

Verbesserte Feuerraummodellierung durch empirische Untersuchungen zur Flüchtigensfreisetzung aus Abfallbrennstoffen und Biomassen

Dipl.-Ing. **J. Behling**, Dipl.-Ing. **P. Danz**, Dr. **T. Marzi**,
Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik
UMSICHT, Oberhausen;
Dipl.-Ing. **M. Weghaus**, Weghaus GmbH, Waldbüttelbrunn;
Dr.-Ing. **R. Warnecke**, GKS - Gemeinschaftskraftwerk Schweinfurt
GmbH, Schweinfurt;
Dipl.-Ing. **A. Al-Zuhairi**, Prof. Dr.-Ing. habil. **K. Görner**, LUAT
(Lehrstuhl für Umweltverfahrens- und Anlagentechnik),
Universität Duisburg-Essen, Essen

Kurzfassung

In der vorliegenden Arbeit werden experimentell gewonnene Daten von Ersatzbrennstoffen und Biomassen, die Einbindung derselben in ein Rostmodell, sowie die Kopplung mit einem Feuerraummodell am Beispiel des Gemeinschaftskraftwerks Schweinfurt demonstriert. Die Untersuchungen helfen dabei, detaillierte Informationen zu den Abbrandbedingungen und zum Brennverhalten im Brennbett und Feuerraum zu erhalten. Dies kann z.B. bei Biomassefeuerungen zu einer deutlichen Verbesserung des Ausbrands und damit zu verbesserten Ascheeigenschaften und einer höheren Energieeffizienz beitragen. Die experimentellen Daten werden aus eigens entwickelten Methoden gewonnen. Die pyrolytische Zersetzung des Brennstoffs wird in einer Technikumsanlage von den anderen Verbrennungsvorgängen isoliert betrachtet und ermöglicht somit eine genauere Untersuchung dieses Vorgangs. Aus Laborversuchen lässt sich die Elementarzusammensetzung der bei unterschiedlichen Temperaturen freigesetzten Flüchtigen bestimmen, was wiederum eine Beurteilung des Heizwerts der Flüchtigen ermöglicht. Die Freisetzung, bzw. der Masseverlust in Abhängigkeit von der Zeit liefert weiterhin Informationen zur Kinetik der Freisetzungsreaktionen.

1. Einleitung

Aufgrund der zunehmenden energetischen Nutzung von Ersatzbrennstoffen, Abfällen und Biomassen ist die Optimierung eines Feuerraummodells Gegenstand eines Forschungsvorhabens von Fraunhofer UMSICHT, der Universität Duisburg-Essen und der Weghaus GmbH. Zielsetzung ist die Charakterisierung von Ersatzbrennstoffen und Biomassen hinsichtlich

ihres Verbrennungsverhaltens. Hierzu werden Daten zur Freisetzung der flüchtigen Brennstoffanteile bei definierten Bedingungen benötigt. Die Daten werden anschließend in ein Rostmodell für gekoppelte Feuerraumsimulationen eingebunden. In dem durch die AiF geförderten Forschungsvorhaben (FV-Nr.: 15780) werden durch die Kopplung von Rostmodell (Finite-Volumen-Methode) und Feuerraummodell (Strömungssimulation) praxisnahe Informationen gewonnen, die die Abbrandbedingungen und das Brennverhalten im Brennbett und Feuerraum beschreiben. Die Ergebnisse können genutzt werden, um Rostfeuerungen an unterschiedliche Brennstoffe anzupassen.

2. Versuchsmethode

Bei der Verbrennung eines festen Brennstoffes überlagern sich die Prozesse Trocknung, Entgasung, Flüchtignoxidation, Zündung und Oxidation des fixen Kohlenstoffs. Um die Eingangsdaten für die o.g. Modellierung zu ermitteln werden die genannten Teilschritte experimentell entkoppelt. Hierbei werden Messdaten zum Entgasungsverhalten des Brennstoffs bei definierten Temperaturen gewonnen, die als Eingangsgrößen in die Modellierung eingehen.

