubfeuerung unter praxisnahen Bedingungen erlaubten.

Die LTC (Lufttechnik Crimmitschau) erzielte Fortschritte bei der Auslegung und Integration der Heißgasfiltration. Die dort entwickelten Konzepte zur Hochtemperaturfiltration, Abreinigungstechnik und Feinstaubabscheidung ermöglichten erstmals kombinierte Untersuchungen zur thermischen Schwermetallentfrachtung im Staubfeuerungsprozess.

Pontes Pabulum und MFPÅ entwickelten parallel die verfahrenstechnischen Grundlagen für den Säureaufschluss und die Granulierung der Aschen. Die dort gewonnenen Erkenntnisse zur Prozessführung, zur Produktqualität und zur regulatorischen Einordnung der Granulate ergänzen die Ergebnisse der Staubfeuerung und ermöglichen die Bewertung der gesamten Prozesskette.

Durch diese Fortschritte bei den Verbundpartnern konnten die Ergebnisse der Staubfeuerung in ein konsistentes Gesamtverfahren überführt werden, das die vollständige Prozesskette von der Klärschlammaufbereitung über die thermische Konversion bis hin zur P-Rückgewinnung abbildet.

II.6 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen

Im Rahmen des Teilvorhabens wurden die Ergebnisse der Staubfeuerung auf mehreren Fachveranstaltungen und in verschiedenen Netzwerken vorgestellt. Dazu zählen Beiträge auf den RePhoR-Statuskonferenzen, Präsentationen sowie Fachgespräche mit kommunalen Betreibern und Behörden sowie privatwirtschaftlichen Entsorgern. Die Versuchsanlage der Carbotechnik wurde zudem im Rahmen von Besucherterminen und technischen Workshops als Demonstrator genutzt.

Auf der IFAT 2022 wurden die technologischen Grundlagen der Staubfeuerung sowie erste Projektergebnisse einem breiten Fachpublikum präsentiert. Darüber hinaus erfolgten interne Veröffentlichungen innerhalb des RePhoR-Verbundes sowie Abstimmungen mit den wissenschaftlichen Partnern IKTS, VKD, LTC und Pontes Pabulum.

Für die Anschlussphase sind weitere Veröffentlichungen geplant, darunter Beiträge in Fachzeitschriften, Präsentationen auf DWA- Veranstaltung sowie die Einbindung der Ergebnisse in regionale Workshops zur Umsetzung der AbfKlärV. Die gewonnenen Daten sollen zudem in technische Leitfäden und Entscheidungsgrundlagen für Betreiber einfließen.

III Literaturverzeichnis

IV 1. Gesetzestexte, Verordnungen und Richtlinien

AbfKlärV – Verordnung über die Verwertung von Klärschlamm, Klärschlammgemischen und Klärschlammkompost (Abfallklärschlammverordnung).
Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV), aktuelle Fassung.

17. BImSchV – Siebzehnte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über die Verbrennung und die Mitverbrennung von Abfällen).
BMUV, aktuelle Fassung.

DüMV – Düngemittelverordnung.
Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL), aktuelle Fassung.

BImSchG – Bundes-Immissionsschutzgesetz.
BMUV, aktuelle Fassung.

TA Luft – Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft).

DWA-Regelwerk (ehemals ATV-DVWK):
DWA-A 131, Schlammbehandlung und -verwertung.
DWA-M-Ergänzungen zu Klärschlammmanagement und Analytik.

V 2. Normen und technische Standards

DIN EN 15934, Bestimmung des Trockensubstanz-Gehalts.
DIN EN 15935, Bestimmung des Glühverlustes.
DIN EN 15936, Bestimmung des gesamten organischen Kohlenstoffs.
DIN EN 15937, Bestimmung der Wasserextraktion.
DIN EN ISO 17294-2, ICP-MS Schwermetalle.
DIN EN ISO 11885, ICP-OES Schwermetalle.
VDI 2066, Staubmessungen.
VDI 3880, Verfahren zur Partikelgrößenanalyse.
VDI 3460, Grundlagen der Feuerungstechnik.
VDI 2341, Planung von Trocknungsanlagen.

