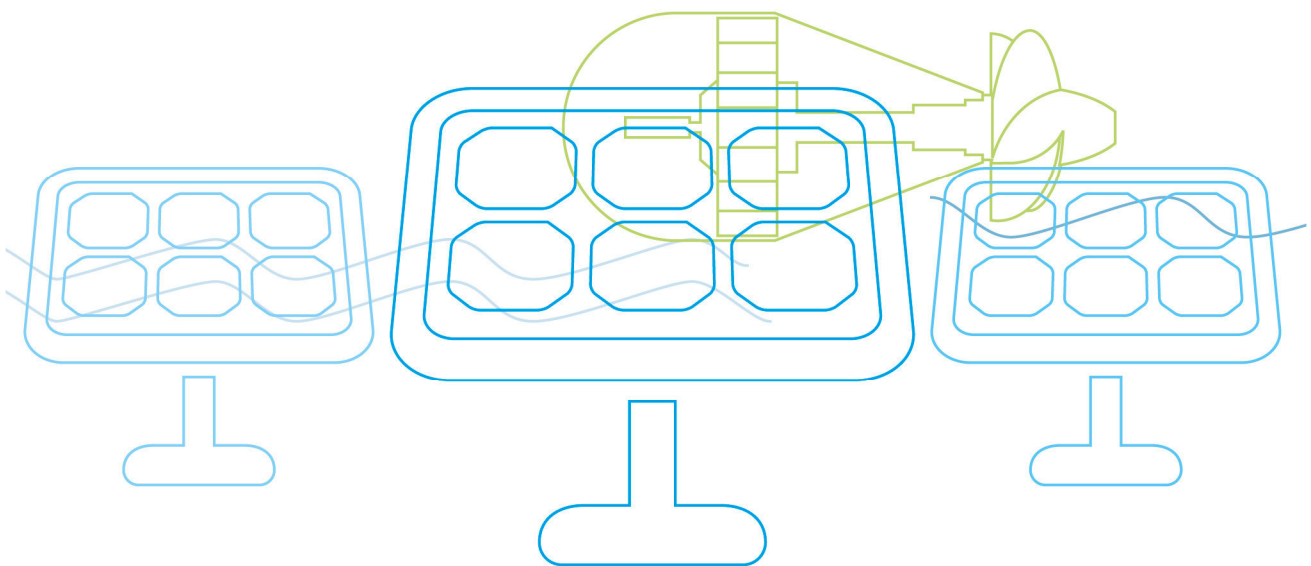




OxyAB II

Sauerstoffangereicherte
Wirbelschichtfeuerung zur Reduktion
des Stützbrennstoffbedarfs bei
thermischer Abfallverwertung



VORWORT

Die Publikationsreihe **BLUE GLOBE REPORT** macht die Kompetenz und Vielfalt, mit der die österreichische Industrie und Forschung für die Lösung der zentralen Zukunftsaufgaben arbeiten, sichtbar. Strategie des Klima- und Energiefonds ist, mit langfristig ausgerichteten Förderprogrammen gezielt Impulse zu setzen. Impulse, die heimischen Unternehmen und Institutionen im internationalen Wettbewerb eine ausgezeichnete Ausgangsposition verschaffen.

Jährlich stehen dem Klima- und Energiefonds bis zu 150 Mio. Euro für die Förderung von nachhaltigen Energie- und Verkehrsprojekten im Sinne des Klimaschutzes zur Verfügung. Mit diesem Geld unterstützt der Klima- und Energiefonds Ideen, Konzepte und Projekte in den Bereichen Forschung, Mobilität und Marktdurchdringung.

Mit dem **BLUE GLOBE REPORT** informiert der Klima- und Energiefonds über Projektergebnisse und unterstützt so die Anwendungen von Innovation in der Praxis. Neben technologischen Innovationen im Energie- und Verkehrsbereich werden gesellschaftliche Fragestellung und wissenschaftliche Grundlagen für politische Planungsprozesse präsentiert. Der **BLUE GLOBE REPORT** wird der interessierten Öffentlichkeit über die Homepage www.klimafonds.gv.at zugänglich gemacht und lädt zur kritischen Diskussion ein.

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse eines Projekts aus dem Forschungs- und Technologieprogramm „Neue Energien 2020“. Mit diesem Programm verfolgt der Klima- und Energiefonds das Ziel, durch Innovationen und technischen Fortschritt den Übergang zu einem nachhaltigen Energiesystem voranzutreiben.

Wer die nachhaltige Zukunft mitgestalten will, ist bei uns richtig: Der Klima- und Energiefonds fördert innovative Lösungen für die Zukunft!

A handwritten signature in black ink, reading 'Theresia Vogel'.

Theresia Vogel
Geschäftsführerin, Klima- und Energiefonds

A handwritten signature in black ink, reading 'Ingmar Höbarth'.

Ingmar Höbarth
Geschäftsführer, Klima- und Energiefonds

Inhalt

Kurzfassung.....	3
Abstract	4
1 Einleitung	5
1.1 Aufgabenstellung	5
1.2 Schwerpunkte des Projektes.....	5
1.3 Einordnung in das Programm.....	5
1.4 Verwendete Methoden	6
2 Inhaltliche Darstellung.....	6
2.1 Design und Errichtung Versuchsaufbau	6
2.2 Versuchsdurchführung	6
2.3 Begleitende Modellierung und Simulation der Wirbelschichtfeuerung.....	7
3 Ergebnisse und Schlussfolgerungen.....	7
3.1 Versuchsaufbau und Anlagenbeschreibung	7
3.2 Bilanzmodell der Wirbelschichtfeuerung	8
3.2.1 Das Simulationsprogramm IPSEpro	9
3.2.2 Messdatenvalidierung mit PSValidate.....	9
3.2.3 Modellierung der untersuchten Wirbelschichtfeuerung in IPSEpro	10
3.2.4 Parameter zu Bewertung der Versuchsergebnisse.....	12
3.3 Vorversuche und Benchmarkmessungen	12
3.3.1 Benchmarkmessungen mit festen Stützbrennstoffen.....	13
3.3.2 Benchmarkmessungen mit flüssigen Stützbrennstoffen	16
3.3.3 Parametermodell zur Abschätzung des Oberfeuers	19
3.3.4 Zusammenfassende Bemerkungen zu den Benchmarkkampagnen.....	21
3.4 Sauerstoffversuche.....	22
3.4.1 Einfluss der Sauerstoffanreicherung auf das Betriebsverhalten bzw. auf die Betriebsstabilität.....	22
3.4.2 Einfluss der Sauerstoffanreicherung auf die Fluidisierung und das Oberfeuer	23
3.4.3 Einfluss der Sauerstoffanreicherung auf die Emissionen	25
3.4.4 Einfluss der Sauerstoffkonzentration auf den Stützbrennstoffbedarf bzw. die Entsorgungskapazität.....	25
4 Ausblick und Empfehlungen	26
5 Literaturverzeichnis.....	26

Kurzfassung

Das langfristige Projekt OxyAB wurde mit dem Ziel gestartet, die Technologie der Reinsauerstoffverbrennung (OxyFuel Technologie) bei der Verbrennung alternativer Brennstoffe vorteilhaft anzuwenden. Dabei liegt das Hauptaugenmerk auf der Ausnutzung von Zusatzeffekten neben der prinzipiellen Möglichkeit, am Ende auch das bei der Verbrennung freigesetzte CO₂ abzuscheiden und zur Sequestrierung bereitzustellen. Ein solcher Zusatznutzen für die Klimabilanz tritt beispielsweise bei der Verbrennung schwachkalorischer Reststoffe auf, die heute unter Zufeuerung fossiler Stützbrennstoffe (Heizöl schwer) erfolgt. Das Ausmaß dieser fossilen Zufeuerung beträgt bis zu 50% der Brennstoffwärmeleistung. Die Reinsauerstofftechnologie ermöglicht die Anhebung des Sauerstoffgehaltes im Verbrennungsgas und erlaubt so eine substanzielle Reduktion bzw. Elimination des Stützbrennstoffbedarfes.

In dieser zweiten Phase des OxyAB Leitgedankens wurde die Anhebung des Sauerstoffgehaltes in der Verbrennungsluft im industriellen Maßstab durch Langzeitversuche erprobt. Diese Versuchsreihe wurde bei der Wien Energie Fernwärme am Standort Simmeringer Haide durchgeführt, wo der in Wien anfallende Klärschlamm in vier Wirbelschichtverbrennungsöfen thermisch verwertet wird. Im Rahmen der Versuche wurde eine Sauerstoffversorgungsstation errichtet und an eine stationäre Wirbelschichtanlage mit einer Brennstoffwärmeleistung von 16 MW_{th} angeschlossen. Durch dieses Setup war es möglich die Sauerstoffkonzentration in der Verbrennungsluft auf bis zu 24 % anzuheben. Ziel des Projekts war es die Auswirkungen der Sauerstoffanreicherung auf den Prozess im Allgemeinen (Stabilität des Prozesses, Auswirkungen auf die Emissionen) und auf den Stützbrennstoffbedarf bzw. auf den Klärschlammdurchsatz im Speziellen zu untersuchen.

Die Versuchskampagnen an der Großanlage wurden mit Hilfe eines Modells dieser Wirbelschichtfeuerung in einem Prozesssimulationsprogramm basierend auf Massen- und Energiebilanzen ausgewertet. Im Rahmen der sogenannten Benchmarkmessungen, die den Sauerstoffmessungen vorangegangen sind, konnten wichtige Mechanismen bei der Klärschlammverbrennung in einer Wirbelschicht erforscht werden. Dabei wurden vor allem die Auswirkungen der Fluidisierung und der Brennstoffleistung auf den Ort der Wärmefreisetzung untersucht. Die Versuche mit sauerstoffangereicherter Verbrennungsluft wurden über einen Zeitraum von mehreren Wochen durchgeführt und haben gezeigt, dass durch Anhebung der Sauerstoffkonzentration in der Verbrennungsluft auf 24 % der Klärschlammdurchsatz um bis zu 30 % gesteigert werden kann, wobei der Stützbrennstoffbedarf drastisch reduziert wird.

Abstract

The project OxyAB was started with the intention of the advantageous application of combustion under oxygen-enriched atmosphere for alternative fuels. Thereby the main focus is given to the utilization of additional benefits besides the possibility to capture the produced CO₂ from the combustion process as for having it ready for sequestration. Such an additional benefit as positive contribution to the climate balance exists for the combustion of low calorific fuels that are currently incinerated by using additional secondary energy carriers such as heavy oil. The amount of such additional fossil fuel support can be up to 50 % of the thermal power of an incineration plant. Oxygen technology, however, enables a substantial reduction or even elimination of support fuel due to an increased oxygen concentration for the combustion air.

In this second phase of the guiding idea of OxyAB the testing of increased oxygen concentration of the combustion air at an industrial scale. The long term experimental campaign was carried out at the site Simmeringer Haide of the district heating provider Fernwärme Wien, where produced sewage sludge of Vienna is thermally disposed in fluidized bed combustors.

