

# Brennstoffe – Analytik und Beschreibung des Verbrennungsverhaltens

Philipp Danz<sup>1</sup>, Siegmar Wirtz<sup>2</sup>, Julia Behling<sup>1</sup>, Burkhard Krüger<sup>1</sup>, Anna Becker<sup>2</sup>, Witold Arnold<sup>2</sup>, Thomas Marzi<sup>1</sup>, Ragnar Warnecke<sup>3</sup>, Martin Weghaus<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Fraunhofer Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT; <sup>2</sup>Ruhr-Universität Bochum, Lehrstuhl für Energieanlagen und Energieprozesstechnik LEAT; <sup>3</sup>GKS Schweinfurt GmbH; <sup>4</sup>Weghaus GmbH

Die Anforderungen an die Charakterisierung abfallstämmiger Brennstoffe sind in den letzten Jahrzehnten kontinuierlich gewachsen. Ursächlich hierfür sind die gesteigerten Anforderungen an die zugehörigen Verbrennungsprozesse. Stand früher die Beseitigung des Abfalls im Vordergrund, sind über die Jahre mehr und mehr Neben-, bzw. Hauptziele hinzugekommen. Heutzutage wird die energetische Nutzung (elektrisch und thermisch) bei möglichst geringer Schadstoffbelastung der Umwelt, bekanntem biogenen Anteil, konstanten Stoffwerten und hohen Wirkungsgraden gewünscht und großteils auch als Leistung erbracht. Während sich die anfängliche Brennstoffanalytik auf Aussagen wie „brennt“, bzw. „brennt nicht“ beschränken konnte, sind heute somit zahlreiche Parameter zu beachten und zu analysieren. Für die meisten können allgemeine oder speziell entwickelte Normen herangezogen werden, für manche Parameter sind jedoch immer noch (und werden es wohl auch immer bleiben) Sonderentwicklungen und angepasste Messverfahren notwendig. Im nachfolgenden Artikel sollen nach einer kurzen Einführung über den Verbrennungsprozess die wichtigsten Verfahren zur Probenahme, Analytik und Beschreibung abfallstämmiger Brennstoffe vorgestellt werden. Eine vollständige Beschreibung aller Parameter füllte ganze Bücherregale, weshalb nur die für die energetische Verwertung relevantesten ausgewählt wurden. Bei unterschiedlichen Normen für Abfälle und Ersatzbrennstoffe (EBS), bzw. Sekundärbrennstoffe, werden beide Normen genannt. Neben der Aufzählung genormter Verfahren wird vor allem auf speziell entwickelte Methoden eingegangen, die Brennstoffe hinsichtlich ihres Einsatzzweckes charakterisieren.

Um die Notwendigkeit der einzelnen Analyseverfahren aufzuzeigen, wird zunächst kurz der Verbrennungsprozess eines Feststoffes beschrieben. Die im allgemeinen als Verbrennung bezeichneten Vorgänge sind ein komplexer Gesamtvorgang, die zur näheren Betrachtung in überschaubare Einzelvorgänge zerlegt werden müssen [1]. Bezogen auf die Verbrennung grobstückiger Abfallstoffe sind dies

- die Trocknung,
- die Flüchtigfreisetzung,
- die Zündung,
- die Vergasung und der Ausbrand.

Diese Einzelvorgänge überlappen einander, beeinflussen sich gegenseitig und die dargestellte Reihenfolge ist nicht streng chronologisch (der Ausbrand beeinflusst z. B. die weitere Flüchtigfreisetzung).

Der Begriff Trocknung beschreibt die Verdampfung des im Brennstoff enthaltenen Wassers. Hierzu ist entsprechend der Verdampfungsenthalpie und der Temperatur des

Wassers ein Energieeintrag notwendig, es handelt sich also um einen endothermen Prozess. Gleiches gilt für die Flüchtigenfreisetzung, unter der man die Aufspaltung langkettiger Kohlenwasserstoffe in kurzkettenige, leicht flüchtige (daher der Name) Seitengruppen und das Schmelzen, Verdampfen, bzw. Sublimieren von Teilen des Brennstoffs versteht. Während die für die Trocknung notwendige Energie leicht über Wassergehalt, Wärmekapazität und Verdampfungsenthalpie des Wassers abzuschätzen ist, bietet sich bei der Flüchtigenfreisetzung ein gänzlich anderes Bild. Menge und Zusammensetzung variieren von Brennstoff zu Brennstoff, so dass keine allgemeinen Aussagen zur aufzuwendenden Energie getroffen werden können.

Die Vergasung bezeichnet die Umsetzung des Kokes von der festen in die gasförmige Phase durch chemische Reaktionen (z. B. Wassergas- und Boudouard-Reaktion). Unter Ausbrand wird die selbsterhaltende Umsetzung des gesamten Kohlenstoffs verstanden, wenn also die exothermen Reaktionen genug Energie freisetzen, um die endothermen Vorgänge am Leben zu erhalten. Der Moment in dem dies erstmals geschieht, wird als Zündung bezeichnet. Der Ausbrand dauert an, bis lediglich die Asche (die nicht brennbaren Bestandteile) des Brennstoffs zurückbleibt. Diese kann weiterhin durch die anderen Prozesse beeinflusst werden, z. B. erweichen, bzw. schmelzen.

Ziel der Brennstoffanalytik ist nun, die Art und Weise der im vorigen Absatz beschriebenen Vorgänge zu antizipieren, d. h. abschätzend vorauszusagen wie sich die Verbrennung dieses Brennstoffs auf den gesamten Verbrennungsprozess auswirken wird. Dies können Betrachtungen der Feuerungswärmeleistung, der Abgasqualität, der Anlagenstandzeit usw. sein. In Abbildung 1 wird die komplexe Verknüpfung des Verbrennungsprozesses mit den Eigenschaften des Brennstoffs und der jeweils zugehörigen Analytik visualisiert.

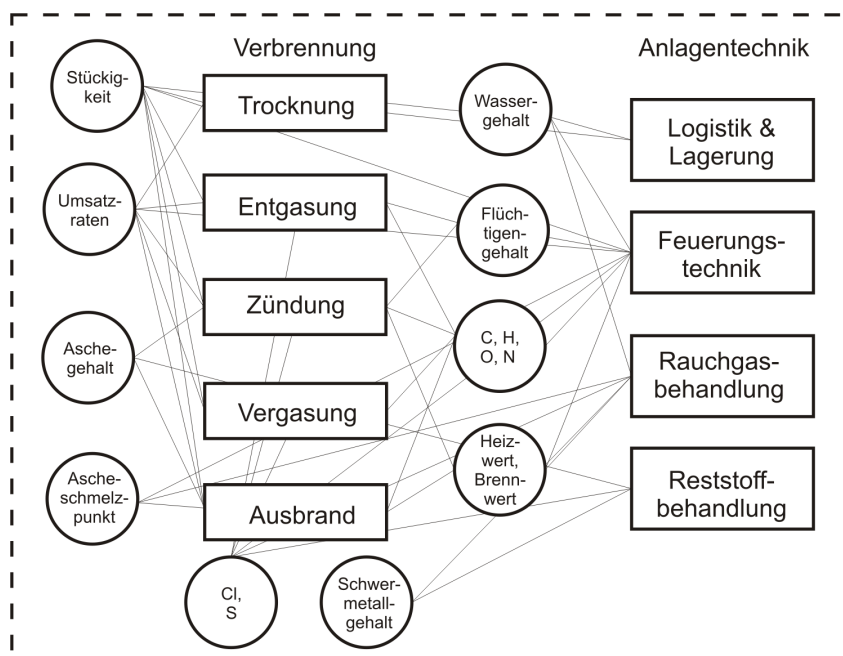


Abbildung 1: Verknüpfung Anlagentechnik – Verbrennungseigenschaften – Analytik

Letztendlich ist jede Analytik nur der Versuch Auswirkungen auf Verbrennung und Anlagentechnik abzuschätzen, bzw. die Einhaltung von Vorschriften zu überprüfen, die aus der Qualitätssicherung der Verbrennung herrührt. Nachfolgend werden kurz die

genormten Analyseverfahren der wichtigsten Parameter vorgestellt. In Tabelle 1 sind die wichtigsten aktuellen, u. a. durch die Arbeitsgruppen TC343 (Technical Committee – Solid Recovered Fuels)) und TC292 (Technical Committee – Waste) des CEN (Europäisches Komitee für Normung) erarbeiteten, sowie anderweitige relevante Normen aufgelistet. Eine ausführliche (wenn auch auf dem Stand von 2008 befindliche) Methodensammlung zur Abfalluntersuchung ist von der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) erarbeitet worden [2].

Tabelle 1: Wichtige Normen der Abfallanalytik

Parameter	Norm
Heizwert / Brennwert	DIN EN 15400 (Sekundärbrennstoffe) DIN 51900 (Feste und flüssige Brennstoffe)
C, H, N	DIN EN 15407 (Sekundärbrennstoffe)
S, Cl	DIN EN 15408 (Sekundärbrennstoffe) DIN 51900-1, DIN EN ISO 10304-1
Flüchtigengehalt	DIN EN 15402 (Sekundärbrennstoffe) DIN 51720-1 bis 51720-3 (Feste Brennstoffe)
Aschegehalt	DIN EN 15403 (Sekundärbrennstoffe) DIN 51719 (Feste Brennstoffe)
Wassergehalt	DIN EN 12880 (Schlämme) DIN EN 14346 (Abfälle) DIN EN 15414-1 bis 15414-3 (Sekundärbrennstoffe)
Ascheerweichung	DIN 51730 (Feste Brennstoffe) DIN 15404 (Sekundärbrennstoffe)

Die vorgenannten Analysen und jede andere Brennstoffanalytik setzen eine repräsentative (bzw. charakterisierende, siehe hierzu [3]) Probenahme voraus. Der Art und Durchführung der Probenahme kommt dabei eine außerordentliche Bedeutung zu. Selbst durch komplexe statistische Algorithmen oder hoch präzise Analysemethoden sind einmal gemachte Fehler bei der Probenahme nicht mehr auszugleichen. Zudem lässt sich die Unsicherheit einer Probenahme nicht quantifizieren, da hierzu die zu beprobende Grundgesamtheit bekannt sein müsste. Die Qualität einer Probenahme ist also nur sehr schwer anhand der Ergebnisse zu beurteilen.