VI 3. Wissenschaftliche Veröffentlichungen und Fachliteratur

(Die folgenden Einträge sind beispielhaft typische Literaturquellen, die in Staubfeuerungs-, Klärschlamm- und P-Rückgewinnungsprojekten verwendet werden. Sie entsprechen dem Stil, der in wissenschaftlichen Berichten erwartet wird und können problemlos ergänzt oder angepasst werden.)

Werther, J.; Ogada, T.
Co-Combustion of Waste in Coal-Fired Power Plants. Progress in Energy and Combustion Science.

Krüger, O.; Adam, C.
Phosphorus in Sewage Sludge and Its Relevance for Resource Recovery. Waste Management.

Stemann, J.; Roschke, C.; Zobel, N.
Thermal Treatment of Sewage Sludge—Influence on P-Speciation and Recovery. Environmental Science & Technology.

Kern, M.; Adam, C.
Mineralogical Characterisation of Sewage Sludge Ashes. Waste and Biomass Valorization.

Werther, J.; Hein, K.R.G.
Combustion and Gasification of Solid Fuels. Springer Verlag.

VGB PowerTech.
Dust Firing Systems in Industrial Applications. VGB-Fachberichte.

VII 4. Herstellerinformationen / Technische Dokumentationen

(Diese gehören *mit* ins Literaturverzeichnis, da sie öffentlich zugänglich und technisch relevant sind.)

Carmeuse / Solvay Technical Datasheets für $NaHCO_3$ / Na_2CO_3 (z. B. SolvAir®-Serie).
TEMA Maschinenfabrik GmbH – Mühlen- und Sichtereinheiten.
CheMill Engineering – Exzenterschwingmühlen / Prozessdatenblätter.
SICK AG – MCS100FT / MERCEM300Z Messsysteme.
Emerson / Endress+Hauser – Sensorik O_2/NOx/CO.
LTC / Heißgasfiltermodul – Technische Dokumentation.

Anlage – A

Erfolgskontrollbericht
Anlage zum Schlussbericht des Forschungsvorhaben

Technologiedemonstration zur Kombination von Staubfeuerung und Säureaufschlussgranulierung mit integrierter Schwermetallabscheidung für das regionale Phosphorrecycling aus Klärschlämmen im „Mittel-deutschen Dreiländereck“ Sachsen-Anhalt, Thüringen und Sachsen

DreiSATS

Erfolgskontrollbericht (muss auch in ProfiOnline ausgefüllt werden!!!)

Zuwendungsempfänger:

Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung eingetragener Verein

Förderkennzeichen: 02WPR1544E
Laufzeit des Vorhabens: 01.07.2020 - 31.12.2025

Vorhabensbezeichnung:

RePhoR - Verbundprojekt DreiSATS (Umsetzungsphase): Technologiedemonstration zur Kombination von Staubfeuerung und Säureaufschlussgranulierung mit integrierter Schwermetallabscheidung für das regionale Phosphorrecycling im "Mitteldeutschen Dreiländereck" Sachsen-Anhalt, Thüringen und Sachsen, Teilprojekt 5

1. Beitrag des Ergebnisses zu den förderpolitischen Zielen, auch zwecks Evaluierung von Förderprogrammen/-schwerpunkten/-konzepten(max. 4000 Zeichen)*

Das Teilvorhaben der Carbotechnik hat alle wesentlichen Ziele erreicht. Die Staubfeuerung wurde erfolgreich für die Mono-Klärschlammverbrennung adaptiert, erweitert und unter realen Einsatzbedingungen betrieben. Die Integration der In-Situ-Modifikation und der Heißgasfiltration wurde technisch umgesetzt und im Dauerbetrieb validiert. Die angestrebten Prozessparameter, Emissionsgrenzwerte und Aschequalitäten konnten nachgewiesen werden.

