

15. DGAU-WISSENSCHAFTSKONGRESS

Kreislauf- und Ressourcenwirtschaft

Anke Bockreis, Martin Faulstich, Sabine Flamme, Kathrin Greiff,
Martin Kranert, David Laner, Mario Mockler, Michael Nelles,
Peter Quicker, Gerhard Rettenberger, Vera Susanne Rotter,
Jörg Woidasky (Hg.)

Wissenschaftliche Organisation

Prof. Dr.-Ing. Anke Bockreis (Univ. Innsbruck)
Prof. Dr.-Ing. Martin Faulstich (INZIN e.V.)
Prof. Dr.-Ing. Sabine Flamme (FH Münster)
Prof. Dr. Kathrin Greiff (RWTH Aachen University, ANTS)
Prof. Dr.-Ing. Martin Kranert (i. R. Univ. Stuttgart)
Prof. Dr. David Laner (Univ. Kassel)
Prof. Dr. Mario Mockler (OTH Amberg-Weiden)
Prof. Dr. mont. Michael Nelles (Univ. Rostock/DBFZ Leipzig)
Prof. Dr.-Ing. Peter Quicker (RWTH Aachen University, TEER)
Prof. Dr.-Ing. Gerhard Rettenberger (i. R. HS Trier)
Prof. Dr.-Ing. Vera Susanne Rotter (TU Berlin)
Prof. Dr.-Ing. Jörg Woidasky (HS Pforzheim)

Deutsche Gesellschaft für Abfall- und Kreislaufwirtschaft e.V.
DGAW
Von-der-Heydt-Straße 2
10785 Berlin
Tel.: 030.84 59 14 77
E-Mail: info@dgaw.de
www.DGAW.de

© *innsbruck* university press, 2026
Universität Innsbruck
1. Auflage
Alle Rechte vorbehalten.
innsbruck university press, Karl-Schönherr-Straße 3, 6020 Innsbruck
Tel. +43 512 507-31700, iup@uibk.ac.at, www.uibk.ac.at/iup
www.uibk.ac.at/iup
ISBN 978-3-99106-187-8
DOI 10.15203/99106-187-8
Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

Implementation des Oxyfuel-Verfahrens zur CO₂-Abscheidung in Müllverbrennungsanlagen

Abstract: Die Implementation des Oxyfuel-Verfahrens in Müllverbrennungsanlagen gilt als vielversprechender Ansatz zur CO₂-Abscheidung. In diesem Kontext werden die prozesstechnischen Auswirkungen verschiedener Abgas-Rezirkulationsstrategien anhand eines numerischen Verbrennungsmodells und ergänzender thermoanalytischer Experimente untersucht. Die Modellierung verdeutlicht, dass die Wahl des Abgas-Rezirkulationspfades die Schadstofffracht, den Wasserdampfanteil im Oxidationsmittel sowie die CO₂- und N₂-Konzentrationen im Abgas maßgeblich beeinflusst. Die experimentellen Ergebnisse belegen, dass eine Erhöhung des O₂-Gehalts die Reaktivität des Brennstoffs deutlich steigert, während H₂O lediglich eine moderat fördernde Wirkung auf die Koksverbrennung besitzt. Um vergleichbare Verbrennungscharakteristika wie im Luftbetrieb zu erreichen, sind etwa 32 bis 35 Vol.-% O₂ in CO₂ erforderlich.

1 Einleitung

Die Europäische Union verfolgt mit dem European Green Deal das Ziel, bis zum Jahr 2050 Klimaneutralität zu erreichen und die Treibhausgasemissionen bis 2030 um mindestens 55 Prozent zu reduzieren [1]. Auch der Sektor der thermischen Abfallbehandlung (TAB) ist von diesen Vorgaben betroffen, deren CO₂-Emissionen je nach Abfallzusammensetzung zwischen 0,84 und 1,1 Tonnen CO₂ pro Tonne Abfall betragen, wovon rund die Hälfte biogenen Ursprungs sind [2], [3].