Grundvoraussetzung für die Probenahme ist ein Probenahmeplan. Auf dessen Vorgaben basierend werden alle Proben genommen und ausgewertet. Somit ist sichergestellt, dass die vorhandenen Streuungen der Ergebnisse nicht noch durch sich ändernde Vorgehensweisen während der Beprobung vergrößert werden. Zur Erstellung eines solchen Plans existieren zahlreiche Vorschriften, Richtlinien und Vorschläge. Welche Art und Weise letztendlich Anwendung findet, ist durch den durchführenden Probenehmer festzulegen, welcher wiederum berücksichtigen muss, welche Eigenschaften letztendlich analysiert werden sollen. So ist z. B. bei einer Bestimmung des Ascheerweichungspunktes ein luftdichtes Probegefäß direkt ab Probenahme unnötig, während es für die Bestimmung des Wassergehaltes unabdingbar ist, um ungewollte Trocknungseffekte zu vermeiden. Tabelle 2 listet Vorschriften / Richtlinien für die Erstellung eines Probenahmeplans auf. In Abhängigkeit von der Region sind unterschiedliche Geltungsbereiche der Vorschriften zu beachten. Die in Deutschland

(noch) gebräuchlichste Richtlinie LAGA PN-98 wird in den folgenden Absätzen kurz vorgestellt. Es ist davon auszugehen, dass die sehr umfangreichen europäischen Normen zur Probenahme DIN EN 15442 (Sekundärbrennstoffe) und DIN EN 14899 (Abfälle) weitere Verbreitung unter den Anwendern finden werden. In diesen Normen wird der Zielsetzung (analytische Zielsetzung) ebenso Rechnung getragen, wie der Herkunft und Heterogenität des Brennstoffs.

Tabelle 2: Vorschriften / Richtlinien zur Probenahme

Vorschrift / Richtlinie	Nähere Beschreibung / Anwendungsbereich
DIN EN 14899	Charakterisierung von Abfällen – Probenahme von Abfällen – Rahmen für die Erstellung und Anwendung eines Probenahmeplans
CEN/TR 15310-1 bis 15310-5	Characterization of waste - Sampling of waste materials
DIN EN 15442	Feste Sekundärbrennstoffe – Verfahren zur Probenahme
LAGA PN 98	Richtlinie für das Vorgehen bei physikalischen, chemischen und biologischen Untersuchungen im Zusammenhang mit der Verwertung / Beseitigung von Abfällen
Richtlinie Abfallanalytik	Richtlinie zur einheitlichen Abfallanalytik in Sachsen
ASTM D 5956-01	Standard Guide for Sampling Strategies for Heterogeneous Wastes
EPA530-D-02-002	RCRA Waste Sampling Draft Technical Guidance

#### LAGA PN 98

Durch die Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) ist die Richtlinie LAGA PN 98 »Richtlinie für das Vorgehen bei physikalischen, chemischen und biologischen Untersuchungen im Zusammenhang mit der Verwertung/Beseitigung von Abfällen« erlassen worden [4]. Nach LAGA PN 98 können Probenahmen von festen und stichfesten Abfällen vorgenommen werden, um eine Charakterisierung des Abfalls durchzuführen. Die genauen Verfahrensvorschriften zur Charakterisierung von Grundgesamtheiten beschränken sich auf Korngrößen kleiner 120 mm. Bei Materialien größer 120 mm ist eine Sortieranalyse (z. B. entsprechend der »Richtlinie zur einheitlichen Abfallanalytik in Sachsen«) vorzunehmen.

Um eine Beprobung durchzuführen, ist zunächst ein Probenahmeplan zu entwerfen, der die örtlichen Gegebenheiten, die Heterogenität, die Größe und die Art der Grundmenge, die Korngröße, die Methoden der Probenahme, die Probenahmetechnik etc. berücksichtigt. Jede zu beprobende Charge ist auf ihre Homogenität bzw. Heterogenität hin zu überprüfen, wobei bei Siedlungsabfall generell letzteres angenommen werden kann. Der Probenumfang und die Anzahl der Einzelproben sind proportional zum Gesamtheitsumfang und zur Stückigkeit festzulegen (s. Tabelle 3 und 4).

Tabelle 3: Auszug aus Tabelle:» Mindestanzahl der Einzel-/Misch-/Sammel- und Laborproben in Abhängigkeit vom Prüfvolumen« [4]

Volumen der Grundmenge in m <sup>3</sup>	Anzahl Einzelproben	Anzahl Mischproben	Anzahl Laborproben
≤ 30	8	2	2
>30 bis ≤ 60	12	3	3
>60 bis ≤ 100	16	4	4
>100 bis ≤ 150	20	5	5
>150 bis ≤ 200	24	6	6
>200 bis ≤ 300	28	7	7
>300 bis ≤ 400	32	8	8
>400 bis ≤ 500	36	9	9
>500 bis ≤ 600	40	10	10

Tabelle 4: Mindestvolumen der Einzel- und Laborprobe in Abhängigkeit von der Korngröße / Stückigkeit [4]

Maximale Korngröße / Stückigkeit in mm	Mindestvolumen Einzelprobe in l	Mindestvolumen der Laborprobe in l
≤ 2	0,5	1
> 2 bis ≤ 20	1	2
> 20 bis ≤ 50	2	4
>50 bis ≤ 120	5	10
> 120	Stück = Einzelprobe	Stück = Einzelprobe

Zusammenfassend lässt sich die Festlegung des Probennahmeplans so darstellen:

- Überprüfung der Homogenität,
- Volumen- / Massenbestimmung,
- Ermittlung der Größtkomponente,
- Festlegung der Probenmindestanzahl und Probenmindestvolumina.

Nach Festlegung von Anzahl und Volumen der Einzel-, Misch- und Laborproben muss das Probennahmeverfahren ausgewählt werden. Die LAGA PN 98 unterscheidet nach ruhenden und bewegten Abfällen (Haufwerke oder Stoffströme), sowie LKW-, Eisenbahnwaggon- und Lastenkahnladungen. Letztere Kategorie (zusammengefasst unter der Rubrik »Transportfahrzeuge«) sind nur sachgerecht zu beproben, wenn feinkörniges Material < 10 mm vorliegt. Für den Bereich Siedlungsabfall ist sie somit nicht relevant, d. h. eine Probenahme direkt vom Anlieferungsfahrzeug an einer Verbrennungsanlage kann nicht PN98-konform sein!

Die Probenahme aus Haufwerken setzt zuerst eine Volumenbestimmung derselben voraus. Danach werden sogenannte Schürfschlitze angelegt, aus denen das Material abgezogen wird. Je nach Form des Haufwerks (Kegel, Trapez) unterscheidet sich die Anordnung der Schürfschlitze. Weitere Möglichkeiten sind die Probenahme mittels Probenstecher, Probennahmespeer oder Schneckenbohrer, sowie die Probenahme nach Ausbreitung der Haufwerke. Generell ist jedoch eine Probenahme aus dem bewegten Abfallstrom der Vorzug zu geben, wobei folgende wesentlichen Forderungen gelten: Es ist der gesamte Materialstrom zu schneiden, die Probenahme ist erst nach einem gewissen Vorlauf zu starten und die Einzelproben werden in gleichen Zeiträumen genommen. Zur Anwendung kommen dabei Auffangkästen oder Schlitzgefäße, die bei den Probenahmen nicht überlaufen dürfen und sich nach jedem Durchgang außerhalb des Abfallstroms befinden müssen. Entsprechend Tabelle 3 werden die aus den Einzelproben gebildeten Mischproben auf Laborprobengröße verjüngt. Diese können danach gemäß den entsprechenden Normen auf die Zielparameter hin untersucht werden. Durch die sogenannte Aliquotierung können aus einer Laborprobe durch

Aufteilung mehrere Teilproben hergestellt werden, die daraufhin für die Analysen der jeweiligen Parameter zur Verfügung stehen. Hierzu sei auf die Normen aus Tabelle 5 hingewiesen.

Tabelle 5: Vorschriften / Richtlinien zur Probenteilung

Vorschrift / Richtlinie	Nähere Beschreibung / Anwendungsbereich
DIN EN 15443	Feste Sekundärbrennstoffe – Verfahren zur Herstellung von Laboratoriumsproben
DIN EN 15413	Feste Sekundärbrennstoffe – Verfahren zur Herstellung der Versuchsprobe aus der Laboratoriumsprobe
DIN EN 15002	Charakterisierung von Abfällen – Herstellung von Prüfmengen aus der Laboratoriumsprobe

Die in Tabelle 1 genannten Analysemethoden liefern die gebräuchlichsten Daten zur Charakterisierung eines Brennstoffs. Zu beachten ist allerdings, dass lediglich Summenparameter gelistet sind, d. h. es wird z. B. nur der Gesamtflüchtigengehalt angegeben, oder der Gesamtchlorgehalt. Sollen differenziertere Aussagen getroffen werden, wie z. B. das Freisetzungsverhalten in Abhängigkeit von der Temperatur, das Zündverhalten usw., stehen keine standardisierten Verfahren mehr zur Verfügung. Ebenfalls nicht standardisiert sind Untersuchungen an größeren Probenmengen. Die vorgestellten Normen setzen Einwaagen zwischen 20 und 100 mg ein. Soll aufgrund der Brennstoffheterogenität oder der schlechten Zerkleinerbarkeit eine größere Probenmenge untersucht werden, muss wiederum vom Standard abgewichen werden.