At the premises of the applicant, oxygen supply equipment was connected temporarily to an industrial scale fluidized bed plant with a fuel power of 16 MW_{th}. The set-up allowed an increase of the oxygen concentration of the fluidization gas from 21 to 24 vol%. Aim of the project was to investigate the influence of the oxygen enrichment on the process in general (stability, influence on emissions) and especially on the secondary fuel demand and to gain general knowledge about mechanisms of sewage sludge combustion in fluidized beds.

The experimental campaigns have been evaluated with a process model of the plant based on mass and energy balances. During the so called benchmark campaign, carried out before the oxygen enriched experiments, important mechanisms of sewage sludge combustion have been investigated. This included mostly influences of fluidization and fuel power on the heat release. Experiments with oxygen enriched combustion air have been carried out over a period of several weeks. Results showed that a moderate increase of the oxygen concentration from 21 to 24 vol% can reduce the secondary fuel demand dramatically and thus, increase the sludge capacity of the plant by up to 30 %.

1 Einleitung

1.1 Aufgabenstellung

Ausgehend von der Motivation des OxyAB Fahrplans (siehe Abbildung 1) sollen in Langzeitversuchen die Auswirkungen der Sauerstoffanreicherung auf den gesamten Prozess der Klärschlammverbrennung untersucht werden. Diese Untersuchungen beinhalten den Wirbelschichtreaktor, den Abhitze-kessel und die Rauchgasreinigung. Zusätzlich sollen die Vorteile des variablen Sauerstoffgehaltes in der Verbrennungsluft hinsichtlich des Stützbrennstoffbedarfs und einer eventuellen Entsorgungskapazitätssteigerung untersucht werden.

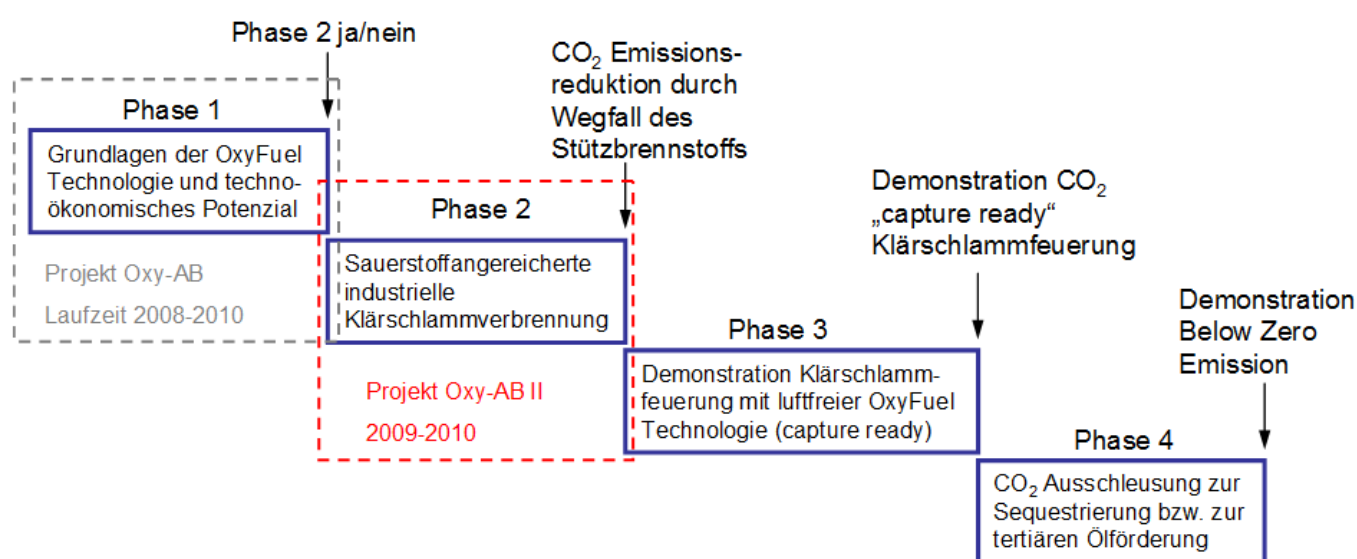


Abbildung 1: OxyAB Leitfaden

1.2 Schwerpunkte des Projektes

Den Schwerpunkt des Projekts stellten die Versuche an der Wirbelschichtfeuerung im industriellen Maßstab. Dabei wurden in zwei Benchmarkkampagnen wichtige Erkenntnisse über die Mechanismen der Klärschlammverbrennung in Wirbelschichten erzielt. In der darauffolgenden Versuchskampagne mit sauerstoffangereicherter Verbrennungsluft wurde der Einfluss der Sauerstoffanreicherung auf den Prozess an sich und auf den Stützbrennstoffbedarf bzw. die Entsorgungskapazität untersucht.

1.3 Einordnung in das Programm

Das Projekt OxyAB II zielt auf die Sicherstellung der Kriterien der Nachhaltigkeit im ökonomischen und ökologischen Sinn ab. Durch die thermische Verwertung von Müll kann ein Teil des Energieinhaltes zurückgewonnen werden, wobei gleichzeitig der benötigte Platz zur Endlagerung der inertesten Bestandteile um bis zu 90 % verringert wird. Durch die Anreicherung der Verbrennungsluft mit Reinsauerstoff kann der zur Entsorgung von niederkalorischen Abfällen wie z.B. Klärschlamm benötigte Einsatz von teilweise fossilen Stützbrennstoffen erheblich reduziert werden. Dadurch sinkt die Abhängigkeit von fossilen Primärenergieimporten. Da der benötigte Sauerstoff lokal erzeugt wird, wird somit auch der inländische Wertschöpfungsanteil im Energiesystem gesteigert.

Da OxyFuel Technologie eine neue, innovative Technologie zur Abfallverwertung darstellt, konnten alle beteiligten Projektpartner wichtiges Know-How auf diesem Zukunftsmarkt generieren bzw. eine bereits vorhandene Führungsposition ausbauen.

1.4 Verwendete Methoden

Im Rahmen des Projektes wurden die folgenden Methoden angewandt:

- Ingenieurmäßige Dimensionierung und Zusammenstellung der Sauerstoffversorgungsanlage und Regelstation.
- Großtechnischer Versuchsbetrieb mit dazugehöriger Prozessanalytik.
- Mathematische Modellierung der Versuchsanlage in einem Prozesssimulationsprogramm inkl. Numerischer Simulation.

2 Inhaltliche Darstellung

2.1 Design und Errichtung Versuchsaufbau

Ziel des ersten Arbeitspaketes war die Auslegung und Errichtung der Sauerstoffversorgung für die Langzeitversuche. Durch die temporäre Natur der Versuche wurde entschieden, die Versorgung mit einem vakuumisolierten Flüssigsauerstofftank mit einem Fassungsvermögen von 17 000 Nm³ zu realisieren. Mit einer Füllung war daher, je nach Sauerstoffbedarf, ein Versuchsbetrieb von 2-3 Tagen möglich.

Der flüssige Sauerstoff wurde mit einem umgebungsluftbeheizten Produktverdampfer mit einer maximalen Kapazität von 1 050 Nm³/h verdampft. Die Sauerstoffmenge wird über eine Gasregelstrecke dosiert. Aus Sicherheitsgründen wurde der Sauerstoff nach dem Primärluftgebläse mittig in die Primärluftleitung eingespeist. Da in der Leitung ein stark turbulenter Strömungszustand vorherrschte, war eine ausreichende Durchmischung von Luft und Sauerstoff garantiert. Zusätzlich wurden die für die Bilanzierung erforderlichen Messungen (Sauerstoffmenge, Sauerstoffkonzentration in der Primärluft) installiert.

Die Auslegung der verwendeten Apparate und Bauteile erfolgte nach den gängigen Anforderungen an verfahrenstechnische Anlagen. Nach Festlegung des Versuchsaufbaus wurde ein Genehmigungsverfahren eingeleitet, um den Versuchsbetrieb von der zuständigen Behörde genehmigen zu lassen.

2.2 Versuchsdurchführung

Die Versuchsdurchführung wurde in zwei große Kampagnen unterteilt: Vortests bzw. Benchmarkmessungen und Sauerstoffversuche.

Während der Vortests wurden die Abläufe für Versuche an dieser Anlage (Messtechnik, Probenahmen, Datamining etc.) getestet und das Massen- und Energiebilanzmodell an die Anlage angepasst. Da die Versuchsdauer für die Sauerstoffversuche auf Grund der Genehmigung begrenzt war, konnten hier wertvolle Erfahrungen für einen effizienten Versuchsablauf gesammelt werden. Ziel der Benchmarkmessungen war es den Ofenbetrieb unter normalen Umständen, d.h. ohne Sauerstoffan-

reicherung abzubilden, um Vergleichswerte für die Sauerstoffversuche zu bekommen. Dabei wurden sämtliche eingesetzten Stützbrennstoffe (Heizöl Schwer, Tiermehl, Shredder-Leicht-Fraktion) verwendet und es konnten wertvolle Erkenntnisse über die Mechanismen der Klärschlammverbrennung in einer Wirbelschicht erlangt werden.

Im Rahmen der zweiten Versuchskampagne wurden die Sauerstoffversuche durchgeführt. Dabei wurde der Betrieb mit sauerstoffangereicherter Primärluft über einen Versuchszeitraum von mehreren Wochen getestet.

2.3 Begleitende Modellierung und Simulation der Wirbelschichtfeuerung

Zur besseren Interpretation und Auswertung der Versuchsdaten wurde ein Modell der Wirbelschichtfeuerung inkl. Abhitzekessel basierend auf Massen- und Energiebilanzen erstellt und mit fortschreitender Projektdauer verfeinert und validiert. Als Framework für das Modell wurde die Fließbildsimulationssoftware IPSEpro der Fa. Simtech verwendet.

Im Rahmen der Versuchsauswertung wurden die aufgenommenen Messdaten dazu verwendet eine im Sinne der Bilanzierung statistisch optimale Abbildung der Versuchsanlage zu erstellen und nicht direkt zugängliche Prozessparameter zu berechnen. Durch diese Methodik wurde eine zuverlässige und reproduzierbare Interpretation der Versuchsergebnisse möglich.

3 Ergebnisse und Schlussfolgerungen

3.1 Versuchsaufbau und Anlagenbeschreibung

Die Untersuchungen wurden an einer stationären Wirbelschichtfeuerung mit einer Brennstoffwärmeleistung von 16 MW_{th} durchgeführt. Die Anlage wurde ca. 1980 errichtet und befindet sich am Standort Simmeringer Haide der Wien Energie Fernwärme.