2.1 FINGERPRINT - Methode

Mit der FINGERPRINT-Methode [1] wird die Verteilung des Heizwertinventars auf die bei unterschiedlichen Temperaturen freigesetzten Flüchtigen und die Restkoksphase erfasst. Im ersten Schritt wird die zu untersuchende Laborprobe unter Sauerstoffabwesenheit bei unterschiedlichen Temperaturen zersetzt. Aufgrund der komplexen Zusammensetzung des gebildeten Substanzgemisches ist eine analytische Charakterisierung der dabei freigesetzten Gase nur eingeschränkt und mit hohem Aufwand möglich. Deshalb werden die flüchtigen Bestandteile in einem zweiten Schritt verbrannt und die Produkte CO_2 , N_2 und H_2O bestimmt. Hierdurch lässt sich ein charakteristischer FINGERPRINT für den Brennstoff ermitteln, der die Freisetzung C-, N-, und H-haltiger Zersetzungsprodukte in Abhängigkeit von der Temperatur beschreibt. Aus der Zusammensetzung der flüchtigen Bestandteile kann ihr Heizwertanteil am Gesamtbrennstoff abgeleitet werden. Hierbei haben sich Modellgleichungen nach Channiwala [2] bewährt. Um Abweichungen gegenüber dem wahren Heizwert quantifizieren zu können, erfolgt stets ein Abgleich mit einer Untersuchung aus dem Bombenkalorimeter. Durch die anschließende Oxidation des Zersetzungsrückstands bei 900 °C wird ebenfalls dessen Zusammensetzung ermittelt. Hierdurch werden der Anteil und die Zusammensetzung des fixen Kohlenstoffs (C_{fix}) ermittelt. Zur Durchführung der FINGERPRINT-Methode wurde

ein handelsüblicher Elementaranalysator modifiziert. Die Messung erfolgt mit analysefein zerkleinerten Proben.

2.2 Flüchtigensfreisetzung im Schütttschicht-Reaktor

Die Untersuchung der Flüchtigensfreisetzung im Schütttschicht-Reaktor baut auf der FINGERPRINT-Methode auf. Sie erlaubt die Umsetzung von größeren Originalbrennstoffproben, die sich aus unterschiedlichen Korngrößen zusammensetzen. Aus den Versuchsergebnissen lassen sich die elementaren Anteile von Kohlenstoff und Wasserstoff in den bei unterschiedlichen Temperaturen freigesetzten Flüchtigen bestimmen, was Rückschlüsse auf den Heizwert der Flüchtigen erlaubt. Im Unterschied zur FINGERPRINT-Methode werden jedoch auch Informationen zur Makrokinetik (Überlagerung aus chemischer Kinetik, Stoff- und Wärmetransport bei unterschiedlichen Partikelgrößen) der Freisetzungsreaktionen erhalten. In Abbildung 1 ist der verwendete Schütttschicht-Reaktor dargestellt. Die Versuchsanlage ist durch eine Fritte in zwei Ofenzonen unterteilt. In der Ofenzone 1 (OZ1: Pyrolysezone) werden die Flüchtigen freigesetzt und anschließend in der Ofenzone 2 (OZ2: Oxidationszone) verbrannt. Die Brenn-