Im Folgenden werden vier speziell entwickelten Charakterisierungsverfahren vorgestellt. Die ersten drei Verfahren dienen der Charakterisierung des Freisetzungs- und Umsatzverhaltens von Festbrennstoffen, wobei die erste Methode FINGERPRINT für Laboreinwaagen und zerkleinerten Brennstoff geeignet ist. Die zweite Methode DROPS (Doppelrohröfen-Pyrolysesystem) dient der Untersuchung von unzerkleinerten Einzelpartikeln bis zu einer Kantenlänge von 40 mm und die dritte Methode LOKI (Large-scale Oven for Kinetics Investigation) ist schließlich geeignet, um Festbetschüttungen von unzerkleinertem Brennstoff bis zu einer Kantenlänge von 150 mm und einer Masse von bis zu 500 g zu untersuchen. Den drei Verfahren gemein ist eine Trennung in zwei thermische Zonen. Es existiert jeweils eine Freisetzungszone, die wahlweise auch pyrolytisch betrieben werden kann (unter Stickstoff oder Argon) und daran angeschlossen eine Nachverbrennungszone, die mit Sauerstoff, Luft oder einem Oxidator (Kupferoxyd) betrieben wird. Das vierte Verfahren KEPF (Kamera-Einzelpartikel-Fallschachtsystem) stellt einen Exkurs zu den ausgefalleneren Charakterisierungsmethoden dar. Nicht thermische Eigenschaften, sondern das Flugverhalten von EBS-Partikeln steht hier im Mittelpunkt der Untersuchungen. Die vorgestellten Methoden sind Ergebnisse verschiedener Forschungsprojekte und Kooperationen. Derzeit arbeiten die Ruhr-Universität Bochum, Fraunhofer UMSICHT und zahlreiche andere Partner im Forschungsvorhaben "Ersatzbrennstoffe der Zukunft", gefördert im Rahmen des nordrhein-westfälischen Ziel 2-Programms, eng zusammen, um neue und bestehende Charakterisierungsmethoden zu bewerten, anzupassen und die daraus ermittelten Messergebnisse in Verbrennungsmodelle zu übertragen [5].

Referent: Philipp Danz | Fraunhofer UMSICHT | Vortrag: Brennstoffe – Analytik und Beschreibung

## FINGERPRINT

Fraunhofer FINGERPRINT bezeichnet ein Freisetzungsprofil des Flüchtigenenergiegehalts eines Brennstoffs in Abhängigkeit von der Freisetzungstemperatur. Der Fraunhofer FINGERPRINT ist ein Rechenwert, der aus drei bis vier teilweise abgewandelten Elementaranalysen je Temperaturstufe gebildet wird. Das genaue Vorgehen wird nachfolgend beschrieben. Zur Berechnung des Fraunhofer FINGERPRINT sind zunächst eine Immediat- und eine Elementaranalyse notwendig, für die jeweils eine neue Probeneinwaage herangezogen wird. Dann folgen drei teilweise abgewandelte Elementaranalysen (Untersuchung 1a, 1b und 2, s. Abbildung 3), für die insgesamt nur noch eine neue Einwaage nötig ist. Als Untersuchungsapparatur wird ein modifizierter CHN-Analysator eingesetzt (s. Abbildung 2). Durch die Modifikation ist es möglich, die eingebrachte Probe wahlweise in inerter oder oxidierender Atmosphäre auf frei wählbare Temperaturen  $T_n$  zwischen 300 und 900 °C zu erhitzen. Die aus drei hintereinander geschalteten Öfen bestehende Apparatur wird so betrieben, dass die zu untersuchende Probe im ersten Ofen unter Sauerstoffmangel bei der Temperatur  $T_n$  (Untersuchung 1a) oder mit anwesendem Sauerstoff bei 900 °C (Untersuchung 1b und 2) zersetzt wird. Abbildung 2 zeigt die Abwandlung des herkömmlichen CHN-Analysators für den Untersuchungsschritt 1a. Das komplex zusammen gesetzte Substanzgemisch, welches hierbei freigesetzt wird, ist analytisch nur eingeschränkt und mit hohem Aufwand zu charakterisieren. Deshalb werden die entstehenden Gase im zweiten Ofen vollständig oxidiert (mit Hilfe von Kupferoxid) und im dritten Ofen reduziert. Die resultierenden Produkte  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$  und  $\text{H}_2\text{O}$  werden mittels eines Wärmeleitdetektors erfasst und rechnerisch wird hieraus der C-, H- und N-Gehalt der im ersten Ofen freigesetzten Gase bestimmt.

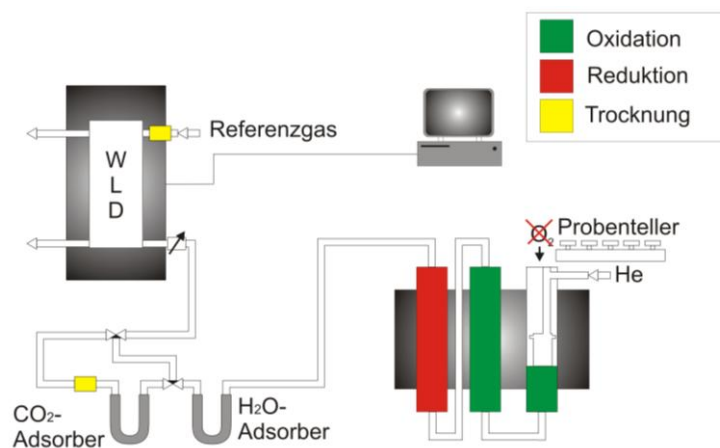


Abbildung 2: Schematische Darstellung, CHN-FINGERPRINT-Analyse [nach 6]

Die beschriebene Methodik wird für mehrere Temperaturstufen  $T_n$  in gleicher Art und Weise durchgeführt. Abbildung 3 zeigt eine als Flussdiagramm aufgebaute Übersicht, die auf der linken Seite den Analytikpfad und auf der rechten Seite die Berechnungsschritte visualisiert. Das Diagramm verdeutlicht die notwendigen Messschritte, um die Freisetzung einer Temperaturstufe zu bestimmen. Es sind vier Elementaranalysen, vier Massenbestimmungen und eine Immediatanalyse (welche wiederum Massebestimmungen beinhaltet) notwendig.



Der Ansatz zur Berechnung des Brennwertes nach CHANNIWALA stellt eine Modellgleichung zur Verfügung, welche sowohl für feste, als auch für gasförmige Stoffe aufgestellt wurde. Die bessere Eignung zur Berechnung konnte durch Vergleiche mit im Bombenkalorimeter ermittelten Brennwerten belegt werden [8]. Die Berechnung des Brennwertes  $H_s$  mit A (Asche) erfolgt durch

$$H_s = 0,3491 \cdot C + 1,1783 \cdot H - 0,1034 \cdot O - 0,0151 \cdot N - 0,0211 \cdot A.$$

Da der Ascheanteil der Flüchtigen null ist, kann der letzte Teil der Gleichung vernachlässigt werden. Werden nun die bei verschiedenen Temperaturen erhaltenen elementaren Zusammensetzungen, sowie Heiz- und Brennwerte über der Temperatur aufgetragen, lässt sich ein funktionaler Zusammenhang abbilden. In Abbildung 4 ist der Vergleich zweier FINGERPRINTs abgebildet. Gut sind hier die unterschiedlichen Freisetzungverhalten der Kohle und des EBS zu erkennen. Während die Kohle bei 400 °C erst 60 % der Energie über die Flüchtigenfreisetzung abgegeben hat, sind dies beim EBS bereits 95 %. Für das Zünd- und Ausbrandverhalten ergeben sich somit signifikante Unterschiede, welche in Auslegungs- und Modellierungsbetrachtungen mit einfließen sollten. Als Anwendungsbeispiel sei hier eine umfangreiche Untersuchung verschiedener Abfallfraktionen genannt, die die Erweiterung des Verbrennungsmodells CombAte um diese Daten [9] ermöglichte.

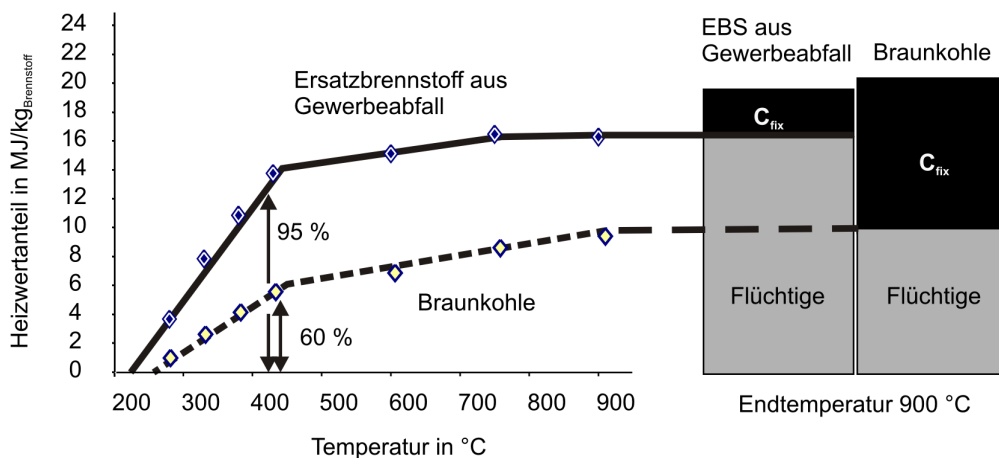


Abbildung 4: Vergleich, Flüchtigenheizwert-Freisetzung, EBS und Braunkohle

Sollen zusätzlich zu den Hauptbestandteilen der Flüchtigen C, H, N und O weitere Elemente, wie z. B. Chlor (Cl) und Schwefel (S) hinsichtlich ihres Freisetzungsverhaltens untersucht werden, muss eine andere Versuchsmethode gewählt werden. Fraunhofer UMSICHT hat hierzu den Versuchsstand DROPS (Doppelrohrföfen-Pyrolysesystem) entwickelt.