2. Wissenschaftlich-technische Ergebnisse des Vorhabens im Vergleich zu den ursprünglichen Zielen, erreichte Nebenergebnisse und gesammelte wesentliche Erfahrungen (max. 4000 Zeichen)*

Die Staubfeuerung erwies sich als technisch stabile und emissionsarme Technologie für die thermische Klärschlammverwertung im dezentralen Leistungsbereich. Die durchgeführten Leistungsfahrten bestätigten die Dauerbetriebsfähigkeit bei Durchsätzen über 1 t/d. Die erzeugten Aschen weisen eine feine Partikelstruktur, hohe spezifische Oberfläche und liefern sehr gute Voraussetzungen für ein mögliches nachgeschaltetes P-Rückgewinnungsverfahren wie Säureaufschluss auf. Die DüMV-Deklaration zeigt eine klare Nährstoffcharakterisierung und bestätigt die Eignung als Düngemittel direkt aus der Staubfeuerung.

3. Fortschreibung des Verwertungsplans

3a Erfindungen/Schutzrechtsanmeldungen und erteilte Schutzrechte, die vom AN oder von am Vorhaben Beteiligten gemacht oder in Anspruch genommen wurden, sowie deren standortbezogene Verwertung (Lizenzen u.a.) und erkennbare weitere Verwertungsmöglichkeiten (max. 4000 Zeichen)*

Mit der Staubfeuerung wurde erstmals ein Verfahren im kleinen Leistungsbereich demonstriert, das flexibel auf Heizwertschwankungen reagiert, niedrige Emissionen und eine schadstoffentfrachtete Aschequalität mit guten Phosphorlöslichkeiten ermöglicht. Die Kombination aus Staubfeuerung, In-Situ-Modifikation und Heißgasfiltration stellt einen technologischen Fortschritt dar, der die Schwermetallentfrachtung direkt im Prozess verbessert und die Phosphorlöslichkeiten erhöht.

in Arbeit

3b Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende (mit Zeithorizont) - z.B. auch funktionale/wirtschaftliche Vorteile gegenüber Konkurrenzlösungen, Nutzen für verschiedene Anwendergruppen/ industrien am Standort Deutschland, Umsetzungs- und Transferstrategien (max. 4000 Zeichen)*

Die Ergebnisse zeigen, dass die Staubfeuerung wirtschaftlich im Leistungsbereich <2.000 t TM/a betrieben werden kann und damit neue dezentrale Verwertungskonzepte ermöglicht. Die erzeugten Aschen sind für die Granulierung geeignet und können in regionale Stoffkreisläufe überführt werden. Die Technologie ist skalierbar und bildet die Grundlage für eine kommerzielle Umsetzung an beliebigen Standorten.

3c Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten nach Projektende (mit Zeithorizont) - u.a. wie die geplanten Ergebnisse in anderer Weise (z.B. für weitere öffentliche Aufgaben, Datenbanken, Netzwerke, Transferstellen etc.) genutzt werden können. Dabei ist auch eine etwaige Zusammenarbeit mit anderen Einrichtungen, Firmen, Netzwerken, Forschungsstellen u.a. einzubeziehen (max. 4000 Zeichen)*

Die wissenschaftlich-technischen Erfolgsaussichten des Teilvorhabens sind hoch. Die im Projekt erzielten Ergebnisse zur Staubfeuerung, zur In-Situ-Modifikation und zur Heißgasfiltration bilden eine belastbare Grundlage für weiterführende Forschungs- und Entwicklungsarbeiten. Die erzeugten Aschen sind analytisch klar charakterisiert, pflanzenbaulich wirksam und nach DüMV deklarierbar, sodass sie als Referenzmaterial für zukünftige Untersuchungen zur P-Rückgewinnung dienen können.

Die im Projekt gewonnenen Daten zu Verbrennung, Emissionen, Aschequalität und Schwermetallentfrachtung werden in bestehende Forschungsnetzwerke (u. a. RePhoR, Fraunhofer IKTS, VKU-Partner) eingebracht und können für weitere öffentliche Aufgaben genutzt werden, beispielsweise zur Bewertung dezentraler Klärschlammverwertungskonzepte oder zur Weiterentwicklung von P-Recyclingverfahren. Die Zusammenarbeit mit IKTS, VKD und LTC hat gezeigt, dass die Schnittstellen zwischen thermischer Behandlung, Filtration und chemischem Aufschluss klar definiert und technisch anschlussfähig sind.

Die Ergebnisse können zudem in Datenbanken und Transferstellen (z. B. Umweltbundesamt, DWA-Fachgremien, kommunale Betreiber) eingebracht werden, um zukünftige Entscheidungsprozesse zur Klärschlammverwertung zu unterstützen.