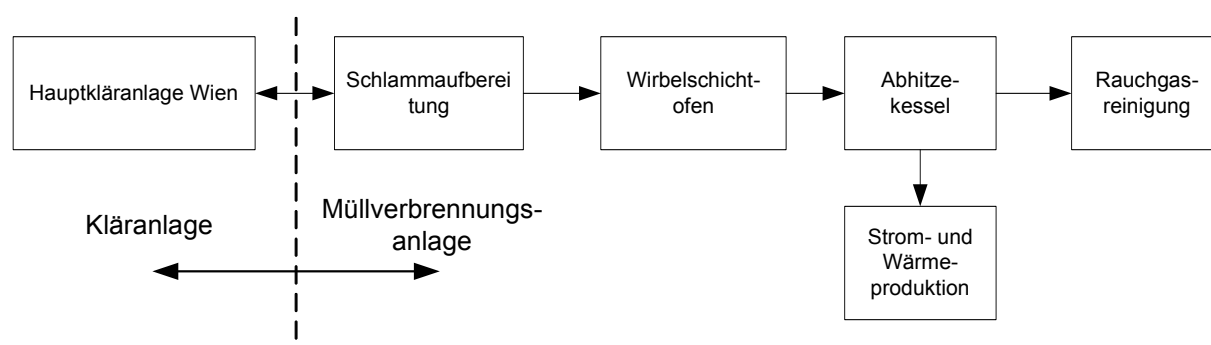


Abbildung 2: Prozessdiagramm

Abbildung 2 zeigt das zugehörige Prozessdiagramm. Der Klärschlamm wird mit einem Trockensubstanzgehalt von ca. 5 % von der Hauptkläranlage Wien übernommen und während der Schlammaufbereitung mit Zentrifugen mechanisch entwässert. Nach der Schlammaufbereitung steigt der Trockensubstanzgehalt auf ca. 33 %. Zusätzlich wird der Klärschlamm nach der Entwässerung mit einem hochkalorischen Stützbrennstoff (Heizöl Schwer, Tiermehl, hochkalorische Abfallstoffe) vermischt. Diese Mischung wird in der Wirbelschichtfeuerung verbrannt. Durch die Abkühlung der hei-

3.2.1 Das Simulationsprogramm IPSEpro

IPSEpro (Integrated Process Simulation Environment) ist ein von der Firma Simtech für den Anlagen- und Kraftwerksbau entwickeltes, gleichungsorientiertes Prozesssimulationsprogramm. Der Benutzer erstellt ein Fließbild, auf dessen Basis ein stationäres, nicht lineares Gleichungssystem erzeugt wird. Dieses wird von der Software in Gruppen unterteilt und anschließend mit dem Newton-Raphson-Algorithmus gelöst.

IPSEpro ist aus mehreren Softwarekomponenten zusammengesetzt. Mit dem Model Development Kit (MDK) werden die erforderlichen Anlagenteile, Apparate und Komponenten entwickelt. Dabei werden physikalische und chemische Grundgleichungen, hauptsächlich Massen- und Energiebilanzen verwendet. Die erstellten Komponenten werden in sogenannten Modellbibliotheken (Model Libraries) zusammengefasst und bilden gemeinsam mit den Stoffdatenbanken, in denen physikalische Eigenschaften chemischer Bestandteile hinterlegt sind, die Grundlage für die damit durchgeführten Berechnungen. In Abbildung 4 wird das Zusammenspiel der einzelnen Softwarekomponenten erläutert. Die eigentliche Bedienung der Simulationssoftware findet über PSE (Process Simulation Environment) statt. PSE stellt die Benutzeroberfläche des Programmes dar, in der Fließbilder aus Apparaten und Komponenten aus der Modellbibliothek erstellt werden.

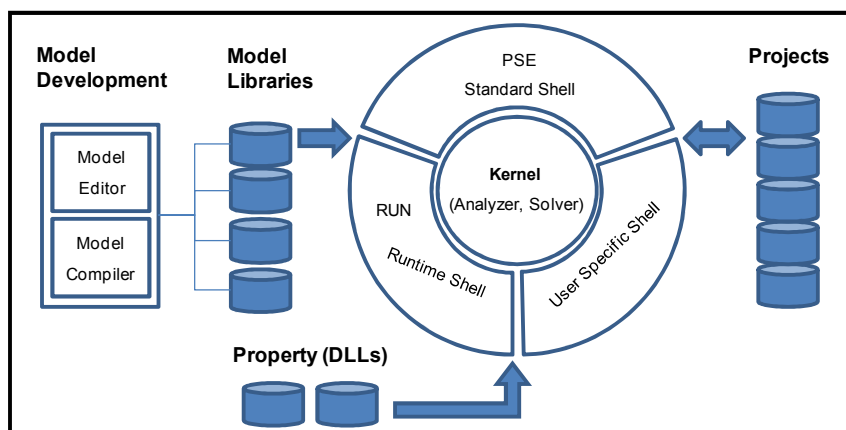


Abbildung 4: Funktionsweise von IPSEpro.

3.2.2 Messdatenvalidierung mit PSValidate

Gemessene Daten sind immer mit Unsicherheiten behaftet. Stehen bei einem bereits bestimmten System zusätzliche Messgrößen zur Verfügung, stimmen deren Werte meist nicht exakt mit den an den jeweiligen Stellen berechneten Werten überein. Bei mehrfacher Überbestimmtheit wird eine Aussage über die Qualität der Einzelmessungen möglich, da sich plausible Messwerte gegenseitig bestätigen während offensichtliche Fehlmessungen nicht mit der Simulation in Einklang gebracht werden können.

Solch ein überbestimmtes System wird durch die Methode der Lagrange-Multiplikatoren in ein bestimmtes Gleichungssystem übergeführt. Die Lösung des erweiterten, bestimmten Systems erfolgt nach dem bereits erwähnten Newton-Raphson Algorithmus. Dabei wird zur Lösung des überbestimmten Systems die Summe der Quadrate der gewichteten Abweichungen der ausgeglichenen Werte von den jeweiligen Messwerten minimiert. Dieses Verfahren wird abkürzend als Methode der minimalen Fehlerquadrate (*method of least squares*) bezeichnet. Um Messwerte unterschiedlicher

Einheiten in diesem Verfahren korrekt berücksichtigen zu können, muss zu jedem Messwert eine Absoluttoleranz angegeben werden. Diese Toleranz entspricht dem abgeschätzten Vertrauensbereich für den jeweiligen Messwert. Der Vertrauensbereich ergibt sich dabei aus den Schwankungen des Messwertes im betrachteten Zeitraum und einer Einschätzung der Qualität bzw. Zuverlässigkeit der Messung. Die daraus abgeleitete dimensionslose Minimierungsaufgabe lautet:

$$\sum_i \left(\frac{x_i - \bar{x}_i}{tol_{x_i}} \right)^2 \rightarrow Min$$

Dabei ist x_i der Messwert, $\bar{x}_i$ der Wert der ausgeglichenen Lösung und tol_{x_i} die festgelegte Absoluttoleranz. Die ausgeglichene Lösung entspricht dabei dem wahrscheinlichsten Betriebszustand unter Berücksichtigung der Erfüllung der Massen- und Energiebilanzen und der vergebenen Absoluttoleranzen der verwendeten Messwerte.

Für die Ausgleichsrechnung wird immer ein stationärer Betriebszustand der Anlage abgebildet. Als Datenbasis eignet sich daher ein Satz an arithmetischen Mittelwerten der Messwerte über einen Zeitraum, in dem keine Anlagenstörungen auftreten und die Betriebsparameter nicht wesentlich driften.

3.2.3 Modellierung der untersuchten Wirbelschichtfeuerung in IPSEpro

Die Wirbelschichtfeuerung wurde inklusive Luftvorwärmung, Brennstoffzufuhr, Wirbelschichtreaktor und Abhitzeessel in IPSEpro abgebildet. Der Kessel wurde als reine Blackbox modelliert, da eine detaillierte Modellierung für die vorgenommenen Untersuchungen nicht nötig war. Die Struktur des Modells ist in Abbildung 5 zu sehen.

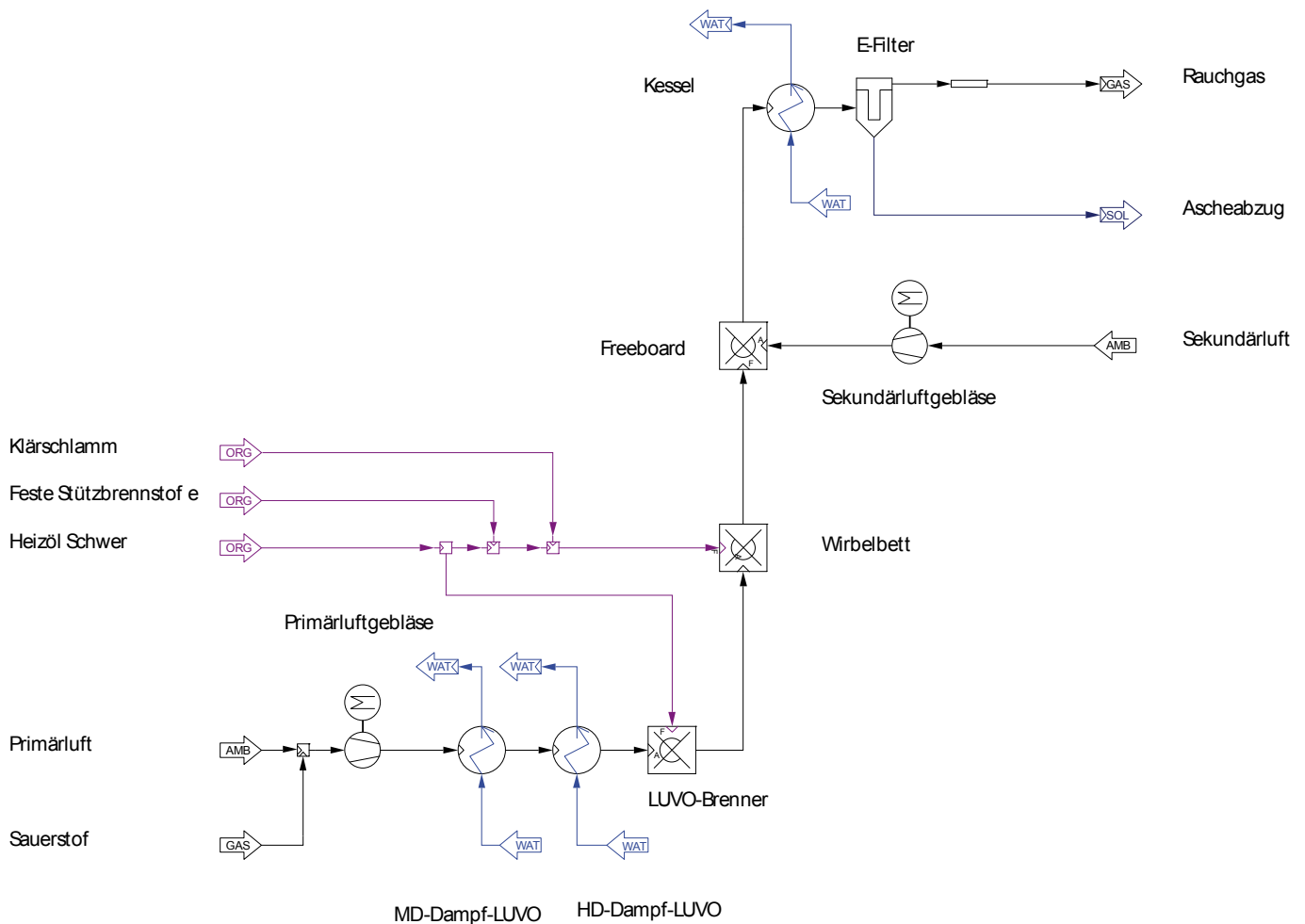


Abbildung 5: Fließbild der Anlage im Simulationsprogramm IPSEpro.