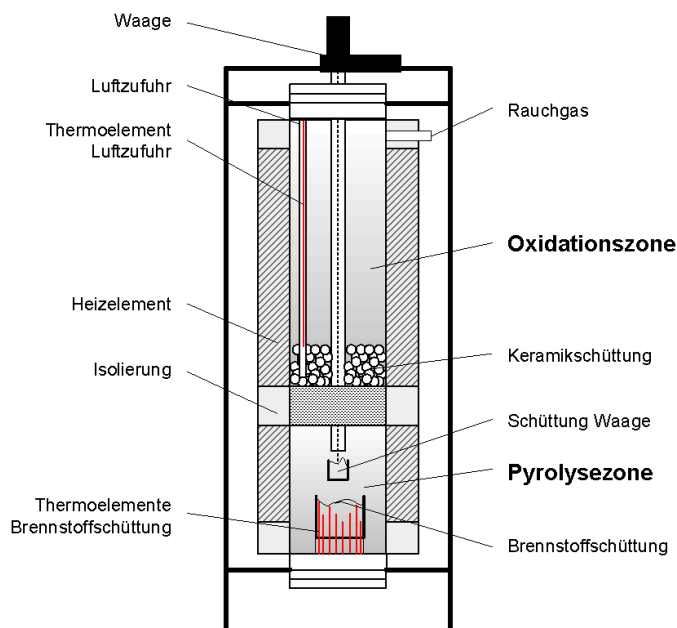


Bild 1: Zweistufiger Schütttschicht-Reaktor

stoffprobe kann im Brennstoffbett (OZ1) bei einstellbarem Luftüberschuss ($0 \leq \lambda$) erhitzt werden. Bei einem Innendurchmesser von 193 mm beträgt die Gesamthöhe des Quarzglasrohrs 1 840 mm. Mit Hilfe von Thermo-

elementen kann der Wärmetransport durch die Ofenstrahlung in die Schüttung erfasst werden. In einem Probenkörnchen (OZ1) kann zusätzlich eine Brennstoffschüttung eingebracht und thermogravimetrisch untersucht werden. Diese Untersuchungsmöglich-

3. Versuchsergebnisse Schütttschicht-Reaktor

In den Abbildungen 2 und 3 werden die Freisetzung von CO_2 , H_2O und CO in Abhängigkeit von der Temperatur und der Zeit dargestellt. Dabei wurden die Proben in das mit der Ther-

mowaage gekoppelte Probenkörbchen eingebracht und mit einer Stickstoffströmung von 10 l/min umspült. Aufgezeigt werden die Verläufe der Reglertemperatur (T_{Heizung_1}) und der Temperatur im Innenraum ($TE2_{\text{OZ1}}$) für die Pyrolysezone ($OZ1$). Gleichzeitig wird der Massenverlust in Abhängigkeit von der Temperatur (Waage) dargestellt. In Abbildung 2 ist das Freisetungsverhalten von Buchenholzkugeln (126 g, 28 Ma.-% Feuchte, 10 mm Durchmesser) dargestellt. Vor dem Beginn der CO_2 -Freisetzung zeigt sich ein deutlicher Anstieg des Wassergehalts im Rauchgas, welcher auf die Trocknung des Brennstoffs zurückzuführen ist. Das freiwerdende Wasser führt zu einer leichten Massenabnahme. Bei einer Innentemperatur von 150 °C beginnt die Freisetzung der Flüchtigen, abzulesen an einem steigenden CO_2 - und H_2O -Gehalt im Rauchgas. Aufgrund einer unvollständigen Verbrennung in der Oxidationszone wurde zudem CO gemessen. Aus Sicherheitsgründen wurde deshalb die Beheizung der Probe kurzzeitig unterbrochen. Nach Fortsetzung des Versuchs und erneutem Anstieg der Temperatur ist eine weitere geringe Flüchtigenfreisetzung festzustellen. Bei einer Aufheizrate von 5 K/min und einer Endtemperatur von 600 °C werden 84 Ma.-% des Brennstoffs in Flüchtige umgesetzt. Mit konventionellen Labormethoden, bei denen der Brennstoff feiner zerkleinert wurde, wurden als Flüchtigen-Anteil des Buchenholzes 87,9 Ma.-% bestimmt. Somit wurde während des Technikumsversuchs ein Großteil der Flüchtigen freigesetzt. In Abbildung 3 wird die Flüchtigenfreisetzung für eine Abfallfraktion (59 g, 18 Ma.-% Feuchte) aus dem GKS Schweinfurt dargestellt. Der Brennstoff besteht hauptsächlich aus Kunststoffen, Textilien, Papier, Holz und Feinmüll. In den Messkurven lassen sich die Flüchtigenfreisetzung aus biogenen Bestandteilen und Kunststofffraktionen voneinander unterscheiden. Durch Messung von Einzelfraktionen konnte gezeigt werden, dass die biogenen Bestandteile wie Holz, Papier und Textilien den ersten Peak der CO_2 - und H_2O -Messung verursachen, während der Peak bei höherer Temperatur auf die Kunststofffraktion zurückgeht. Bei einer Aufheizrate von 5 K/min und einer Endtemperatur von 600 °C werden 63 Ma.-% des Brennstoffs in Flüchtige zersetzt. Durch konventionelle Labormethoden wurde der Flüchtigen-Gehalt zu 75,8 Ma.-% bestimmt. Somit wurde auch hier ein Großteil der Flüchtigen während des Technikumsversuchs freigesetzt.