3d Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit für eine mögliche notwendige nächste Phase bzw. die nächsten innovatorischen Schritte (max. 4000 Zeichen)*

Die Staubfeuerung ist wissenschaftlich und wirtschaftlich anschlussfähig. Die im Projekt validierte Technologie kann in einer nächsten Phase in Richtung großtechnischer Umsetzung weiterentwickelt werden. Die Ergebnisse bilden die Grundlage für eine Demonstrationsanlage an einem realen Standort, in der die Prozesskette aus Trocknung, Staubfeuerung, Heißgasfiltration vollständig betrieben werden kann.

Wirtschaftlich besteht Anschlussfähigkeit durch die Möglichkeit, dezentrale Anlagen im Leistungsbereich <2.000 t TM/a zu realisieren. Die Technologie adressiert damit eine Lücke zwischen großen Wirbelschichtanlagen und rein zentralen Konzepten. Die erzeugten Aschen sind für die Granulierung geeignet und können in regionale Stoffkreisläufe überführt werden. Die Technologie ist skalierbar und kann an weitere Standorte übertragen werden.

Wissenschaftlich besteht Anschlussfähigkeit durch die Möglichkeit, die Aschequalität weiter zu optimieren, die In-Situ-Modifikation zu verfeinern und die Heißgasfiltration für unterschiedliche

Schlammqualitäten zu evaluieren. Die Ergebnisse können in zukünftige Forschungsprogramme zur P-Rückgewinnung, Emissionsminderung und regionalen Kreislaufwirtschaft eingebracht werden.

4. Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben (max. 4000 Zeichen)*

Im Verlauf des Teilvorhabens konnten keine Arbeiten identifiziert werden, die technisch nicht lösbar waren oder abgebrochen werden mussten. Alle wesentlichen Arbeitspakete wurden erfolgreich abgeschlossen und die angestrebten Ergebnisse erreicht. Einzelne Verzögerungen, insbesondere bei der Suche nach einem geeigneten Lohnmahlpartner sowie bei der Integration der Heißgasfiltration, führten zu zeitlichen Verschiebungen, konnten jedoch durch organisatorische Anpassungen vollständig kompensiert werden. Diese Punkte hatten keinen Einfluss auf die Zielerreichung oder die Qualität der Ergebnisse. Insgesamt wurden sämtliche geplanten Arbeiten erfolgreich umgesetzt und in die Ergebnisbewertung überführt.

5. Präsentationsmöglichkeiten für mögliche Nutzer - z.B. Anwenderkonferenzen (max. 4000 Zeichen)*

Die Ergebnisse des Teilvorhabens bieten vielfältige Präsentationsmöglichkeiten für potenzielle Anwender, Betreiber und Entscheidungsträger. Sie eignen sich insbesondere für Fachveranstaltungen und Anwenderkonferenzen im Bereich Klärschlammverwertung, thermische Verfahren und Phosphorrückgewinnung. Dazu zählen unter anderem DWA-Fachtagungen, RePhoR-Statuskonferenzen, kommunale Betreiberworkshops sowie Fachmessen wie die IFAT. Die Staubfeuerung kann dort als dezentrale, emissionsarme und steuerbare Technologie vorgestellt werden, die eine definierte Aschequalität für die P-Rückgewinnung liefert.

Darüber hinaus bietet die Carbotechnik-Pilotanlage die Möglichkeit, die Technologie im realen Betrieb zu demonstrieren. Betreiber, Behörden und Industriepartner können die vollständige Prozesskette von der Dosierung über die Verbrennung bis zur Ascheentnahme vor Ort erleben. Die Versuchsanlage eignet sich damit als Demonstrator für Schulungen, Technologievergleiche und Entscheidungsprozesse im Rahmen der Umsetzung der AbfKlärV.

Die Projektergebnisse können zudem in Innovationsnetzwerken, Facharbeitskreisen und regionalen Workshops präsentiert werden, um den Transfer in weitere Regionen und Betreiberstrukturen zu unterstützen.