Daher rückt die Integration von CO₂-Abscheidungstechnologien zunehmend in den Fokus. Während die Aminwäsche als Post-Combustion-Verfahren zur CO₂-Abscheidung derzeit am weitesten entwickelt ist und bereits im industriellen Maßstab eingesetzt wird, bietet die Oxyfuel-Verbrennung einen alternativen Ansatz, der direkt in den Verbrennungsprozess eingreift. Indem die Verbrennungsluft durch reinen Sauerstoff und rezirkuliertes Rauchgas ersetzt wird, soll der Stickstoffeintrag in das System vermieden bzw. reduziert werden. Das Abgas besteht folglich aus hohen Anteilen CO₂ und H₂O. Nach der Kondensation des Wassers sowie nach Abtrennung von Verunreinigungen und Kompression (Compression and Purification Unit, CPU) steht das CO₂ für eine Weiterverwendung (Carbon Capture and Utilization, CCU) oder Speicherung (Carbon Capture and Storage, CCS) zur Verfügung. [4], [5]

Obwohl das Oxyfuel-Verfahren im Bereich der Kohleverbrennung bereits umfassend erforscht wurde, bestehen hinsichtlich der Übertragbarkeit auf heterogene Abfallströme und Rostfeuerungsanlagen weiterhin große Forschungslücken. Simulationen der Implementation des Oxyfuel-Verfahrens in Müllverbrennungsanlagen (MVA) adressieren bisher nicht den Vergleich der Rauchgasrezirkulation an verschiedenen Positionen im Prozess und werden selten durch experimentelle Untersuchungen zu realistischen O₂-Bedarfen oder resultierenden Verbrennungscharakteristika gestützt. [5], [6]

Die vorliegende Arbeit schließt diese Lücke, indem ein Oxyfuel-Modell mit experimentellen TGA/DTA-Daten verknüpft wird und dadurch sowohl die Prozessbedingungen als auch die praktische Umsetzbarkeit verschiedener Rezirkulationsstrategien bewertet werden kann.

2 Methodik

2.1 Modellierung der Oxyfuel-Verbrennung in MVA

Zur Untersuchung der Oxyfuel-Verbrennung in MVA wurde ein numerisches Modell entwickelt, das auf einer stöchiometrischen Verbrennungsrechnung unter Oxyfuel-Bedingungen basiert. Das Prozessschema der betrachteten, technischen Konfiguration der MVA und die gewählten Randbedingungen des Modells sind in Abbildung 1 dargestellt. Um stationäre Betriebsbedingungen abbilden zu können, berücksichtigt das Modell eine Rauchgasrezirkulation und Verbrennungsrechnung über einhundert Iterationsschritte. Steuergrößen sind die eingestellte O_2 -Konzentration im Oxidationsmittel, der O_2 -Überschuss sowie Falschluffanteile und die Abfallzusammensetzung. Anhand der Modellierung von drei verschiedenen Rezirkulationspfaden A, B und C, die in Abbildung 1 dargestellt sind, wurde der Einfluss auf die Gaszusammensetzung und den Volumenstrom entlang des Prozesses untersucht. Mithilfe einer Sensitivitätsanalyse wurde der Einfluss der Steuergrößen auf die CO_2 - und N_2 -Konzentrationen im Gasstrom zur CPU sowie auf den Sauerstoffbedarf untersucht. Ein weiterer Fokus lag auf der resultierenden Wasserdampf-Konzentration im Oxidationsmittel, dessen Effekt auf die Verbrennung in den thermoanalytischen Messungen experimentell untersucht wurde.

