Schlussbericht

Verbundprojekt:	Technologiedemonstration zur Kombination von Staubfeuerung und Säureaufschlussgranulierung mit integrierter Schwermetallabscheidung für das regionale Phosphorrecycling aus Klärschlämmen im „Mitteldeutschen Dreiländereck“ Sachsen-Anhalt, Thüringen und Sachsen **DreiSATS**
Teilprojekt:	4
Zuwendungsempfänger:	**LTC - Lufttechnik Crimmitschau GmbH** Gewerbering 24, 08451 Crimmitschau
Förderkennzeichen:	02WPR1544D
Bewilligungszeitraum:	01.07.2020 – 30.06.2025
Berichtszeitraum:	01.07.2020 – 30.06.2025
Projektleitung:	**Holger Ullmann**

Crimmitschau, den 30.06.2026

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis **I**

Abkürzungsverzeichnis **II**

Abbildungsverzeichnis **III**

I Kurze Darstellung **1**
I.1 Aufgabenstellung 1
I.2 Kompetenzen und Ausstattung 2
I.3 Planung und Ablauf des Vorhabens 3
I.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Projektbeginn 7
I.5 Aufzählung der wichtigsten wissenschaftlich-technischen Ergebnisse 8
I.6 Zusammenarbeit mit anderen Stellen 11

II Eingehende Darstellung (ca. 20 Seiten) **12**
II.1 Ergebnisdarstellung 12
II.1.1 Hauptarbeitspaket 2: Adaption Staubfeuerung für die Mono-Klärschlamm-Verbrennung und In-Situ-Modifikation und Schwermetallabtrennung 12
II.1.1.1 AP 2.2: In-Situ-Modifikation und Heißgasfiltration zur Schwermetallabscheidung 12
II.1.1.2 AP 2.3: Umbau und Erweiterung Pilotanlage Staubfeuerung 16
II.1.2 Hauptarbeitspaket 5: Bilanzierungen, Stakeholder und Vorbereitung Anschlussphase zur kommerziellen Umsetzung 22
II.1.2.1 AP 5.2: Ableitung eines Grundkonzeptes zur großtechnischen Umsetzung im Produktionsmaßstab 22
II.1.2.2 AP 5.4: Vorbereitung Anschlussphase zur kommerziellen Umsetzung am Modellstandort Zorbau 24
II.1.3 Hauptarbeitspaket 6: Projektkoordination und Öffentlichkeitsarbeit 25
II.1.3.1 AP 6.1: Öffentlichkeitsarbeit 25
II.1.3.2 AP 6.2: Projektkoordination und Berichtswesen 26
II.2 Zahlenmäßiger Nachweis 26
II.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit 26
II.4 Nutzbarkeit der Ergebnisse 26
II.5 Fortschritte bei anderen Stellen 26
II.6 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen 26

Anlage A - Erfolgskontrollbericht

Abkürzungsverzeichnis

AD 2000	technisches Regelwerk für Druckgeräte
CAD	Computer-Aided Design
IKTS	Fraunhofer Institut für keramische Technologien und Systeme
LTC	LTC - Lufttechnik Crimmitschau GmbH
FuE	Forschung und Entwicklung
GIS	Geoinformationssystem
HPO	Regelwerk und eine Herstellerqualifikation für Betriebe, die Druckgeräte und Rohrleitungen herstellen oder reparieren
KS	Klärschlamm
MAG	Metall-Aktivgas
MgCl2	Magnesiumchlorid
MIG	Metall-Inertgas
Na2CO3	Natriumcarbonat
NaCl	Natriumchlorid
NH4Cl	Ammoniumchlorid
R&I	Rohrleitungs- und Instrumentenfließschema
TM	Trockenmasse
WIG	Wolfram-Inertgas

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Umsetzungsschritte DreiSATS – vom Grobkonzept zur kommerziellen Anlage (Stand: 2020) 3
Abbildung 2: Arbeitsplan DreiSATS – Umsetzungs- und Validierungsphase 2020 – 2025 (Stand 2020) 6
Abbildung 3: Entwurf Anlagenkonzept Bypass-Lösung 12
Abbildung 4: Entwurf R&I Versuchsanlage 13
Abbildung 5: Ausführung R&I Versuchsanlage 15
Abbildung 6: Ausführung Modell 16
Abbildung 7: Probemontage LTC – Verrohrung und Komponenten 17
Abbildung 8: Probemontage LTC – Verrohrung und Komponenten 17
Abbildung 9: Probemontage LTC – Verrohrung und Komponenten 18
Abbildung 10: Montage Magdeburg – Heißgasfilteranlage 18
Abbildung 11: Montage Magdeburg – Heißgasfilteranlage (links) und Additivzugabe (rechts) 18
Abbildung 12: Ablagerungen im Versuchsbetrieb 20
Abbildung 13: Ablagerungen im Versuchsbetrieb 21

I Kurze Darstellung

I.1 Aufgabenstellung

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

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

In dem Teilvorhaben 4 war die Entwicklung, Auslegung und experimentelle Validierung eines Systems zur Heißgasfiltration unter realitätsnahen Einsatzbedingungen durchzuführen. Aufbauend auf labor- und versuchstechnischen Untersuchungen bestand die zentrale Aufgabe darin, die verfahrenstechnischen und konstruktiven Grundlagen für eine großtechnisch einsetzbare Heißgasfiltrationsanlage zu erarbeiten, diese anlagentechnisch umzusetzen und in die bestehende Infrastruktur der Staubfeuerungsanlage am Standort Magdeburg zu integrieren. Dabei waren sowohl die Anforderungen an die thermische und mechanische Belastbarkeit der Komponenten als auch die Randbedingungen des Anlagenbetriebs zu berücksichtigen.

Ein weiterer Schwerpunkt lag auf der wissenschaftlich-technischen Untersuchung des Betriebsverhaltens der Heißgasfiltration im integrierten Anlagenverbund. Hierzu waren geeignete Monitoring- und Auswertungsverfahren zu entwickeln und anzuwenden, um das Systemverhalten unter variierenden Betriebsbedingungen zu analysieren und gegebenenfalls Anpassungen zur Optimierung der Anlagenperformance abzuleiten. Die Bearbeitung erfolgte dabei in enger Abstimmung mit den weiteren Teilprojekten des Verbundvorhabens, um die Kompatibilität der entwickelten Lösungen mit den übergeordneten Projektzielen sicherzustellen.

Darüber hinaus war die Ermittlung grundlegender verfahrenstechnischer und materialtechnischer Kenngrößen des Ascheaustrags im Nachgang der Heißgasfiltration Gegenstand der Untersuchungen. Im Fokus standen dabei insbesondere die Analyse und Optimierung des Austragsverhaltens der nach der Abreinigung von Filterkerzen anfallenden heißen Aschen sowie die Sicherstellung eines kontinuierlichen und störungsfreien Materialtransports. Zur Identifikation und Minimierung technischer Risiken waren Vorversuche, systematische Werkstoff- und Materialuntersuchungen sowie betriebsbegleitende Analysen

durchzuführen. Die gewonnenen Erkenntnisse dienten der Ableitung geeigneter konstruktiver und verfahrenstechnischer Maßnahmen zur Gewährleistung eines zuverlässigen Anlagenbetriebs und zur Erhöhung der Betriebssicherheit der Heißgasfiltration.

I.2 Kompetenzen und Ausstattung

Die LTC Lufttechnik Crimmitschau GmbH ist ein mittelständisches Unternehmen des Maschinen- und Anlagenbaus mit langjähriger Erfahrung in der Entwicklung, Konstruktion, Fertigung und Montage lufttechnischer sowie verfahrenstechnischer Anlagen. Das Unternehmen verfügt über umfassende Kompetenzen entlang der gesamten Wertschöpfungskette von der verfahrenstechnischen Konzeption und konstruktiven Auslegung über die Fertigung bis hin zur Montage, Inbetriebnahme und dem After-Sales-Service komplexer Anlagen und Apparate. Die Entwicklung kundenspezifischer Lösungen sowie die Realisierung kompletter Anlagensysteme aus einer Hand stellen dabei wesentliche Alleinstellungsmerkmale dar.

Im Bereich der Luftreinhaltung und Umwelttechnik besitzt die LTC umfangreiche Erfahrungen bei der Planung und Herstellung von Filteranlagen zur Abscheidung von Stäuben, Gasen und Aerosolen, von Entstaubungsanlagen für industrielle Anwendungen sowie von Abluftwäschern, Biofiltern und Aktivkohlefiltersystemen. Darüber hinaus entwickelt und fertigt das Unternehmen verfahrenstechnische Spezialapparate, Behälter, Silos, Austragseinrichtungen und Komponenten für den Materialtransport. Diese Kompetenzen bilden eine wesentliche Grundlage für die Bearbeitung der Aufgabenstellungen im Vorhaben zur Heißgasfiltration und insbesondere für die konstruktive Umsetzung sowie die Integration der entwickelten Filtrationstechnik in bestehende Feuerungs- und Versuchsanlagen.

Für die Bearbeitung des Vorhabens bringt die LTC ihre langjährigen Erfahrungen im Apparate- und Filteranlagenbau sowie ihre Expertise bei der Entwicklung von Austrags- und Fördersystemen für Schüttgüter und Stäube ein. Von besonderer Bedeutung für die Projektziele sind die Kompetenzen bei der Konstruktion von Filtergehäusen, druck- und druckstoßfesten Anlagenkomponenten, Zyklonen, Austragsschnecken, Schwingaustragsböden, Doppelpendelklappen und weiteren Einrichtungen zur Handhabung und Förderung von Feststoffen. Diese Erfahrungen bilden eine wichtige Grundlage für die Entwicklung eines zuverlässigen Ascheaustragssystems nach der Heißgasfiltration sowie für die Auslegung der zugehörigen Komponenten unter erhöhten thermischen und mechanischen Belastungen.

Die technische Ausstattung der LTC ermöglicht die Herstellung großdimensionierter verfahrenstechnischer Komponenten und Apparate bis zu einem Durchmesser von 3,5 m, einer Länge von 12 m sowie einem Stückgewicht von bis zu 10 t. Dabei können sowohl unlegierte als auch warmfeste, hochlegierte und verschleißbeständige Werkstoffe verarbeitet werden. Insbesondere die Verarbeitung hochtemperaturbeständiger Edelstähle und Sonderwerkstoffe stellt eine wichtige Voraussetzung für die Realisierung von Komponenten der Heißgasfiltration dar. Die Fertigungskapazitäten umfassen moderne Anlagen zur Blech- und Profilbearbeitung, CAD-gestützte Plasmaschneidtechnik, Rundbiegemaschinen, WIG-, MIG-, MAG- und Plasmaschweißverfahren sowie umfangreiche Montage- und Prüfeinrichtungen.

Die hohe technische Kompetenz wird durch entsprechende Qualifikationen und Zulassungen untermauert. Hierzu zählen unter anderem die HP0-Zulassung nach AD 2000, die Zulassung nach DIN EN 13445 für Druckgeräte, die Zertifizierung nach DIN EN ISO 3834-2 für schweißtechnische Qualitätsanforderungen sowie die Herstellerqualifikation nach DIN EN 1090 EXC2 für Stahl- und Aluminiumtragwerke. Diese Voraussetzungen gewährleisten die normgerechte Konstruktion und Fertigung sicherheitsrelevanter Komponenten für anspruchsvolle verfahrenstechnische Anwendungen.

Im Rahmen des Verbundvorhabens übernimmt die LTC insbesondere die konstruktive Auslegung, fertigungstechnische Umsetzung und montagegerechte Integration der Heißgasfiltrationsanlage einschließlich der zugehörigen Austrags- und Fördertechnik. Durch die Kombination aus langjähriger Erfahrung im Anlagenbau, umfassenden Fertigungsmöglichkeiten

und ausgewiesener Expertise im Bereich der Luftreinhaltung leistet das Unternehmen einen wesentlichen Beitrag zur Entwicklung und Demonstration einer betriebssicheren und industriell übertragbaren Lösung für die Heißgasfiltration und den nachgeschalteten Ascheaustrag.

I.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

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

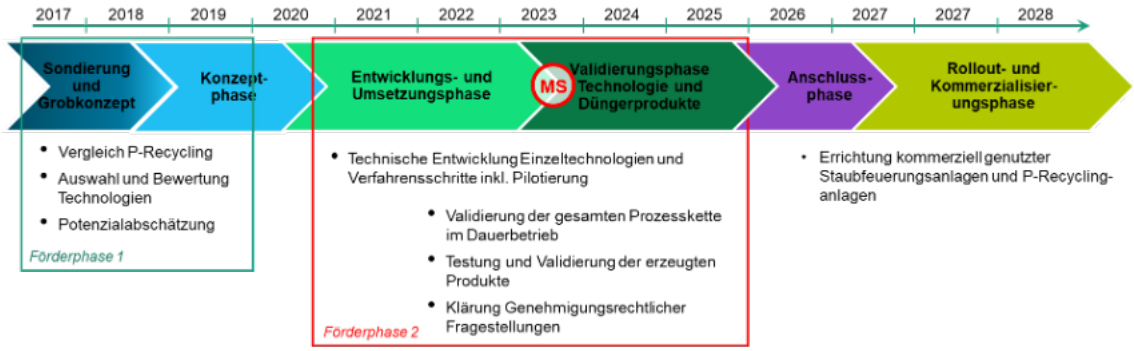


Abbildung 1: Umsetzungsschritte DreiSATS – vom Grobkonzept zur kommerziellen Anlage (Stand: 2020)

Zum Erreichen der oben genannten Zielstellungen wurde ein gemeinsamer detaillierter Arbeitsplan erstellt, in welchem die partnerspezifischen Inhalte enthalten sind. Der Arbeitsplan (vgl. nachfolgende Abbildung) gliedert sich in 6 Hauptarbeitspakete.

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

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

Ziel des Hauptarbeitspaketes 2 für LTC war die Entwicklung, Auslegung, Konstruktion und Integration einer Heißgasfiltrationsanlage zur Abscheidung und thermochemischen Modifikation von Klärschlammaschen im Umfeld einer Staubfeuerungsanlage. Im Fokus stand die Übertragung der von den Projektpartnern erarbeiteten verfahrenstechnischen Grundlagen in ein technisch umsetzbares Anlagenkonzept sowie dessen Integration in die Demonstrationsanlage am Standort Magdeburg. Die Heißgasfiltration sollte dabei die Abreinigung heißer Flugaschen ermöglichen und gleichzeitig die Voraussetzungen für eine In-situ-Schwermetallabtrennung durch Additivzugabe schaffen. Grundlage hierfür war die Entwicklung einer Filtereinheit, die unter den besonderen Randbedingungen der Klärschlammstaubverbrennung – hohe Staubfrachten, erhöhte Temperaturen und aggressive Prozessatmosphären – zuverlässig betrieben werden kann. Die grundlegenden Entwicklungsziele wurden bereits in der Teilvorhabenbeschreibung der LTC definiert und umfassten die Entwicklung, Konstruktion, Errichtung und Einbindung der Heißgasfiltration in die

Demonstrationsanlage sowie die Untersuchung geeigneter keramischer Filtermaterialien und Austragskonzepte für heiße Aschen.

Im ersten Entwicklungsschritt führte LTC die verfahrenstechnische Auslegung der Gesamtanlage durch. Hierzu wurden die wesentlichen Betriebsparameter wie Volumenströme, Temperaturen, Druckverhältnisse, Wartungs- und Standzeiten sowie Anforderungen an die Filterabreinigung und den Ascheaustrag definiert. Parallel erfolgte die Erarbeitung eines Anlagenkonzeptes einschließlich der Bewertung unterschiedlicher Bypass-Varianten, der Definition der Schnittstellen zur Staubfeuerungsanlage und der Festlegung des Anlagenstandortes. Diese Arbeiten bildeten die Grundlage für die Erstellung des Pflichtenheftes und die spätere Detailplanung der Anlage.