#### DROPS

Ähnlich wie bei den flüchtigen Bestandteilen eines Brennstoffs wird durch Standardmethoden lediglich der Gesamtgehalt des gebundenen Chlors analytisch erfasst. Unterschiedliche Chlorverbindungen können jedoch bei verschiedenen

Temperaturen freigesetzt werden und wirken sich somit in Verbrennungsanlagen differenziert aus. Eine Unterscheidung zwischen verschiedenen Chlor- und Schwefelspezies ist mit Hilfe der FINGERPRINT-Methode nicht möglich, da einerseits die Detektionstechnik im Elementaranalysator zur Messung von Chlor- und Schwefelverbindungen nicht geeignet ist, andererseits Chlor- und Schwefelverbindungen in den Öfen durch die eingesetzten Oxidations- und Adsorptionsmittel abgeschieden werden. Aus diesem Grund wurde der in Abbildung 5 gezeigte Versuchsaufbau entwickelt.

In einem Doppelrohr-Ofen-Pyrolyse-System (DROPS) können ein oder mehrere Brennstoffpartikel auf eine frei wählbare Temperatur bis 900 °C erhitzt (Kantenlänge bis 40 mm) und die freigesetzten Gase in einer nachgeschalteten Ofenzone oxidiert werden. Der Doppelrohrofen besteht aus zwei Ofenzonen. Ofenzone 1 wird mit Inertgas (Stickstoff) gespült und Sauerstoff wird in Ofenzone 2 zugeleitet. Beide Ofenzonen sind separat voneinander regelbar. Die Ofenzonen des Doppelrohrfens umschließen ein Quarzglasrohr mit einem Innendurchmesser von 23 mm und einer Länge von 1 m (s. Abbildung 5). Die oxidierten Pyrolysegase werden in Waschflaschen aufgefangen. Anschließend werden der Chlorid- und Schwefelgehalt mittels der Ionenchromatographie (IC) untersucht, da diese sich zur Bestimmung anorganischer und organischer Anionen und Kationen in wässriger Lösung eignet. Führt man die beschriebene Prozedur ähnlich zum FINGERPRINT-Verfahren bei unterschiedlichen Temperaturen durch, erhält man ein temperaturabhängiges Freisetzungsprofil für Chlor- und Schwefelverbindungen. Für jede Untersuchungstemperatur wird dabei ein einzelner Versuch vorgenommen, d. h. es wird für jede Temperaturstufe eine jeweils neue Probe untersucht.

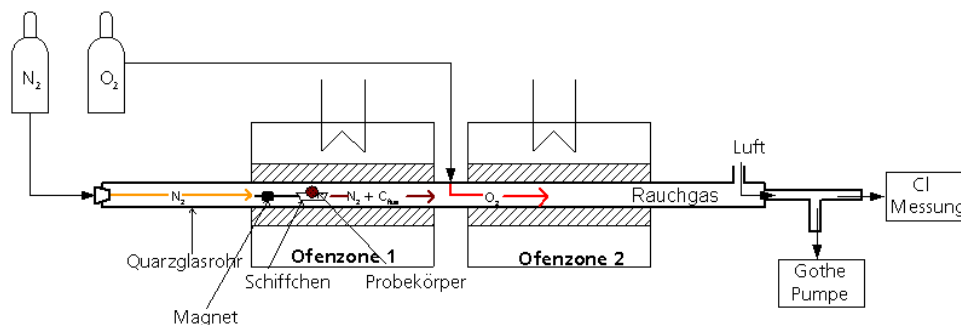


Abbildung 5: Fraunhofer DROPS, Aufbau

In Abbildungen 6 ist aus den Ergebnissen einer solchen Untersuchung der Vergleich zwischen einer Kunststoff-Fraktion (ähnlich einem EBS) und einer Kohle hergestellt. Zum einen wird deutlich, dass bei der Kohle die Chlorverbindungen bei niedrigeren Temperaturen freigesetzt werden als die Schwefelverbindungen. Bei der fast schwefelfreien Kunststofffraktion zieht sich die Freisetzung der Chlorverbindungen bis zum Temperaturbereich 700 °C hin, während bei der Kohle die Freisetzung bereits bei 500 °C abgeschlossen ist. Auch diese Daten finden Eingang in das Verbrennungsmodell CombAte und führen dort zu einer verlässlichen Simulation der Chlor- und Schwefelfreisetzung auf dem Rost [9]. Die vorgestellten Ergebnisse entstammen einer wissenschaftlichen Kooperation zwischen der GKS Schweinfurt GmbH und Fraunhofer UMSICHT.

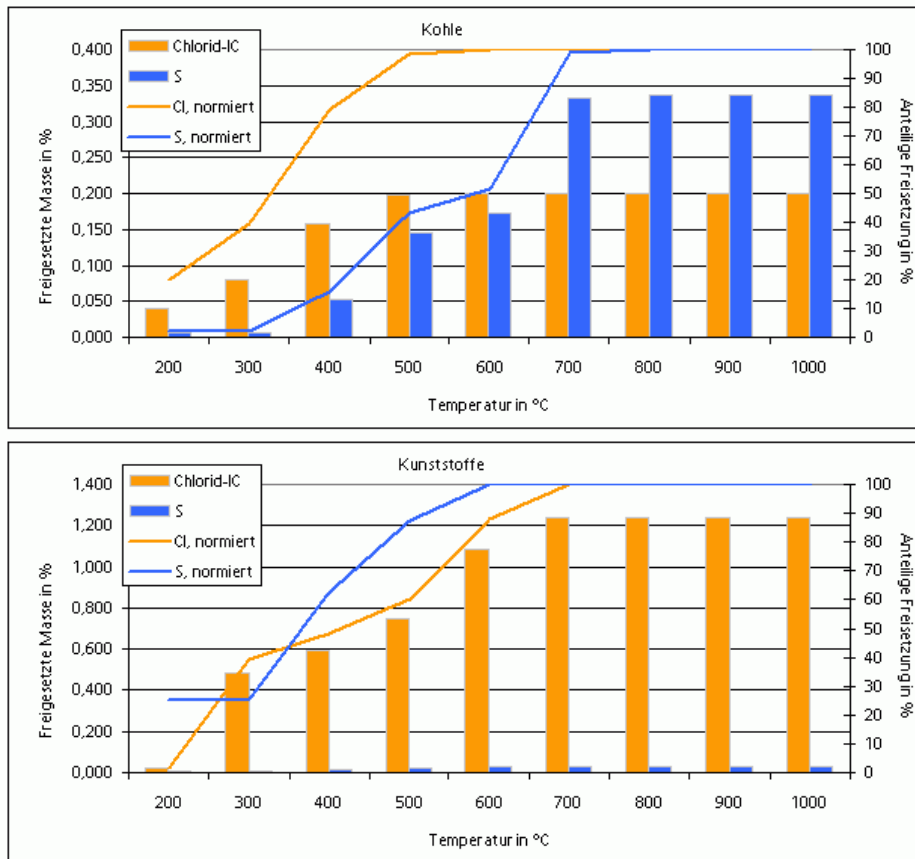


Abbildung 6: Vergleich der Cl- und S-Freisetzung, Kohle und Kunststofffraktion

Sollen anstelle von Einzelpartikeln Schüttungen oder größere Probenkörper untersucht werden, sind Anlagen im Technikumsmaßstab notwendig. Die Charakterisierung von EBS und Abfällen in solchen Technikumsanlagen ist in Deutschland bereits durch mehrere Forschungseinrichtungen durchgeführt worden. Als Beispiel sei hier der Festbettreaktor KLEAA des Forschungszentrum Karlsruhe genannt [10]. Wie eingangs erläutert ist zur Untersuchung und Charakterisierung der Verbrennungsteilschritte eine Abtrennung und Einzelbetrachtung wünschenswert. Dies ist in den bis jetzt vorhandenen Technikumsanlagen nicht möglich gewesen. Aus diesem Grund wurde die aus der FINGERPRINT- und DROPS-Methodik bekannte Zweiteilung in den Technikumsmaßstab übertragen, was zur Entwicklung des Large-scale Oven for Kinetics Investigation LOKI führte.

### LOKI

Der Schüttchichtreaktor LOKI ist ein Versuchs-Ofensystem mit zwei thermisch und räumlich getrennten Ofenzonen (OZ1 und OZ2) aus Quarzglas (Abbildung 7). Diese Trennung erlaubt die vollständige Stufung der Verbrennung. Die untere Ofenzone OZ1 kann mit vorgewärmten Stickstoff (im Pyrolysebetrieb), technischer Luft oder einer Mischung der beiden Gase (im oxidativen Betrieb) beaufschlagt werden. Die obere Ofenzone OZ2 wird mit technischer Luft betrieben und dient zur Nachverbrennung. Um die Inertisierung der unteren Ofenzone im Pyrolysebetrieb aufrecht zu erhalten, werden die OZ1 und OZ2 durch eine Keramikfritte getrennt. Diese gewährleistet neben einer Wärmedämmung zwischen den zwei Zonen einen Gasfluss in Richtung der

Nachverbrennungszone. Die Brennstoffprobe kann im Brennstoffbett in der OZ1 bei einstellbarem Luftüberschuss ( $0 \leq \lambda$ ) erhitzt werden. Mit Hilfe von Thermoelementen kann der Wärmetransport durch die Ofenstrahlung in die Schüttung erfasst werden. In einem zusätzlichen Probenkörnchen kann eine Brennstoffschüttung mit einer Einwaage bis zu 500 g eingebracht und thermogravimetrisch mit Hilfe einer Waage untersucht werden. Die maximale Aufheiztemperatur und Aufheizrate betragen 1 000 °C und 40 K/min. Unter der unteren Ofenzone befindet sich ein Schleusensystem, welches eine Einbringung der Brennstoffprobe in den bereits aufgeheizten Ofen erlaubt und somit eine schlagartige Erhitzung der Probe ermöglicht. Die nachgeschaltete Rauchgasanalytik (NDIR-Spektroskopie) entnimmt 1 l/min des Rauchgasstroms und misst kontinuierlich die molekulare Zusammensetzung der Rauchgase hinsichtlich  $\text{CO}_2$  und  $\text{H}_2\text{O}$ , wodurch die elementare Zusammensetzung des umgesetzten Brennstoffs hinsichtlich H, C und O (unter Vernachlässigung von N) berechnet werden kann.