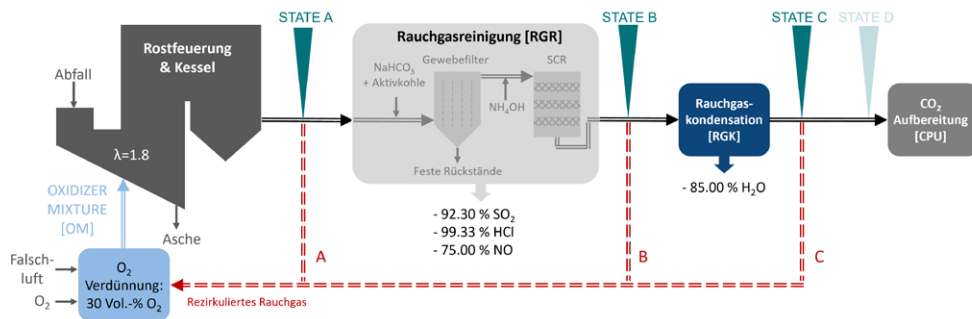


Abbildung 1: Modellierung der Oxyfuel-Verbrennung in MVA

2.2 Thermoanalytische Untersuchungen der Oxyfuel-Verbrennung von EBS

Zur experimentellen Untersuchung der Oxyfuel-Verbrennung wurden thermogravimetrische Analysen (TGA) und Differenzthermoanalysen (DTA) durchgeführt. Als Probenmaterial wurde zerkleinerter Ersatzbrennstoff (EBS) mit der Korngröße < 1 mm aus einem deutschen Zementwerk verwendet, um die Homogenität des Materials im Vergleich zu Siedlungsabfällen zu verbessern. Eine Einwaage aus $10 \text{ mg} \pm 0,1 \text{ mg}$ wurde unter definierten Gasatmosphären mit einer Heizrate von 10 K/min bis 1000°C erhitzt. Die untersuchten Oxyfuel-Atmosphären waren 21, 22,5, 25, 27,5, 30, 32,5 und 35 Vol.-% O_2 in CO_2 . Bei einer konstanten O_2 -Konzentration von 30 Vol.-% wurde die H_2O -Konzentration von 0 auf 10, 15, 20, 25, 30 und 35 Vol.-% in CO_2 variiert. Als Referenz wurden 21 Vol.-% O_2 in N_2 mit 0, 10, 20 und 30 Vol.-% H_2O in CO_2 untersucht. Jedes Experiment wurde in Doppelbestimmung durchgeführt. Die Analyseergebnisse wurden hinsichtlich der Verschiebung von charakteristischen Temperaturen wie Onset-, Peak- und Offset-Temperaturen in Abhängigkeit von der O_2 - und H_2O -Konzentration evaluiert. Anschließend wurde mithilfe einer Regressionsanalyse die Oxyfuel-Gaszusammensetzung bestimmt, bei der die Verbrennungscharakteristik der Verbrennung mit Luft entspricht.

3 Ergebnisse

3.1 Modellierung der Oxyfuel-Verbrennung in MVA

Die Modellierung der Oxyfuel-Verbrennung in MVA zeigt, dass die Wahl der Rezirkulationsstrategie des Rauchgases die Zusammensetzung des Oxidationsmittels, die Schadstoffbelastung und die resultierenden Abgasströme maßgeblich beeinflusst.

Wird das Rohgas vor der Rauchgasreinigung (Pfad A) rezirkuliert, befinden sich im rückgeführten Gas hohe Schadstoffgehalte. Bezogen auf die feuchte Gaszusammensetzung enthält das Oxidationsmittel rund 0,3 Vol.-% HCl und 0,1 Vol.-% SO₂. Dies resultiert in einem erhöhten Korrosionsrisiko in den Rohrbauteilen zur Rezirkulation des Rohgases und in der Zuführung des Oxidationsmittels in den Feuerraum, der die Betriebssicherheit einer Anlage gefährden kann. Vorteilhaft an der Rezirkulation des Rohgases ist jedoch der reduzierte Volumenstrom in der Abgasreinigung.

Erfolgt die Rezirkulation erst nach der Rauchgasreinigung (Pfad B), sinkt die Schadstofffracht deutlich. Der Wasserdampfgehalt im Oxidationsmittel ist sowohl bei Pfad A, als auch bei Pfad B mit rund 40 Vol.-% im Oxidationsmittel sehr hoch, daher wird der Einfluss auf die Verbrennung in 3.2 experimentell untersucht. Beide Rezirkulationsstrategien, bei denen das Abgas vor der Kondensationsstufe rezirkuliert wird, führen zu moderaten CO₂-Gehalten von rund 50 Vol.-% vor Einleitung in die CPU (bezogen auf den feuchten Abgasstrom).