Ein wesentlicher Schwerpunkt der Arbeiten lag auf der Entwicklung des verfahrenstechnischen Anlagenkonzeptes. Gemeinsam mit den Projektpartnern IKTS und Carbotechnik entwickelte LTC ein vollständiges Rohrleitungs- und Instrumentierungsdiagramm (R&I-Schema), definierte die möglichen Betriebszustände der Anlage und führte eine systematische Sicherheitsanalyse der Heißgasfiltration durch. Darüber hinaus wurden die Anforderungen an die Mess-, Steuer- und Regelungstechnik spezifiziert sowie Funktionsbeschreibungen für die spätere Ausschreibung und Implementierung der Steuerungstechnik erstellt.

Parallel hierzu entwickelte LTC ein Konzept zur Additivdosierung für die In-situ-Modifikation der Aschen. Ziel war die reproduzierbare Dosierung verschiedener Additive, insbesondere NH4Cl, Na2CO3, NaCl und MgCl2, zur gezielten Beeinflussung der Schwermetallverteilung im Verbrennungsprozess. Hierfür wurden Anforderungen an Korngröße, Dosiergenauigkeit, Fördertechnik und Vermeidung von Agglomerationen definiert. Nach der Untersuchung verschiedener Einspeisemöglichkeiten wurde eine Lösung entwickelt, bei der die Additive über einen vorhandenen Stutzen der Staubfeuerungsanlage in den Prozess eingebracht werden konnten. Dadurch ließ sich die Modifikation der Asche ohne tiefgreifende Eingriffe in die Feuerungstechnik realisieren.

Im Rahmen der ingenieurwissenschaftlichen Entwicklung zeigte sich, dass wesentliche Randbedingungen der ursprünglich vorgesehenen Anlagenkonzeption angepasst werden mussten. Insbesondere erwies sich die Temperaturbeständigkeit marktverfügbarer Ventilatoren als limitierender Faktor. LTC entwickelte deshalb eine Bypass-Lösung mit definierter Frischluftzumischung, um die Gastemperatur vor dem Ventilator auf maximal etwa 300 °C zu begrenzen. Gleichzeitig wurde das Konzept des Ascheaustrages grundlegend überarbeitet. Anstelle einer kontinuierlichen Austragung entstand ein zweistufiges Austragssystem, das einen Behälterwechsel während des laufenden Betriebes ermöglicht und damit die Betriebssicherheit deutlich erhöht.

Auf Basis der abgeschlossenen Engineeringarbeiten erfolgte die konstruktive Umsetzung der Anlage. LTC entwickelte die Aufstellungs- und Integrationskonzepte für die Heißgasfiltration, erstellte Modelle der Versuchsanlage und führte die Anpassung der Komponenten an die räumlichen Gegebenheiten der Versuchshalle in Magdeburg durch. Anschließend wurden die erforderlichen Komponenten beschafft, gefertigt und montiert. Die realisierte Versuchsanlage umfasste die Dosierstation zur Additivzugabe, die Heißgasfiltereinheit, die Ventilatorstation sowie die erforderlichen Rohrleitungs- und Sicherheitseinrichtungen.

Nach Abschluss der Montage unterstützte LTC die Inbetriebnahme und die Optimierung des Anlagenbetriebes. Während der Versuchsfahrten wurden Betriebsdaten aufgenommen und technische Herausforderungen analysiert. Dabei zeigte sich insbesondere eine ausgeprägte Schlacke- und Ablagerungsbildung im Bereich zwischen Nachbrennkammer und Heißgasfilter. Diese Ablagerungen führten zu einer Verringerung des Volumenstromes, zu erhöhten Druckverlusten sowie zu einer Absenkung der Filtertemperatur und beeinträchtigten dadurch die geplante Betriebsweise der Heißgasfiltration. LTC analysierte die Ursachen dieser Effekte, bewertete deren Auswirkungen auf die Prozessführung und leitete Optimierungsmaßnahmen für den weiteren Anlagenbetrieb ab.

Zusammenfassend bestand der Beitrag der LTC im Hauptarbeitspaket 2 in der vollständigen ingenieurtechnischen Entwicklung der Heißgasfiltration einschließlich Anlagenkonzeption, Verfahrenstechnik, Sicherheitsbetrachtung, Additivdosierung, Detailengineering, Konstruktion, Fertigung, Montage, Inbetriebnahme und betrieblicher Optimierung. Damit schuf LTC die technische Grundlage für die experimentelle Untersuchung der In-situ-Aschemodifikation und Heißgasfiltration im Staubfeuerungsprozess und leistete einen wesentlichen Beitrag zur Demonstration der Gesamttechnologie.

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

Das Hauptarbeitspaket 5 diente für LTC der Übertragung der im Demonstrationsmaßstab gewonnenen Erkenntnisse auf industrielle Anwendungen und damit der Vorbereitung einer großtechnischen Umsetzung der entwickelten Technologie. Die Beiträge der LTC konzentrierten sich insbesondere auf die Teilaufgaben AP 5.2.1 „Teilkonzeption einer Verbrennungsanlage mit Staubfeuerung“ sowie AP 5.4.1 „Zusammenstellung von Informationen und Prozessdaten für die Auslegung der Komponenten und des Gesamtsystems im großtechnischen kommerziellen Maßstab“.

Hierzu wurden die während der Entwicklung, Inbetriebnahme und Optimierung der Heißgasfiltrationsanlage gewonnenen Betriebs- und Auslegungsdaten systematisch erfasst und ausgewertet. Im Mittelpunkt standen die verfahrenstechnischen Randbedingungen der Heißgasfiltration, die Anforderungen an die Filtertechnik, die Auslegung des Ascheaustrags, die Temperaturführung, die Druckverluste sowie die Integration der Additivdosierung in den Gesamtprozess. Darüber hinaus wurden die im Versuchsbetrieb identifizierten Herausforderungen, insbesondere die Bildung von Schlacken und Ablagerungen im Bereich der Nachbrennkammer und der Heißgasführung, hinsichtlich ihrer Relevanz für industrielle Anlagen bewertet.

Die gewonnenen Erkenntnisse wurden genutzt, um Anforderungen an eine zukünftige großtechnische Anlage abzuleiten und Auslegungskriterien für die Dimensionierung der Heißgasfiltration sowie der zugehörigen Nebenaggregate bereitzustellen. Damit leistete LTC einen wesentlichen Beitrag zur technischen Bewertung der Gesamttechnologie und zur Schaffung einer belastbaren Datengrundlage für die industrielle Umsetzung eines integrierten Verfahrens zur Mono-Klärschlammverbrennung mit In-situ-Aschemodifikation und Heißgasfiltration.

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

Im HA 6 sind alle Arbeiten zum strukturierten Informationsaustausch über gängige digitale Wege und zum besseren Workflow durch die Fraunhofer OwnCloud, Arbeiten zur öffentlichkeitswirksamen Präsentation, alle Arten der Projektkoordination und Planung der weiteren Arbeiten enthalten. Ziel dieses Hauptarbeitspaketes ist die Bündelung, Verteilung und Koordinierung der im Projekt entstandenen Ergebnisse.

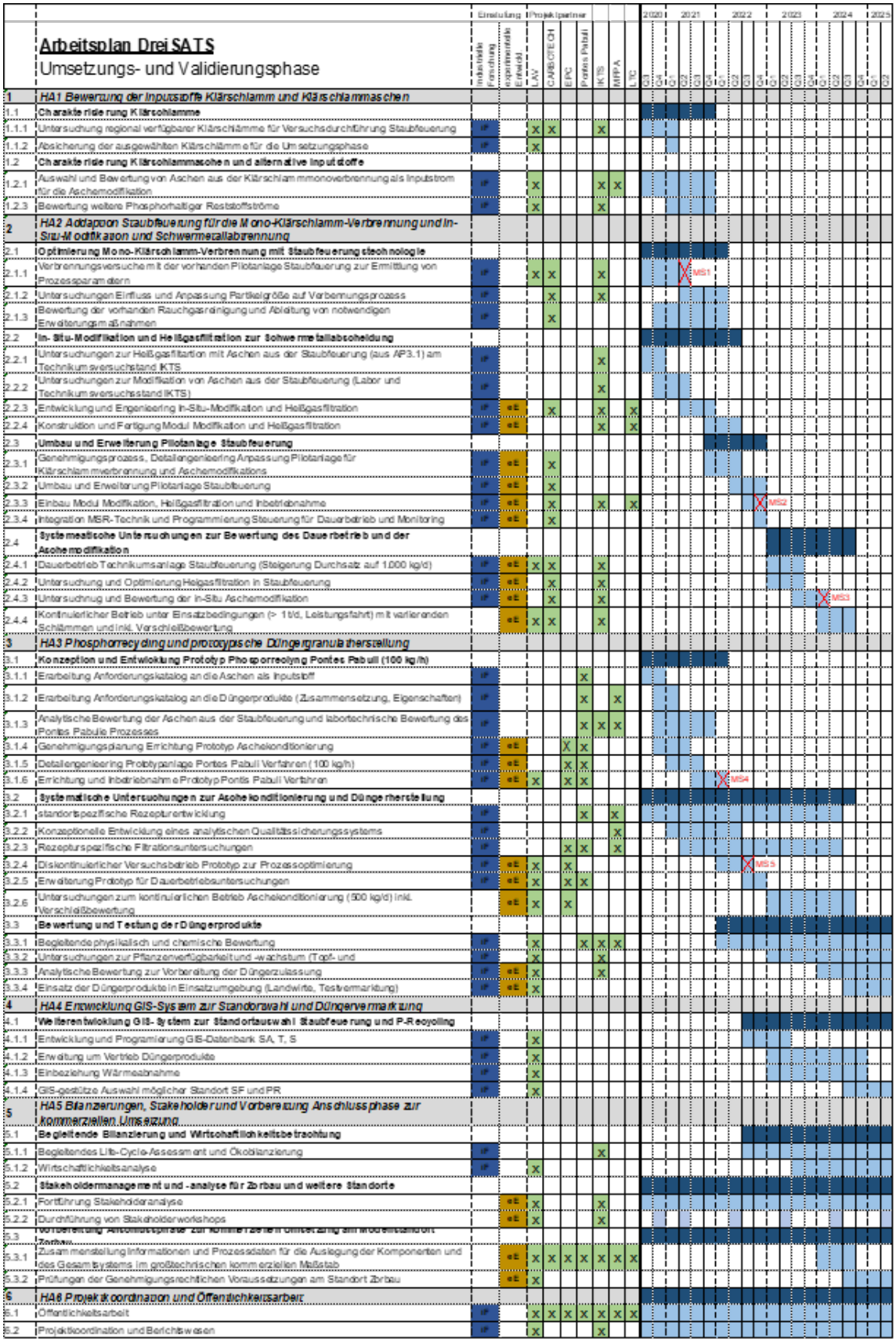


Abbildung 2: Arbeitsplan DreiSATS – Umsetzungs- und Validierungsphase 2020 – 2025 (Stand 2020)

I.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Projektbeginn

Zum Zeitpunkt des Projektbeginns war die thermische Klärschlammverwertung bereits als etablierter Verfahrenspfad zur Entsorgung und Verwertung kommunaler Klärschlämme anerkannt. Insbesondere die Monoklärschlammverbrennung wurde als wesentliche Voraussetzung für die Rückgewinnung von Phosphor aus den entstehenden Aschen betrachtet. Gleichzeitig stellte die Belastung der Klärschlammaschen mit Schwermetallen eine zentrale technische und wirtschaftliche Herausforderung dar, da erhöhte Schwermetallgehalte die direkte stoffliche Nutzung der Aschen erheblich einschränken oder zusätzliche Aufbereitungsschritte erforderlich machen.

Die am Markt verfügbaren Verfahren zur Schwermetallabtrennung aus Klärschlammaschen basierten überwiegend auf nachgeschalteten thermo-chemischen oder nasschemischen Behandlungsprozessen. Beispiele hierfür sind Verfahren wie ASHDEC, MEPHREC, TetraPhos oder Ash2Phos. Diese Technologien ermöglichen zwar eine Reduzierung der Schwermetallgehalte beziehungsweise die Rückgewinnung von Phosphor, sind jedoch mit einem hohen apparativen Aufwand, erheblichem Energiebedarf sowie teilweise einem umfangreichen Einsatz von Chemikalien verbunden. Darüber hinaus erfolgt die Schwermetallentfrachtung erst nach der Verbrennung, wodurch zusätzliche Prozessschritte erforderlich werden.

Im Rahmen der dem Verbundvorhaben vorgelagerten Konzeptphase wurden verschiedene Verfahren der thermochemischen Konversion von Klärschlämmen untersucht. Neben der hydrothermalen Carbonisierung, der Pyrolyse und der Vergasung wurde insbesondere die Verbrennung hinsichtlich ihrer technologischen und wirtschaftlichen Eignung bewertet. Dabei zeigte sich, dass insbesondere die Staubfeuerung gegenüber der etablierten Wirbelschichtverbrennung für kleinere und mittlere Anlagengrößen erhebliche Vorteile hinsichtlich Investitionskosten, Regelbarkeit und Prozessflexibilität bietet. Zudem entstehen bei der Staubfeuerung deutlich feinere Aschepartikel mit größerer spezifischer Oberfläche, wodurch sowohl die Schwermetallabtrennung als auch nachfolgende Aufschlussprozesse begünstigt werden können.

Die Abscheidung von Partikeln aus heißen Prozessgasen mittels keramischer Heißgasfiltration war zu Projektbeginn grundsätzlich Stand der Technik. Insbesondere im Zusammenhang mit der Entwicklung moderner Kohlekraftwerkskonzepte wurden seit den 1990er Jahren umfangreiche Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zur Heißgasfiltration durchgeführt. Dabei konnte die technische Eignung keramischer Filterkerzen für Temperaturen bis etwa 850 °C sowie die Wirksamkeit von Druckstoßabreinigungen nachgewiesen werden. Ebenso standen geeignete keramische Werkstoffe mit hoher Temperatur-, Korrosions- und Kriechbeständigkeit zur Verfügung. Die industrielle Anwendung konzentrierte sich jedoch überwiegend auf Kraftwerks- und Vergasungsprozesse. Für die gezielte In-situ-Abtrennung flüchtiger Schwermetallverbindungen aus Klärschlammverbrennungsaschen lagen lediglich Demonstrator- und Technikumsuntersuchungen vor. Eine Übertragung auf den kontinuierlichen Betrieb von Staubfeuerungsanlagen war bislang nicht erfolgt.

Vorarbeiten des Fraunhofer IKTS und weiterer Projektpartner konnten die prinzipielle Machbarkeit einer thermochemischen Modifizierung von Schwermetallverbindungen mit anschließender Heißgasfiltration bereits im Technikumsmaßstab nachweisen. Hierbei wurden Schwermetalle durch gezielte Additivzugabe in leicht flüchtige Verbindungen überführt und anschließend mittels keramischer Filterelemente aus dem Heißgasstrom abgeschieden. Die Integration dieser Technologie in eine Staubfeuerung sowie die Entwicklung einer robusten, kontinuierlich betreibbaren Heißgasfiltration mit geeignetem Filterabreinigungs- und Ascheaustragssystem stellten jedoch weiterhin wesentliche wissenschaftlich-technische Herausforderungen dar.