Nachfolgend werden drei unterschiedliche Anwendungen des Ofensystems präsentiert. Die vorgestellten Untersuchungen wurden zum Teil aus Mitteln des Ziel 2-Programms Energie.NRW des Landes Nordrhein-Westfalen gefördert, zum Teil entstammen sie der wissenschaftlichen Zusammenarbeit mit der GKS Schweinfurt GmbH. Zunächst wird ein einfacher Versuchsaufbau zur Validierung eines Wärmeleitmodells anhand einer Keramik-Kugel vorgestellt, der prinzipiell auch auf Abfallstoffe übertragen werden kann. Danach wird ein Versuch zur Flüchtigensfreisetzung in inerter Atmosphäre für eine Schüttung EBS-Folie und der Versuchsaufbau zur Abschätzung der Zündtemperatur beschrieben.

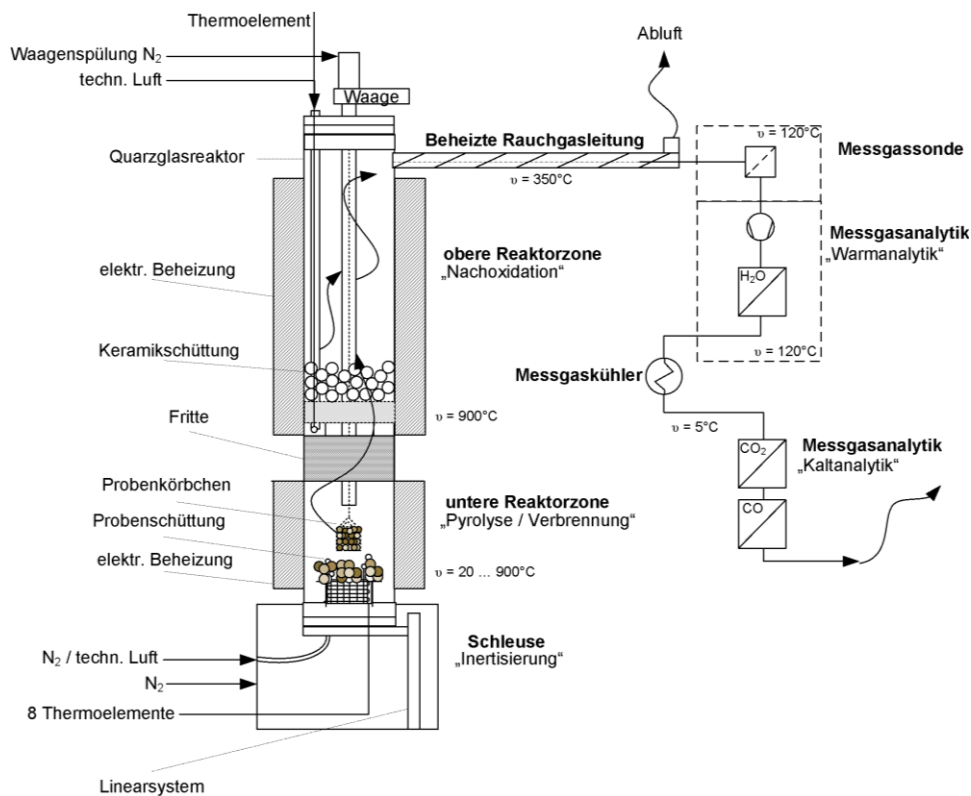


Abbildung 7: Schütttschichtreaktor LOKI

Versuchsbeschreibung »Wärmeleitung Keramikku­gel«

Zur Ermittlung des Wärmeleitverhaltens und Überprüfung der Wärmeleitmodellierung wurde eine Keramikku­gel (Durchmesser 20 mm) in der unteren Ofenzone ohne jegliche Durchströmung schlagartig auf 800 °C aufgeheizt. Hierzu wurde das Ofensystem zunächst auf Temperatur gebracht, und anschließend die Keramikku­gel durch eine kleine Öffnung eingeführt. Im Kern der Keramikku­gel befand sich die Messspitze eines Thermoelementes. Auf die Oberfläche trat von allen Seiten eine thermische Strahlung mit einer konstanten Strahlungstemperatur von 800 °C auf. In Abbildung 8 wird der Versuchsaufbau zur Messung dargestellt. In Abbildung 9 ist die Auswirkung des konstanten Wärmestroms auf die kontinuierlich erfasste Kerntemperatur zu sehen. Die Parameter des Ofens und die bekannten Parameter der Kugel (Durchmesser, Wärmeleitfähigkeit, Wärmekapazität, Dichte, Emissivität usw.) wurden in ein zu prüfendes Modell an der Ruhr-Universität Bochum übertragen [11]. Der Vergleich der beiden Ergebnisse ist in Abbildung 9 dargestellt. Es ist eine gute Übereinstimmung gegeben und damit die Eignung des Modells für diesen Anwendungsfall (Wärmeübertragung fast ausschließlich durch Strahlung) gezeigt. Für das Ofensystem konnte in mehreren Versuchen die Reproduzierbarkeit dieser Ergebnisse belegt werden. Ein ähnlicher Versuch kann im Bedarfsfall in Schüttungen, mit und ohne Umströmung in inerte oder oxidativer Atmosphäre durchgeführt werden. Zur Betrachtung der Wärmeleitung in Abfallfraktionen ist eine ähnliche Messung an Presskörpern geplant.

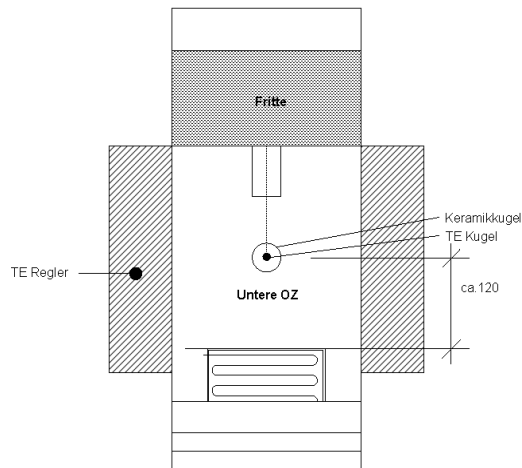


Abbildung 8: Versuchsaufbau zur Messung der Wärmeleitung in eine Kugel

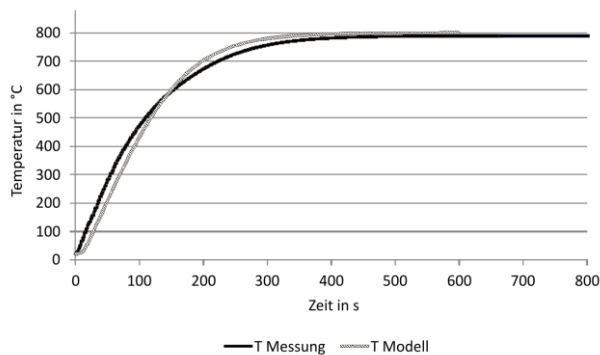


Abbildung 9: Vergleich der Messdaten mit einem Berechnungsmodell [11]

Versuchsbeschreibung »Flüchtigenfreisetzung Folie«

Zur Untersuchung der Flüchtigenfreisetzung einer EBS-Fraktion Folie fanden Untersuchungen in inerter Atmosphäre statt. Die untere Ofenzone (OZ1) wurde hierzu mit Stickstoff gespült ( $N_{2,OZ1} = 0,391$  l/s). Die obere Ofenzone (OZ2) wurde mit technischer Luft (Techn. Luft<sub>OZ2</sub> = 0,183 l/s) beaufschlagt. Die Thermowaage wurde mit der Probe (10 g) befüllt und in einer Höhe von ca. 120 mm über dem Boden positioniert. In der OZ2 wurde eine Nachverbrennungstemperatur von 850 °C eingestellt und die Aufheizrate der OZ1 betrug 5 K/min bis 500 °C. Während des Versuchs wurden der Massenverlust und die Gaskonzentration von CO<sub>2</sub> und H<sub>2</sub>O aufgezeichnet. Neben der Erfassung der Heizelementtemperatur, welche der Regelung dient (TE Regler OZ1), erfolgte in unmittelbarer Nähe zur Probe die Messung der Ofeninnentemperatur mittels eines fix angebrachten Thermoelements (TE OZ 1).

Die Ergebnisse des Versuchs zur Flüchtigenfreisetzung sind in Abbildung 10 dargestellt. Der Masseverlust der Folienprobe gliedert sich in drei Abschnitte. In Phase I ist bereits eine leichte Massenabnahme ab 170 °C Ofeninnentemperatur zu erkennen. Die leicht flüchtigen Bestandteile des Brennstoffs werden hier entgast. Der gesamte Massenverlust in Phase I beträgt 0,85 g (8,5 Ma.-%). In Phase II findet die Hauptfreisetzungsreaktion statt. Ab ca. 300 °C Ofeninnentemperatur ist ein starker Masseverlust von 9,04 g zu verzeichnen. Dies entspricht 90,4 Ma.-% der Gesamtprobe. Die Freisetzung dauert ca. 2 500 s, und der verbleibende Masseanteil bildet den Entgasungsrückstand, welcher bei einer Ofeninnentemperatur von 420 °C zurückbleibt. In Phase III entgasen nochmals 0,04 g, so dass insgesamt 9,93 g umgesetzt wurden (99 Ma.-%). Die annähernd komplette Umsetzung des festen Brennstoffs deckt sich mit den Erwartungen an die Sortierfraktion Folie, die zu großen Teilen aus Polyethylen (PE) besteht. PE stammt aus der Gruppe der Thermoplaste, welche sich ab einer bestimmten Temperatur komplett verflüchtigen. Sie bestehen aus langen Kohlenwasserstoffketten, in welchen durch thermische Einwirkung ein Bindungsbruch der C-C Bindungen initiiert wird. Der Zerfall der Ausgangsmoleküle (Phase II) wird als Depolymerisation bezeichnet und benötigt höhere Temperaturen als die Abspaltung von Nebengruppen und Seitenketten (Phase I) [12].

