WEGHAUS GMBH

Bericht

Beschreibung der Verbrennungsprozesse auf dem Rost

Martin Weghaus [1], Dr.-Ing. Ragnar Warnecke [2]

1 Weghaus GmbH, Marktgasse 9,
97070 Würzburg

2 Gemeinschaftskraftwerk Schweinfurt GmbH,
Hafenstraße 30, 97424 Schweinfurt

1 Einleitung

Wurde noch vor wenigen Jahren für die Auslegung von verfahrenstechnischen Anlagen im Wesentlichen auf die Erfahrung altgedienter Experten gebaut, so ist aus jetziger Sicht der Einsatz numerischer Verfahren als Ergänzung nicht mehr wegzudenken.
Eine Anlagenneuplanung ist ohne detaillierte Strömungssimulation nicht mehr marktfähig und selbst bei Umbauten wird zunehmend auf diese Werkzeuge gebaut. Die Vorteile sind offensichtlich. Es kann grundsätzlich das Verhalten der Anlage im realen Maßstab im Voraus untersucht werden und so bereits während der Planung optimiert werden. Diesen Trend haben die großen Anbieter von Strömungssimulationsprogrammen erkannt. Die weitreichende Integration von Struktur- und Strömungsmechanik in den Konstruktionsprozess wird als zukunftsweisend angesehen. In der Praxis zeigt sich aber sehr schnell, dass ein hervorragender Konstrukteur nicht zwangsläufig die über neue „Buttons“ integrierten Disziplinen umfassend beherrschen kann.
Gerade im Bereich der Strömungssimulation wird dies immer wieder deutlich. Das Akronym CFD wird gerne scherzhaft als „Colors for Directors“ interpretiert, ein Programm, das bunte Bilder für Präsentationen liefert, aber wenig Aussagekraft hat. In den falschen Händen kann das Werkzeug CFD tatsächlich zu Fehleinschätzungen und Überinterpretationen führen.
Sinn einer Strömungssimulation ist es, einen Bilanzraum zu betrachten. Ein Bilanzraum wird durch die Prozesse im Bilanzraum und dessen Grenzen beschrieben. Die CFD-Softwarepakete stellen umfassende physikalisch-chemische Modelle und numerische Verfahren zur Verfügung, um die unterschiedlichsten Verfahren abbilden zu können. Diese sind hinreichend validiert und liefern verlässliche Ergebnisse. Darüber hinaus ermöglichen die Einbindung von ergänzenden Unterprogrammen, meist aus verfahrenstechnischen Grundlagen entwickelt, die Ergänzung der vorhandenen Standardmodelle (beispielsweise: Berechnung von Druckverlusten in Wärmeübertragerbündeln gemäß VDI-Wärmeatlas oder Integration kinetischer Detailmodelle zur Berechnung von z.B. CO-, NOx- oder Sulfatierungs-Reaktionen).
Die Grenzen des Bilanzraumes können allerdings nicht mit allgemeingültigen Methoden beschrieben werden, sondern erfordern eine genauere, spezifische Betrachtung. Die Qualität des Ergebnisses ist sehr eng mit der Qualität der Randbedingungen verknüpft. Betrachten wir beispielsweise die Simulation einer Müllverbrennungslange, so sind im Bilanzraum Modelle für

- Gasmischung mit variabler Temperatur,
- Gastransport,
- Wärmeübergang/Strahlung und
- Reaktion

etc. zu aktivieren.

Die Grenzen des Bilanzraumes sind durch die geometrischen Verhältnisse von Feuerraum und Kessel bestimmt. An den Bilanzgrenzen sind Ströme zu definieren. Über die Kesselwände wird Wärme abgeleitet, Sekundärluft wird über Düsen aufgegeben etc. Der für den Prozess von Rostfeuerungen (für MVA, BVA und EVA) wesentliche (Stoff- und Wärme)-Strom ist der Umsatz des Feststoffes zu Gas. Dies geschieht an einer Bilanzgrenze/Randbedingung mit großer örtlicher Ausdehnung, dem Rostsystem. Die Beschreibung der Randbedingung einer Sekundärluftdüse ist vergleichsweise einfach. Eine Ungenauigkeit im Austrittsprofil einer Düse von vielleicht 70 mm Durchmesser hat nur einen sehr geringen Einfluss innerhalb einer Geometrie von einigen Metern. Anders sieht dies bei der Randbedingung „Rost“ aus. Die Beschreibung des Entgasungsprofils bestimmt letztendlich die Feuerlage und hat somit einen enormen Einfluss auf das Ergebnis der Berechnung. In Abbildung 1.1, bei der nur die Randbedingung Rost variiert wurde, wird die starke Abhängigkeit der Ergebnisse von den Randbedingungen deutlich.