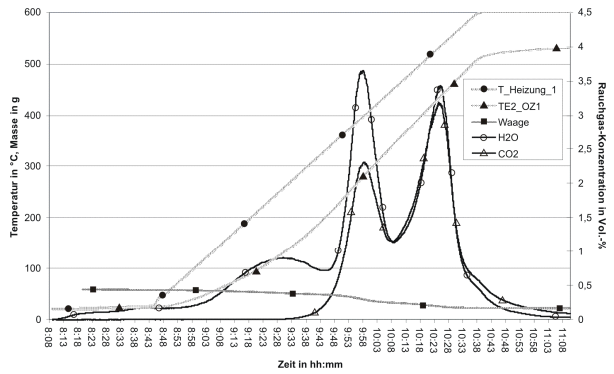
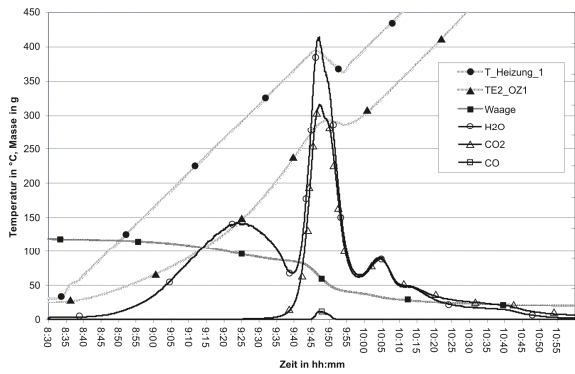


Bild 2: Freisetzungsverhalten Buchenholzkugeln Bild 3: Freisetzungsverhalten Abfallfraktion

4. Überführung experimenteller Daten in Modellgleichungen

Im Bereich der Verbrennungssimulation von rostgefeuerten Biomassekraftwerken und Abfallverbrennungsanlagen ist besonderes Augenmerk auf die „Randbedingung Brennbett“ zu legen. Die festen Brennstoffe durchfahren entlang des Rostes unterschiedliche Temperaturbereiche. Brennstoffverhalten und Temperatur beeinflussen sich dabei iterativ. Die daraus resultierende Lage von Trocknungszone, Hauptverbrennungszone oder Ausbrandzone auf dem Rost bestimmen das spätere Strömungsbild im Feuerraum. Um dieses temperaturabhängige Verhalten besser beschreiben zu können, wurde mittels der bereits vorgestellten FINGERPRINT-Methode das Entgasungsverhalten von zehn Brennstofffraktionen im Temperaturbereich von 100 °C – 900 °C bestimmt. In Abbildung 4 ist die im Brennstoff Holz nach Ausgasung bei definierter Temperatur noch verbleibende Flüchtige menge und der zugehörige Heizwert aufgetragen. Abbildung 5 zeigt die zugehörige elementare Zusammensetzung (Prozente bezogen auf die Ausgangstrockenmasse).

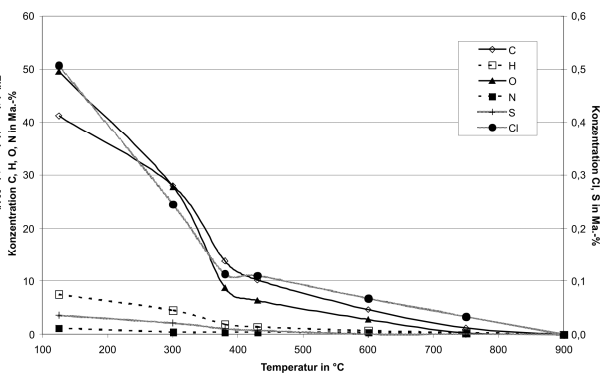
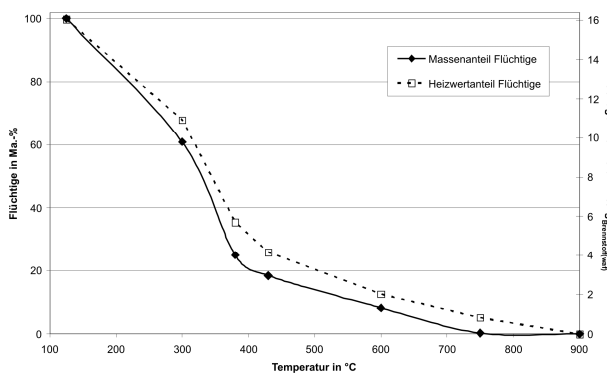