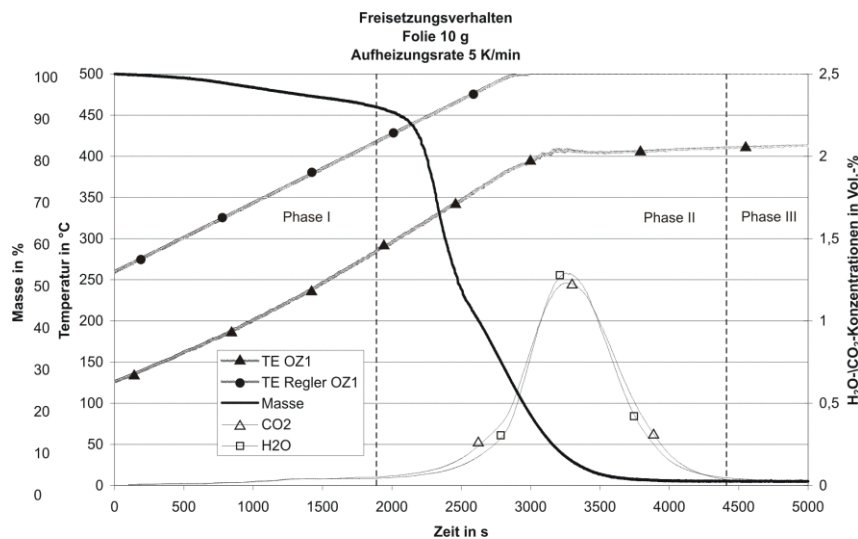


Abbildung 10: Versuchsverlauf Sortierfraktion Folie, Flüchtigenfreisetzung, 500 °C

Im nächsten Schritt wird nun innerhalb des Forschungsvorhabens „Ersatzbrennstoffe der Zukunft“ versucht, dieses Ergebnis anhand einer Modellrechnung wiederzugeben. Hierzu finden neben den Wärmeleitungsberechnungen auch Ansätze zur Berücksichtigung der verschiedenen Reaktions- und Umwandlungsenthalpien Berücksichtigung. Das Modell befindet sich noch im Entwicklungsstadium, Ergebnisse werden aber in naher Zukunft veröffentlicht.

Versuchsbeschreibung »Zündtemperatur«

Die Ermittlung der Zündtemperatur abfallstämmiger Brennstoffpartikeln ist die Zielsetzung des nächsten Versuchsaufbaus. Für staubförmige Kohlebrennstoffe existieren Methoden (z. B. in Clausthal [13]), die jedoch auf grobstückige Partikel nicht anwendbar sind, weshalb im Forschungsvorhaben AiF-Nr. 14894 die EBS vorher zu Pulver aufgemahlen wurden [14]. Da im vorliegenden Forschungsvorhaben Zielsetzung in der Untersuchung unzerkleinerter Partikel besteht, wird eine Methode nach WOLLERS [13] abgeändert und angepasst. Hierbei wird ein mit Originalbrennstoff gefülltes Gefäß mit einem Thermoelement bestückt und erhitzt. Gleichzeitig dient ein leeres Gefäß, welches ebenfalls mit einem Thermoelement bestückt ist, als Referenzmessung (s. Abbildung 11). Aus dem Vergleich der beiden Temperaturmessungen (genauer gesagt, aus der Differenz der Anstiegsfunktionen) können Kurvenmaxima ermittelt werden, die eine Abschätzung der Zündtemperatur erlauben (s. Abbildung 12).

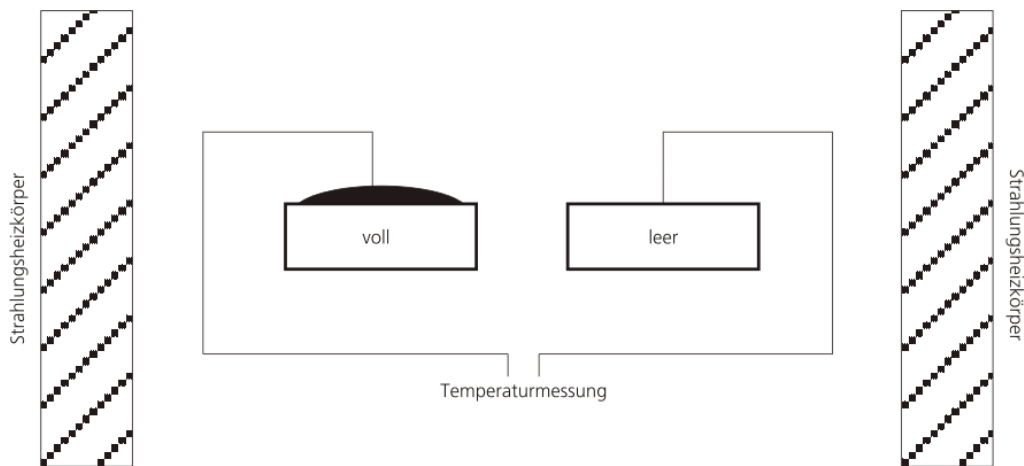


Abbildung 11: Versuchsaufbau zur Bestimmung der Zündtemperatur

Abbildung 12 zeigt die beiden Temperaturmesskurven und die Differenzkurve. Gut zu erkennen ist die exotherme Reaktion, welche bei ca. 470 °C einsetzt und als Zündpunkt interpretiert wird. Die vorgestellte Methodik wird derzeit noch entwickelt und soll letztendlich in Kombination mit anderen Messverfahren die Berechnung einer abgewandelten Zündwilligkeitszahl (s. [13]) ermöglichen. Somit soll Anlagenbetreibern ein Werkzeug an die Hand gegeben werden, um Brennstoffe hinsichtlich ihres Zündverhaltens einschätzen zu können.

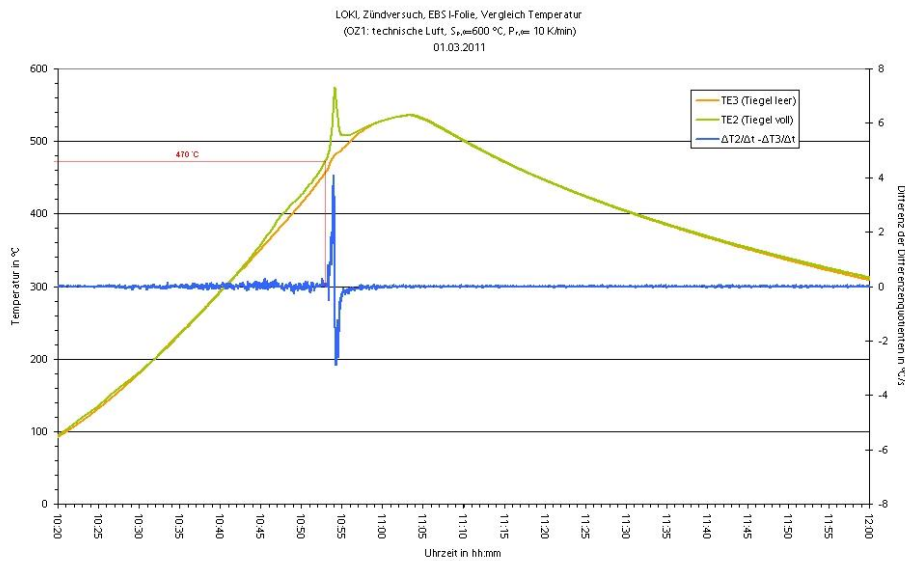


Abbildung 12: Messkurven der EBS-Fraktion Folie zur Bestimmung der Zündtemperatur

Dass die Charakterisierungsmethoden von Brennstoffen nicht immer thermische Zielsetzungen haben müssen, soll der abschließende Teil dieses Beitrags zeigen. Hier wird nun das Kamera-Einzelpartikel-Fallschachtsystem KEPF vorgestellt, welches ebenfalls im Rahmen des Forschungsvorhabens „Ersatzbrennstoffe der Zukunft“ (Ziel 2- Programm Energie.NRW) entwickelt wurde.

#### KEPF

Die Mitverbrennung von EBS, dessen Zusammensetzung und Form sich stark von den Regelbrennstoffen (Gas, Öl, Stein- und Braunkohlestaub) unterscheidet, führt zu signifikanten Änderungen der Vorgänge in den Brennkammern der Feuerungssysteme. Hierbei sind die aerodynamischen Charakteristika des inhomogen zusammengesetzten Brennstoffgemischs ein wichtiger Faktor. Je nach Fraktion und Partikelgröße ergibt sich durch die nicht sphärische Form der Partikel ein extrem variables Flugverhalten. Neben den abweichenden Verbrennungseigenschaften führt dies zu einer Änderung der Flammgeometrie und somit des Temperaturprofils im Vergleich zum Regelbrennstoff, auf den die Anlage ursprünglich ausgelegt ist. Für die Betreiber sind deshalb weiterführende Untersuchungen hinsichtlich des aerodynamischen Verhaltens von großem Interesse, um Optimierungen im Anlagenbetrieb vorzunehmen zu können.

Mit dem heutigen Stand der Technik sind die angeführten Vorgänge nur schwer vorauszusagen. Bei kleinen Partikeln (< 1mm), wie z. B. Kohlestaub, ist die Annahme von Massenpunkten oder einer Kugelform für die Beschreibung im turbulenten Strömungsfeld mit strömungsmechanisch-numerischen Methoden gut zu vertreten. Die Bewegung größerer Partikel ist jedoch in hohem Maße von ihrer Geometrie geprägt und kann bei hoher Beladung nicht mehr als voneinander unabhängig betrachtet werden [15]. Anders als leichte, sphärische Partikel, die einer Gasströmung isokinetisch folgen können, ist das Flugverhalten von EBS-Partikeln aufgrund der Partikeleigenschaften von einer Eigendynamik überlagert. Diese zeichnet sich durch ein Taumelverhalten aus und führt

zwangsläufig dazu, dass sich eine schwankende Relativgeschwindigkeit zwischen Gasphase und Partikel einstellt.