Ausgangssituation und Vorarbeiten der LTC Lufttechnik Crimmitschau GmbH

Die LTC Lufttechnik Crimmitschau GmbH verfügte zu Projektbeginn über langjährige Erfahrungen im Bereich des Anlagenbaus für Luftreinhaltung, Entstaubung und industrielle Filtration. Das Unternehmen entwickelte und fertigte lufttechnische Anlagen zur Abscheidung von Stäuben, Gasen und Aerosolen sowie Filteranlagen für unterschiedlichste industrielle Anwendungen. Schwerpunkte lagen dabei in der Entwicklung kundenspezifischer Filtrationslösungen, der Konstruktion von Filtergehäusen und verfahrenstechnischen Apparaten sowie der Realisierung kompletter Anlagen einschließlich Montage und Inbetriebnahme.

Besondere Erfahrungen bestanden im Bereich der Filtration von Prozessgasen und industriellen Abluftströmen. Neben der Abscheidung feiner Partikel in der Lebensmittel- und Pharmaindustrie realisierte die LTC auch Anlagen zur Entstaubung von groben Stäuben, beispielsweise im Bereich der Energie- und Kraftwerkstechnik. Darüber hinaus lagen bereits Erfahrungen bei der Filtration heißer Prozessgase vor, sodass die Heißgasfiltration für das Unternehmen kein grundsätzlich neues Technologiefeld darstellte. Insbesondere das vorhandene Know-how hinsichtlich Werkstoffauswahl, thermischer Beanspruchung und konstruktiver Auslegung hochtemperaturbelasteter Komponenten bildete eine wichtige Grundlage für die Projektbearbeitung.

Zusätzlich verfügte die LTC über umfangreiche Kompetenzen im Apparate-, Behälter- und Druckgerätebau. Hierzu gehörten die Auslegung und Fertigung von Druckbehältern, Sonderapparaten, Austrags- und Fördereinrichtungen sowie die Integration von Mess-, Steuerungs- und Automatisierungstechnik. Durch die vorhandenen Zulassungen und Fertigungskapazitäten war das Unternehmen in der Lage, komplexe Versuchsanlagen eigenständig zu planen, zu fertigen und in bestehende Anlagenumgebungen zu integrieren.

Trotz dieser umfangreichen Vorarbeiten bestand zu Projektbeginn ein erheblicher Forschungs- und Entwicklungsbedarf hinsichtlich der Übertragung der Heißgasfiltration auf die spezifischen Randbedingungen der Klärschlammstaubverbrennung. Insbesondere lagen keine belastbaren Erkenntnisse zur kontinuierlichen Abreinigung keramischer Filterelemente unter den vorliegenden Prozessbedingungen, zum Austragsverhalten heißer Aschen nach der Filterabreinigung sowie zur konstruktiven Umsetzung eines dauerhaft betriebssicheren Heißgasfiltrationsmoduls vor. Die Entwicklung einer integrierten Heißgasfiltrationsanlage einschließlich Filterabreinigung und Ascheaustrag stellte daher den zentralen Innovations- und Entwicklungsgegenstand des Teilvorhabens der LTC dar.

I.5 Aufzählung der wichtigsten wissenschaftlich-technischen Ergebnisse

Im Rahmen des Vorhabens wurde erstmals eine Heißgasfiltration zur In-situ-Modifikation und Abscheidung schwermetallhaltiger Aschefraktionen aus der Staubfeuerung von Klärschlämmen entwickelt, konstruiert, gefertigt, in eine bestehende Versuchsanlage integriert und unter realen Betriebsbedingungen erprobt. Ziel war die technologische Demonstration eines neuartigen Verfahrens zur Schwermetallentfrachtung von Klärschlammaschen als Voraussetzung für ein hochwertiges regionales Phosphorrecycling.

Entwicklung eines neuartigen Anlagenkonzeptes zur Heißgasfiltration

Zu Projektbeginn existierte kein geeignetes Referenzsystem für die Integration einer Heißgasfiltration in eine Klärschlamm-Staubfeuerungsanlage. Daher wurde zunächst gemeinsam mit den Projektpartnern ein vollständiges verfahrenstechnisches Anlagenkonzept entwickelt. Hierzu gehörten die Erstellung des R&I-Schemas, die Definition der Betriebszustände, die sicherheitstechnische Analyse sowie die Auslegung aller verfahrenstechnischen Schnittstellen zwischen Staubfeuerung, Additivdosierung und Heißgasfiltration. Gleichzeitig wurden Anforderungen an Standzeiten, Wartungsintervalle, Betriebsweisen und Produktqualitäten definiert.

Ein wesentliches Ergebnis war die Entwicklung eines flexiblen Bypass-Konzeptes, welches die Entnahme eines definierten Teilstroms aus der Nachbrennkammer der Staubfeuerung und dessen Zuführung zur Heißgasfiltration ermöglicht. Hierdurch konnten unterschiedliche Betriebszustände untersucht und die Versuchsanlage ohne Eingriff in den Hauptprozess betrieben werden.

Entwicklung einer Additivdosierung zur In-situ-Modifikation der Aschen

Ein zentrales wissenschaftlich-technisches Ergebnis war die Entwicklung einer Dosiertechnik zur gezielten Zugabe von Additiven in den Verbrennungsprozess. Ziel war die Umwandlung von Schwermetallen in leichtflüchtige Verbindungen, die anschließend im Heißgasstrom abgeschieden werden können.

Im Rahmen der Untersuchungen wurden Anforderungen an Korngröße, Dosiergenauigkeit, Reproduzierbarkeit und Vermeidung von Agglomerationen definiert. Für die Versuchsarbeiten wurden verschiedene Additive, darunter Ammoniumchlorid, Natriumchlorid, Natriumcarbonat und Magnesiumchlorid betrachtet. Die Dosieranlage wurde so ausgelegt, dass eine reproduzierbare Zugabe im Bereich von 10 bis 60 kg/h möglich ist. Schließlich konnte eine technisch umsetzbare Lösung mit dem Projektpartner Carbotechnik entwickelt werden, bei der die Additive über vorhandene Einbringstellen der Staubfeuerungsanlage in den Verbrennungsprozess eingetragen werden.

Ingenieurwissenschaftliche Entwicklung der Heißgasfiltrationsanlage

Im Verlauf der Auslegung zeigte sich, dass mehrere ursprünglich vorgesehene technische Lösungen unter den realen Randbedingungen nicht umsetzbar waren. Insbesondere die Temperaturbeständigkeit verfügbarer Hochtemperaturventilatoren stellte eine wesentliche Einschränkung dar. Da marktverfügbare Ventilatoren nur bis etwa 300 °C dauerhaft betrieben werden können, wurde eine neuartige Bypass-Lösung mit gezielter Frischluftzumischung entwickelt. Hierdurch konnte die Temperatur des Teilstromes vor dem Ventilator kontrolliert abgesenkt werden, ohne die Funktion der Heißgasfiltration zu beeinträchtigen.

Darüber hinaus wurde ein neuartiges zweistufiges Ascheaustragssystem entwickelt. Dieses ermöglicht den Wechsel von Aschebehältern während des Anlagenbetriebes und gewährleistet gleichzeitig die sichere Handhabung heißer Aschen. Die ursprünglich geplanten Konzepte erwiesen sich als technisch nicht realisierbar, sodass eine vollständige Neuentwicklung erforderlich wurde.

Konstruktion, Fertigung und Aufbau einer Demonstrationsanlage

Auf Grundlage der entwickelten Verfahrenstechnik wurden sämtliche Komponenten der Heißgasfiltration konstruktiv ausgelegt und gefertigt. Dies umfasste insbesondere:

- Heißgasfilter mit keramischen Filterelementen,
- Additiv-Dosierstation,
- Rohrleitungssystem einschließlich Isolierung,
- Ventilator- und Kühlsystem,
- Mess-, Steuerungs- und Regelungstechnik,
- Ascheaustrags- und Sammelsystem.

Parallel dazu erfolgte die Erstellung eines vollständigen 3D-Anlagenmodells sowie die Planung der Integration in die Staubfeuerungsanlage des Projektpartners CARBOTECHNIK in Magdeburg.

Somit konnte eine Demonstrationsanlage für die kombinierte Staubfeuerung mit In-situ-Modifikation und Heißgasfiltration im Technikumsmaßstab realisiert werden.

Nachweis der technischen Funktionsfähigkeit unter Praxisbedingungen

Mit der Inbetriebnahme konnten wesentliche Teilfunktionen der entwickelten Anlage unter Verwendung von Braunkohlenstaub erfolgreich nachgewiesen werden. Hierzu zählen insbesondere:

- die Integration der Heißgasfiltration in den Verbrennungsprozess,
- die kontrollierte Entnahme von Heißgasen aus der Nachbrennkammer,
- die Funktion der Additivdosierung,
- die Abreinigung keramischer Filterelemente,
- der Austrag abgeschiedener Aschen,
- die Erfassung relevanter Betriebsdaten für eine spätere Maßstabsvergrößerung.

Damit wurde die grundsätzliche technische Umsetzbarkeit der entwickelten Verfahrenskombination unter realitätsnahen Betriebsbedingungen bestätigt.

Identifikation neuer wissenschaftlich-technischer Fragestellungen

Während der Versuchsdurchführung wurden wichtige Erkenntnisse zum Verhalten von Klärschlammaschen unter Hochtemperaturbedingungen gewonnen. Insbesondere zeigte sich eine ausgeprägte Schlackebildung in dem Bypass. Offenbar führten niedrigschmelzende Aschebestandteile bereits bei Temperaturen zwischen 950 °C und 1100 °C zur Bildung klebriger Schmelzphasen respektive Sinterungen, die sich an feuerfesten Auskleidungen und in Strömungsberuhigungszonen ablagerten. Dies verursachte Druckverlusterhöhungen, verringerte Gasvolumenströme und beeinträchtigte den vorgesehenen Filterbetrieb erheblich.

Darüber hinaus wurden Ablagerungen im Ansaug- und Rohrleitungssystem zum Heißgasfilter festgestellt. Die Untersuchungen zeigten, dass diese Ablagerungen den Gasstrom reduzierten, den Druckverlust erhöhten und die Filtertemperatur deutlich absenkten.

Die Ursachenanalyse dieser Effekte stellt einen wichtigen Erkenntnisgewinn für die zukünftige industrielle Umsetzung dar und liefert wertvolle Hinweise für die konstruktive Optimierung großtechnischer Anlagen.

Die Lageanordnung der Heißgasfiltration ist aus gegenwärtig Sicht derart zu wählen, dass der gesamte Brenngasstrom verwendet wird und kein Bypass zum Einsatz kommt.

Grundlagen für die großtechnische Umsetzung

Ein weiteres wesentliches Ergebnis des Vorhabens besteht in der Bereitstellung umfangreicher Auslegungs- und Betriebsdaten für eine spätere industrielle Umsetzung. Hierzu gehören Erkenntnisse zu:

- erforderlichen Volumenströmen,
- Temperatur- und Druckverhältnissen,
- Auslegung keramischer Filterflächen,
- Additivbedarf und Dosierstrategien,
- Austrags- und Abreinigungssystemen,
- Werkstoffbeanspruchungen,
- Betriebs- und Sicherheitskonzepten.

Diese Ergebnisse bilden die Grundlage für die zukünftige Auslegung großtechnischer Anlagen zur kombinierten Staubfeuerung, Schwermetallabtrennung und Phosphorrückgewinnung aus Klärschlämmen. Damit wurde ein wesentlicher Beitrag zur Weiterentwicklung nachhaltiger und regionaler Phosphorrecyclingverfahren geleistet.

I.6 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Im Rahmen des Vorhabens hat LTC mit den Projektpartnern zusammengearbeitet.

II Eingehende Darstellung (ca. 20 Seiten)

II.1 Ergebnisdarstellung

II.1.1 Hauptarbeitspaket 2: Adaption Staubfeuerung für die Mono-Klärschlamm-Verbrennung und In-Situ-Modifikation und Schwermetallabtrennung

II.1.1.1 AP 2.2: In-Situ-Modifikation und Heißgasfiltration zur Schwermetallabscheidung

Im Arbeitspaket 2.2 wurden durch die LTC Lufttechnik Crimmitschau GmbH die wesentlichen ingenieurtechnischen Grundlagen für die Entwicklung, Auslegung, Konstruktion und fertigungstechnische Umsetzung des Moduls zur In-Situ-Modifikation und Heißgasfiltration erarbeitet. Ziel war die Realisierung einer verfahrenstechnischen Lösung, mit der schwermetallhaltige Bestandteile der Klärschlammasche bereits im heißen Prozessgasstrom gezielt beeinflusst, abgeschieden und vom weiter zu verwertenden Aschestrom separiert werden können. Die Arbeiten erfolgten in enger Abstimmung mit den Projektpartnern IKTS und CARBOTECHNIK und bildeten die Grundlage für die spätere Integration der Anlage in die Staubfeuerungsversuchsanlage am Standort Magdeburg.

Zu Beginn der Bearbeitung wurden die bau- und betriebstechnischen Anforderungen an die Versuchsanlage systematisch abgeleitet. Hierzu zählten insbesondere die Definition der relevanten Auslegungsparameter wie Volumenstrom, Temperaturbereich, Druckverhältnisse, Filterflächenbelastung, Standzeiten, Wartungsintervalle, Betriebszustände, Abreinigungsregime sowie Anforderungen an den Austrag der heißen Asche. Auf dieser Basis wurde ein Pflichtenheftansatz entwickelt, der die verfahrenstechnischen Schnittstellen zwischen Staubfeuerung, Additivdosierung, Heißgasfilter, Ventilatorstrecke, Ascheaustrag und Steuerungstechnik beschrieb.

Ein wesentliches Ergebnis des Arbeitspakets war die Entwicklung eines vollständigen Anlagenkonzeptes für den variablen Betrieb der Heißgasfiltration.

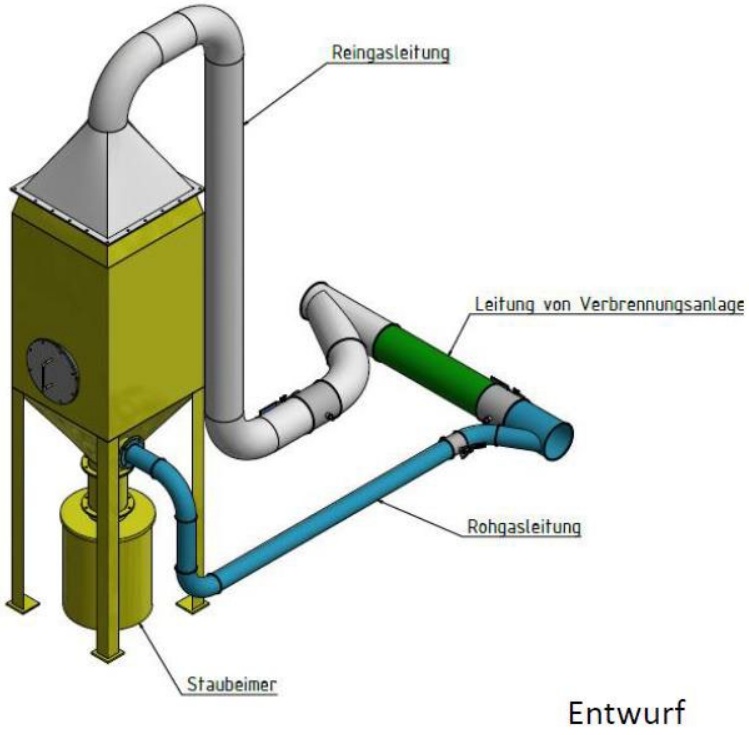


Abbildung 3: Entwurf Anlagenkonzept Bypass-Lösung

Die Anordnung der Komponenten wurde unter Berücksichtigung der Einbausituation in der Versuchshalle Magdeburg, der vorhandenen Staubfeuerungsanlage, der verfügbaren Aufstellflächen, der Rohrleitungsführung sowie der erforderlichen Zugänglichkeit für Betrieb, Wartung und Probenahme geplant. Hierzu wurden Aufstellungsvarianten, R&I-Schemata und Anlagenmodelle erstellt, fortlaufend mit den Projektpartnern abgestimmt und schrittweise in ein umsetzbares Engineering überführt.