Da der Klärschlamm nur teilweise im Wirbelbett verbrennt und ein Teil der flüchtigen Bestandteile das Wirbelbett unverbrannt verlässt (Ogada und Werther, 1996) wurde der Wirbelschichtreaktor in zwei Bilanzzonen, Wirbelbett und Freiraum, unterteilt. In jeder dieser Bilanzen wird der erste Hauptsatz der Thermodynamik mit der konventionellen Enthalpie H^{*1} nach Baehr (2009) ausgewertet:

$$\dot{Q} + P = \sum_{i=1}^N \dot{m}_i^a H_{0i}^*(T_a, p_a) - \sum_{i=1}^N \dot{m}_i^e H_{0i}^*(T_e, p_e)$$

Dabei ist $\dot{Q}$ die zugeführte Wärme und P die zugeführte mechanische Leistung. Grundsätzlich wird in den Bilanzzonen des Modells von einer vollständigen Verbrennung ausgegangen. Um eine unvoll-

¹ Die Verwendung der konventionellen Enthalpie H^* ermöglicht eine Auswertung des ersten Hauptsatzes der Thermodynamik für chemische Reaktionen ohne weitere Bestimmung der Reaktionsenthalpien. Es gilt nach Baehr (2009):

$$H_{0i}^*(T, p) = H_{0i}^f + [H_{0i}(T, p) - H_{0i}(T_0, p_0)]$$

Dabei ist H_{0i}^f die Standardbildungsenthalpie des Stoffes i . In den eckigen Klammern findet sich die Differenz zwischen der Enthalpie im Zustand (T,p) und im Standardzustand (T₀,p₀).

ständige Verbrennung bzw. die unverbrannten flüchtigen Bestandteile zu modellieren, wurde der CO-Schlupf eingeführt:

$$s_{CO} = \frac{y_{CO}}{y_{CO} + y_{CO_2}} \Big|_{Austritt}$$

3.2.4 Parameter zu Bewertung der Versuchsergebnisse

Um die Ergebnisse der Experimente besser zu bewerten, wurden Kennzahlen eingeführt, die es erlauben unterschiedliche Betriebszustände miteinander zu vergleichen.

Oberfeuer

Das Oberfeuer φ_{OF} dient der Quantifizierung der Wärmefreisetzung im Wirbelbett. Es gilt:

$$\varphi_{OF} = \frac{P_{th, Freiraum}}{P_{th, gesamt}}$$

Das Oberfeuer beschreibt also die Menge an Wärme, die im Freiraum freigesetzt wird. Niedriges Oberfeuer bedeutet daher, dass nur ein geringer Teil der Flüchtigen das Wirbelbett unverbrannt verlässt, wobei ein hoher Wert bedeutet, dass ein großer Teil der Flüchtigen das Wirbelbett unverbrannt verlässt. Grundsätzlich wird angestrebt das Oberfeuer möglichst klein zu halten, da mit einem hohen Oberfeuer auch ein höherer Stützbrennstoffbedarf einhergeht.

Querschnittsbelastung

Die Querschnittsbelastung ist die ins Wirbelbett eingebrachte Brennstoffleistung bezogen auf die Bettquerschnittsfläche:

$$q_{Bett} = \frac{P_{th, total}}{A_{Bett}}$$

Fluidisierungszahl

Die Fluidisierungszahl U/U_L ist das Verhältnis der Lehrsrohrgeschwindigkeit zur Lockerungsgeschwindigkeit der Wirbelschicht. Sie beschreibt den Grad der Fluidisierung.

3.3 Vorversuche und Benchmarkmessungen

Zweck der Benchmarkmessungen war, Erkenntnisse über die Mechanismen der Klärschlammverbrennung in der Wirbelschicht und Vergleichswerte für die Sauerstoffversuche zu bekommen. Die Messungen wurden mit Heizöl Schwer als Stützbrennstoff und mit hochkalorischen Reststoffen durchgeführt.

Bei den Messungen wurden vor allem die Auswirkungen der Parameter Fluidisierungszahl und Querschnittsbelastung auf das Oberfeuer untersucht.

3.3.1 Benchmarkmessungen mit festen Stützbrennstoffen

Während der Benchmarkmessungen mit den festen Stützbrennstoffen war der Öl-Brenner zur Luftvorwärmung nicht in Betrieb. Als Stützbrennstoff wurden hochkalorische Kunststoffabfälle aus der Autoverwertung, die sogenannte Shredderleichtfraktion, verwendet.

In der ersten Variation wurde die Primärluftmenge und somit die Fluidisierungszahl variiert und versucht die Querschnittsbelastung konstant zu halten. Wie man in Abbildung 6 sehen kann, sinkt das Oberfeuer mit steigender Fluidisierung merklich ab.

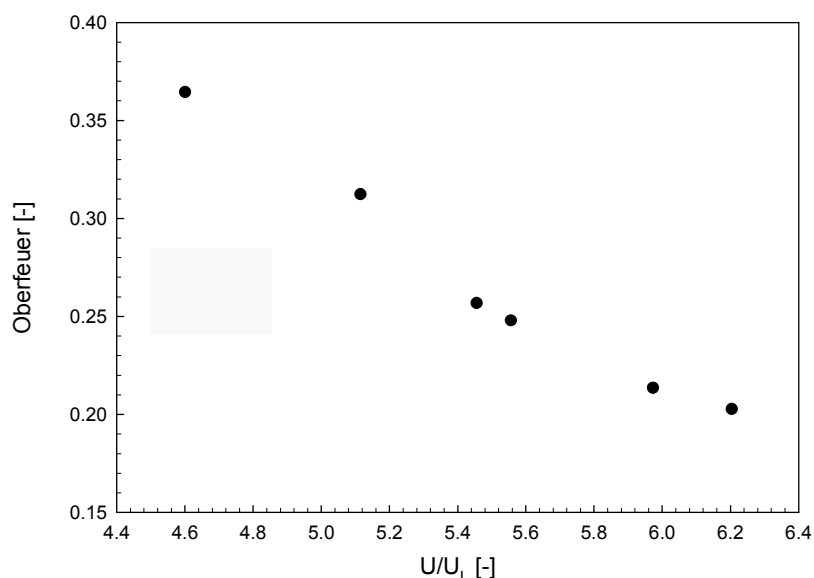


Abbildung 6: Änderung des Oberfeuers bei Variation der Fluidisierungszahl.

Wie in Abbildung 8 erkennbar ist, nimmt die Betttemperatur mit Erhöhung der Primärluftmenge um über 50 °C zu, ebenso steigt die Luftüberschusszahl des Bettes (Abbildung 7) mit Erhöhung der Fluidisierungszahl deutlich an. Das Verhalten der Temperatur ist eigentlich für eine überstöchiometrische Verbrennung untypisch, da bei einer weiteren Erhöhung der Luftmenge die Temperatur sinken sollte. Das Verhalten von Luftüberschusszahl, Betttemperatur und Oberfeuer lässt darauf schließen, dass mit zunehmender Fluidisierungszahl das Bett besser durchmischt wird und somit eine Verschiebung der Wärmefreisetzung vom Freeboard ins Bett stattfindet.

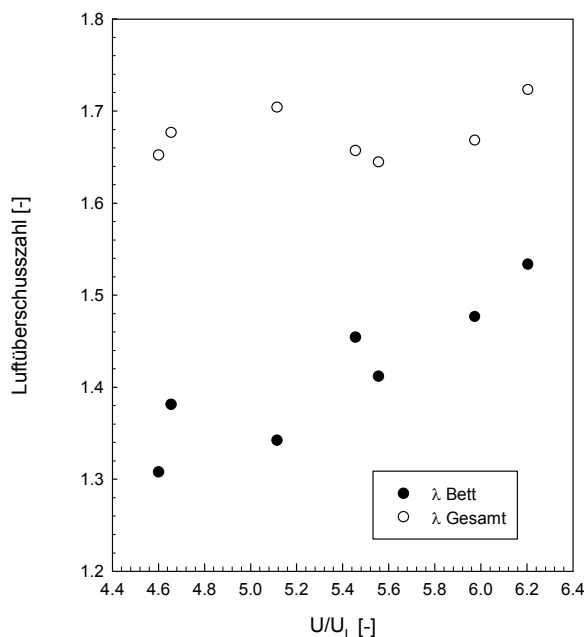


Abbildung 7: Änderung der Luftüberschusszahl bei Variation der Fluidisierung.

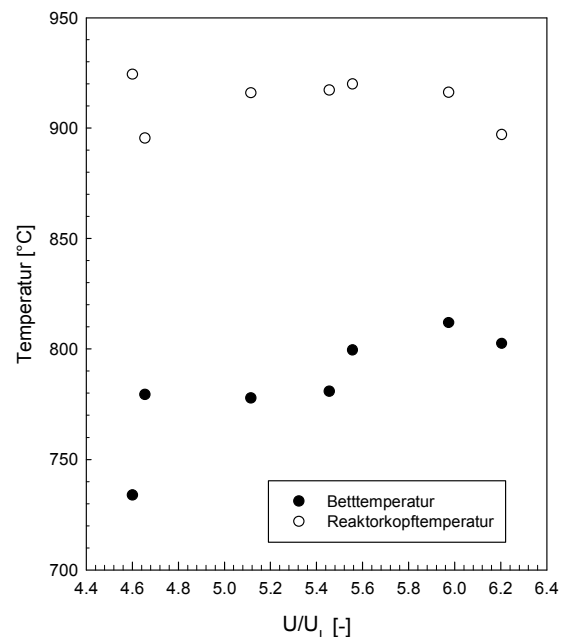


Abbildung 8: Änderung der Temperaturen bei Variation der Fluidisierung.

Die gesamte Luftüberschusszahl und die Temperatur am Reaktorkopf bleiben über der Variation in etwa konstant. Dies ergibt sich v.a. durch die Regelung der Sekundärluftmenge und ist somit von der Fluidisierungszahl entkoppelt. Daraus lässt sich folgern, dass durch eine höhere Fluidisierungszahl die Abgasverluste nicht steigen.

In einer zweiten Variation wurde die Querschnittsbelastung bei möglichst konstanter Fluidisierungszahl variiert. In Abbildung 9 ist eine Zunahme des Oberfeuers mit Steigerung der Querschnittsbelastung erkennbar. Die Zunahme des Oberfeuers mit der Querschnittsbelastung kann als Indiz gesehen werden, dass bei gleichbleibender Fluidisierungszahl und mit steigender Querschnittsbelastung, d.h. eine größere eingebrachte Brennstoffmenge, eine vermehrte Segregation der Brennstoffe stattfindet, dadurch mehr Flüchtige unverbrannt ins Freeboard gelangen und somit die Wärmefreisetzung im Bett geringer wird.