Um Partikelbewegungen in beliebigen Gasströmungen beschreiben zu können und somit Aussagen über das Taumelverhalten und daraus folgender Partikeldispersion zu treffen, müssen zuvor die Relativgeschwindigkeiten für die jeweiligen Partikel ermittelt werden. Als Grundlage, z. B. für eine numerische Strömungssimulationen, ist demzufolge eine gute Datenbasis erforderlich, die die Relativbewegung zwischen Gas und Partikel in Abhängigkeit von der Form des Partikels beschreibt. Dafür müssen Luftwiderstandsbeiwerte in Abhängigkeit von Größe, Form und Masse sowie zusätzliche Daten, die das Taumelverhalten beschreiben, ermittelt werden. In den meisten bestehenden Versuchsanordnungen, welche sich der Bestimmung aerodynamischer Eigenschaften widmen, ist eine Aufnahme dieses Verhaltens nur beschränkt möglich und die für diese Partikel typischen, starken Schwankungen in der Geschwindigkeit werden nicht berücksichtigt [16, 17]. Die Aufnahme einzelner Geschwindigkeiten zur Ermittlung fraktionsaufgelöster Widerstandswerte stellt somit eine Unsicherheit dar und vernachlässigt die Eigendynamiken von EBS-Partikeln vollständig. Deshalb wurde eine Methodik erarbeitet, mit der das Flugverhalten von heterogenen EBS durch numerische Simulation berechnet werden kann. Hierbei ist, wie angeführt, die Kenntnis der Flugeigenschaften von unregelmäßig geformten Brennstoffpartikeln ein zentraler Betrachtungsgegenstand. Dafür wurde ein Fallschacht entwickelt, in dem, über ein Partikeldetektionssystem, die Position und Lage eines fallenden Partikels zeitaufgelöst bestimmt werden kann. Fraunhofer UMSICHT hat in Kooperation mit dem Lehrstuhl für Energieanlagen und Energieprozesstechnik der Ruhr-Universität Bochum eine Methode für die Erforschung des Flugverhaltens grobstückiger Partikel weiterentwickelt. Auf Basis der experimentellen Daten können nun fundierte Aussagen über das Flugverhalten von EBS getroffen werden können. Im folgenden Abschnitt wird die Versuchsanordnung des Experiments beschrieben.

Die Partikel-Relativgeschwindigkeiten und die Partikelbewegung innerhalb des transportierenden Fluids sind abhängig von der Partikelform, Masse und der Partikelgröße. Aus diesem Grund ist es zwangsläufig erforderlich, ungeachtet einer Vorsortierung des EBS in Fraktionen, eine Zuweisung der geometrischen Abmaße des Partikels zur entsprechenden Flugbahn (Fallversuch) vorzunehmen. Daher wird im ersten Schritt das EBS-Partikel gewogen und mit Hilfe zweier Kameras aufgenommen. Der schematische Aufbau ist in Abbildung 13 dargestellt. Das Partikel liegt dabei auf einem Probentisch, auf dem es gewogen und geometrisch über die Bildaufnahmen vermessen wird. Aus den Kamerainformationen (jeweils einer horizontalen und vertikalen Aufnahme) werden die geometrischen Daten, wie Abmaße, Volumen und Formfaktor berechnet. Im nächsten Schritt wird zeitlich die Flugbahn der fallenden Partikel im Fallschacht aufgenommen und untersucht. Dabei werden in einem Fallschacht über zwei, an den Schachtwänden gegenüberliegend montierten Kameras, basierend auf der Anordnung eines Stereokamerasystems, Bildpaare eines herabfallenden Partikels in Abhängigkeit von der Zeit aufgenommen. Sie stellen die Rohdaten und damit die Basis zur Positions- und Lagebestimmung dar. Abbildung 14 zeigt das entwickelte Messsystem „Fallschacht“.

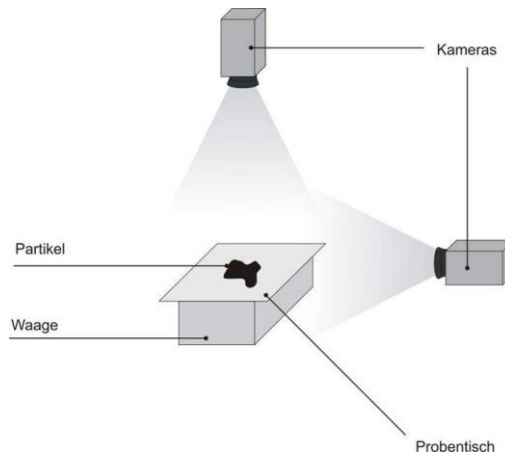


Abbildung 13: Schematischer Aufbau zur geometrischen Partikelcharakterisierung

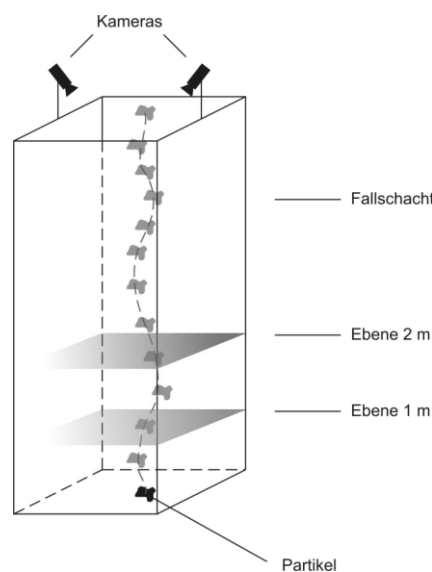


Abbildung 14: Prinzipskizze des Fallschachts mit Messsystem

Die Bildsignale beider Kameras werden auf erkannte Partikelkonturen hin untersucht. Die hierfür entwickelte automatische Partikelerkennung beruht sowohl bei der Waagen-, als auch bei der Fallschacht-Anwendung auf dem gleichen Prinzip. Durch eine Lichtquelle wird das Partikel angestrahlt und anhand des Helligkeitswerts des reflektierten Lichts kann es durch die Kamerasysteme erfasst werden. Im linken Teil von Abbildung 15 wird die ursprüngliche Aufnahme eines EBS-Partikels gezeigt. Im rechten Teil der Abbildung ist das zugehörige über die Bildauswertung weiß markierte, erkannte Partikel zu sehen.

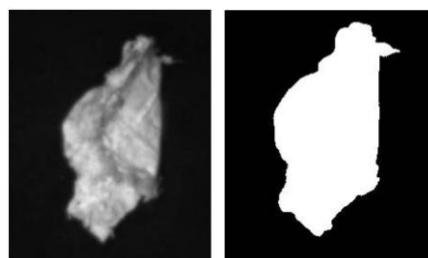


Abbildung 15: Darstellung der Bilderkennung eines Ersatzbrennstoffpartikels

Über einen festgelegten Flächenschwerpunkt kann mittels Winkelbeziehungen und Strahlensätzen die Position des Partikels zeitaufgelöst berechnet werden. Hieraus wird schließlich die Flugbahn und daraus resultierend die Relativgeschwindigkeit bestimmt. Die mit diesen Methoden gewonnenen geometrischen und flugtechnischen Daten sowie Erkenntnisse von EBS-Partikeln können in numerischen Strömungssimulationen als Grundlage zur Modellierung des Flugverhaltens verwendet und schließlich auf industrienähe Anwendungen übertragen werden. Im nachfolgenden Absatz wird eine solche Simulation am Beispiel eines Referenzstoffes und einer realen Brennstofffraktion beschrieben.

Die Simulation von Partikelbahnen und Partikelbewegungen (Partikeltracking) setzt bisher kleine und rotationsfreie Partikel voraus. Die Herausforderung besteht nun darin, Partikel, die stark von der Form einer Kugel abweichen (EBS), auf Basis der in den Apparaturen ermittelten Daten realitätsnah zu simulieren.

In verfügbaren Simulationsprogrammen, wie zum Beispiel Fluent<sup>®</sup>, besteht die Möglichkeit, vorhandene Modelle durch benutzerdefinierte Routinen (user defined functions - UDF) zu erweitern und dadurch die in Experimenten ermittelten Parameter weitgehend zu implementieren. Diese Möglichkeit wurde bei den hier vorgestellten Forschungsarbeiten genutzt. In Abbildung 16 werden die Häufigkeitsverteilungen der vertikalen Geschwindigkeiten von Experiment und Simulation einer einzelnen Partikelgröße verglichen. Dabei zeigt sich, dass die meisten Partikel im Experiment innerhalb eines bestimmten Geschwindigkeitsbereichs liegen und diese Geschwindigkeitsverteilung gut mit dem entwickelten Simulationsmodell (Darstellung der vertikalen Geschwindigkeitskomponente) wiedergegeben werden kann.

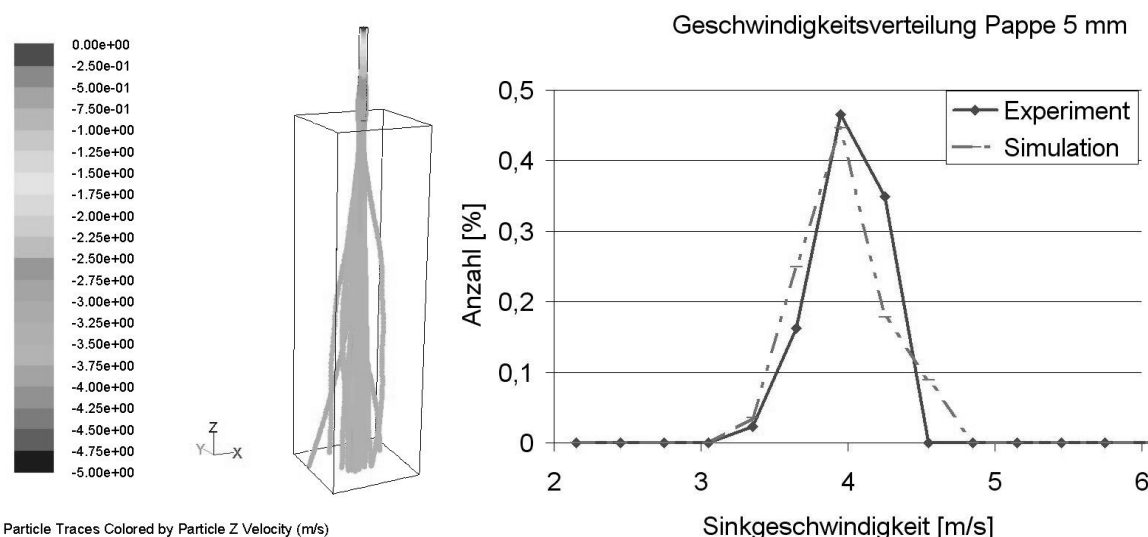


Abbildung 16: Berechnete Trajektorien (links) und Häufigkeitsverteilung der stationären Sinkgeschwindigkeiten (rechts) einer Fraktion Musterpartikel

Zum Vergleich der Dispersion von Simulation und Experiment werden die radialen Abstände der Partikelflugbahnen zur Mittelachse des Fallschachtes in den Ebenen von

1 m und 2 m Höhe (s. Abbildung 14) über dem Boden herangezogen. In Abbildung 17 sind im Vergleich gute Übereinstimmungen zu erkennen.