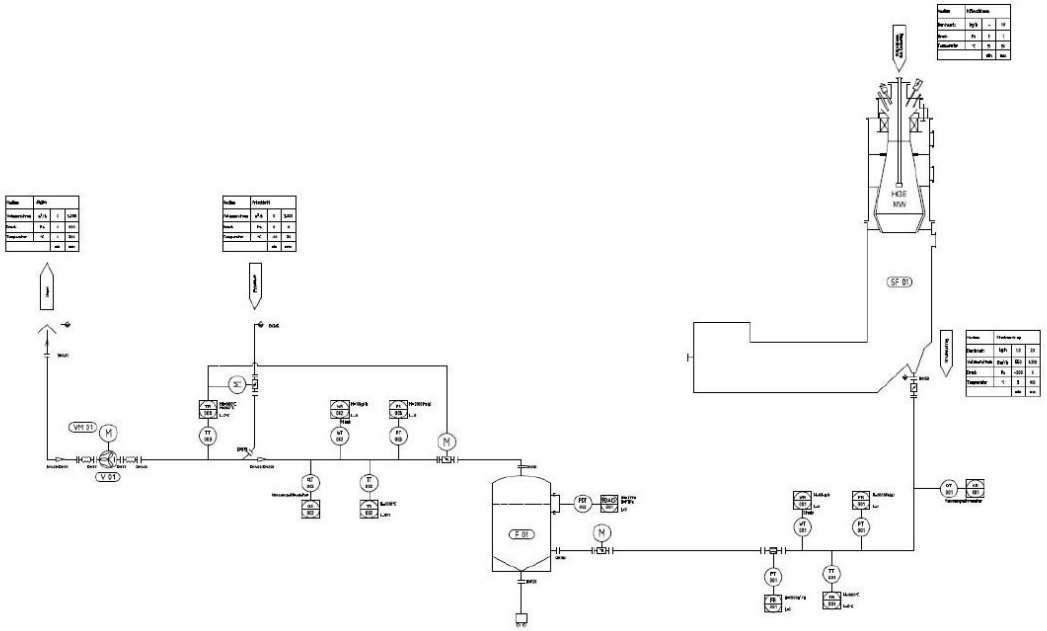


Abbildung 4: Entwurf R&I Versuchsanlage

Von zentraler Bedeutung war die Auslegung der Heißgasfiltration als Bypass-System zur bestehenden Staubfeuerung. Das entwickelte Konzept sah vor, einen definierten Teilstrom aus dem Heißgasbereich der Nachbrennkammer zu entnehmen, diesen über eine Rohrleitungsstrecke dem Filtermodul zuzuführen, dort die Abscheidung der partikulären Bestandteile an keramischen Filterelementen vorzunehmen und das gereinigte Gas über eine Ventilator- und Abluftstrecke abzuführen. Durch die Bypass-Ausführung konnte die Versuchsanlage so konzipiert werden, dass unterschiedliche Betriebszustände und Versuchsfahrweisen untersucht werden konnten, ohne den Hauptbetrieb der Staubfeuerung grundsätzlich zu verändern.

Im Rahmen der sicherheitstechnischen und betrieblichen Betrachtung wurden die möglichen Betriebszustände der Anlage definiert. Hierzu gehörten insbesondere Stillstand, Anfahren, Aufheizen, regulärer Betrieb, Abfahren, Abkühlen sowie Stör- und Gefahrensituationen. Die Sicherheitsanalyse auf Grundlage des R&I-Schemas führte zu wichtigen konstruktiven und betrieblichen Festlegungen. Unter anderem wurde erkannt, dass für den Störfall zusätzliche Maßnahmen zur sicheren Abführung des Heißgasstromes erforderlich sind. Daraus ergaben sich Anforderungen an Redundanz, Emissionsführung, Ventilatorkonzept, Notfahrweisen und steuerungstechnische Verriegelungen.

Ein weiteres wesentliches Ergebnis war die Entwicklung der Lösung zur Additivzuführung für die In-Situ-Modifikation. Die Additivzugabe ist verfahrenstechnisch erforderlich, um Schwermetalle im Verbrennungsprozess beziehungsweise im heißen Asche-Gas-System gezielt in besser abtrennbare Verbindungen zu überführen. Im Arbeitspaket wurden verschiedene Einbringstellen und Dosierprinzipien betrachtet, darunter die Aufgabe in die Förderleitung der Staubfeuerung sowie die Einbringung über Stutzen an der Nachbrennkammer. Bewertet wurden unter anderem Förderschnecken, Zellenradschleusen, Injektorlösungen und pneumatische Fördervarianten.

Im Ergebnis wurde eine technisch umsetzbare Lösung entwickelt, bei der die Additive über vorhandene Schnittstellen der Dosier- beziehungsweise Brennstoffaufgabe der Staubfeuerungsanlage zugeführt werden können. Für die Dosierung wurden Anforderungen an die Additiveigenschaften und an die Dosiertechnik formuliert. Hierzu zählten eine geeignete Aufmahlung, eine gleichförmige Dosierung, eine hohe Dosiergenauigkeit, die Reproduzierbarkeit der aufgegebenen Additivmenge sowie die Vermeidung von Agglomerationen. Damit wurde eine wesentliche Voraussetzung geschaffen, um die In-Situ-Modifikation unter definierten Versuchsbedingungen durchführen zu können.

Parallel zur Additivzuführung wurde das Heißgasfiltermodul konstruktiv entwickelt. Dabei wurden die geometrische Ausführung des Filtergehäuses, die Anordnung der keramischen Filterelemente, die Führung des Roh- und Reingases, die Zugänglichkeit für Wartung und Kontrolle, die Temperaturbeanspruchung, die Dichtheit sowie die Integration des Abreinigungssystems berücksichtigt. Die Filteranlage wurde so ausgelegt, dass die aus dem Heißgasstrom abgeschiedene Asche auf den Filterelementen zurückgehalten und anschließend über eine Abreinigung in den Ascheaustrag überführt werden kann.

Ein besonderer Entwicklungsschwerpunkt lag auf der Abreinigung der Filterelemente im heißen Betrieb. Ziel war es, die Filterkerzen ohne Unterbrechung des Filtrationsprozesses beziehungsweise ohne vorherige Abkühlung von anhaftender Asche zu befreien. Im Engineering wurden hierzu verschiedene Abreinigungsprinzipien und Betriebsweisen bewertet. Die Auslegung musste sowohl die Empfindlichkeit keramischer Filterelemente als auch die Anforderungen an einen möglichst pulsationsarmen und betriebssicheren Anlagenbetrieb berücksichtigen. Das entwickelte Abreinigungskonzept wurde in die Gesamtanlage integriert und steuerungstechnisch berücksichtigt.

Ein weiterer wesentlicher Erkenntnis- und Entwicklungsbereich betraf den Ascheaustrag. Die ursprünglich betrachtete kontinuierliche Austragslösung erwies sich im weiteren Engineering unter den gegebenen Randbedingungen als nicht geeignet beziehungsweise nicht wirtschaftlich umsetzbar. Daher entwickelte LTC eine alternative zweistufige Austragslösung. Diese ermöglicht die Sammlung der abgeschiedenen Asche in Behältern und deren Wechsel im Betrieb. Damit wurde eine dem Versuchsmaßstab, dem Kostenrahmen und den sicherheitstechnischen Anforderungen angepasste Lösung geschaffen, die zugleich die Handhabung heißer beziehungsweise staubförmiger Aschefraktionen ermöglicht.

Im Zuge der Detailplanung zeigte sich zudem, dass die ursprünglich angenommene thermische Belastbarkeit marktverfügbarer Ventilatortechnik nicht ausreichte. Die Recherche geeigneter Ventilatoren ergab, dass die verfügbare Technik für den dauerhaften Betrieb nur bis etwa 300 °C geeignet ist. Da der aus der Nachbrennkammer entnommene Heißgasstrom deutlich höhere Temperaturen aufweisen kann, musste das Anlagenkonzept angepasst werden. Als Ergebnis wurde eine Bypass-Lösung mit gezielter Zuluftdosierung entwickelt, durch die der Gasstrom vor dem Ventilator auf ein zulässiges Temperaturniveau abgekühlt werden kann. Diese Anpassung stellte einen wesentlichen ingenieurtechnischen Fortschritt dar, da sie die prinzipielle Realisierbarkeit der Heißgasfiltration mit marktverfügbaren Komponenten ermöglichte.

Diese genannten Anpassungen wurden vollumfänglich in der Planung berücksichtigt und sind in der Ausführungsplanung integriert. Vgl. dazu nachfolgende Abbildung.

Die fertigungstechnische Entwicklung umfasste anschließend die Überführung des Anlagenkonzeptes in konkrete Fertigungsunterlagen. Hierzu gehörten die Auslegung und Konstruktion des Filtergehäuses, der Rohrleitungen, der Anschlussstutzen, der Trag- und Haltekonstruktionen, der Isolierung, der Ventilatorstrecke, der Additivdosierung, der Ascheaustragskomponenten sowie der steuerungstechnischen Schnittstellen. Ergänzend wurden die erforderlichen Materialqualitäten bewertet und an die thermischen, mechanischen und korrosiven Belastungen angepasst. Die Planung wurde in ein montagefähiges Anlagenlayout überführt.

Im Ergebnis des Arbeitspaketes lagen ein vollständiges R&I-Schema, ein abgestimmtes Anlagenkonzept, eine Lösung zur Additivzuführung, eine konstruktiv ausgearbeitete Heißgasfilteranlage, ein Konzept für Abreinigung und Ascheaustrag sowie die fertigungstechnischen Unterlagen für die Herstellung der Anlage vor. Damit wurde das Arbeitspaket 2.2 erfolgreich von der konzeptionellen Verfahrensentwicklung über das Engineering bis zur konstruktiven Umsetzung geführt.

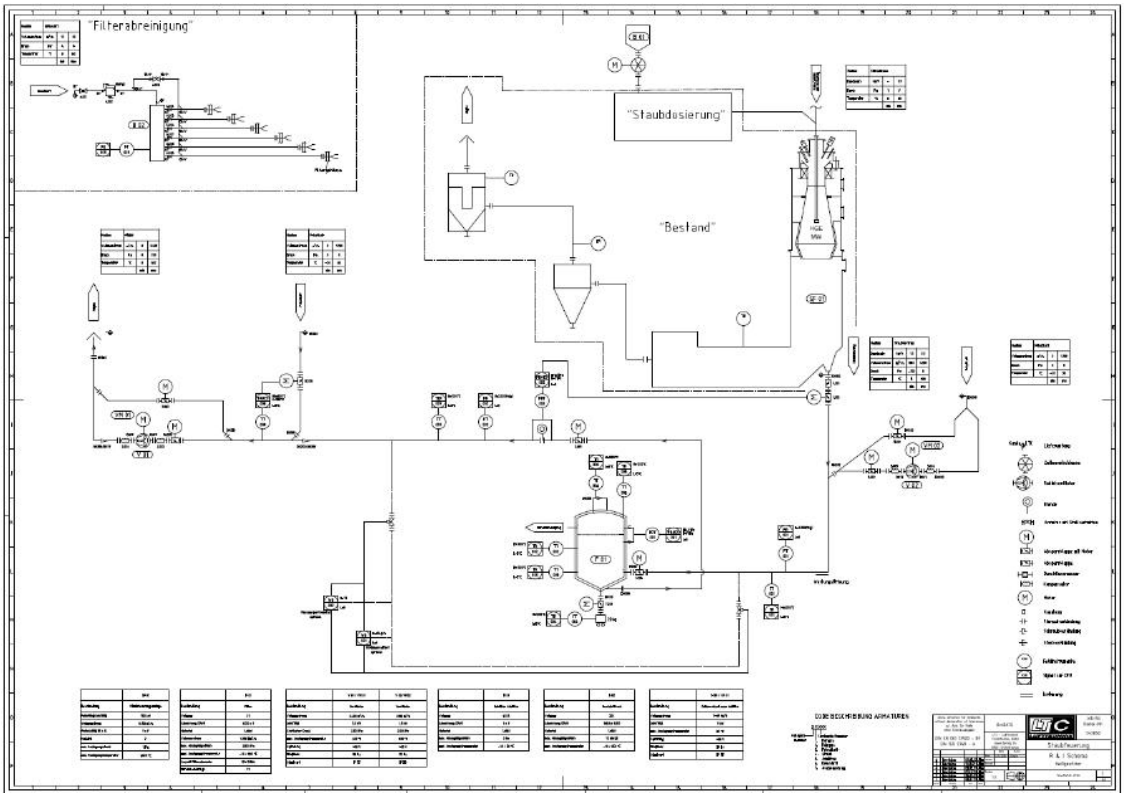


Abbildung 5: Ausführung R&I Versuchsanlage

Die im Arbeitspaket 2.2 erzielten Ergebnisse waren zugleich Grundlage für die nachfolgenden Arbeiten zur Fertigung, Montage, Kaltinbetriebnahme, Warminbetriebnahme und Versuchsdurchführung. Die entwickelte Anlage konnte später am Standort Magdeburg installiert und mit der Staubfeuerungsanlage verbunden werden. Bei Testversuchen mit Braunkohlenstaub konnte Asche im Heißgasfilter abgeschieden werden. Damit wurde die grundsätzliche Funktion des entwickelten Anlagenkonzeptes bestätigt.

Die Versuche mit Klärschlamm zeigten jedoch zugleich wesentliche neue Erkenntnisse für die weitere Technologieentwicklung. Im Betrieb traten Ablagerungen und Versinterungen in der Bypass-Leitung beziehungsweise im Rohr zum Heißgasfilter auf. Diese führten zu einer Reduzierung des zum Filter ansaugbaren Volumenstromes, zu einem erhöhten Druckverlust vor dem Filter, zu einer Absenkung der Filtertemperatur und zu einer verminderten Aschemenge im Filter. Als Ursache wurden niedrigschmelzende beziehungsweise reaktive Aschebestandteile identifiziert, die bei hohen Temperaturen zu Anbackungen und Versinterungen führen können. Diese Erkenntnisse sind für die spätere großtechnische Umsetzung von hoher Bedeutung, da sie zeigen, dass nicht nur der Filter selbst, sondern insbesondere die Heißgasentnahme, die Rohrleitungsführung, die Temperaturführung und die Vermeidung von Strömungsberuhigungszonen entscheidend für einen stabilen Betrieb sind.