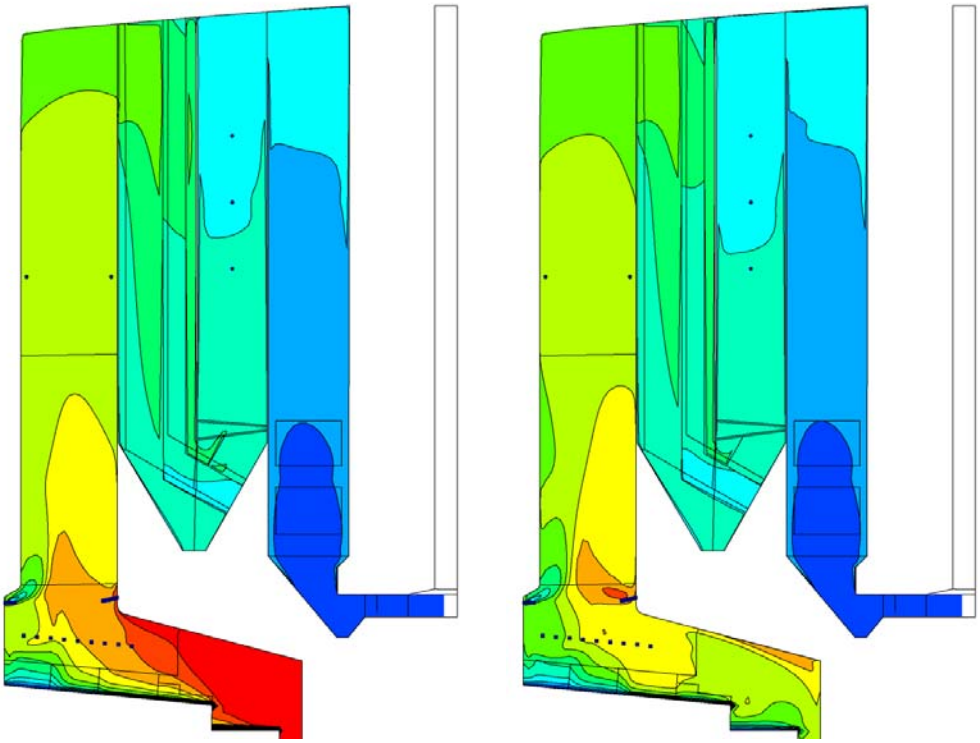

Abbildung 1.1: Demonstration des Einflusses von Randbedingungen

Wie sind also für diese Randbedingungen hinreichend genaue Parameter zu ermitteln? Eine reine Abschätzung des Entgasungsprofils ist sicherlich wenig sinnvoll. Bei Altanlagen

können Messungen im Feuerraumbereich durchgeführt werden, die jedoch mit sehr hohen Kosten (im Bereich von 200.000 Euro) verbunden sind. Für Neuplanungen, von Neuanlagen oder Umbauten, bei denen keine Messungen vorliegen können, ist aber ohne belastbare Randbedingungen keine zuverlässige Erfolgsprognose zu machen. Ein Weg aus dem Dilemma ist die Erstellung eines Modells, das die Vorgänge auf dem Rost auf der Basis validierter und verallgemeinerter Messungen aus bestehenden Anlagen zuverlässig beschreibt und somit verlässliche und reproduzierbare Randbedingungen liefert. Glücklicherweise sind die Grundsätze der Physik und Chemie überall gültig und können, wenn Daten an einzelnen Anlagen durch Messungen validiert sind, auf andere Anlagen weitgehend übertragen werden, sofern die richtigen Zusammenhänge erkannt werden. Letzteres kann mit den Erfahrungen aus betrieblicher Praxis und verfahrenstechnischer Expertise erreicht werden.

2 Rostmodelle

In der Vergangenheit wurden einige Modelle zur Beschreibung der Vorgänge auf dem Rost erstellt. Abbildung 2.1 gibt eine Übersicht über bereits vorhandene Modelle.

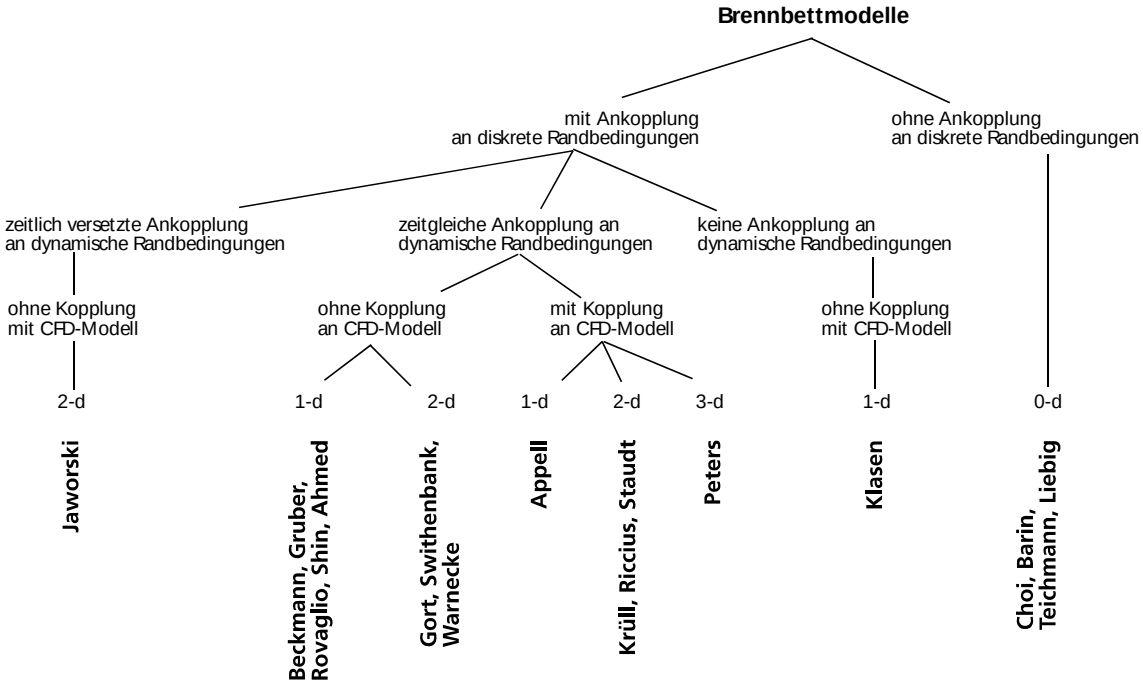

Abbildung 2.1: Brennbettmodelle [Wolf, 2005]