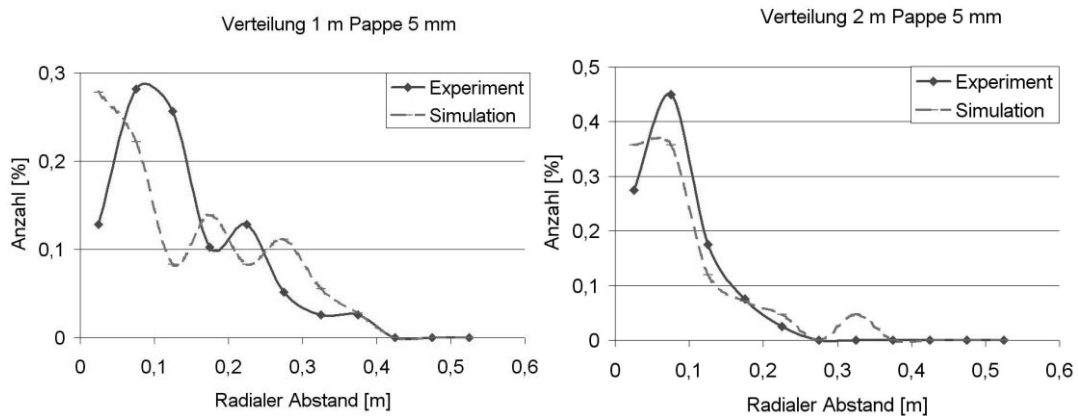


Abbildung 17: Vergleich der Dispersion in den Ebenen 2 m (links) und 1 m (rechts) Höhe

Das bestehende Modell kann nun analog um weitere Größenfraktionen erweitert werden. Bei EBS ist hierfür eine deutlich größere Datenbasis vonnöten, da neben der statistischen Partikelbewegung eine inhomogenere Korngrößenverteilung sowie Formvielfalt vorhanden ist. Für die in diesem Artikel vorgestellte Sortierfraktion Folie eines EBS sind die Ergebnisse von Experiment und Simulation anhand exemplarischer Partikeltrajektorien in Abbildung 18 gegenübergestellt. Im linken Bild sind die im Fallschacht aufgenommenen Partikelflugbahnen dargestellt. Durch die detaillierte Bildauswertung ist die Eigendynamik dieser Partikelfraktion gut zu erkennen und kann entsprechend für die Simulation (rechtes Bild) verwendet werden. Sowohl im Experiment als auch in der Simulation zeigen sich zum einen übereinstimmende Partikelgeschwindigkeiten, zum anderen ähnliche Eigendynamiken.

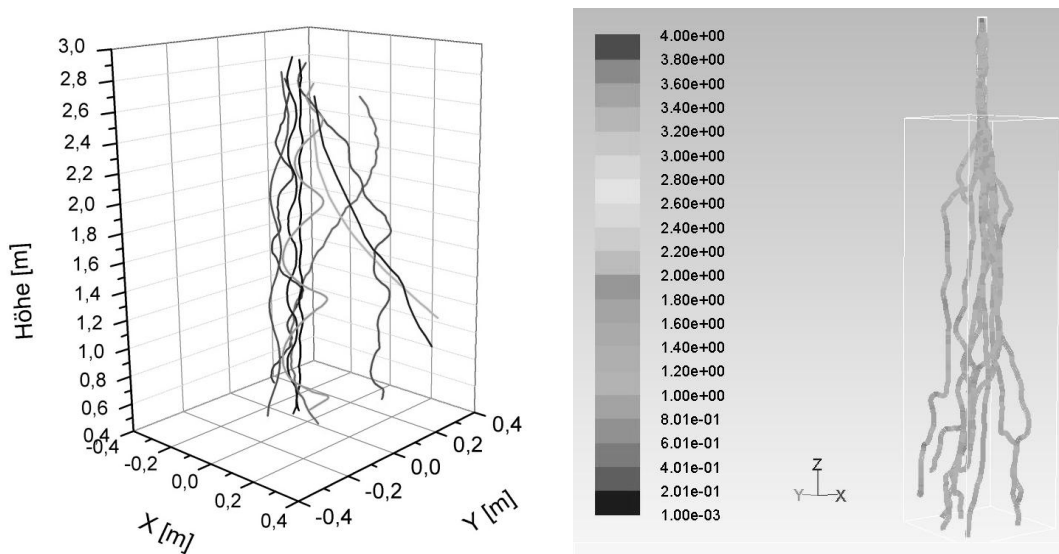


Abbildung 18: Vergleich von Experiment (links) und Simulation (rechts) der Fraktion Folie

Mit den hier vorgestellten Charakterisierungsmethoden bietet sich ein umfangreiches Instrumentarium, um abfallstämmige Brennstoffe besser hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf den Verbrennungsbetrieb zu beschreiben. Die gezeigten Messapparaturen werden beständig weiter entwickelt und die Modelle fortlaufend ergänzt, so dass zukünftig eine verbesserte Grundlage zur Auslegung von Feuerungsprozessen und Bewertung von Brennstoffen zur Verfügung stehen wird.

#### DANKSAGUNG

Wir danken dem Land Nordrhein-Westfalen für die Unterstützung des Forschungsvorhabens im Rahmen des Ziel 2-Programms und unseren Industriepartnern für die Ermöglichung dieses Projekts.

#### LITERATUR

- [1] Görner, Klaus: »Technische Verbrennungssysteme«. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 1991.
- [2] Länderarbeitsgemeinschaft Abfall. <http://www.laga-online.de> 15.05.2012
- [3] E. Thomanetz, Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Chem.: »Das Märchen von der repräsentativen Abfallprobe.« Müll und Abfall (3/02). 2002.
- [4] LAGA PN 98. »Richtlinie für das Vorgehen bei physikalischen, chemischen und biologischen Untersuchungen im Zusammenhang mit der Verwertung/Beseitigung von Abfällen«. 2001.
- [5] <http://www.lead.ruhr-universität-bochum.de/ersatzbrennstoff/> 23.05.2012
- [6] Dr. Thomas Marzi, Dr. Kai Keldenich, Prof. Dr.-Ing. habil. Klaus Görner: »Energetische Verwertung von Ersatzbrennstoffen - Entwicklung einer Methodik zur Erfassung der feuerungstechnischen Brennstoffeigenschaften«. Müll und Abfall, Mai 2005, S. 572-579.
- [7] W. Boie, Prof. Dr.-Ing.: »Vom Brennstoff zum Rauchgas.« B.G. Teubner Verlagsgesellschaft. Leipzig, 1957.
- [8] S.A. Channiwala, P.P. Parikh: »A unified correlation for estimating HHV of solid, liquid and gaseous fuels«. Fuel 81, 2002, S. 1051-1063.

- [9] Dr. Ragnar Warnecke, Volker Müller, Philipp Danz, Martin Weghaus, Martin Zwiellehner: »Optimierung der Feuerungsbedingungen durch Prozessmodellierung«. 5. Freiburger Fachtagung Dampferzeugerkorrosion. 20.-21. Oktober 2011, Freiberg.
- [10] S. Bleckwehl; M. Riegel; T. Kolb; H. Seifert: »Charakterisierung der verbrennungstechnischen Eigenschaften fester Brennstoffe.« 22. Deutscher Flammentag: Verbrennung und Feuerungen, Braunschweig, 21./22.09.2005.
- [11] Wirtz, S.: Interne Kommunikation. Ruhr-Universität Bochum, Lehrstuhl für Energieanlagen und Energieprozesstechnik. Bochum, 2012.
- [12] Gerdes, C.: »Pyrolyse von Biomasse-Abfall: Thermochemische Konversion mit dem Hamburger-Wirbelschichtverfahren«. Dissertation, Universität Hamburg. Hamburg, 2001.
- [13] J. Zelkowski, Dr.-Ing.: »Kohlecharakterisierung und Kohleverbrennung.« VGB PowerTech GmbH. Essen, 2004.
- [14] M. Beckmann; R. Scholz; S. Flamme; H. Seifert. AiF-Forschungsvorhaben. AiF-Nr. 14894. Bauhaus-Universität Weimar. Technische Universität Clausthal. Institut für Abfall, Abwasser, Site und Facility Management e.V. Ahlen. Forschungszentrum Karlsruhe. Weimar, Clausthal, Ahlen, Karlsruhe, 2007.
- [15] Marzi, T., Wirtz, S.: »Ersatzbrennstoffe – Analyse der Verbrennungseigenschaften«, II.EBS – Analytik Workshop, Dresden, 2010
- [16] Dunnu, G., Maier, Schnell, U., Scheffknecht, G.: »Drag coefficient of Solid Recovered Fuels (SRF)«. Fuel (89) 2010.
- [17] Perumalsamy, S., Schroer, K., Yilmaz, H., Oeljeklaus, G., Görner, K.: »Characterization of Inhomogeneous Non-Spherical Alternative Fuel Particles for the Cement Manufacturing Process«