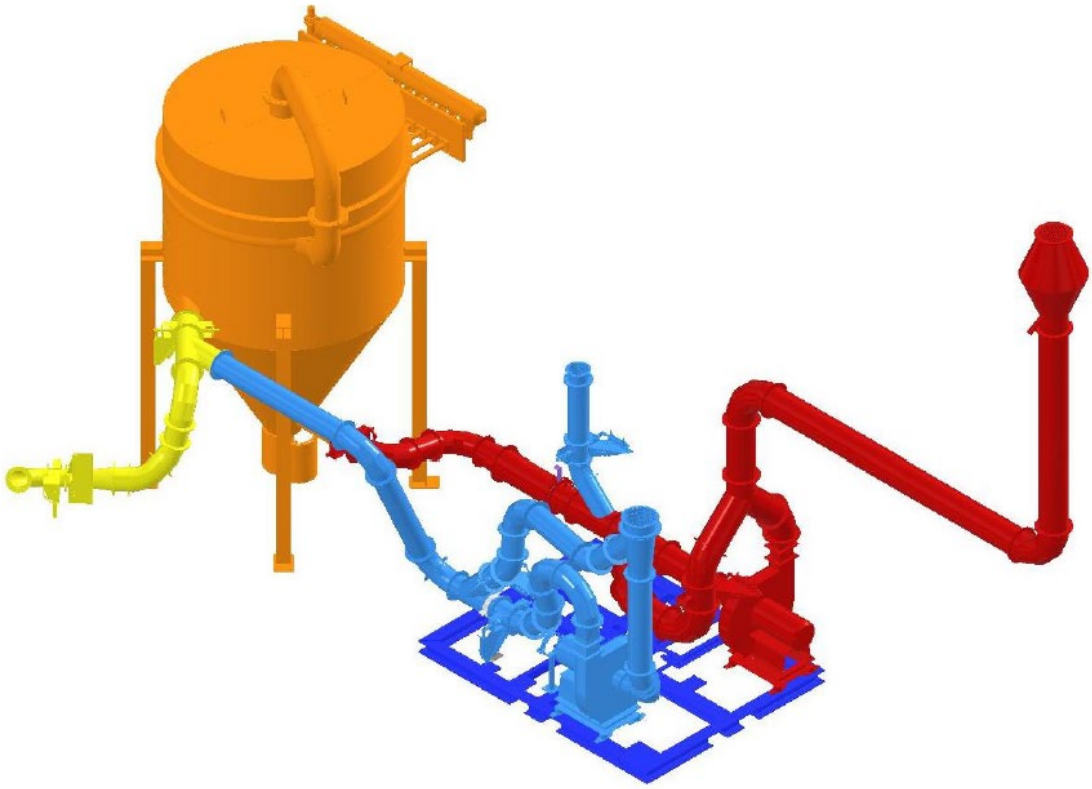


Abbildung 6: Ausführung Modell

Zusammenfassend hat LTC im Arbeitspaket 2.2 die verfahrenstechnischen, konstruktiven und fertigungstechnischen Grundlagen für eine neuartige Heißgasfiltration zur In-Situ-Schwermetallabscheidung aus Klärschlammaschen geschaffen. Die wesentlichen Ergebnisse bestehen in der Entwicklung eines integrierten Anlagenkonzeptes, der Auslegung der Bypass-Heißgasführung, der Erarbeitung eines Sicherheits- und Steuerungskonzeptes, der Entwicklung der Additivzuführung, der konstruktiven Umsetzung des Heißgasfilters, der Entwicklung eines Abreinigungs- und Ascheaustragssystems sowie der Ableitung wichtiger Betriebs- und Auslegungsdaten für eine spätere großtechnische Anwendung. Zugleich wurden durch die praktischen Versuchserfahrungen zentrale technische Grenzen und Optimierungsbedarfe identifiziert, insbesondere hinsichtlich Schlacke- und Ablagerungsbildung im Heißgasentnahmebereich. Damit lieferte das Arbeitspaket einen wesentlichen Beitrag zur Bewertung der technischen Machbarkeit und zur Weiterentwicklung der In-Situ-Modifikation und Heißgasfiltration als Baustein eines regionalen Phosphorrecyclingverfahrens.

II.1.1.2 AP 2.3: Umbau und Erweiterung Pilotanlage Staubfeuerung

Im Arbeitspaket 2.3 lag der Schwerpunkt der Arbeiten der LTC Lufttechnik Crimmitschau GmbH auf dem Einbau des Moduls zur In-Situ-Modifikation und Heißgasfiltration, der hard- und softwaretechnischen Einbindung der entwickelten Komponenten in die bestehende Staubfeuerungsanlage sowie der Vorbereitung und Begleitung der Inbetriebnahme und Versuchsdurchführung am Standort Magdeburg. Damit bildete dieses Arbeitspaket den Übergang von der konstruktiven und fertigungstechnischen Entwicklung der Heißgasfilteranlage hin zur praktischen Erprobung im Anlagenverbund.

Ausgangspunkt der Arbeiten war die im vorhergehenden Engineering entwickelte Heißgasfiltrationsanlage, bestehend aus Heißgasfilter, Additivdosierung, Rohrleitungs- und Bypasssystem, Ventilatorstrecke, Reingasführung, Mess- und Steuerungstechnik sowie Ascheaustragskomponenten. Im Rahmen von AP 2.3 mussten diese Komponenten in die vorhandene Staubfeuerungsanlage des Projektpartners CARBOTECHNIK integriert werden.

Hierbei waren sowohl die räumlichen Randbedingungen der Versuchshalle als auch die prozesstechnischen Anforderungen der Staubfeuerung, der Nachbrennkammer, der Abgasführung und des Messbetriebs zu berücksichtigen.

Nach der Fertigung erfolgte Probemontage am Standort der LTC (vgl. dazu nachfolgende Abbildungen).



Abbildung 7: Probemontage LTC – Verrohrung und Komponenten



Abbildung 8: Probemontage LTC – Verrohrung und Komponenten



Abbildung 9: Probemontage LTC – Verrohrung und Komponenten

Darauf aufbauend erfolgte der Transport nach Magdeburg und die Montage vor Ort. Vgl. nachfolgende Abbildungen.

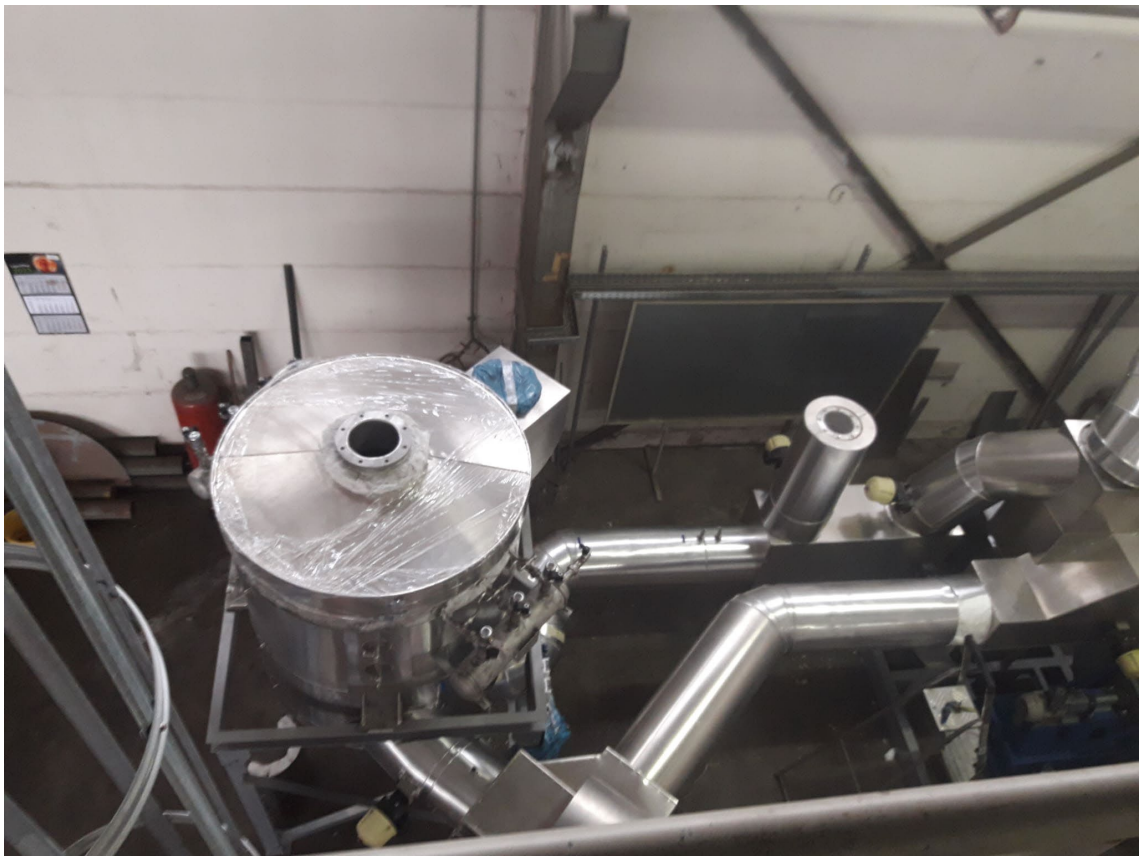


Abbildung 10: Montage Magdeburg – Heißgasfilteranlage



Abbildung 11: Montage Magdeburg – Heißgasfilteranlage (links) und Additivzugabe (rechts)

Ein wesentliches Ergebnis war die erfolgreiche mechanische Integration der Heißgasfilteranlage am Standort Magdeburg. Hierzu wurden die Aufstellflächen vorbereitet, die Tragkonstruktionen und Anschlussbereiche angepasst, die Dosierstation montiert, der Heißgasfilter aufgestellt und die Ventilatoreinheit installiert. Die Verbindung zur Staubfeuerungsanlage erfolgte über eine Bypass-Anbindung, mit der ein definierter Teilstrom aus dem Heißgasbereich der Nachbrennkammer entnommen und dem Heißgasfilter zugeführt werden konnte. Ergänzend wurde ein Abluftrohr für das gereinigte Reingas realisiert, sodass die filtrierten Prozessgase aus dem Filtermodul abgeführt werden konnten.

Die Montagearbeiten umfassten insbesondere die Einbindung des Heißgasfilters, der Dosierstation, der Ventilatorstrecke und der Rohrleitungsführung in die bestehende Anlagenumgebung. Dabei mussten die in der Planungsphase erarbeiteten Aufstellungs- und Rohrleitungskonzepte an die tatsächlichen örtlichen Gegebenheiten angepasst werden. Von Bedeutung waren hierbei die Zugänglichkeit für Wartung und Versuchsbetrieb, die Einhaltung der Sicherheitsabstände, die thermische Entkopplung und Isolierung heißgasführender Bauteile sowie die Möglichkeit zur Probenahme und visuellen Kontrolle der Anlage.

Ein weiterer zentraler Bestandteil des Arbeitspakets war die hard- und softwaretechnische Einbindung der neuen Komponenten. Dazu gehörten die elektrotechnische Installation, die Einbindung des Schaltschrankes, die Herstellung der Signal- und Steuerungsverbindungen sowie die Abstimmung der Steuerung der Heißgasfiltration mit der bestehenden Staubfeuerungsanlage. Die Steuerung musste so ausgelegt werden, dass die Betriebszustände der Staubfeuerung, der Additivdosierung, des Bypassbetriebs, der Filterabreinigung, des Ventilators und des Ascheaustrags koordiniert gefahren werden konnten.

Im Zuge der Inbetriebnahme wurden die Einzelkomponenten zunächst auf Funktion geprüft. Hierzu gehörten die Kontrolle der mechanischen Einbauten, die Überprüfung der Rohrleitungsanschlüsse, die Dichtheits- und Funktionskontrolle der Ventilatorstrecke, die Überprüfung der Messstellen, die Funktionsprüfung des Schaltschrankes sowie die Abstimmung der Steuerungsabläufe. Anschließend erfolgte die schrittweise Inbetriebnahme im Anlagenverbund. Ziel war es, die Heißgasfiltration zunächst unter definierten, beherrschbaren Randbedingungen zu betreiben und anschließend in die Versuchsfahrten der Staubfeuerung einzubinden.

Ein wichtiges Ergebnis war die Inbetriebnahme der Anlage mit Kohlenstaub beziehungsweise unter vergleichsweise gut beherrschbaren Betriebsbedingungen. Dabei konnte die grundsätzliche technische Funktionsfähigkeit des aufgebauten Systems gezeigt werden. Die Heißgasfilteranlage war mechanisch und steuerungstechnisch in die Versuchsanlage integriert, der Bypassbetrieb konnte hergestellt werden, die Reingasführung war realisiert und die Filterkerzen waren in das Filtergehäuse eingebaut. Damit wurde ein wesentlicher Meilenstein erreicht: Die im Rahmen des Vorhabens entwickelte Heißgasfiltration wurde vom Planungs- und Fertigungsstand in einen realen Versuchsanlagenbetrieb überführt.

Im weiteren Verlauf erfolgte die Einbindung in Versuchsfahrten mit gemahlenem Klärschlamm. Diese Versuche waren für die Bewertung der tatsächlichen Eignung der Anlage von besonderer Bedeutung, da erst unter diesen Bedingungen die spezifischen Eigenschaften der Klärschlammaschen, der entstehenden Flugstäube und der Hochtemperaturgasphase sichtbar wurden. Dabei zeigte sich, dass die Integration einer Heißgasfiltration in eine Klärschlamm-Staubfeuerung nicht allein durch die Auslegung des Filters bestimmt wird, sondern wesentlich durch die Stabilität der vorgelagerten Verbrennung, die Temperaturführung in der Nachbrennkammer, das Schmelz- und Anbackungsverhalten der Aschen sowie die Strömungsverhältnisse im Bypass beeinflusst wird.

Während der Versuche mit Klärschlamm kam es zu einer unerwartet intensiven Schlackebildung in der Bypassleitung. Die Beobachtungen zeigten, dass niedrigschmelzende und reaktive Aschebestandteile bereits im Temperaturbereich von etwa 950 °C bis 1.100 °C Schmelzphasen

bilden können. Diese Schmelzen lagerten sich bevorzugt an feuerfesten Auskleidungen, in Strömungsberuhigungszonen sowie im Bereich der Heißgasentnahme ab. Die Folge waren haftende, teilweise korrosive Schlackeschichten, eine Beeinträchtigung der Strömungsführung und eine Erhöhung des Druckverlustes. Vgl. dazu nachfolgende Abbildung.

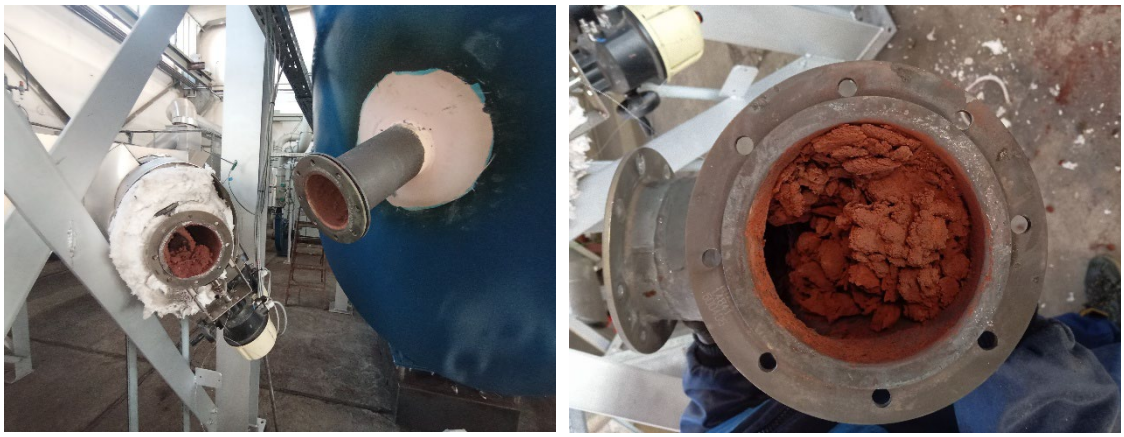


Abbildung 12: Ablagerungen im Versuchsbetrieb

Diese Betriebserfahrungen hatten unmittelbare Auswirkungen auf den Bypassbetrieb der Heißgasfiltration. Die ursprünglich vorgesehene kontinuierliche beziehungsweise definierte Entnahme des Heißgasteilstroms konnte unter den aufgetretenen Randbedingungen nicht stabil realisiert werden. Die Ablagerungen im Bereich des Ansaugstutzens und in der Rohrleitung zum Heißgasfilter führten zu einer Reduzierung des ansaugbaren Volumenstromes, zu einer Erhöhung des Druckverlustes vor dem Filter und zu einer deutlichen Absenkung der Temperatur im Filter. Dadurch gelangte nur eine geringe Aschemenge in den Filter, sodass die Abreinigung und der Austrag der Filterasche nicht in dem ursprünglich geplanten Umfang untersucht werden konnten.