Die Darstellung in Abbildung 2.1 strukturiert die Brennbettmodelle nach Detaillierungsgrad, Randbedingungen und Dimensionalität.
In der ersten Strukturebene wird unterschieden, ob die Modelle Randbedingungen wie z.B. detaillierte Luftverteilung oder Abfallzusammensetzung berücksichtigen können. Können die Modelle diesen ersten wesentlichen Punkt nicht erfüllen (z.B. wenn die zugeführte Luft lediglich als eine Gesamtluft zugegeben wird), ist der praktische Einsatz kaum gegeben.
Die zweite Ebene gliedert entsprechend der Möglichkeiten der Modelle hinsichtlich „dynamischer Randbedingungen“. Einzelne Ansätze weisen dabei eine direkte Verknüpfung mit den technischen Randbedingungen (z.B. die Wechselwirkung zwischen der Gasphase und dem Brennbett) auf, andere Ansätze berücksichtigen keine diskreten Randbedingungen.

In der 3. Ebene wird die Möglichkeit der direkten Kopplung mit der CFD-Anwendung aufgezeigt.
Die letzte Unterteilung wird nach ihrer Dimensionalität vorgenommen:

- Integrale Modelle (Null-dimensional)
  auf der Basis von abgeschätzten/berechneten konstanten Wärme- und Konzentrationsfreisetzungsprofilen oder auf der Basis von vorgegebenen Messwerten
- Eindimensionale Modelle
  Erzeugung von Profilen in Abfalltransportrichtung
- Zweidimensionale Modelle:
  - Erzeugung von Profilen in Abfalltransportrichtung und Rostbreite, die durch asymmetrische Belegung hervorgerufen werden
  - Erzeugung von Profilen in Abfalltransportrichtung, wobei die Vorgänge in der Abfallschüttung (vertikal) Berücksichtigung finden
- Dreidimensionale Modelle:
  gesamte Abbrand- und Transportvorgänge in alle Richtungen

Wesentliche Einschränkung all dieser Modelle ist, dass sie spezialisiert sind auf ein enges Einsatzgebiet, welches Anlagen-typisch (z.B. Walzenrost) oder auch hinsichtlich der physikalisch-chemischen Modelle (z.B. Rührkessel-Charakteristik) bestimmt ist. Weiterhin ist eine praxisnahe Konfiguration über realistische Parameter wie Rostneigung, Roststab-Geometrie, Fahrweise des Rostes, vorhandene Stürze und Kopplung mit der detaillierten Luftverteilung bisher nicht möglich. Ferner ist eine detaillierte, instationäre Berechnung der Zustände auf dem Rost in Echtzeit oder schneller mit keinem der Modelle möglich. Zu guter Letzt ist in der Regel die Bedienung der Modelle nicht für Betreiber gemacht.

3 CombAte

Im vorliegenden Programm CombAte (= Combustion on Grate) sind die Erkenntnisse der letzen 15 Jahre zusammengetragen. Die Grundidee von Combate ist es, Rosttyp-unabhängig die Vorgänge auf einem Verbrennungsrost umfassend beschreiben zu können. Das aktuelle Implemantierung funktioniert gleichermaßen für Schürroste, Walzenroste etc., aber auch für z.B. Haufwerke auf unbewegten Rosten.

3.1.1 Grundkonfigurationen

Für die Konfiguration sind nur praxisrelevante Parameter erforderlich, die auch der interessierte Betreiber eingeben kann. Um erste schnelle Ergebnisse zu bekommen, wurde ein Konfigurationsassistent implementiert, der den Benutzer durch das Programm leitet. Aus der Entwicklung des Projektes hat sich ergeben, dass zumindest die Programmoberfläche in Englisch erstellt werden musste, während aber die Erklärungen in Deutsch geschrieben sind.