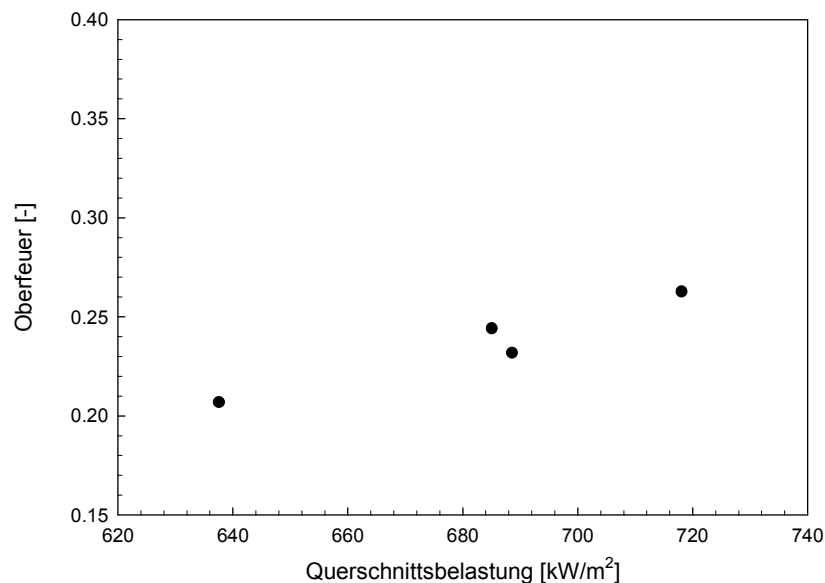


Abbildung 9: Änderung des Oberfeuers bei veränderter Querschnittsbelastung.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass Querschnittsbelastung und Fluidisierungszahl entgegengesetzten Einfluss auf das Oberfeuer haben. Zusammen mit dem Verhalten der Betttemperatur und der Luftüberschusszahl kann darauf geschlossen werden, dass eine Erhöhung der Primärluftmenge eine bessere Durchmischung im Bett bewirkt und damit mehr Brennstoff im Bett verbrannt wird. Anders liegt die Vermutung nahe, dass es durch die Erhöhung der Querschnittsbelastung bei konstanter Fluidisierungszahl zu einer Sättigung bei den Feedstellen mit Klärschlamm kommt, somit mehr Flüchtige das Freeboard unverbrannt erreichen und dadurch insgesamt ein kleinerer Teil der Brennstoffwärme im Bett freigesetzt wird. Die gesamten Betriebspunkte sind in einem dreidimensionalen Diagramm, Oberfeuer über Fluidisierungszahl und Querschnittsbelastung aufgetragen, siehe Abbildung 10. Zu erkennen ist, dass der Einfluss der Fluidisierungszahl auf das Oberfeuer größer ist als die Auswirkungen der Veränderung der Querschnittsbelastung.

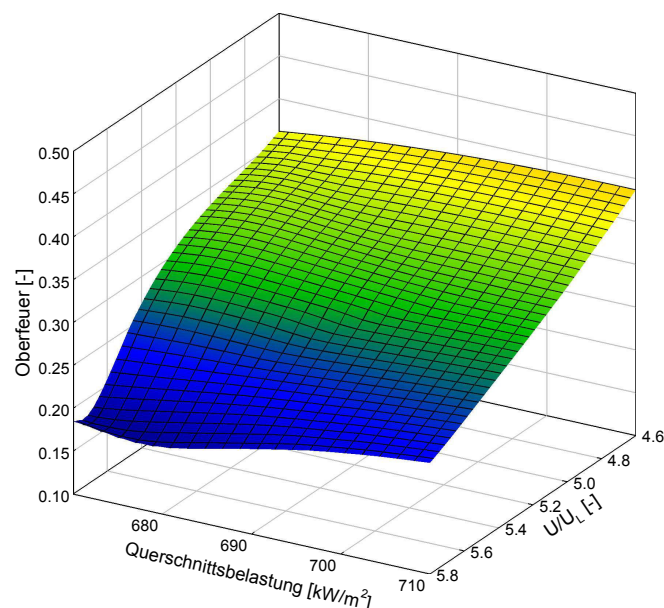


Abbildung 10: Oberfeuer über Fluidisierungszahl und Querschnittsbelastung.

3.3.2 Benchmarkmessungen mit flüssigen Stützbrennstoffen

Um den Unterschied zwischen den Mechanismen bei der Verbrennung mit festen und flüssigen Stützbrennstoffen zu bestimmen, wurde die Benchmarkkampagne mit Heizöl Schwer als einzig eingesetztem Stützbrennstoff wiederholt. Da bei den Messungen mit den festen Stützbrennstoffen Probleme beim Halten der erforderlichen Temperaturen im Reaktor auftraten, wurde bei der Öl-Kampagne der Öl-Brenner zur Luftvorwärmung eingesetzt. Damit konnte ohne große Beeinflussung des Gesamtsystems eine höhere Flexibilität bei den Parametervariationen erreicht werden.

Die beobachteten Effekte der Versuche mit festen Stützbrennstoffen konnten mit Heizöl Schwer reproduziert werden. Das Oberfeuer nimmt wie gehabt signifikant mit Zunahme der Fluidisierungszahl ab, siehe Abbildung 11. Bei dem ersten angefahrenen Betriebspunkt, bei einer Fluidisierungszahl von 4,4, wurde dem Klärschlamm zu viel Heizöl Schwer beigemischt. Dieser Punkt liegt erkennbar höher als die anderen Punkte. Dies kann als Indiz dafür gedeutet werden, dass das Heizöl zum größeren Teil im Bett verdampft und erst im Freiraum verbrannt wird.

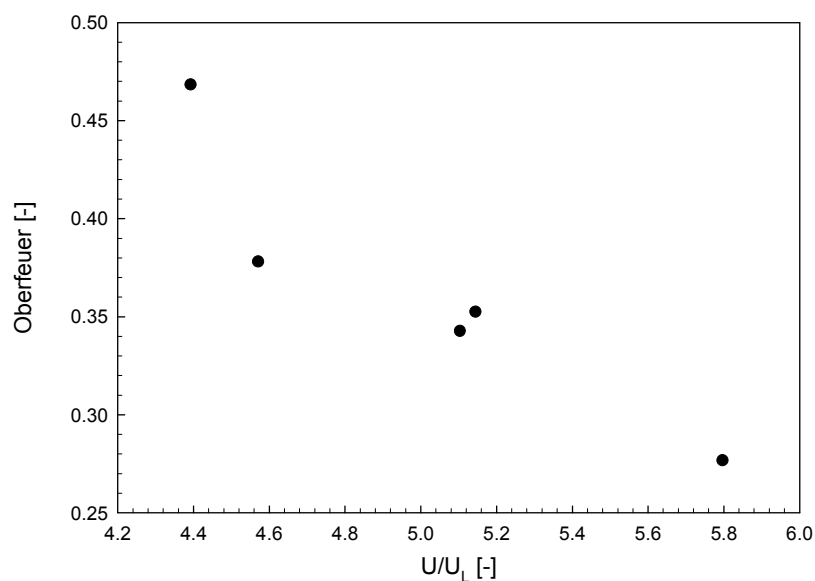


Abbildung 11: Änderung des Oberfeuers bei Variation der Fluidisierungszahl.

Wie in Abbildung 12 und Abbildung 13 ersichtlich ist, steigen die Luftüberschusszahl des Bettes und die Betttemperatur mit Erhöhung der Fluidisierungszahl etwas an. Wie auch bei den Versuchen mit Schredderleichtfraktion ist dies eigentlich für eine überstöchiometrische Verbrennung untypisch, da bei einer weiteren Erhöhung der Luftmenge die Temperatur sinken sollte.

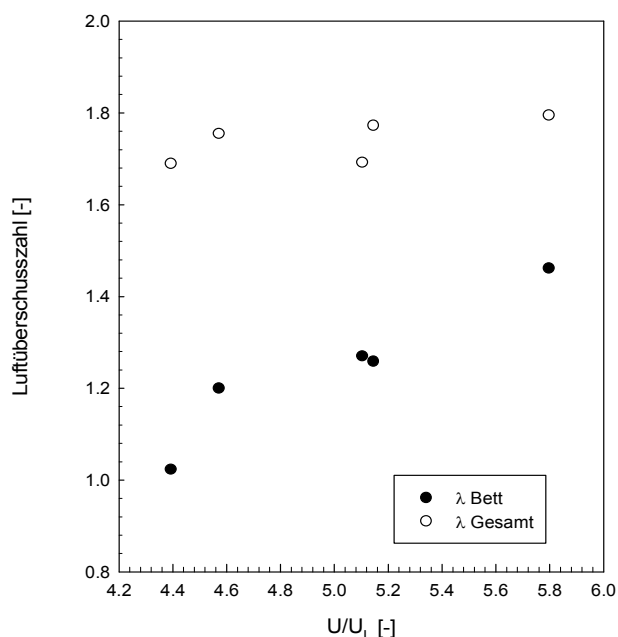


Abbildung 12: Luftüberschusszahlen in Abhängigkeit der Fluidisierung.

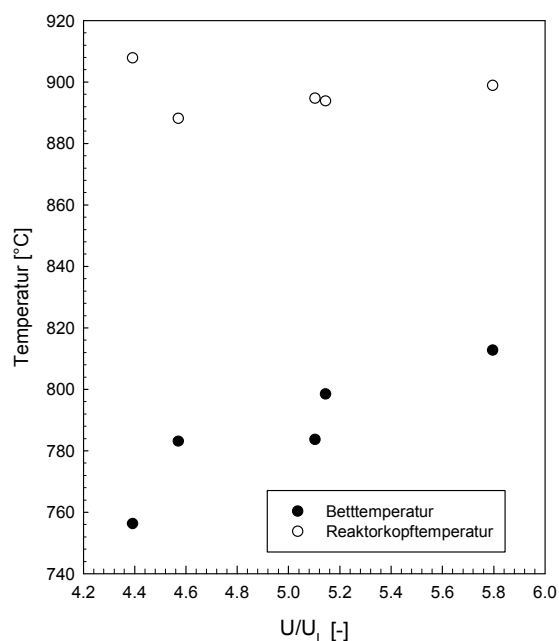


Abbildung 13: Temperaturen in Abhängigkeit der Fluidisierung.

Dieses Verhalten der Betttemperatur ist durch die Veränderung des Oberfeuers zu erklären, da mit zunehmender Fluidisierungszahl anzunehmen ist, dass das Bett besser horizontal und vertikal durchmischt wird, somit eine Verschiebung der Wärmefreisetzung vom Freeboard ins Bett stattfindet und die Temperaturen im Bett steigen.

Die Luftüberschusszahl des Reaktors, siehe Abbildung 12, bleibt in etwa gleich. Somit kann darauf geschlossen werden, dass eine höhere Fluidisierungszahl respektive Primärluftmenge und damit bessere Durchmischung im Bett keine Erhöhung der Abgasverluste bewirken.

Auch bei der Variation der Querschnittsbelastung waren die Trends der festen Stützbrennstoffe reproduzierbar. In Abbildung 14 ist eine klare Zunahme des Oberfeuers mit Steigerung der Querschnittsbelastung erkennbar.