Ein wesentliches wissenschaftlich-technisches Ergebnis des Arbeitspaketes besteht daher in der Identifikation dieser prozessbedingten Begrenzungen. Die Untersuchungen zeigten, dass die großtechnische Umsetzung einer In-Situ-Heißgasfiltration bei Klärschlamm-Staubfeuerung wesentlich stärker durch die Eigenschaften der Asche und die Temperaturführung im Entnahmebereich bestimmt wird als zunächst angenommen. Insbesondere die Bildung niedrigschmelzender Phasen, deren Ablagerung im Bereich der Nachbrennkammer und deren Einfluss auf die Bypassleitung sind für die künftige Anlagenentwicklung von zentraler Bedeutung.

In Abstimmung mit den Projektpartnern erfolgten Um- und Anpassungsarbeiten durch die LTC an der Anlage sowie regelmäßige Reinigungsarbeiten. Vgl. dazu nachfolgende Abbildungen.

Trotz dieser Einschränkungen konnten im Arbeitspaket 2.3 wesentliche Entwicklungsziele erreicht werden. Die Pilotanlage wurde um die für die In-Situ-Modifikation und Heißgasfiltration notwendigen Komponenten erweitert. Die Heißgasfilteranlage wurde mechanisch installiert, die Dosierstation eingebunden, die Ventilator- und Reingasstrecke realisiert, der Schaltschrank montiert und die steuerungstechnische Integration umgesetzt. Damit konnte eine funktionsfähige Versuchsanlage aufgebaut werden, die die technische Basis für die Untersuchung der Heißgasfiltration im Verbund mit einer Staubfeuerung bildet.

Darüber hinaus wurden wichtige Erkenntnisse für die spätere Maßstabsvergrößerung gewonnen. Hierzu zählen insbesondere die Notwendigkeit einer strömungstechnisch optimierten Heißgasentnahme, die Vermeidung von Totzonen und Strömungsberuhigungsbereichen, die kontrollierte Temperaturführung oberhalb kritischer Ascheschmelzbereiche, die robuste Auslegung der Bypassleitung gegen Ablagerungen, die leichte Zugänglichkeit für Inspektion und Reinigung sowie die Abstimmung der Filtertemperatur mit den zulässigen Betriebsgrenzen von Ventilator und Messsystemen.





Abbildung 13: Ablagerungen im Versuchsbetrieb

Die Ergebnisse zeigen außerdem, dass die Versuchsanlage als Demonstrationsplattform wichtige Daten zur Bewertung des Gesamtsystems liefert. Im Rahmen des Arbeitspakets konnten Auslegungs- und Betriebsdaten zu Volumenströmen, Druckverlusten, Temperaturverläufen, Filtereinbindung, Rohrleitungsverhalten, Additivdosierung, Aschetransport und Anlagenbetrieb erhoben beziehungsweise qualitativ bewertet werden. Diese Daten sind für die spätere Konzeption einer großtechnischen Anlage von erheblicher Bedeutung, da sie reale Betriebsprobleme sichtbar machen, die in reinen Labor- oder Technikumsuntersuchungen nicht vollständig abgebildet werden können.

Zusammenfassend hat LTC im Arbeitspaket 2.3 die entwickelte Heißgasfiltration vom Engineering in den realen Anlagenbetrieb überführt. Die wesentlichen Ergebnisse bestehen in der erfolgreichen Erweiterung der Pilot-Staubfeuerungsanlage um das Modul In-Situ-Modifikation und Heißgasfiltration, der mechanischen und steuerungstechnischen Integration der Komponenten, der Inbetriebnahme der Anlage, dem Nachweis der grundsätzlichen Funktion einzelner Anlagenteile sowie der Identifikation zentraler prozesstechnischer Herausforderungen beim Betrieb mit Klärschlamm. Insbesondere die Erkenntnisse zur Schlacke- und Ablagerungsbildung im Bereich der Nachbrennkammer und der Bypassleitung stellen einen wichtigen Beitrag zur Weiterentwicklung der Technologie dar. Sie bilden die Grundlage für zukünftige konstruktive Optimierungen und für die belastbare Auslegung großtechnischer Anlagen zur kombinierten Staubfeuerung, Schwermetallabscheidung und Phosphorrückgewinnung.

Die Versuchsanlage wurde nach dem Betrieb vollständig zurückgebaut und abtransportiert.

II.1.2 Hauptarbeitspaket 5: Bilanzierungen, Stakeholder und Vorbereitung Anschlussphase zur kommerziellen Umsetzung

II.1.2.1 AP 5.2: Ableitung eines Grundkonzeptes zur großtechnischen Umsetzung im Produktionsmaßstab

Im Arbeitspaket 5.2 bestand die Aufgabe der LTC Lufttechnik Crimmitschau GmbH darin, die während der Entwicklung, Konstruktion, Fertigung, Integration und Erprobung der Heißgasfiltration gewonnenen Erkenntnisse für die Konzeption einer großtechnischen Anlage aufzubereiten und in ein industriell umsetzbares Anlagenkonzept zu überführen. Ziel war die Ableitung grundlegender verfahrenstechnischer, konstruktiver und betrieblicher Anforderungen für die zukünftige Umsetzung des Verfahrens zur In-Situ-Modifikation und Heißgasfiltration im Produktionsmaßstab.

Grundlage der Arbeiten bildeten die im Rahmen der Technikumsanlage gewonnenen Erfahrungen aus Planung, Fertigung, Montage, Inbetriebnahme und Versuchsbetrieb. Insbesondere die während des Anlagenbetriebs identifizierten Wechselwirkungen zwischen Staubfeuerung, Heißgasentnahme, Additivzugabe, Filterbetrieb und Ascheaustrag lieferten wesentliche Erkenntnisse für die Auslegung eines industriellen Gesamtsystems.

Überführung des Technikumsaufbaus in ein großtechnisches Anlagenkonzept

Im ersten Schritt wurden die im Projekt realisierten Anlagenteile hinsichtlich ihrer Übertragbarkeit auf industrielle Durchsätze analysiert. Dabei zeigte sich, dass das Grundprinzip der Staubfeuerung mit nachgeschalteter In-Situ-Modifikation und Heißgasfiltration grundsätzlich technisch umsetzbar ist. Gleichzeitig wurde deutlich, dass einzelne Komponenten für eine industrielle Anwendung angepasst beziehungsweise neu ausgelegt werden müssen.

Die Untersuchungen führten zu dem Ergebnis, dass die großtechnische Anlage aus den folgenden Hauptkomponenten bestehen sollte:

- Brennstoffannahme und Brennstoffaufbereitung,
- Staubfeuerung mit Hochtemperatur-Nachbrennkammer,
- Additivlagerung und Additivdosierung,
- Heißgasentnahme aus dem Hochtemperaturbereich,
- keramische Heißgasfiltration,
- Ascheaustrag und Aschesammlung,
- Rauchgasreinigung,
- Mess-, Steuerungs- und Regelungstechnik.

Dabei wurde die Heißgasfiltration als integraler Bestandteil des Gesamtprozesses betrachtet und nicht als nachgeschaltete Filtereinheit.

Erkenntnisse zur Auslegung der Heißgasentnahme

Ein wesentliches Ergebnis der großtechnischen Betrachtung betrifft die Gestaltung der Heißgasentnahme aus der Nachbrennkammer. Die Versuchsergebnisse zeigten, dass die Bildung von Ablagerungen und Versinterungen im Bereich der Entnahmestelle einen entscheidenden Einfluss auf die Anlagenverfügbarkeit besitzt.

Für eine industrielle Umsetzung wurde deshalb abgeleitet, dass:

- die Heißgasentnahme in Bereichen mit hohen Strömungsgeschwindigkeiten erfolgen sollte,
- Totzonen und Strömungsberuhigungsbereiche konsequent zu vermeiden sind,

- die Entnahmestutzen möglichst kurz ausgeführt werden sollten,
- Inspektions- und Reinigungsmöglichkeiten vorzusehen sind,
- kritische Temperaturbereiche mit erhöhter Schlackebildungsneigung vermieden werden müssen.

Idealerweise wird der Vollstrom respektive vollständige Brenngasstrom für die nachfolgenden Prozessschritte verwendet, so dass Bypassleitung und daraus resultierende Herausforderungen vermieden werden können. Die während des Projektes beobachteten Ablagerungen im Bereich der Bypassleitung lieferten hierfür wichtige Auslegungsgrundlagen.

Anforderungen an die Temperaturführung

Die Untersuchungen zeigten, dass die Temperaturführung innerhalb des Gesamtsystems eine entscheidende Bedeutung besitzt. Sowohl die Bildung von Ablagerungen und Schmelzphasen kann darüber gesteuert werden als auch die Einsatzgrenzen nachgeschalteter Komponenten wie Ventilatoren, Sensorik und Messsysteme.

Für die industrielle Umsetzung wurde daher ein abgestimmtes Temperaturmanagement als wesentliche Randbedingung identifiziert. Hierzu gehören:

- die Vermeidung kritischer Temperaturbereiche mit erhöhter Schlackebildung,
- die thermische Optimierung der Brenngasnutzung ,
- die kontrollierte Kühlung von Teilströmen vor empfindlichen Komponenten,
- die Minimierung von Wärmeverlusten in Rohrleitungen und Apparaten.

Die im Projekt entwickelte Lösung zur Teilstromkühlung vor dem Ventilator stellt hierfür wesentliche Erkenntnisse bereit.

Großtechnische Anforderungen an die Heißgasfiltration

Die Arbeiten zeigten, dass keramische Filterelemente grundsätzlich für die Abscheidung modifizierter Aschepartikel geeignet sind. Für eine industrielle Anlage wurden daraus Anforderungen an die Filterauslegung abgeleitet. Hierzu zählen insbesondere:

- modulare Erweiterbarkeit der Filtereinheiten,
- kontinuierliche Filterabreinigung,
- wartungsfreundlicher Austausch von Filterelementen,
- robuste Werkstoffauswahl für Hochtemperaturanwendungen,
- Vermeidung von Anbackungen im Filtergehäuse,
- sichere Erfassung und Austragung abgeschiedener Aschen.

Darüber hinaus wurde deutlich, dass die Filtertechnik eng mit der Auslegung des Austrags- und Fördersystems verknüpft werden muss.

Anforderungen an den Ascheaustrag

Die Untersuchungen des Projektes bestätigten, dass der Austrag heißer und teilweise reaktiver Aschen eine eigenständige verfahrenstechnische Herausforderung darstellt. Die gewonnenen Erkenntnisse führten zur Ableitung folgender Anforderungen:

- geschlossene Austragssysteme zur Vermeidung von Staubemissionen,
- temperaturbeständige Austragsorgane,
- sichere Behälterwechselkonzepte,
- Vermeidung von Brückenbildungen und Anbackungen,

- Möglichkeit der getrennten Erfassung verschiedener Aschefraktionen.

Die im Projekt entwickelte zweistufige Austragslösung lieferte hierfür wichtige praktische Erfahrungen.

Anforderungen an die Additivdosierung

Die Versuchsergebnisse zeigten, dass die Wirksamkeit der In-Situ-Modifikation wesentlich von einer reproduzierbaren Additivzugabe abhängt. Für die großtechnische Umsetzung wurden daher Anforderungen an Lagerung, Förderung und Dosierung der Additive abgeleitet.

Besondere Bedeutung besitzen dabei:

- hohe Dosiergenauigkeit,
- kontinuierliche Massenstromregelung,
- Vermeidung von Entmischung und Agglomeration,
- Anpassung an unterschiedliche Additivarten,
- Integration in die Feuerungsregelung.
- Ableitung eines industriellen Anlagenlayouts

Auf Basis der während des Projektes erstellten Modelle, Aufstellungspläne und Montageerfahrungen wurde ein Grundkonzept für die räumliche Anordnung der Hauptkomponenten entwickelt. Dabei wurden insbesondere Wartungszugänglichkeit, Sicherheitsanforderungen, Materialflüsse, Rohrleitungsführung und Erweiterbarkeit berücksichtigt.

Die Ergebnisse zeigen, dass eine industrielle Umsetzung mit konventionellen Komponenten des Apparate- und Anlagenbaus grundsätzlich möglich ist. Die erforderlichen Schlüsseltechnologien – Staubfeuerung, Additivdosierung, keramische Heißgasfiltration und Ascheaustrag – können zu einem integrierten Gesamtsystem kombiniert werden.

Zusammenfassung der Ergebnisse

Im Arbeitspaket 5.2 konnte die LTC Lufttechnik Crimmitschau GmbH die im Technikumsmaßstab gewonnenen Erkenntnisse erfolgreich in ein Grundkonzept für eine industrielle Umsetzung überführen. Wesentliche Ergebnisse sind die Definition der verfahrenstechnischen Hauptkomponenten, die Ableitung von Auslegungs- und Betriebsanforderungen für Heißgasentnahme, Additivdosierung, Heißgasfiltration und Ascheaustrag sowie die Identifikation kritischer Randbedingungen hinsichtlich Temperaturführung und Ablagerungsbildung.

Die Arbeiten bilden damit eine wesentliche Grundlage für die spätere Planung, Dimensionierung und wirtschaftliche Bewertung großtechnischer Anlagen zur kombinierten Klärschlamm-Staubfeuerung, Schwermetallabscheidung und Phosphorrückgewinnung. Gleichzeitig konnten technische Risiken identifiziert und konkrete Optimierungsansätze für zukünftige industrielle Anwendungen aufgezeigt werden.

II.1.2.2 AP 5.4: Vorbereitung Anschlussphase zur kommerziellen Umsetzung am Modellstandort Zorbau

Keine Ausführungen.

II.1.3 Hauptarbeitspaket 6: Projektkoordination und Öffentlichkeitsarbeit

II.1.3.1 AP 6.1: Öffentlichkeitsarbeit

Die Arbeiten der LTC Lufttechnik Crimmitschau GmbH im Arbeitspaket 6.1 dienten der fachlichen Begleitung der Öffentlichkeitsarbeit des Verbundvorhabens sowie der Verbreitung der im Projekt erzielten wissenschaftlich-technischen Ergebnisse. Ziel war es, die entwickelten Technologien und Erkenntnisse einer breiteren Fachöffentlichkeit zugänglich zu machen, den Wissenstransfer zwischen Forschung und Industrie zu unterstützen und die Sichtbarkeit des Verbundprojektes im Bereich der thermischen Klärschlammverwertung und des Phosphorrecyclings zu erhöhen.

Ein wesentlicher Bestandteil der Öffentlichkeitsarbeit bestand in der kontinuierlichen Präsentation des Projektfortschrittes innerhalb des Projektverbundes sowie gegenüber interessierten Fachkreisen. Hierzu erarbeitete die LTC regelmäßig Präsentationen und Ergebnisberichte zu den durchgeführten Entwicklungsarbeiten in den Bereichen In-Situ-Modifikation, Heißgasfiltration, Additivdosierung, Anlagenintegration, Montage, Inbetriebnahme und Versuchsbetrieb. Die Ergebnisse wurden im Rahmen der Projekttreffen vorgestellt, diskutiert und mit den Projektpartnern abgestimmt. Dadurch wurde ein kontinuierlicher Informationsfluss innerhalb des Verbundprojektes sichergestellt und die gemeinsame Weiterentwicklung der Technologie unterstützt.