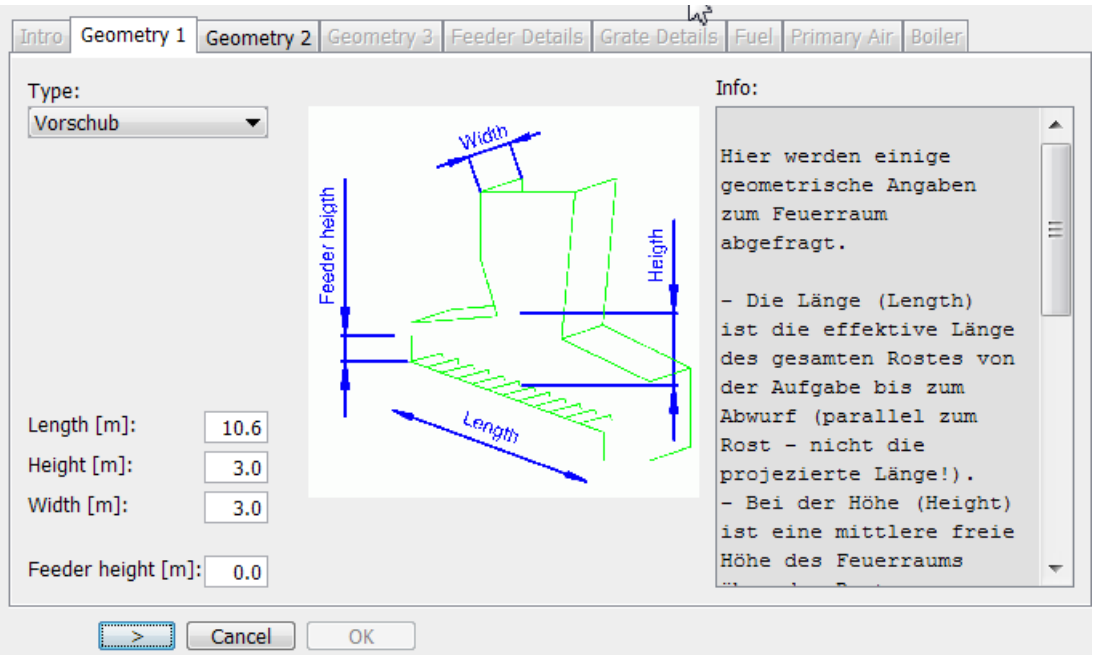

Abbildung 3.1: Konfigurationsassistent

Zur Konfiguration sind folgende Punkte zu definieren:

- Brennstoff
  - Heizwert

    - Massenstrom
    - Temperatur
    - Qualität (Aufteilung nach Abfallfraktionen)
- Brennkammer
    - Geometrische Abmessungen (aus Kesselschnitt)
    - Aufgabesystem
        - Höhe Aufgabetisch
        - Betriebsart
            - Anzahl der Doppelhübe
            - Bewegungsmuster (Vor-, Rückhub, Haltezeiten etc.)
    - Rostzonen
        - Anzahl und Ausdehnung
        - Rostwinkel
        - Abmessungen der Roststäbe/Walzen
        - Betriebsart
            - Anzahl der Doppelhübe / Umdrehungsgeschwindigkeit
            - Bewegungsmuster (Vor-, Rückhub, Haltezeiten etc.)
    - Unterwindzonen
        - Anzahl und Ausdehnung
        - Luft
            - Volumenstrom
            - Temperatur
            - Qualität (Spezies-Zusammensetzung)
- Weitere Luft (z.B.: Sekundärluft, Rezigas, Plattenluft, Falschluft)
    - Volumenstrom
    - Temperatur
    - Qualität

Um diese Parameter zusammenstellen zu können, ist kein besonderes Expertenwissen notwendig. Die geometrischen Daten können aus dem in jeder Anlage verfügbaren Kesselschnitt zusammengestellt werden. Die verfahrenstechnischen Daten sind in der Anlagenauslegung definiert oder während des Betriebs in der Warte abzulesen bzw. aus der Feuerungsregelung zu entnehmen.