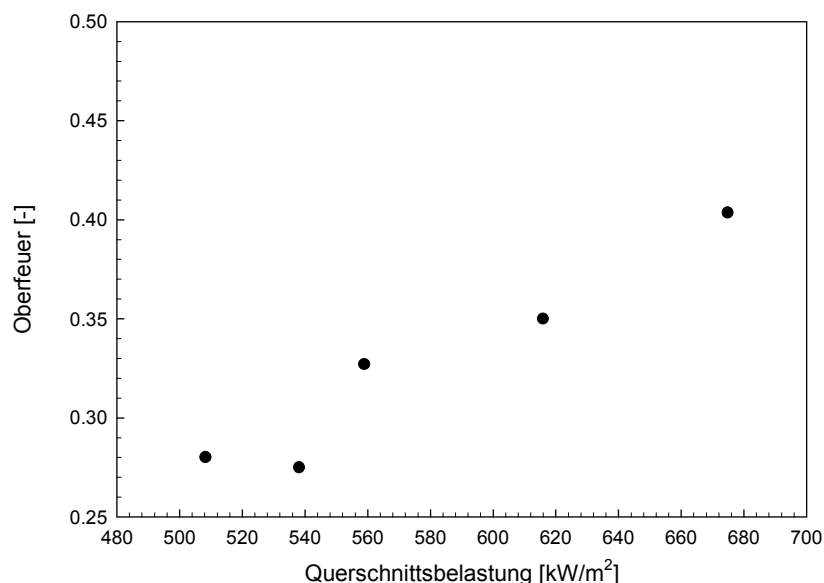


Abbildung 14: Änderung des Oberfeuers bei Variation der Querschnittsbelastung.

Da auch bei diesen Versuchen das Oberfeuer mit der Querschnittsbelastung steigt, wird die Vermutung gestärkt, dass bei gleichbleibender Fluidisierungszahl und mit steigender Querschnittsbelastung eine vermehrte Segregation der Brennstoffe stattfindet, dadurch mehr Flüchtige unverbrannt ins Freeboard gelangen und somit die Wärmefreisetzung im Bett geringer wird.

Für die Benchmarkkampagne mit den flüssigen Stützbrennstoffen kann zusammenfassend gesagt werden, dass auch hier die Querschnittsbelastung und die Fluidisierung entgegengesetzte Auswirkungen auf das Oberfeuer, d.h. auf die Wärmefreisetzung im Wirbelbett haben. Zusammen mit dem Verhalten der Betttemperatur verstärkt das die Vermutungen, dass bei höherer Primärluftmenge eine bessere Durchmischung im Bett stattfinden und eine Erhöhung der Querschnittsbelastung bei konstanter Fluidisierungszahl zu einer Sättigung im Bett und damit zu vermehrtem Oberfeuer führt.

Die Betriebspunkte sind in einem dreidimensionalen Diagramm, Oberfeuer über Fluidisierungszahl und Querschnittsbelastung aufgetragen, siehe Abbildung 15. Aus dem Verlauf des Diagramms geht hervor, dass sich die Querschnittsbelastung bei hohen Fluidisierungszahlen weniger stark auf das Oberfeuer auswirkt als bei niedrigen.

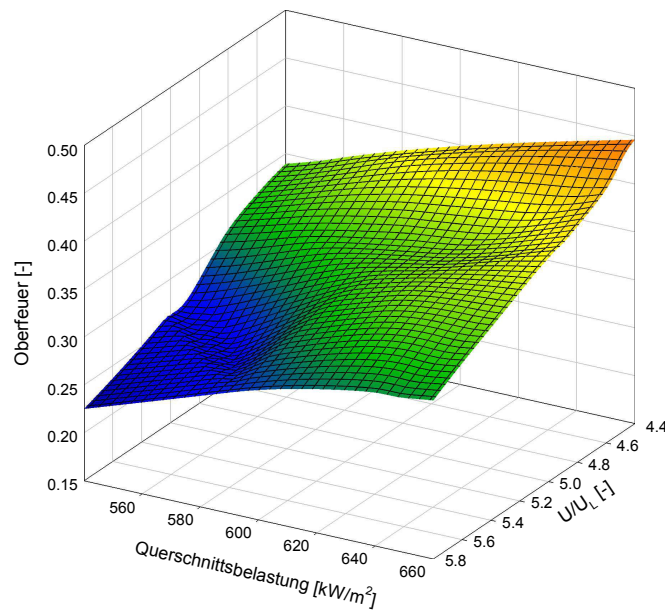


Abbildung 15: Oberfeuer über Fluidisierungszahl und Querschnittsbelastung.

3.3.3 Parametermodell zur Abschätzung des Oberfeuers

Bei den Variationen hat sich ergeben, dass die Fluidisierungszahl und die Querschnittsbelastung entgegengesetzte Auswirkungen auf das Oberfeuer und somit auf die Wärmefreisetzung im Bett haben. Um während des Betriebes abschätzen zu können, in welchem Bereich sich das Oberfeuer befindet, wird aus den Messwerten ein Parametermodell erstellt. Das Oberfeuer ist in diesem Modell die beschreibende Größe für die Wärmefreisetzung im Freeboard und somit auch der Wärmefreisetzung im Bett.

Da sich die festen und flüssigen Stützbrennstoffe in ihren Auswirkungen auf die Verbrennung im Bett signifikant voneinander unterscheiden, wird für die beiden Versuchsreihen jeweils ein separates Parametermodell gebildet.

Ausgehend von den Ergebnissen der Variationen ergibt sich, dass das Oberfeuer im Wesentlichen eine Funktion der Fluidisierungszahl und der Querschnittsbelastung ist:

$$\varphi_{OF} = \varphi_{OF}(q_{Bett}, \frac{U}{U_L})$$

Dabei wird der folgende mathematische Ansatz für ein lineares Parametermodell verwendet:

$$\varphi_{OF} = a_0 + a_1 \cdot \frac{q_{Bett}}{q_{Bett}} + a_2 \cdot \frac{\frac{U}{U_L}}{(\frac{U}{U_L})}$$

Dabei werden die Parameter dimensionslos gemacht, indem sie jeweils durch die Mittelwerte der jeweiligen Versuchsreihe normiert werden (siehe Tabelle 1). Dies geschieht aus dem Grund, damit die Koeffizienten und die dadurch erlangten Ergebnisse besser verglichen werden können.

Tabelle 1: Mittelwerte der Querschnittsbelastung und der Fluidisierungszahl.

Parameter	Einheit	Arithmetisches Mittel	
		Flüssige SB	Feste SB
U/U_L	[-]	5,02	5,43
q_{Bett}	[kW/m ²]	597	683

Anschließend wird mit den Messwerten und dem mathematischen Ansatz ein überbestimmtes Gleichungssystem gebildet und es werden die Fehlerquadrate zwischen den gemessenen und berechneten Werten für das Oberfeuer gebildet und minimiert. Daraus ergeben sich die drei gesuchten Koeffizienten. Die Ergebnisse sind in der Tabelle 2 zusammengefasst.

Tabelle 2: Berechnete Koeffizienten des Parametermodells.

Koeffizient	Arithmetisches Mittel		Zugeh. Parameter
	Flüssige SB	Feste SB	
a_0	0,274	0,190	-
a_1	0,479	0,708	q_{Bett}
a_2	-0,436	-0,642	U/U_L

Mit den berechneten Koeffizienten und den Mittelwerten ergeben sich die folgenden Parametermodelle für Schredderleichtfraktion und für Heizöl Schwer:

Shredderleichtfraktion:

$$\varphi_{OF} = 0,190 + 1,04 \cdot 10^{-4} \cdot q_{Bett} - 0,118 \cdot \frac{U}{U_L}$$

Heizöl Schwer:

$$\varphi_{OF} = 0,274 + 8,33 \cdot 10^{-4} \cdot q_{Bett} - 8,68 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{U}{U_L}$$

Hier gilt zu beachten, dass das Modell nur in dem während der Benchmarkkampagnen gefahrenen Arbeitsbereichen gilt.

In Abbildung 16 und Abbildung 17 sind die berechneten über den gemessenen Werten für das Oberfeuer aufgetragen. Es ist eine gute Übereinstimmung der Werte ersichtlich, alle befinden sich innerhalb eines 10 % Intervalls.

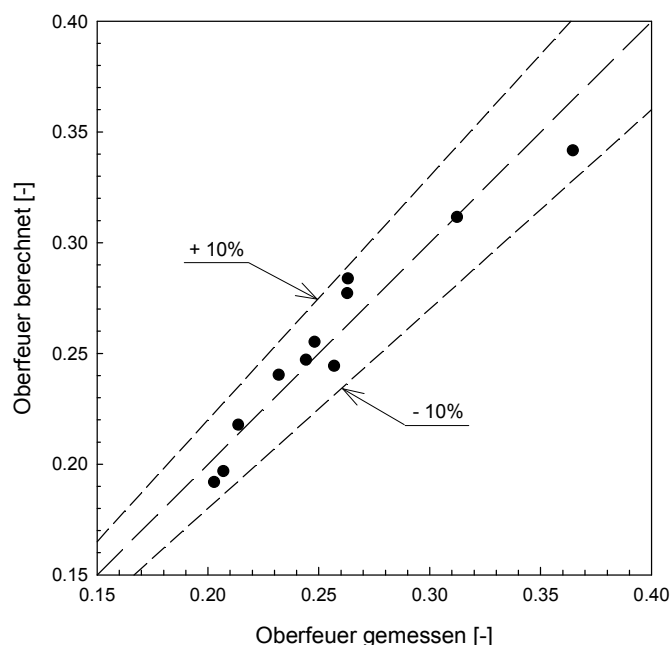


Abbildung 16: Parametermodell für feste Stützbrennstoffe.

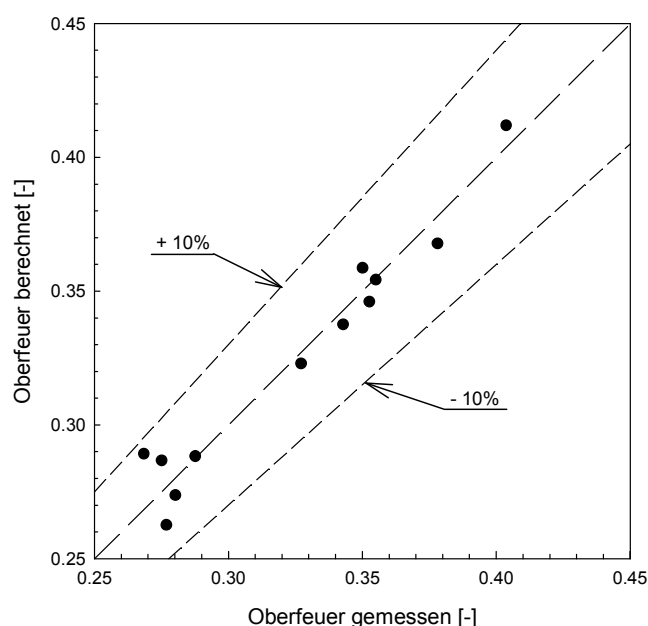


Abbildung 17: Parametermodell für flüssige Stützbrennstoffe.