Bild 4: Massen- und Heizwertvorrat Flüchtige Bild 5: Rauchgaskonzentration Flüchtige

Mit Hilfe dieser Diagramme kann direkt abgelesen werden, welche Mengen an Flüchtigen bei einer gegebenen Temperatur maximal entweichen können. Somit wird deutlich, dass ein Brennstoff für den vollständigen Ausbrand eine Mindesttemperatur erreicht haben muss. Um

die oben gewonnenen temperaturabhängigen Informationen zur Berechnung von Verbrennungsvorgängen mit CFD-Programmen nutzen zu können, ist die Überführung der Elementen-Verteilung in eine Spezies-Verteilung erforderlich. Hierzu wird ein sog. Pseudobrennstoff definiert, der das globale Verhalten eines Brennstoffes wiedergeben soll. In der vorliegenden Arbeit wurden als Flüchtige die Spezies O_2 , CO , CO_2 , C_3H_8 (als Stellvertreter für die Organik), H_2 , H_2O , N_2 , NH_3 , NO , SO_2 , HCl und HF definiert. Dabei wird modellhaft angenommen, dass diese Gase als quasi-feste Spezies im Pseudobrennstoff vorliegen, die durch Energieeintrag in die Gasphase übergehen. Die Konvertierung der temperaturabhängigen Elementaranalysen in die Spezies-Verteilung geschieht über eine erweiterte Gibbs-Minimierung.

5. Vorstellung des Rostmodells

Das vorliegende Rost-Simulationsprogramm CombAte [3] benutzt das Schalenmodell. Das Einzelpartikel wird als Kern mit mehreren umgebenden Schalen modelliert. Der Kern und jede Schale sind zunächst unabhängig und in sich homogen. Durch Wechselwirkung mit benachbarten Schalen oder bei der äußeren Schale mit dem umgebenden Gas finden Stoff- und Wärmetransport statt. Der oben beschriebene Pseudobrennstoff wurde durch Analysen aufgemahlener realer Brennstoffproben gewonnen. Dies bedeutet, dass Effekte wie Wärme- und Stofftransport nicht implizit integriert sind. Um die verwendeten Modelle für Stoff- und

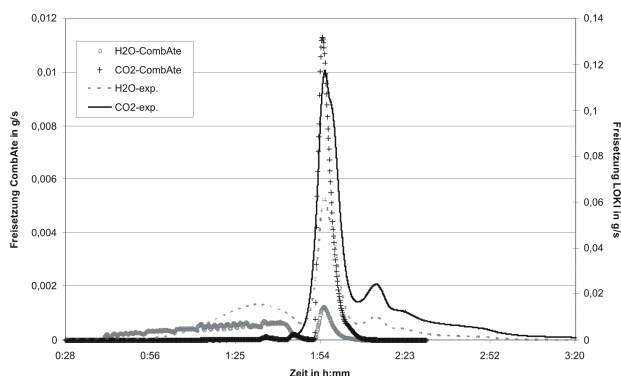


Bild 6: Vergleich Versuchsdaten : CombAte

Wärmetransport zu validieren, wurde der Schüttschichtreaktor basierend auf Ergebnissen des FINGERPRINT-Verfahrens mit CombAte simuliert. Abbildung 6 zeigt einen ersten Vergleich zwischen experimentellen Daten und CombAte-Berechnungen für den Brennstoff Holz im Schüttschichtreaktor. Während die zeitliche Abfolge und Dauer von Trocknung und Flüchtigenfreisetzung bereits gut übereinstimmen, weichen die massenbezogenen Angaben ab. Da das Modell für Abfallverbrennungsanlagen (mehrere t/h) vorgesehen ist, wird es derzeit an die Berechnung kleinerer Umsatzmengen angepasst.