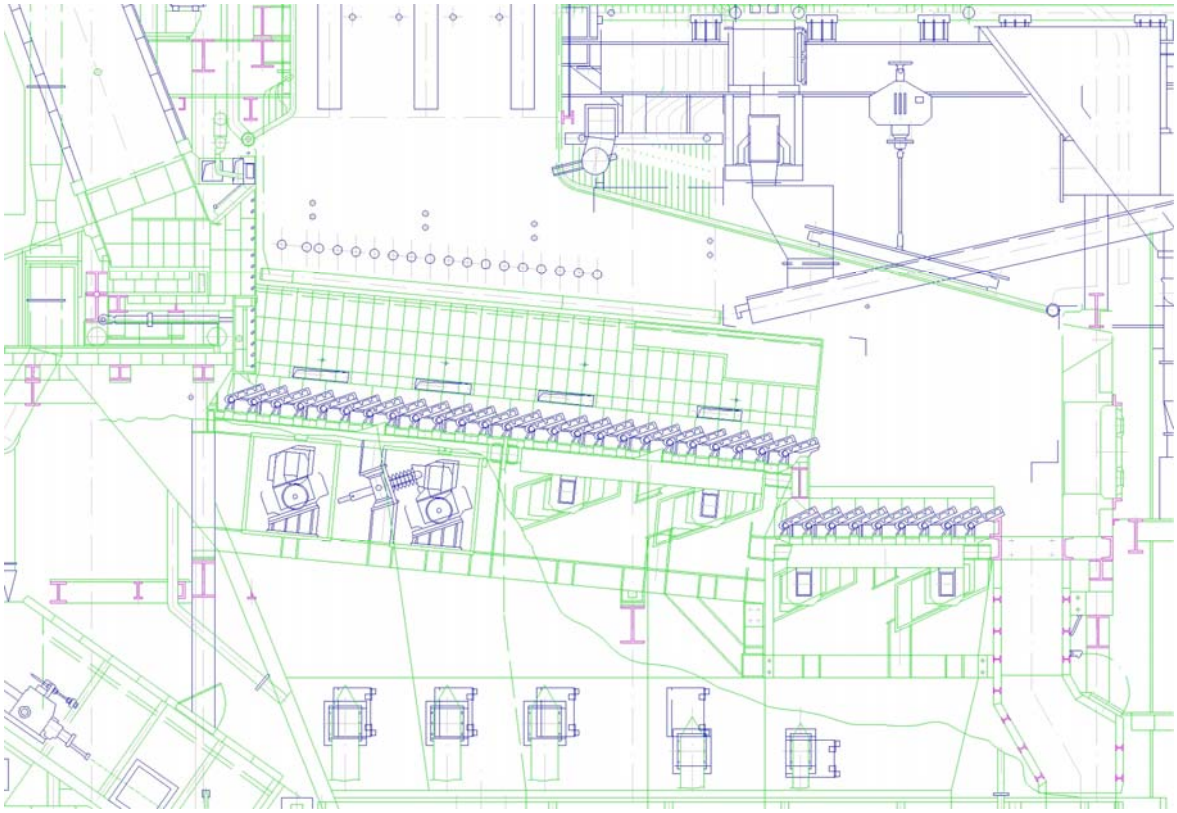

Abbildung 3.2: Rostsystem GKS

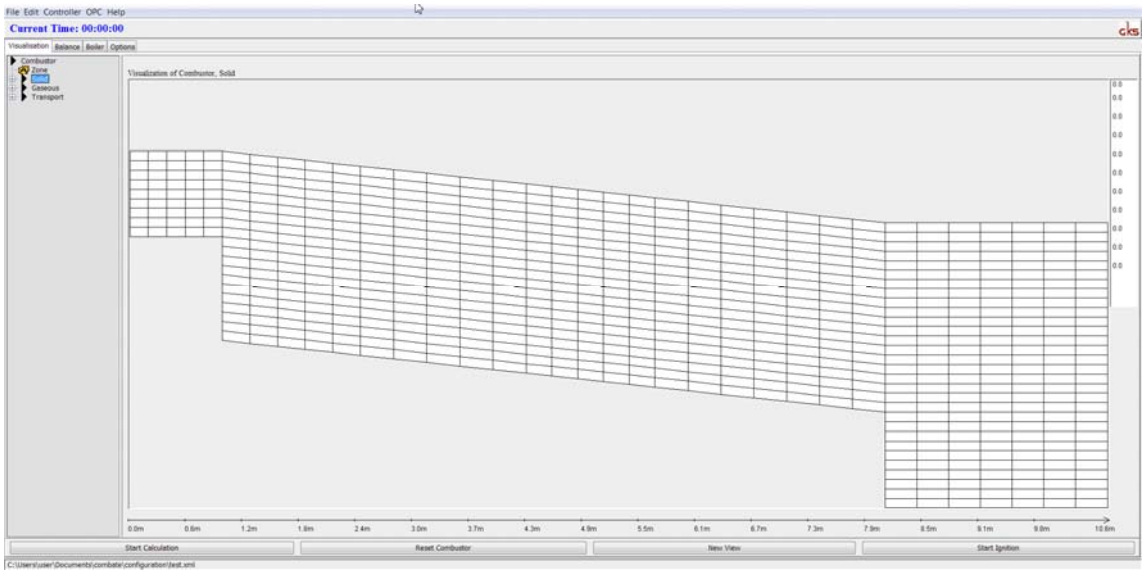

Abbildung 3.3: Rostsystem GKS

In Abbildung 3.3 ist die Feuerraumsituation des GKS dargestellt. Es ist der Aufgabetisch, die um 6° geneigten Rostabschnitte 1 und 2 sowie der horizontale Ausbrandrost 3 zu erkennen.

Nachdem das Rostsystem konfiguriert ist, kann der virtuelle Betrieb aufgenommen werden. Auch hier wurde die Praxisnähe berücksichtigt. Wie in der realen Anlage ist hier zunächst ein Brenner zu starten, der den Brennstoff auf Temperatur bringt und zündet. Wird der Brenner nicht gestartet, wird der kalte Müll über den Rost transportiert und unverbrannt am Rostende abgeworfen.