Die Rezirkulation des Reingases nach der Kondensationsstufe (Pfad C) führt zu einem Oxidationsmittel mit geringem Wasserdampfanteil (3,5 Vol.-%) und zu 62 Vol.-% CO₂ im Abgasstrom zur CPU. Diese sogenannte trockene Rezirkulation senkt den Sauerstoffbedarf um rund 11,6 %, da in diesem Pfad ein größerer Anteil des zuvor nicht umgesetzten Sauerstoffs in das Oxidationsmittel zurückgeführt wird.

Eine der wichtigsten Erkenntnisse der Sensitivitätsanalyse ist, dass der CO₂-Gehalt im Abgas zur CPU überproportional stark vom Sauerstoffüberschuss abhängt, während der N₂-Gehalt wiederum fast vollständig auf den Falschlufteintrag zurückzuführen ist.

3.2 Thermoanalytische Untersuchungen der Oxyfuel-Verbrennung von EBS

Die thermoanalytischen Untersuchungen der Oxyfuel-Verbrennung von EBS bestätigen den in der Literatur bekannten, mehrstufigen Verlauf aus Trocknung, Devolatilisierung (ab ca. 300 °C), Koksausbrand und Aschereaktionen [7]. Mit steigendem Sauerstoffgehalt verschieben sich die charakteristischen Temperaturen der Koksverbrennung deutlich zu niedrigeren Temperaturen, was eine höhere Reaktivität signalisiert. Die Devolatilisierung wird dagegen kaum beeinflusst. Aus der linearen Regressionsanalyse der charakteristischen Temperaturen in Abhängigkeit von der O₂-Konzentration wurde eine O₂-Konzentration von 32-35 Vol.-% O₂ in CO₂, bestimmt, bei der die Oxyfuel-Verbrennung den Charakteristika bei Luftverbrennung entspricht. Diese Werte liegen etwas höher als in Teilen der Literatur angegeben. Dies ist durch die hohe Variabilität des Abfalls und unterschiedliche Materialfraktionen erklärbar [5].

Ein erhöhter Wasserdampfgehalt im Oxidationsmittel bewirkt ebenfalls eine leichte Verschiebung des Koksausbrandes zu niedrigeren Temperaturen, was einer erhöhten Reaktivität entspricht. Diese Effekte sind jedoch deutlich schwächer ausgeprägt als die der Sauerstoffanreicherung. Die Devolatilisierung zeigt praktisch keine Abhängigkeit vom Wasserdampfgehalt. Die experimentellen Ergebnisse belegen somit, dass die Rezirkulation von feuchtem Abgas einen moderat beschleunigenden Einfluss auf die Verbrennung haben kann.

4 Diskussion

Die Kombination aus Modellierung und thermoanalytischen Untersuchungen verdeutlicht, dass die technische Umsetzung der Oxyfuel-Verbrennung in MVA wesentlich von der Wahl des Rezirkulationspfades abhängt. Die Effizienz des Oxyfuel-Verfahrens, gemessen an der CO_2 -Konzentration im Abgas zur CPU, ist maßgeblich von der Reduktion des Falschlufteintrags und des O_2 -Überschusses abhängig. Um hohe Schadstoffgehalte im Oxidationsmittel zu vermeiden, sollte die Rezirkulation nach der Abgasreinigung stattfinden. Die Rezirkulation des feuchten Reingases führt zu hohen Wasserdampfanteilen im Oxidationsmittel, die die Reaktivität des Koksausbrandes, wie experimentell gezeigt, leicht erhöhen.

Die Rezirkulation des Reingases nach der Kondensationsstufe führt zu den höchsten CO_2 -Konzentrationen im Abgas zur CPU und hat den geringsten Sauerstoffbedarf. Die Sensitivitätsanalyse verdeutlicht, dass selbst geringe Fehlluftanteile den N_2 -Gehalt im Abgas erheblich erhöhen und dadurch den Energieaufwand der CPU stark beeinflussen. Damit wird die Minimierung von Falschlufteinträgen zu einem zentralen technischen Ziel bei der industriellen Umsetzung. Die thermoanalytischen Ergebnisse verdeutlichen den starken Einfluss des O_2 -Gehalts auf den Verbrennungsprozess, was die Notwendigkeit präziser O_2 -Regelungen in zukünftigen Oxyfuel-MVA hervorhebt.