3.3.4 Zusammenfassende Bemerkungen zu den Benchmarkkampagnen

Es hat sich gezeigt, dass die Trends des Oberfeuers, der Temperaturen und der Luftüberschusszahlen bei beiden Versuchsreihen ähnlich sind. Jedoch ist das Oberfeuer bei den Versuchen mit Heizöl Schwer bei allen Betriebspunkten um etwa 30 % höher als bei der Schredderleichtfraktion. Als mögliche Ursache dafür ist anzunehmen, dass die festen Stützbrennstoffe vermehrt im Bett verbleiben und dort besser verbrennen und dass die flüssigen Stützbrennstoffe zu einem gewissen Teil im Bett verdampft werden und somit in gesteigertem Maße unverbrannt oder nur teiloxidiert das Freeboard erreichen.

In Abbildung 18 und Abbildung 19 sind die Aufteilungen der in den Ofen eingebrachten Leistungen auf die Brennstoffleistungen von Klärschlamm und Stützbrennstoffen, sowie die des Dampfes durch die LUVOs dargestellt. Die Mittelwerte der beiden Versuchsreihen haben sich dafür als repräsentativer Punkt gezeigt. Zu erkennen ist, dass der Anteil an Klärschlamm bei der Schredderleichtfraktion kleiner ist als mit Heizöl Schwer, der Anteil des Dampfes ist in etwa gleich. Da es während der Variationen mit festen Stützbrennstoffen Probleme gab die Temperaturen im Ofen zu halten, wurde der Anteil der Schredderleichtfraktion bewusst größer gewählt, um eine höhere Flexibilität zu erreichen.

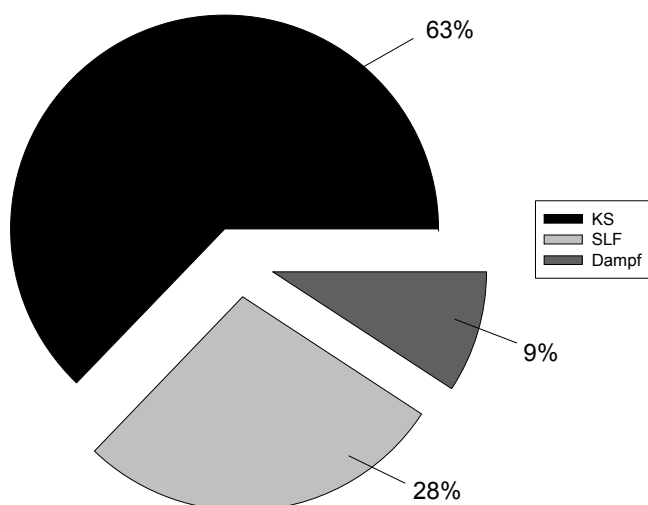


Abbildung 18: Inputströme beim Einsatz fester Stützbrennstoffe (KS...Klärschlamm; SLF...Shredderleichtfraktion).

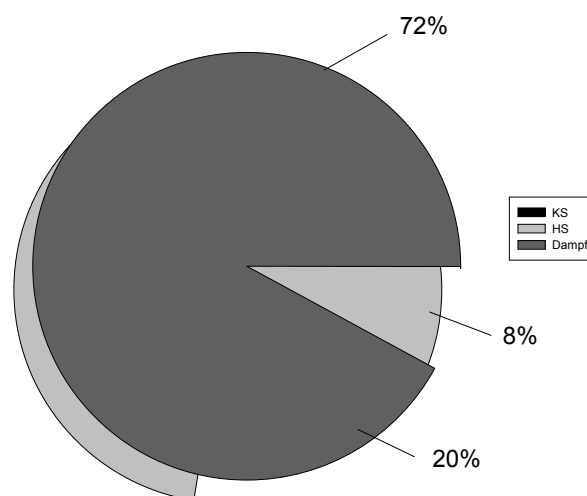


Abbildung 19: Inputströme beim Einsatz flüssiger Stützbrennstoffe (KS...Klärschlamm; HS...Heizöl Schwer).

3.4 Sauerstoffversuche

Die Sauerstoffversuche wurden über einen Zeitraum von mehreren Wochen durchgeführt, wobei aus Kostengründen ausschließlich feste Stützbrennstoffe eingesetzt wurden. Da sich die eingesetzten Brennstoffe (Klärschlamm sowie eine Mischung aus Tiermehl und Shredderleichtfraktion) in ihrer Zusammensetzung kontinuierlich ändern, war es nicht immer möglich die Anlage in den erwünschten Betriebsbereichen zu betreiben. Die Bereiche der wichtigsten Brennstoffdaten sind in Tabelle 3 gelistet.

Tabelle 3: Brennstoffeigenschaften während der Sauerstoffversuche (gemessen).

Brennstoff	H _o (tr.) [kJ/kg]	Wassergehalt [gew%]	Aschegehalt (tr.) [gew%]
Klärschlamm	18 000-18 800	64.7-70.2	19.9-26.6
Tiermehl	19 400-20 600	5.6-7.0	20.2-25.0
Shredderleichtfraktion	13 500-23 700	3.7-9.2	28.5-43.6

Nach dem Einschalten der Sauerstoffeinspeisung wurde die Brennstoffmischung in Richtung mehr Schlamm und weniger Stützbrennstoff verändert bzw. die Primärluftmenge angepasst bis die gewünschten Betriebsparameter (z.B. Temperaturen, Dampfproduktion, Restsauerstoffgehalt im Abgas) erreicht wurden. Während der Sauerstoffversuche war der Öl-Brenner zur Luftvorwärmung nicht in Betrieb. Als Stützbrennstoff wurde eine Mischung aus Tiermehl und Shredderleichtfraktion (30 %Tiermehl und 70 % Shredderleichtfraktion bezogen auf das Volumen) eingesetzt.

3.4.1 Einfluss der Sauerstoffanreicherung auf das Betriebsverhalten bzw. auf die Betriebsstabilität

Auf Grund der an sich sehr robusten Natur von Wirbelschichtprozessen und der sehr moderaten Anreicherung der Sauerstoffkonzentration auf 24 vol% mussten beim Umschalten auf den angereicherten Betrieb keine speziellen Maßnahmen getroffen werden. Nach dem Start der Sauerstoffeinspei-

sung war der erste erkennbare Effekt ein Anstieg des Restsauerstoffgehaltes im Abgas. In Abbildung 20 sind die wichtigsten Prozessparameter über einen Versuchstag zu sehen.

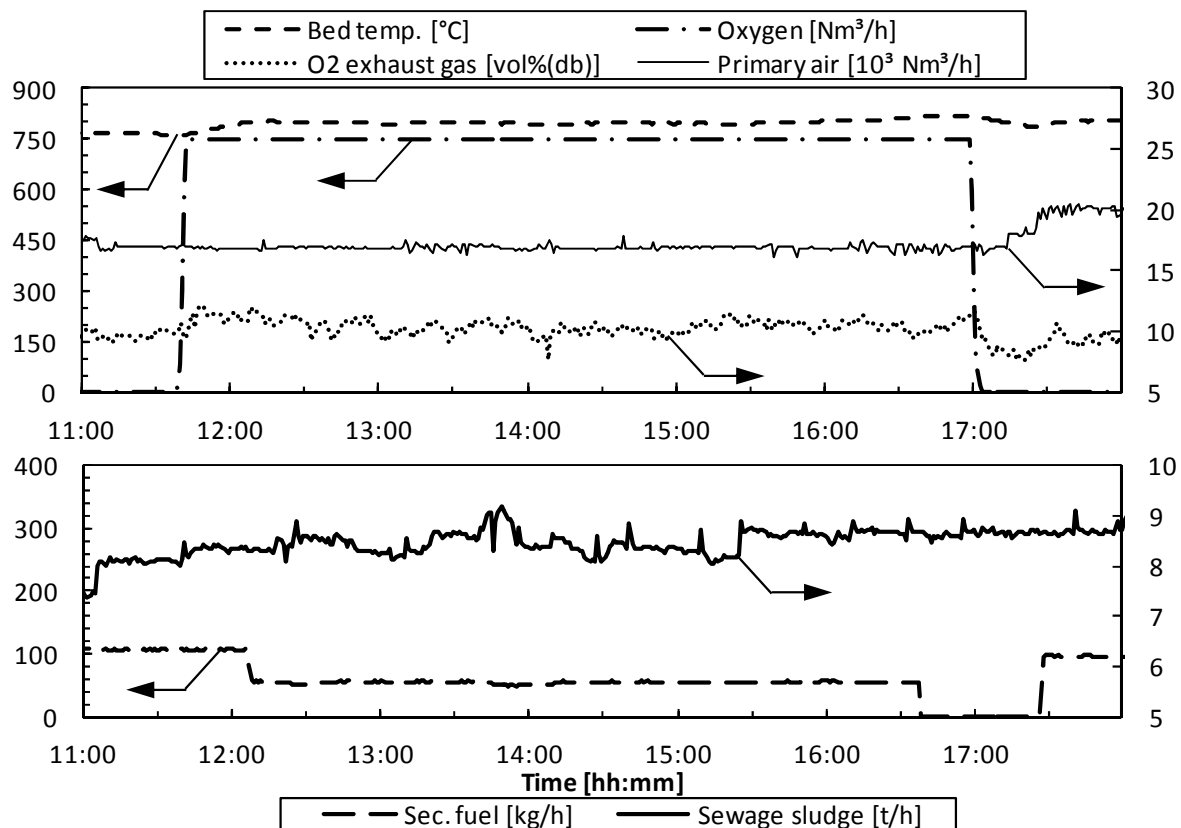


Abbildung 20: Wichtigste Prozessgrößen während eines Versuchstages. Sauerstoffanreicherung beginnt um 11:40 und endet um 17:00.

Die Sauerstoffanreicherung selbst hatte keinen bemerkbaren Effekt auf die Betriebsstabilität des Ofens. Auf Grund der örtlichen Entfernung der Einspeisestelle von der Eintrittsstelle des Verbrennungsgases in den Reaktor war immer eine ausgezeichnete Vermischung des Sauerstoffes mit der Luft garantiert. Daher sind im Betrieb auch keine Temperaturhotspots aufgetreten.

Beim Umschalten vom angereicherten auf den normalen Betrieb traten ebenfalls keine Schwierigkeiten auf. Durch die hohe Wärmekapazität des Wirbelbettes waren keine zeitkritischen Parameteränderungen notwendig. Es war also genügend Zeit die Brennstoffmischung und die Primärluftmenge auf die Werte, die für den normalen Betrieb nötig sind, einzustellen (siehe Abbildung 20).

3.4.2 Einfluss der Sauerstoffanreicherung auf die Fluidisierung und das Oberfeuer

Durch die erhöhte Sauerstoffkonzentration musste die Primärluftmenge reduziert werden, um einen akzeptablen Restsauerstoffgehalt zu erreichen. Eine Reduzierung der Restsauerstoffmenge durch Erhöhung der Leistung war nicht immer möglich, da die maximale Last der Schlammmentwässerungssysteme und des Abhitzekessels erreicht war. Als Resultat der reduzierten Fluidisierungsgasmenge (Mischung aus Luft und Reinsauerstoff) reduzierte sich die Fluidisierungszahl und ein Betrieb unter den gewünschten Fluidisierungsparametern ($U/U_L > 5$) war bei höheren Sauerstoffkonzentrationen nicht möglich (siehe Abbildung 21).