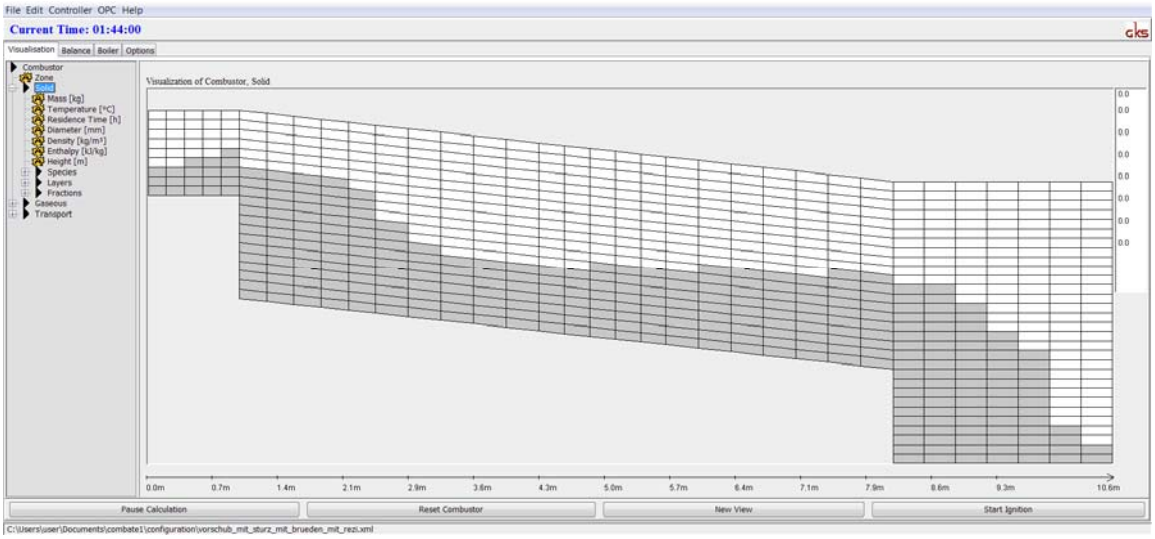

Abbildung 3.4: Überschütteter Rost ohne Zündung

Im Betrieb können zahlreiche Parameter dargestellt werden. In Abbildung 3.5 ist beispielhaft die Wasserverteilung dargestellt.

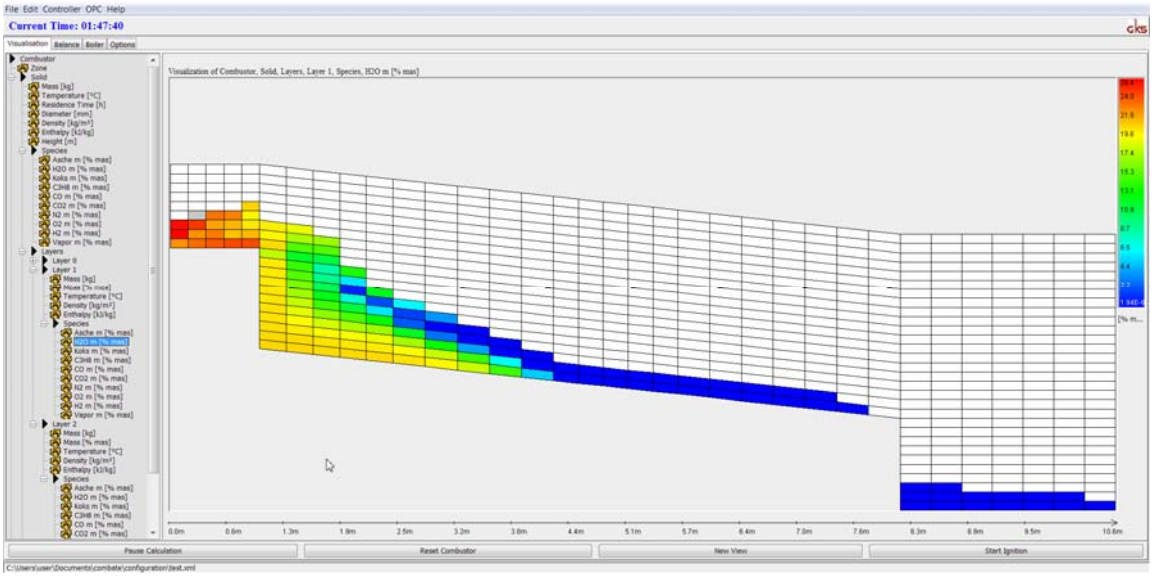

Abbildung 3.5: Wasserverteilung

Der Auswahlbaum auf der linken Seite zeigt die Detaillierungstiefe der Anzeigemöglichkeiten. So sind die Hauptbereiche:

- „Zone“ (Bereiche der Rost- bzw. Primärluftzonen)
- „Solid“ (Feststoffeigenschaften)
- „Gaseous“ (Gasphaseneigenschaften)
- „Transport“ (Bewegungsrichtungen des Feststoffes in x-, y- und z-Richtung).

Für Solid können die folgenden Eigenschaften visualisiert werden:

- Mass (Masse)
- Temperature (Temperatur)
- Residence Time (Verweilzeit)
- Diameter (Brennstoffpartikeldurchmesser)
- Density (Schüttdichte des Brennstoffes)
- Enthalpy (Enthalpie des Brennstoffes)
- Height (Höhe der Brennstoffschüttung)
- Species (Zusammensetzung: Asche, H2O, Koks, C3H8, CO, CO2, N2, O2, H2, Vapor (sublimierbares Wasser)
- Layer (Schicht: Brennstoffpartikel bestehen aus drei Schichten; 0 = innere, 1 = mittlere, 2 = äußere Schicht)
- Fractions (Brennstoff wird aus verschiedenen Fraktionen zusammengesetzt).

Für Gaseous wir zusätzlich die Reaction Temperature angegeben, die die adiabate Verbrennungstemperatur der Gasphase angibt. Sie ist wesentlich für die Rückstrahlung auf das Brennbett und damit auf die Freisetzung der Flüchtigen. Dafür entfallen Verweilzeit, Durchmesser, Dichte und Höhe.

Neben der reinen Darstellung des aktuellen Zustandes kann auch in den „Betrieb“ eingegriffen. Die Rechengeschwindigkeit liegt im Bereich von 20 bis 100-facher Echtzeit, ein Betriebstag kann also in wenigen Minuten simuliert werden.
Wie in der Warte können Werte vertrimmt und dessen Auswirkung aufgrund des hohen Echtzeit-Faktors direkt beobachtet werden. Für alle änderbaren Größen wie z.B. Geschwindigkeit des Aufgabeschiebers, der den Brennstoffstrom bestimmt, Unterwindmengen oder Rostgeschwindigkeiten sind Steuerelemente verfügbar.