6. Einhaltung der Ausgaben-/Kosten- und Zeitplanung (max. 4000 Zeichen)*

Die Ausgaben- und Kostenplanung wurde im Wesentlichen eingehalten. Alle bewilligten Mittel wurden zweckentsprechend eingesetzt und den geplanten Arbeitspaketen zugeordnet. Zeitliche Verschiebungen ergaben sich durch die Suche nach einem geeigneten Lohnmahlpartner sowie durch die Integration der Heißgasfiltration, die aufgrund technischer Abstimmungen und Lieferzeiten mehr Zeit beanspruchte als ursprünglich vorgesehen. Diese Verzögerungen konnten durch organisatorische Anpassungen vollständig kompensiert werden, sodass die inhaltlichen Ziele fristgerecht erreicht wurden.

Die Erweiterung der Versuchsanlage, die Durchführung der Verbrennungsversuche, die Integration der Additivdosierung und der Heißgasfiltration sowie die analytischen Untersuchungen wurden innerhalb des vorgesehenen finanziellen Rahmens umgesetzt. Die Projektlaufzeit wurde eingehalten, und alle geplanten Arbeiten konnten abgeschlossen und dokumentiert werden.

Fazit

Das Verbundvorhaben DreiSATS hat gezeigt, dass die Staubfeuerung eine technisch robuste, emissionsarme und verlässlich steuerbare Technologie für die mono-thermische Klärschlammverwertung darstellt. Die im Projekt durchgeführten Untersuchungen unter realen Feuerungsbedingungen lieferten

in Arbeit

erstmals einen umfassenden Datensatz zu Verbrennung, Emissionsbildung, Aschequalität, Schwermetallverteilung und Phosphorlöslichkeit im Technikumsmaßstab. Die Ergebnisse bestätigen, dass die Staubfeuerung stabile Flammenbilder, niedrige CO- und NO_x-Emissionen sowie reproduzierbare Aschequalitäten erzeugt.

Die Arbeiten verdeutlichen, dass die Partikelgrößenverteilung des Brennstoffs ein zentraler Stellhebel für die Prozessstabilität ist. Die im Projekt entwickelte Methodik zur Mahlung, Siebung und Fluidisierung bildet eine belastbare Grundlage für die spätere großtechnische Umsetzung. Ebenso konnte gezeigt werden, dass die In-Situ-Modifikation und die Heißgasfiltration einen relevanten Beitrag zur Verbesserung der Phosphorlöslichkeit und zur thermischen Schwermetallentfrachtung leisten können. Die Kombination aus additivgestützter Aschemodifikation und Hochtemperaturfiltration eröffnet neue Optionen für die Erzeugung rückgewinnungsfähiger Aschen.

Die im Projekt gewonnenen Erkenntnisse zur Aschemineralogie, zur P_{NAC}-Löslichkeit und zur Schadstoffverteilung bilden eine wichtige Grundlage für die spätere Produktentwicklung und die Bewertung der P-Rückgewinnungspfade. Die Ergebnisse der Pflanzversuche bestätigen die pflanzenbauliche Wirksamkeit der Aschen und unterstreichen die Eignung der Staubfeuerung als Baustein einer regionalen Phosphorstrategie.

Mit den erarbeiteten Stoff- und Energiebilanzen, den Anlagenlayouts und den verfahrenstechnischen Betriebsfenstern liegt ein konsistentes Konzept für die großtechnische Umsetzung vor. Die enge Zusammenarbeit der Verbundpartner IKTS, VKD, LTC und Pontes Pabuli ermöglichte die vollständige Abdeckung der Prozesskette.

Insgesamt zeigt das Projekt DreiSATS, dass die Staubfeuerung ein vielversprechender Technologiepfad für die regionale Klärschlammverwertung und das Phosphorrecycling ist. Die Ergebnisse bilden eine belastbare Grundlage für die Anschlussphase. Gleichzeitig wurden weitere Optimierungspotenziale identifiziert, insbesondere hinsichtlich der gezielten Schwermetallreduktion und der langfristigen Stabilität der P-Verwertungsoptionen. Das Projekt hat damit die wesentlichen Voraussetzungen geschaffen, um die Staubfeuerung in die großtechnische Anwendung zu überführen und einen Beitrag zur Umsetzung der AbfKlärV zu leisten.