Wärmetransport zu validieren, wurde der Schüttschichtreaktor basierend auf Ergebnissen des FINGERPRINT-Verfahrens mit CombAte simuliert. Abbildung 6 zeigt einen ersten Vergleich zwischen experimentellen Daten und CombAte-Berechnungen für den Brennstoff Holz im Schüttschichtreaktor.

Während die zeitliche Abfolge und Dauer von Trocknung und Flüchtigenfreisetzung

6. Vorstellung des Feuerraummodells

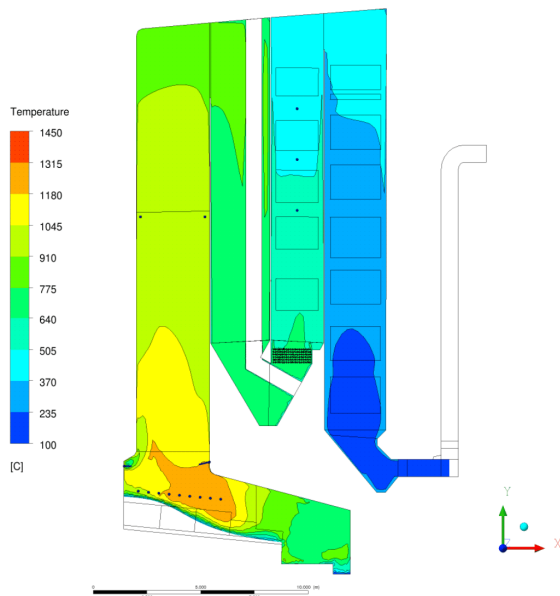


Bild 7: CFX-CombAte – GKS

Abbildung 7 zeigt die Temperaturverteilung in einem Mittenschnitt. Die Berechnungen wurden mit dem gekoppelten System CFX-CombAte durchgeführt. Zur weiteren Validierung des Programm-Pakets CombAte wurde dieses Modell an die Messdatenerfassung der realen Anlage geschaltet und lief parallel. So konnten reale und simulierte Messdaten zeitgleich verglichen und gute Übereinstimmungen festgestellt werden.

Durch Kopplung des Rostmodells mit CFD-Programmen wie z.B. CFS oder Fluent können diese Daten mit Randbedingungen bezüglich des Brennstoffumsatzes auf dem Rost parametrisiert werden. Diese Kopplung erlaubt Variationen von Betriebsparametern wie z.B. der Unterwindverteilung oder der Rostgeschwindigkeit. So können Auswirkungen auf den gesamten Verbrennungsprozess bis in die ersten Züge des Kessels simuliert und beobachtet werden. Nachfolgend werden Ergebnisse einer Berechnung des GKS in Schweinfurt gezeigt.

Abbildung 7 zeigt die Temperaturverteilung in einem Mittenschnitt. Die Berechnungen wurden

7. Danksagung

Die vorgestellten Arbeiten sind Bestandteil eines Forschungsvorhabens, gefördert durch die AiF e.V.. Für die Unterstützung sei an dieser Stelle gedankt.

8. Literatur

- [1] Marzi, T., Mrotzek, A., Görner, K.: Ersatz- und Sekundärbrennstoff aus Abfällen – Entwicklung eines Verfahrens zur Bestimmung des Verbrennungsverhaltens. Abfallforschungstage 2006, Hannover. In: Kühle-Weidemeier, M.: Göttingen: Cuvillier 2006, S. 69-82,
- [2] Channiwala, S.A.: A unified correlation for estimating HHV of solid, liquid and gaseous fuels. Fuel 81 (2002) S. 1051 – 1063
- [3] Zwiellehner, M., Warnecke, R., Müller, V., Weghaus M.: Kopplung einer modernen Feuerungsregelung mit einem modellbasierten System. VDI Wissensforum Seminar: „Beläge und Korrosion, Verfahrenstechnik und Konstruktion in Großfeuerungsanlagen“, Oberhausen 2008