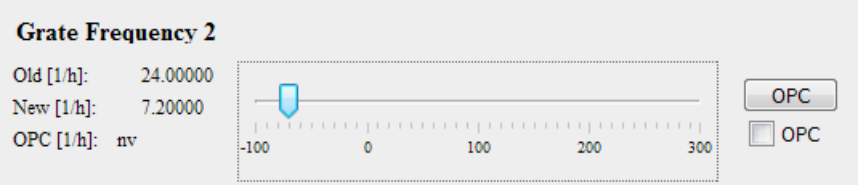

Abbildung 3.6: Vertrimmung der Doppelhübe auf Rost 2

Wird z.B. die Doppelhubzahl auf Rost 2 (2. Hälfte des schrägen Rostes) reduziert steigt die Schütthöhe in diesem Abschnitt.

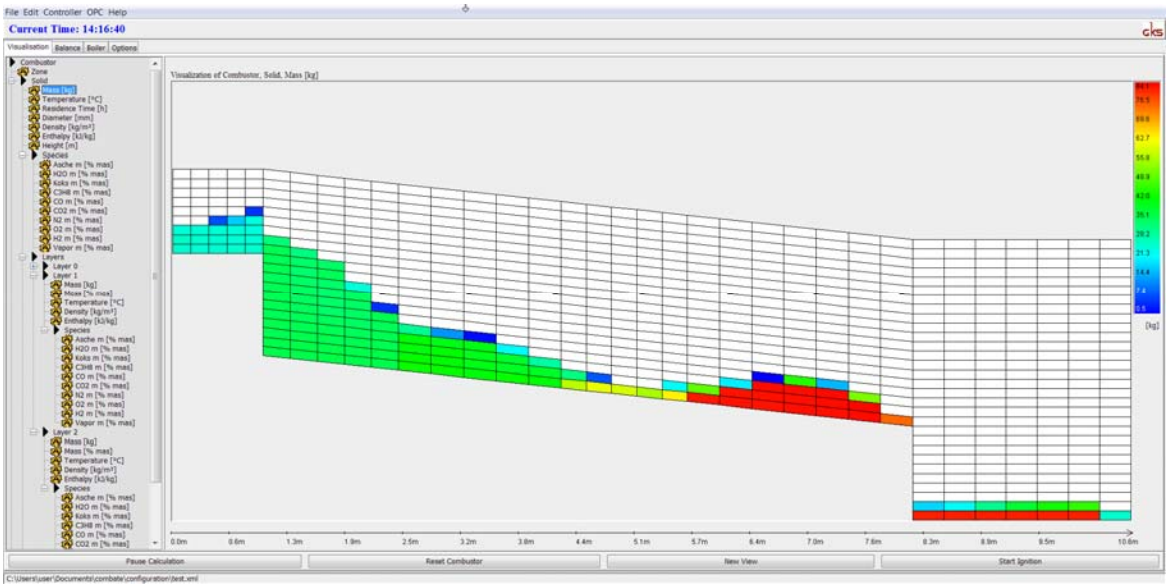

Abbildung 3.7: Auswirkung der Vertrimmung auf Rost 2 / größere Schütthöhe

Mit diesen Eingriffsmöglichkeiten kann das dynamische Verhalten untersucht werden. In ähnlicher Art und Weise kann beispielsweise die Veränderung der Primärluftmengen oder –temperaturen betrachtet und validiert werden.

3.1.2 Weitere Rostbauarten

In der Vorgänger-Version von CombAte wurden im Wesentlichen Vorschubroste behandelt. Mit Diesem Projekt wurde das System um Rückschub- und Walzenroste erweitert.

In Abbildung 3.8 ist ein typischer Rückschubrost abgebildet. Die Roststäbe arbeiten in Richtung der Aufgabe.