5 Fazit und Ausblick

Insgesamt zeigen die Ergebnisse, dass die Implementation der Oxyfuel-Verbrennung für CCU/CCS in MVA prozesstechnisch vielversprechend ist, sofern eine geeignete Rauchgas-Rezirkulationsstrategie, eine Minderung des Falschlufteintrags und optimierte O_2 -Einstellungen realisiert werden. Für eine belastbare Bewertung der Oxyfuel-MVA sind jedoch weitere Schritte zwingend notwendig. Dazu gehören experimentelle Validierungen im Technikumsmaßstab, um Reaktivität, Schadstoffverteilung und Feuchtebedingungen sowie die Wechselwirkung aus O_2 -Konzentration und O_2 -Überschuss zu erfassen. Auf der Modellierungsseite sind Erweiterungen erforderlich, die neben der Massenbilanz der Gasphase auch Wärmeübertragung, Rostkinetik und Variabilität der Primär- und Sekundärluft einbeziehen. Zudem muss eine vollständige energetische und wirtschaftliche Gesamtbilanzierung durchgeführt werden, die die Beiträge der Sauerstofferzeugung und der CPU in Bezug auf zu erzielende CO_2 -Reinheiten evaluiert.

Danksagung

Das Projekt wurde durch die großzügige finanzielle Unterstützung der Stiftung Sustainable Industrial Society Foundation ermöglicht.

Literatur/Quellen

- [1] Europäisches Parlament: Reduktion von CO_2 -Emissionen: Ziele und Maßnahmen der EU. URL: <https://www.europarl.europa.eu/topics/de/article/20180305STO99003/reduktion-von-co2-emissionen-ziele-und-massnahmen-der-eu> [Stand: 18.06.2024]
- [2] Arnold, K.; Scholz, A.; Taubitz, A.; Wilts, H.: Unvermeidbare Emissionen aus der Abfallbehandlung – Optionen auf dem Weg zur Klimaneutralität. In: Energiewirtschaftliche Tagesfragen

- [3] Dietz, W.; Schönmeyer, M.; Seitz, M.; Thiel, N.; Rommel, W.: Nutzungsmöglichkeiten und Potenziale bei Abfallbehandlungsanlagen zur Sektorenkopplung, Energiebereitstellung und CO₂-Abscheidung. Umweltbundesamt, August 2024
- [4] Acampora, L.; Grilletta, S.; Costa, G.: The Integration of Carbon Capture, Utilization, and Storage (CCUS) in Waste-to-Energy Plants: A Review. In: *Energies*. 18. Jg., 2025, Nr. 8, S. 1883
- [5] Wienchol, P.; Szłęk, A.; Ditaranto, M.: Waste-to-energy technology integrated with carbon capture – Challenges and opportunities. In: *Energy*. 198. Jg., 2020
- [6] Becidan, M.; Ditaranto, M.; Carlsson, P.; Bakken, J.; Olsen, M. N. P.; Stuenkel, J.: Oxyfuel Combustion of a Model MSW—An Experimental Study. In: *Energies*. 14. Jg., 2021, Nr. 17
- [7] Lv, J.; Yan, B.; Zhou, S.; Wu, Z.; Liu, X.; Lu, S.; Zhu, X.; Sun, Y.; Li, J.; Lin, F.; Chen, G.: Ignition, combustion and pollutant emissions characteristics of excavated waste in low oxygen concentration and O₂/CO₂ atmosphere. In: *Waste management*. 200. Jg., 2025, Nr. 114770

Kontakt

Isabel Kaphahn, M. Sc., Wissenschaftliche Mitarbeiterin

L.u.F. Thermoprozesse und Emissionsminderung in der Entsorgungs- und Recyclingwirtschaft

Tel: 0241-8090714

E-Mail: kaphahn@teer.rwth-aachen.de

Homepage: www.teer.rwth-aachen.de