Im Verlauf des Projektes dokumentierte die LTC die einzelnen Entwicklungs- und Realisierungsschritte der Heißgasfiltrationsanlage umfassend. Hierzu gehörte die Erstellung von Verfahrens- und R&I-Schemata, Aufstellungsplänen, 3D-Anlagenmodellen sowie die fotografische Dokumentation der Fertigung, Montage und Inbetriebnahme der Versuchsanlage am Standort Magdeburg. Diese Unterlagen wurden für die interne und externe Projektkommunikation genutzt und dienten zugleich der anschaulichen Darstellung der entwickelten Technologie.

Darüber hinaus stellte die LTC wesentliche technische Informationen und Betriebserfahrungen für die Berichterstattung innerhalb des Verbundprojektes zur Verfügung. Dies umfasste insbesondere Erkenntnisse zur Auslegung der Heißgasfiltration, zur Integration der Anlagentechnik in die Staubfeuerung, zu den Betriebsbedingungen der Versuchsanlage sowie zu den während der Versuchsdurchführung gewonnenen Erfahrungen hinsichtlich Ablagerungs- und Schlackebildung. Die bereitgestellten Informationen flossen in die wissenschaftliche Bewertung der Technologie sowie in die Ableitung von Empfehlungen für die zukünftige industrielle Umsetzung ein.

Ein weiterer Schwerpunkt lag auf der Darstellung des Potenzials der entwickelten Heißgasfiltration für die Verbesserung des regionalen Phosphorrecyclings. Die von LTC entwickelten Anlagenkomponenten und Betriebskonzepte wurden im Rahmen der Projektkommunikation als wesentliche Bausteine für zukünftige Verfahren zur thermischen Klärschlammverwertung und Schwermetallentfrachtung vorgestellt. Dabei wurde insbesondere die Möglichkeit hervorgehoben, durch die Kombination aus Staubfeuerung, Additivzugabe und Heißgasfiltration neue Wege zur Aufbereitung von Klärschlammaschen und zur Verbesserung der Rohstoffrückgewinnung zu erschließen.

Die Öffentlichkeitsarbeit umfasste zudem die Mitwirkung an der Aufbereitung von Projektergebnissen für Abschlussberichte, Präsentationen und weitere Veröffentlichungen des Verbundprojektes. Hierfür stellte die LTC technische Daten, Anlageninformationen, Fotos und Erfahrungen aus dem Anlagenbetrieb bereit und unterstützte die fachliche Bewertung der erzielten Ergebnisse. Die gewonnenen Erkenntnisse wurden insbesondere hinsichtlich ihrer Übertragbarkeit auf industrielle Anwendungen und ihrer Bedeutung für die Weiterentwicklung der Technologie bewertet.

Zusammenfassend leistete die LTC Lufttechnik Crimmitschau GmbH im Arbeitspaket 6.1 einen wesentlichen Beitrag zur fachlichen Kommunikation und Verbreitung der Projektergebnisse. Durch die kontinuierliche Dokumentation der Entwicklungsarbeiten, die Vorstellung des Projektfortschritts, die Bereitstellung technischer Informationen sowie die Mitwirkung an der Ergebnisaufbereitung wurde die Sichtbarkeit des Vorhabens unterstützt und der Wissenstransfer zwischen Forschungseinrichtungen, Anlagenbau und potenziellen Anwendern gefördert. Die Arbeiten trugen dazu bei, die entwickelten Technologien zur In-Situ-Modifikation und Heißgasfiltration als innovative Ansätze für die zukünftige thermische Klärschlammverwertung und das Phosphorrecycling einer breiteren Fachöffentlichkeit zugänglich zu machen.

II.1.3.2 AP 6.2: Projektkoordination und Berichtswesen

Keine Ausführungen.

II.2 Zahlenmäßiger Nachweis

Die laut Antrag geplanten Aufgaben wurden mit den geplanten finanziellen Mitteln realisiert. Der zahlenmäßige Nachweis erfolgte separat durch die einzelnen Projektpartner.

II.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

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

II.4 Nutzbarkeit der Ergebnisse

Die im Projekt erzeugten Ergebnisse werden als belastbar eingeschätzt. Für die Fortführung der Entwicklungen in einen größeren Maßstab stellen die Daten eine gute Basis dar. Die Erkenntnisse werden seitens der Projektpartner in Folgeprojekten angewendet und weiterentwickelt. Für eine geplante Markteinführung des Systems ist die Erprobung im großtechnischen Maßstab unter realen Bedingungen notwendig. Dies soll im Rahmen eines geplanten Folgeprojektes an einer großtechnischen Biogasanlage erfolgen. Detailliert wird im Erfolgskontrollbericht auf den fortgeschriebenen Verwertungsplan eingegangen.

II.5 Fortschritte bei anderen Stellen

Im Bereich des Einsatzes beschichteter Schäume zur Biogasentschwefelung mit anschließender thermischer Regeneration und Schwefelrückgewinnung sind den Zuwendungsempfängern keine Forschungs- und Entwicklungsarbeiten bei anderen Einrichtungen bekannt.

II.6 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen

Das Projekt sowie ausgewählte Ergebnisse wurde durch LTC ausschließlich auf projektinternen Veranstaltungen vorgestellt. Es sind keine Veröffentlichungen geplant.

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 „Mitteldeutschen Dreiländereck“ Sachsen-Anhalt, Thüringen und Sachsen

DreiSATS

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

Zuwendungsempfänger:
LTC - Lufttechnik Crimmitschau GmbH

Förderkennzeichen: 02WPR1544D

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 4

1. Beitrag des Ergebnisses zu den förderpolitischen Zielen, auch zwecks Evaluierung von Förderprogrammen/-schwerpunkten/-konzepten

Für die Evaluierung der förderpolitischen Ziele zeigt das Teilvorhaben „Heißgasfiltration“ der LTC Lufttechnik Crimmitschau GmbH beispielhaft den Beitrag öffentlicher FuE-Förderung zur Entwicklung innovativer Technologien für die Kreislaufwirtschaft und das regionale Phosphorrecycling. Ziel des Vorhabens war die Entwicklung, Konstruktion, Errichtung und Demonstration einer Heißgasfiltrationsanlage zur Abscheidung von Flugaschen und Schwermetallen aus der Klärschlammstaubverbrennung unter Hochtemperaturbedingungen. Bereits in der Antragstellung wurden die Entwicklung neuer Filtrations- und Ascheaustragskonzepte sowie die Erhöhung der stofflichen Verwertbarkeit der Aschen als zentrale technische Ziele definiert.
Im Projektverlauf konnte die LTC wesentliche technologische Innovationen realisieren. Dazu zählen die vollständige ingenieurtechnische Auslegung der Heißgasfiltration, die Entwicklung einer neuartigen Bypass-Lösung zur Beherrschung hoher Gastemperaturen, die Konzeption eines temperaturbeständigen Ascheaustrags sowie die Entwicklung einer präzisen Additivdosierung zur In-situ-Modifikation der Verbrennungsaschen. Durch umfangreiche Sicherheitsanalysen, die Definition verschiedener Betriebszustände und die Integration redundanter Sicherheitssysteme wurden zudem wichtige Erkenntnisse für den sicheren Betrieb hochtemperaturgeführter Filtrationsprozesse gewonnen.
Ein wesentlicher förderpolitischer Mehrwert bestand darin, dass die im Projekt identifizierten technischen Herausforderungen – beispielsweise begrenzte Temperaturbeständigkeiten verfügbarer Komponenten, neuartige Anforderungen an den Ascheaustrag sowie unerwartete Schlackebildungen im Demonstrationsbetrieb – nur durch zusätzliche Forschungs- und Entwicklungsarbeiten gelöst werden konnten. Die Förderung ermöglichte es, diese Risiken systematisch zu analysieren, alternative technische Lösungen zu entwickeln und die Erkenntnisse unmittelbar in die Anlagentechnik zu überführen. Dadurch entstanden neue Kompetenzen und technologisches Know-how im Bereich der Hochtemperaturfiltration und Prozessgasreinigung.
Darüber hinaus wurde die vollständige Demonstrationsanlage einschließlich Heißgasfilter, Dosierstation, Ventilatoreinheit, Verrohrung, Steuerungstechnik sowie der Einbindung in die Staubfeuerungsanlage am Standort Magdeburg erfolgreich aufgebaut, in Betrieb genommen und für Versuchskampagnen genutzt. Damit wurde die Überführung von Forschungsergebnissen in einen anwendungsnahen Demonstrationsmaßstab erreicht und die

Grundlage für eine spätere großtechnische Umsetzung geschaffen. Die gewonnenen Prozessdaten dienen bereits der Auslegung zukünftiger kommerzieller Anlagen zur Klärschlammverwertung und zum Phosphorrecycling.
Aus förderpolitischer Sicht leistet das Vorhaben somit einen direkten Beitrag zu den Zielen der Ressourceneffizienz, der Kreislaufwirtschaft und der nachhaltigen Rückgewinnung kritischer Rohstoffe. Gleichzeitig stärkt es die Innovationsfähigkeit eines mittelständischen Anlagenbauunternehmens sowie die Zusammenarbeit zwischen Industrie und Forschungseinrichtungen. Die Projektergebnisse schaffen die Voraussetzungen für neue Verfahren zur Emissionsminderung und Wertstoffrückgewinnung aus Klärschlämmen und liefern wichtige Erkenntnisse für die Weiterentwicklung zukünftiger Förderprogramme im Bereich nachhaltiger Umwelt- und Recyclingtechnologien.

2. Wissenschaftlich-technische Ergebnisse des Vorhabens im Vergleich zu den ursprünglichen Zielen, erreichte Nebenergebnisse und gesammelte wesentliche Erfahrungen

Das Teilvorhaben „Heißgasfiltration“ verfolgte das Ziel, eine Anlage zur Heißgasfiltration für die Klärschlammstaubverbrennung zu entwickeln, zu konstruieren, zu errichten und in die Demonstrationsanlage des Verbundprojektes DreiSATS zu integrieren. Darüber hinaus sollten Verfahren zur In-situ-Schwermetallabtrennung, zur Additivdosierung sowie zum kontinuierlichen Ascheaustrag unter Hochtemperaturbedingungen entwickelt und erprobt werden. Die ursprünglichen Projektziele konnten weitgehend erreicht werden. Insbesondere wurde die vollständige Heißgasfiltrationsanlage einschließlich keramischer Filtertechnik, Additivdosierung, Ventilatoreinheit, Steuerungs- und Sicherheitstechnik entwickelt, gefertigt, montiert und erfolgreich in die Demonstrationsanlage am Standort Magdeburg integriert.
Im Projektverlauf wurden zahlreiche wissenschaftlich-technische Fragestellungen bearbeitet und Lösungen entwickelt, die über den ursprünglichen Projektansatz hinausgingen. Dazu gehörte die Entwicklung einer Bypass-Lösung zur Begrenzung der Gastemperatur auf die technisch zulässigen Temperaturen der eingesetzten Ventilatoren. Ebenso musste der ursprünglich vorgesehene Ascheaustrag aufgrund der besonderen Eigenschaften der heißen Verbrennungsaschen grundlegend neu konzipiert werden. Weiterhin wurde ein Konzept zur hochgenauen pneumatischen Mikrodosierung von Additiven entwickelt, um eine reproduzierbare In-situ-Modifikation der Aschen und die gezielte Beeinflussung des Schwermetallverhaltens zu ermöglichen.
Zu den erreichten Nebenergebnissen zählt die umfassende sicherheitstechnische Analyse der Heißgasfiltration. Im Rahmen der Planung wurden verschiedene Betriebszustände definiert, Risiken bewertet und zusätzliche technische Sicherheitsmaßnahmen entwickelt. Hierzu gehören insbesondere redundante Ventilatorlösungen, zusätzliche Emissionspfade für Störfälle sowie erweiterte Überwachungs- und Steuerungskonzepte. Diese Ergebnisse stellen wertvolle Grundlagen für die spätere großtechnische Umsetzung vergleichbarer Anlagen dar.
Ein weiterer bedeutender Erkenntnisgewinn ergab sich aus dem Demonstrationsbetrieb. Während der Versuchsfahrten wurden unerwartete Schlackebildungen und Ablagerungsprozesse in der Nachbrennkammer und den Heißgasleitungen beobachtet. Die Untersuchungen zeigten, dass bestimmte Bestandteile der Klärschlammaschen bereits bei Temperaturen zwischen etwa 950 °C und 1100 °C niedrigschmelzende Phasen bilden können. Die daraus resultierenden Anpassungen der Anlagen- und Betriebsführung lieferten wichtige Erkenntnisse über das Verhalten von Klärschlammaschen unter Hochtemperaturbedingungen und die Grenzen bestehender Auslegungskonzepte.

Zu den wesentlichen Erfahrungen des Vorhabens gehört die Erkenntnis, dass die Überführung innovativer Verfahren aus dem Labor- in den Demonstrationsmaßstab mit erheblichen technischen Risiken verbunden ist, die häufig erst im realen Anlagenbetrieb sichtbar werden. Gleichzeitig zeigte das Projekt, dass durch die enge Zusammenarbeit von Anlagenbau, Verfahrenstechnik und Forschungspartnern robuste technische Lösungen entwickelt werden können. Darüber hinaus wurde deutlich, dass die Auslegung zukünftiger großtechnischer Anlagen eine stärkere Berücksichtigung der Ascheeigenschaften, der Temperaturführung sowie der betrieblichen Flexibilität erfordert. Die gewonnenen Erkenntnisse und Prozessdaten bilden eine belastbare Grundlage für die weitere Entwicklung industrieller Verfahren zur Schwermetallabtrennung und zum regionalen Phosphorrecycling aus Klärschlämmen.

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

Im Rahmen des Teilvorhabens „Heißgasfiltration“ wurden keine patentfähigen Erfindungen erzielt, keine Schutzrechtsanmeldungen vorgenommen und keine bestehenden Schutzrechte Dritter in Anspruch genommen. Die im Projekt entwickelten technischen Lösungen betreffen überwiegend die anwendungsspezifische Anpassung, Integration und Optimierung bestehender verfahrenstechnischer Komponenten und Systeme für den Einsatz in der Klärschlammstaubverbrennung und Heißgasfiltration. Die erzielten Ergebnisse beruhen insbesondere auf ingenieurtechnischen Entwicklungen, konstruktiven Anpassungen sowie betrieblichen und verfahrenstechnischen Optimierungen innerhalb der Demonstrationsanlage. Eine wirtschaftliche Verwertung über Lizenzen, Schutzrechtsübertragungen oder vergleichbare gewerbliche Schutzrechtsmodelle ist daher derzeit nicht vorgesehen. Die Verwertung der Projektergebnisse erfolgt vielmehr durch die Nutzung des im Projekt aufgebauten Know-hows innerhalb der LTC Lufttechnik Crimmitschau GmbH. Hierzu zählen insbesondere die gewonnenen Erkenntnisse zur Auslegung, Konstruktion und Integration von Heißgasfiltersystemen, zur Additivdosierung unter Hochtemperaturbedingungen, zum Ascheaustrag sowie zu sicherheitstechnischen Anforderungen bei der Behandlung hochbelasteter Prozessgase.
Die standortbezogene Verwertung erfolgt durch die Demonstrationsanlage am Standort Magdeburg, an der die entwickelten Technologien erfolgreich umgesetzt und erprobt wurden. Die dort gewonnenen Betriebs- und Prozessdaten bilden die Grundlage für zukünftige Planungen vergleichbarer Anlagen sowie für die Weiterentwicklung der eingesetzten Komponenten und Verfahren.
Weitere Verwertungsmöglichkeiten ergeben sich insbesondere aus der Übertragung der gewonnenen Erkenntnisse auf großtechnische Anlagen zur thermischen Klärschlammverwertung, zur Phosphorrückgewinnung sowie auf weitere Anwendungen der industriellen Heißgasfiltration. Darüber hinaus können die entwickelten Konzepte für die In-situ-Modifikation von Aschen, die Additivdosierung sowie die Prozessgasreinigung auf andere thermische Behandlungsverfahren übertragen werden. Die Projektergebnisse stärken damit nachhaltig die technologische Kompetenz der LTC im Bereich der industriellen Luftreinhalte- und Filtrationstechnik und schaffen die Voraussetzungen für zukünftige Aufträge, Anlagenentwicklungen und Dienstleistungen im Bereich der Kreislaufwirtschaft und Ressourcenschonung.