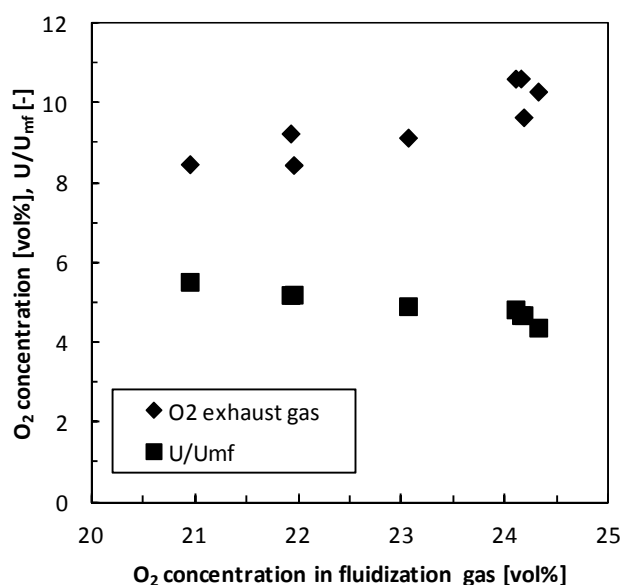


Abbildung 21: Erhöhung der Sauerstoffkonzentration im Abgas und Abfall der Fluidisierungsahl als Resultat der Sauerstoffanreicherung und der Reduktion der Fluidisierungsgasmenge.

Abbildung 22 zeigt den Einfluss der Sauerstoffkonzentration im Fluidisierungsgas auf das Oberfeuer. Die Daten zeigen einen leichten Anstieg des Oberfeuers mit steigender Sauerstoffkonzentration. Berücksichtigt man aber die Erkenntnisse aus den Benchmarkmessungen (Oberfeuer steigt bei schwächerer Fluidisierung) scheint es eher der Fall zu sein, dass das erhöhte Oberfeuer das Resultat einer verringerten Fluidisierung ist (siehe Abbildung 23). Es muss aber festgehalten werden, dass die Daten hier kein eindeutiges Bild zeichnen und die getroffenen Aussagen in zukünftigen Arbeiten verfeinert werden müssen.

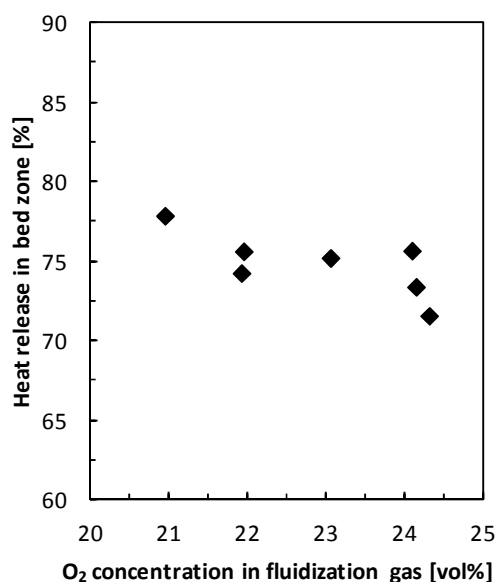


Abbildung 22: Einfluss der Sauerstoffkonzentration auf die Wärmefreisetzung im Wirbelbett.

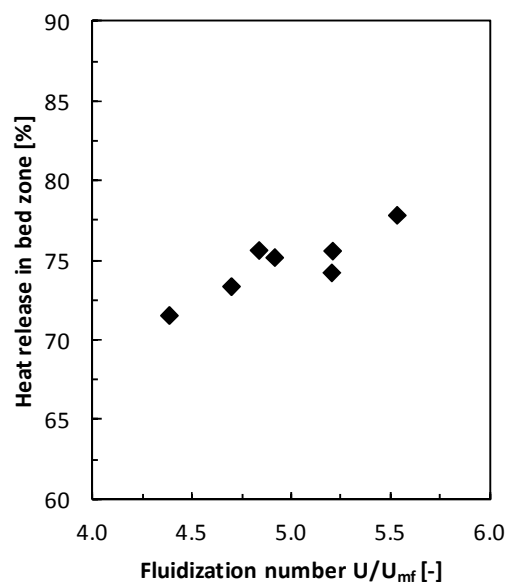


Abbildung 23: Einfluss der Fluidisierungsahl auf die Wärmefreisetzung im Wirbelbett.

3.4.3 Einfluss der Sauerstoffanreicherung auf die Emissionen

In der vorherrschenden Konfiguration werden Emissionen wie NO_x und SO_x nur nach der Rauchgasreinigung gemessen. Hier konnten während der Versuche absolut keine Veränderung zum Normalbetrieb festgestellt werden. Die Sauerstoffanreicherung hat auf diese Emissionen daher keine Auswirkungen.

3.4.4 Einfluss der Sauerstoffkonzentration auf den Stützbrennstoffbedarf bzw. die Entsorgungskapazität

Neben der grundlegenden Machbarkeit der Sauerstoffanreicherung war der Einfluss auf den Stützbrennstoffbedarf und die daraus resultierende Veränderung der Entsorgungskapazität der wirtschaftlich interessanteste Aspekt des Projektes. In Abbildung 24 sieht man diesen Einfluss. Mit steigender Sauerstoffkonzentration im Fluidisierungsgas steigt der Beitrag des Schlammes am Gesamtenergieinput an und der Beitrag des Stützbrennstoffes sinkt. Bei der maximal erreichten Sauerstoffkonzentration von 24,1 % beträgt der Anteil des Schlammes am Gesamtenergieinput 80 %. Es kann also mehr Schlamm unter Einsatz von weniger Stützbrennstoff verbrannt werden.

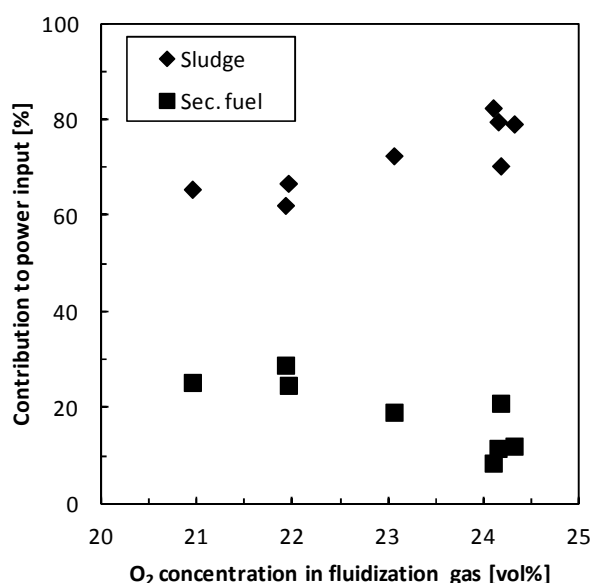


Abbildung 24: Einfluss der Sauerstoffanreicherung auf den Stützbrennstoffbedarf (Input durch die Luftvorwärmung ca. 9 %, nicht dargestellt).

Nimmt man den Standardbetrieb während der Benchmarkmessungen (Energieinput des Schlammes ca. 60-65 %) als Vergleichsbasis, bedeutet das eine relative Entsorgungskapazitätssteigerung von ca. 30 %. Abbildung 25 zeigt einen Vergleich der Inputs bei normalem Betrieb und bei Betrieb mit einer Sauerstoffkonzentration im Fluidisierungsgas von 24 %.

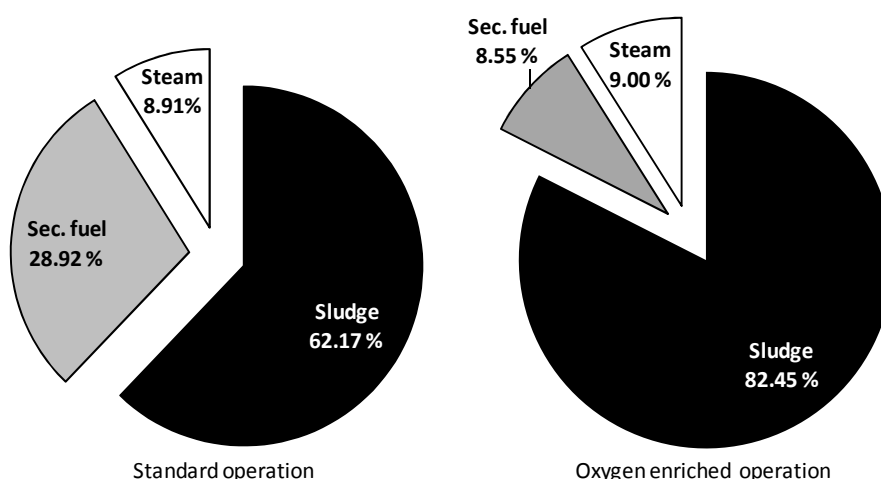


Abbildung 25: Vergleich der Energieinputs bei normalem Betrieb und bei Betrieb mit Sauerstoffanreicherung.

4 Ausblick und Empfehlungen

Die nächsten Schritte können in zwei Bereiche, langfristige und kurzfristige, unterteilt werden. Kurzfristig müssen ausgehend von den gewonnenen Daten detaillierte wirtschaftliche Analysen über die temporäre Durchsatzsteigerung durch Sauerstoffanreicherung getroffen werden. Diese Analysen dürfen dabei nicht nur auf den momentanen Rahmenbedingungen basieren, sondern müssen auch auf zukünftige Entwicklungen der Primärenergiekosten eingehen.

Für langfristige Entscheidungen im Sinne des OxyAB Fahrplanes müssen die politischen Rahmenbedingungen zur CO₂-Speicherung in Österreich und in Europa bzw. die endgültigen Regeln für den Emissionszertifikatehandel geklärt sein. Erst dann können Entscheidungen in diese Richtung getroffen werden.

5 Literaturverzeichnis

Baehr, H, Kabelac, S., 2009 „Thermodynamik – Grundlagen und technische Anwendungen.“ 14. Auflage, Springer-Verlag, Hamburg.

Ogada, T. Werther, J., 1996 „Combustion characteristics of wet sewage sludge in a fluidised bed, release and combustion of the volatiles.“ Fuel (75), 617-626.

IMPRESSUM

Verfasser

Fernwärme Wien Gesellschaft m.b.H.

Bernhard Kronberger
Spittelauer Lände 45, 1090 Wien
E-Mail: bernhard.kronberger@fernwaermewien.at

Eigentümer, Herausgeber und Medieninhaber

Klima- und Energiefonds
Gumpendorfer Straße 5/22
1060 Wien
office@klimafonds.gv.at
www.klimafonds.gv.at

Disclaimer

Die Autoren tragen die alleinige Verantwortung für den Inhalt dieses Berichts. Er spiegelt nicht notwendigerweise die Meinung des Klima- und Energiefonds wider.

Der Klima- und Energiefonds ist nicht für die Weiternutzung der hier enthaltenen Informationen verantwortlich.

Gestaltung des Deckblattes

ZS communication + art GmbH