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

Zum gegenwärtigen Zeitpunkt ist eine belastbare Bewertung der wirtschaftlichen Erfolgsaussichten der im Teilvorhaben entwickelten Technologien nur eingeschränkt möglich. Zwar konnten die wesentlichen technischen Entwicklungsziele erreicht sowie die Heißgasfiltration und die In-situ-Modifikation erfolgreich in die Demonstrationsanlage integriert werden, jedoch sind für eine fundierte wirtschaftliche Bewertung weitere Forschungs- und Entwicklungsarbeiten sowie zusätzliche Betriebserfahrungen im Demonstrationsmaßstab erforderlich.
Insbesondere die im Projektverlauf identifizierten Wechselwirkungen zwischen Klärschlammeigenschaften, Temperaturführung, Schlackebildung, Additivzugabe und Heißgasfiltration erfordern weitere Untersuchungen unter unterschiedlichen Betriebsbedingungen. Die im Demonstrationsbetrieb gewonnenen Erkenntnisse haben gezeigt, dass bestimmte prozesstechnische Effekte erst im kontinuierlichen Anlagenbetrieb sichtbar werden und einen wesentlichen Einfluss auf Anlagenverfügbarkeit, Wartungsaufwand, Energieverbrauch und damit auf die Wirtschaftlichkeit besitzen.
Aus heutiger Sicht lassen die Projektergebnisse jedoch erkennen, dass die entwickelte Technologie gegenüber konventionellen Verfahren der Abgasreinigung und Aschebehandlung funktionale Vorteile aufweisen kann. Hierzu zählen insbesondere die Möglichkeit der Abscheidung von Partikeln und schwermetallhaltigen Aschebestandteilen direkt unter Heißgasbedingungen, die Vermeidung zusätzlicher Abkühlungs- und Wiedererwärmungsschritte sowie die Integration einer gezielten In-situ-Modifikation der Verbrennungsaschen. Dadurch bestehen Potenziale zur Verbesserung der Ressourceneffizienz, zur Erhöhung der Verwertbarkeit phosphorhaltiger Aschen und zur Reduzierung des apparativen Gesamtaufwandes zukünftiger Anlagen. Die im Projekt entwickelte Additivdosierung ermöglicht darüber hinaus eine flexible Anpassung an unterschiedliche Klärschlammqualitäten und Betriebsbedingungen.
Mögliche Anwender der entwickelten Technologien sind Betreiber von Klärschlammmonoverbrennungsanlagen, Unternehmen der Abfall- und Kreislaufwirtschaft, Anlagenbauer für thermische Verfahrenstechnik sowie Betreiber von Anlagen zur Phosphorrückgewinnung. Darüber hinaus erscheinen Anwendungen in weiteren Bereichen der industriellen Heißgasfiltration, beispielsweise bei thermischen Recyclingprozessen oder in ausgewählten Hochtemperaturverfahren der Umwelttechnik, grundsätzlich möglich.
Für den Standort Deutschland besitzen die Projektergebnisse besondere Relevanz, da durch die gesetzlichen Anforderungen zur Phosphorrückgewinnung aus Klärschlämmen ein wachsender Bedarf an wirtschaftlichen und ressourceneffizienten Verfahren erwartet wird. Die im Projekt aufgebauten Kompetenzen stärken die technologische Wettbewerbsfähigkeit der beteiligten Unternehmen und schaffen Grundlagen für zukünftige Anlagenentwicklungen „Made in Germany“.
Die Umsetzung und der Technologietransfer sollen schrittweise über die weitere Optimierung der Demonstrationsanlage, zusätzliche Versuchskampagnen sowie die Überführung der gewonnenen Prozessdaten in Auslegungs- und Planungskonzepte für großtechnische Anlagen erfolgen. Die im Projekt erhobenen Daten bilden hierfür eine wichtige Grundlage. Vor einer belastbaren Markt- und Wirtschaftlichkeitsbewertung sind jedoch weitere Untersuchungen zu Langzeitverhalten, Anlagenverfügbarkeit, Wartungsaufwand, Betriebskosten sowie zur

Übertragbarkeit auf unterschiedliche Klärschlammqualitäten erforderlich. Erst nach Abschluss dieser weiterführenden FuE-Arbeiten kann das wirtschaftliche Potenzial der entwickelten Technologie abschließend bewertet werden.

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

Die im Teilvorhaben erzielten wissenschaftlichen und technischen Ergebnisse bilden eine wichtige Grundlage für die Weiterentwicklung von Verfahren zur Heißgasfiltration und In-situ-Modifikation im Bereich der thermischen Klärschlammverwertung. Eine unmittelbare industrielle Nutzung der Ergebnisse ist jedoch nach Projektende nur eingeschränkt möglich, da für eine belastbare Bewertung der Langzeitstabilität, Anlagenverfügbarkeit und Wirtschaftlichkeit weitere Untersuchungen im Demonstrationsmaßstab erforderlich sind.
Insbesondere die während der Versuchsfahrten gewonnenen Erkenntnisse zu Schlackebildung, Ablagerungsprozessen, Temperaturführung und dem Verhalten unterschiedlicher Klärschlammqualitäten zeigen, dass zusätzlicher Forschungs- und Entwicklungsbedarf besteht. Für die weitere Optimierung der Heißgasfiltration, der Additivdosierung sowie der Prozessführung sind daher weitere Demonstrationsversuche unter variierenden Betriebsbedingungen notwendig.
Die wissenschaftlichen und technischen Erfolgsaussichten sind dennoch als positiv zu bewerten, da die entwickelte Anlagentechnik erfolgreich konstruiert, aufgebaut und in Betrieb genommen werden konnte. Die gewonnenen Erkenntnisse liefern wertvolle Daten für die Auslegung zukünftiger großtechnischer Anlagen zur Phosphorrückgewinnung und zur Behandlung hochtemperaturbelasteter Prozessgase.
Eine weitere Verwertung der Ergebnisse wird insbesondere durch die Fortführung von Demonstrationsaktivitäten im Verbund angestrebt. Hierzu zählen Forschungseinrichtungen, Anlagenbauer und Unternehmen der Kreislaufwirtschaft, die über komplementäre Kompetenzen in den Bereichen Verbrennungstechnik, Werkstoffentwicklung, Prozessführung und Phosphorrückgewinnung verfügen. Darüber hinaus erscheint eine Einbindung in bestehende Forschungsnetzwerke sowie die Beteiligung an weiteren FuE-Verbundvorhaben sinnvoll, um die gewonnenen Erkenntnisse zu vertiefen und die Übertragbarkeit auf industrielle Anwendungen nachzuweisen.

3d Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit für eine mögliche notwendige nächste Phase bzw. die nächsten innovatorischen Schritte

Die im Vorhaben entwickelten Technologien zur Heißgasfiltration und In-situ-Modifikation haben ihre grundsätzliche technische Funktionsfähigkeit im Demonstrationsmaßstab nachgewiesen. Gleichzeitig hat das Projekt gezeigt, dass für eine wirtschaftliche und wissenschaftlich belastbare Überführung in den industriellen Maßstab weitere Entwicklungsarbeiten erforderlich sind. Die erzielten Ergebnisse bilden somit eine wichtige Grundlage für eine mögliche Folgephase sowie für weitere innovationsgetriebene Forschungsvorhaben.
Aus wissenschaftlicher Sicht besteht insbesondere weiterer Forschungsbedarf hinsichtlich des Langzeitverhaltens der keramischen Filterelemente, der Wechselwirkungen zwischen

Additiven, Aschezusammensetzung und Schwermetallbindung sowie der Entstehung von Ablagerungen und Schlacken unter variierenden Betriebsbedingungen. Die während des Demonstrationsbetriebs gewonnenen Erkenntnisse haben gezeigt, dass insbesondere unterschiedliche Klärschlammqualitäten und deren Einfluss auf Verbrennungs-, Filtrations- und Austragsprozesse weiter untersucht werden müssen. Darüber hinaus sind zusätzliche Daten zur Optimierung der Prozessführung, der Temperaturregelung sowie der Betriebs- und Sicherheitskonzepte erforderlich.
Aus wirtschaftlicher Sicht erscheint eine Anschlussentwicklung insbesondere zur Skalierung der Technologie auf industrielle Durchsatzgrößen sinnvoll. Hierfür müssen die gewonnenen Prozessdaten weiter ausgewertet und in Auslegungsmodelle für großtechnische Anlagen überführt werden. Ebenso sind Untersuchungen zur Anlagenverfügbarkeit, Wartungsintensität, Energieeffizienz und zu den Investitions- und Betriebskosten notwendig, um belastbare Wirtschaftlichkeitsbewertungen durchführen zu können.
Die Demonstrationsanlage in Magdeburg bietet hierfür eine geeignete Infrastruktur und kann als Entwicklungs- und Erprobungsplattform für weitere Optimierungsschritte genutzt werden. Eine mögliche nächste Phase sollte daher auf die Erweiterung des Demonstrationsbetriebs, die Durchführung zusätzlicher Versuchskampagnen sowie die Validierung der Technologie unter unterschiedlichen Einsatzbedingungen ausgerichtet sein.
Die wissenschaftliche Anschlussfähigkeit wird durch die bereits etablierte Zusammenarbeit zwischen Anlagenbau, Forschungseinrichtungen und Technologiepartnern unterstützt. Insbesondere die Zusammenarbeit mit den Verbundpartnern aus den Bereichen Verbrennungs-, Werkstoff- und Verfahrenstechnik bietet die Möglichkeit, die gewonnenen Erkenntnisse in weiteren Forschungsprojekten zu vertiefen. Darüber hinaus bestehen Potenziale zur Einbindung weiterer Forschungseinrichtungen, Industrieunternehmen und Netzwerke im Bereich Kreislaufwirtschaft, thermische Abfallbehandlung und Phosphorrückgewinnung.
Die wirtschaftliche Anschlussfähigkeit ergibt sich vor allem aus den zukünftig steigenden Anforderungen an die Phosphorrückgewinnung aus Klärschlämmen sowie aus dem Bedarf an innovativen Lösungen zur Emissionsminderung und Ressourcenschonung. Die im Projekt entwickelten Technologien können hierfür eine wesentliche Grundlage bilden. Voraussetzung für eine erfolgreiche Marktüberführung sind jedoch weitere FuE-Aktivitäten zur technischen Optimierung, Skalierung und industriellen Validierung der entwickelten Verfahren.

4. Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben

Im Projektverlauf wurden verschiedene technische Lösungsansätze untersucht, die sich im weiteren Entwicklungsprozess als nicht praktikabel erwiesen und daher nicht weiterverfolgt wurden. Hierzu gehörte insbesondere die ursprünglich vorgesehene Auslegung einzelner Komponenten auf Basis der Annahmen aus der Konzeptionsphase. So zeigte sich beispielsweise, dass die verfügbaren Hochtemperaturventilatoren die für den Prozess erforderlichen Gastemperaturen nicht dauerhaft beherrschen konnten. Der ursprüngliche Ansatz musste daher zugunsten einer neu entwickelten Bypass-Lösung mit Temperaturabsenkung aufgegeben werden.
Ebenso konnten erste Konzepte für den Ascheaustrag aufgrund des tatsächlichen Verhaltens der heißen Aschen und der auftretenden Ablagerungs- und Agglomerationseffekte nicht umgesetzt werden. Die gewonnenen Erkenntnisse machten eine grundlegende Überarbeitung des Austragskonzeptes erforderlich.
Darüber hinaus führten die im Demonstrationsbetrieb beobachteten Schlackebildungen und Ablagerungen in der Nachbrennkammer sowie in den Heißgasleitungen dazu, dass einzelne ursprünglich geplante Betriebszustände nicht realisiert werden konnten. Die Untersuchungen

dieser Effekte lieferten jedoch wichtige Erkenntnisse für die weitere Optimierung der Prozessführung und der Anlagenauslegung.
Auch wenn diese Arbeiten nicht unmittelbar zu den ursprünglich vorgesehenen technischen Lösungen führten, leisteten sie einen wesentlichen Beitrag zum Verständnis der Prozesszusammenhänge und zur Entwicklung der schließlich umgesetzten technischen Konzepte.

5. Präsentationsmöglichkeiten für mögliche Nutzer - z.B. Anwenderkonferenzen

Die Projektergebnisse können potenziellen Anwendern im Rahmen von Fachveranstaltungen, Branchenkonferenzen sowie Netzwerktreffen vorgestellt werden. Darüber hinaus bieten sich Fachvorträge, Workshops mit Kläranlagenbetreibern, Anlagenbauern und Unternehmen der Kreislaufwirtschaft sowie Veröffentlichungen in Fachzeitschriften an.

6. Einhaltung der Ausgaben-/Kosten- und Zeitplanung

Das Vorhaben konnte im Wesentlichen im Rahmen der bewilligten Kosten- und Ausgabenplanung durchgeführt werden. Die geplanten Entwicklungs-, Konstruktions-, Fertigungs- und Integrationsarbeiten wurden vollständig umgesetzt und die vorgesehenen Projektziele weitgehend erreicht.
Im Projektverlauf kam es jedoch zu zeitlichen Verschiebungen einzelner Arbeitspakete. Wesentliche Ursachen hierfür waren die Auswirkungen der COVID-19-Pandemie sowie die infolge des Ukraine-Krieges erheblich verlängerten Lieferzeiten für Anlagenkomponenten, Werkstoffe und technische Ausrüstung. Darüber hinaus ergaben sich zusätzliche Entwicklungsaufwände aufgrund technischer Herausforderungen, die erst während der Detailplanung und des Demonstrationsbetriebs sichtbar wurden. Hierzu zählten insbesondere die Anpassung des Anlagenkonzeptes hinsichtlich der Temperaturführung, die Entwicklung einer Bypass-Lösung für die Heißgasführung, die Überarbeitung des Ascheaustrags sowie die Optimierung der Anlagenintegration.
Die aufgetretenen Verzögerungen machten eine Verlängerung der Projektlaufzeit erforderlich, führten jedoch nicht zu einer grundlegenden Änderung der Projektziele. Die zusätzlichen Entwicklungsarbeiten waren notwendig, um die technische Funktionsfähigkeit der Gesamtanlage sicherzustellen und die Erkenntnisse aus dem Demonstrationsbetrieb in die Anlagentechnik zu überführen.
Insgesamt konnten die bereitgestellten Fördermittel zweckentsprechend eingesetzt werden. Die finanziellen Ressourcen ermöglichten die vollständige Entwicklung, Konstruktion, Fertigung, Montage und Inbetriebnahme der Heißgasfiltrationsanlage sowie die Durchführung der geplanten Demonstrations- und Optimierungsarbeiten.