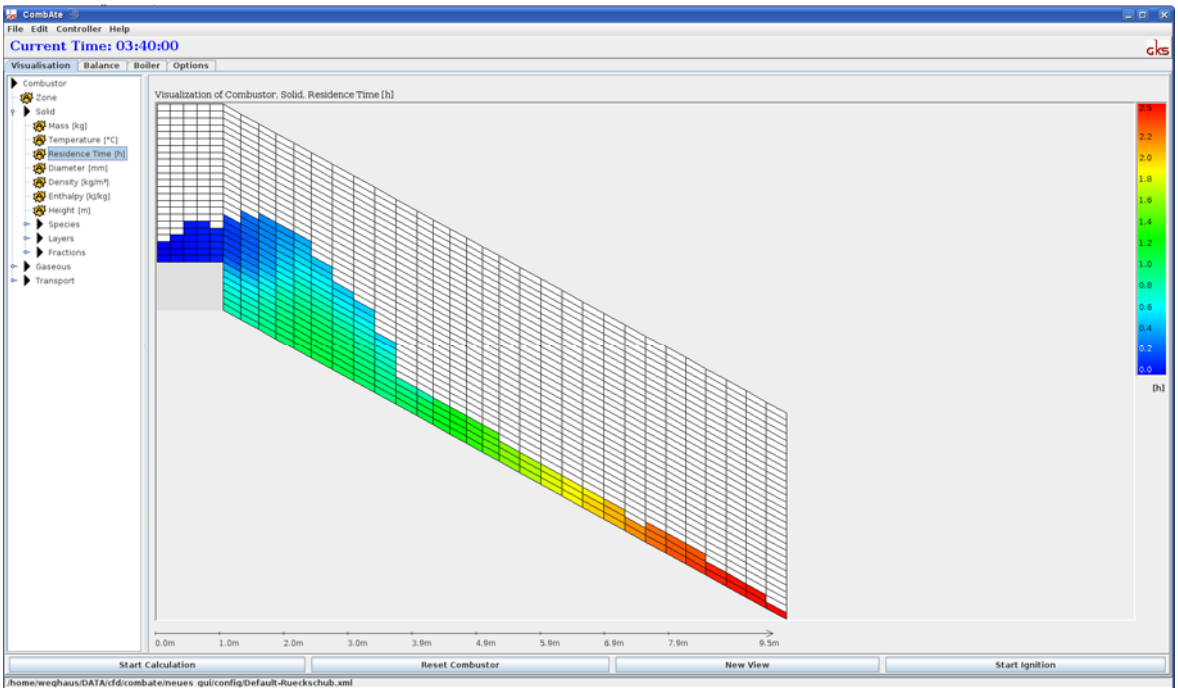

Abbildung 3.8: CombAte / Rückschubrost

Abbildung 3.9 gibt einen Walzenrost mit 6 Walzen wieder. Auf der Bergseite der Walzen kann schön die charakteristische Feststoff-Anhäufung beobachtet werden. Bei den letzten Rollen liegt die Walze talseitige nahezu frei (eine Beobachtung, die auch an realen Anlagen zu sehen ist).

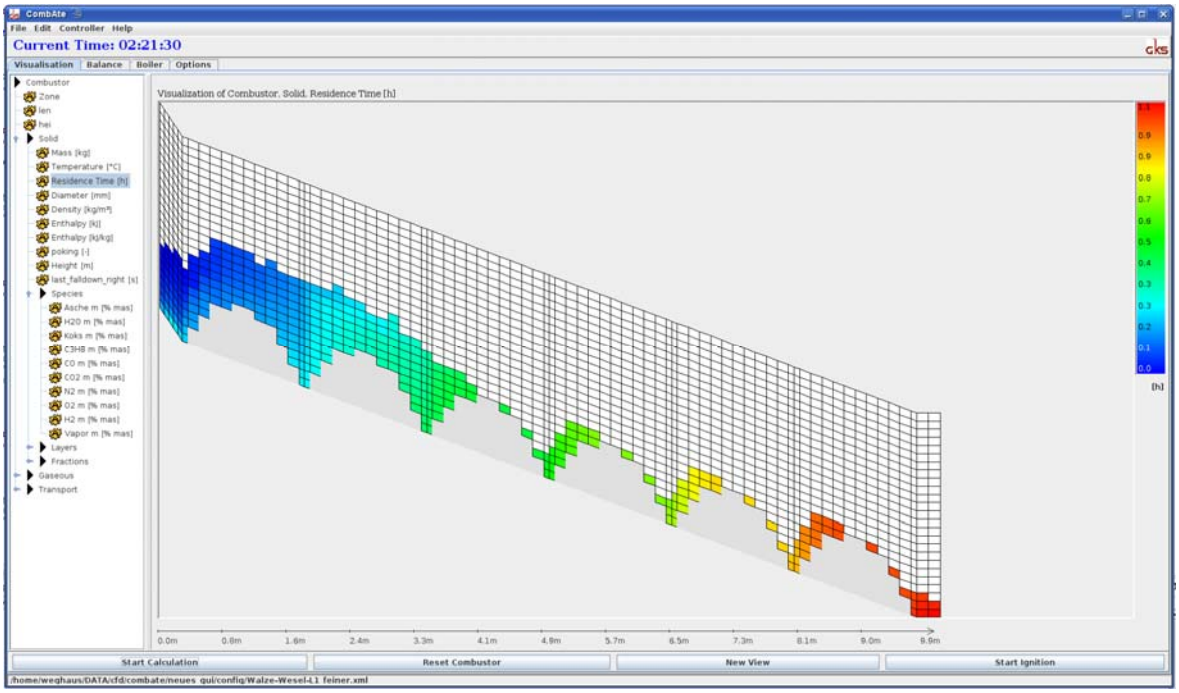

Abbildung 3.9: CombAte / Walzenrost

3.2 Validierung

Wesentlich für die Akzeptanz eines Modells ist die Validierung. Dazu werden Antworten aus dem Modell mit der Realität verglichen. Wie schon oben erwähnt, ist es schwierig und kostenintensiv verlässliche und umfassende Messdaten über Verteilungen innerhalb des Brennbettes zu bekommen. Dies erschwert die Validierung des Modells und führt zu einer erweiterten Beweisführung neben direkten Messungen von Größen. Es werden dazu sekundäre Effekte wie z.B. der Ausbrand oder die Verweilzeit verglichen. Gibt es aber eine Vielzahl von Übereinstimmungen von sekundären Effekten, müssen auch die grundlegenden Modelle mit hoher Wahrscheinlichkeit und in Abstimmung mit den direkt gemessenen Werten die Realität gut wiedergeben.
Validierungen wurden sowohl mit Laborversuchen als auch an realen Anlagen durchgeführt.

3.2.1 Laborversuche

Das Forschungszentrum Karlsruhe (FZK) hat einen Versuch zu Abbrand und Temperaturleitung in die Schüttung zur Verfügung gestellt [Gehrmann, 2009].

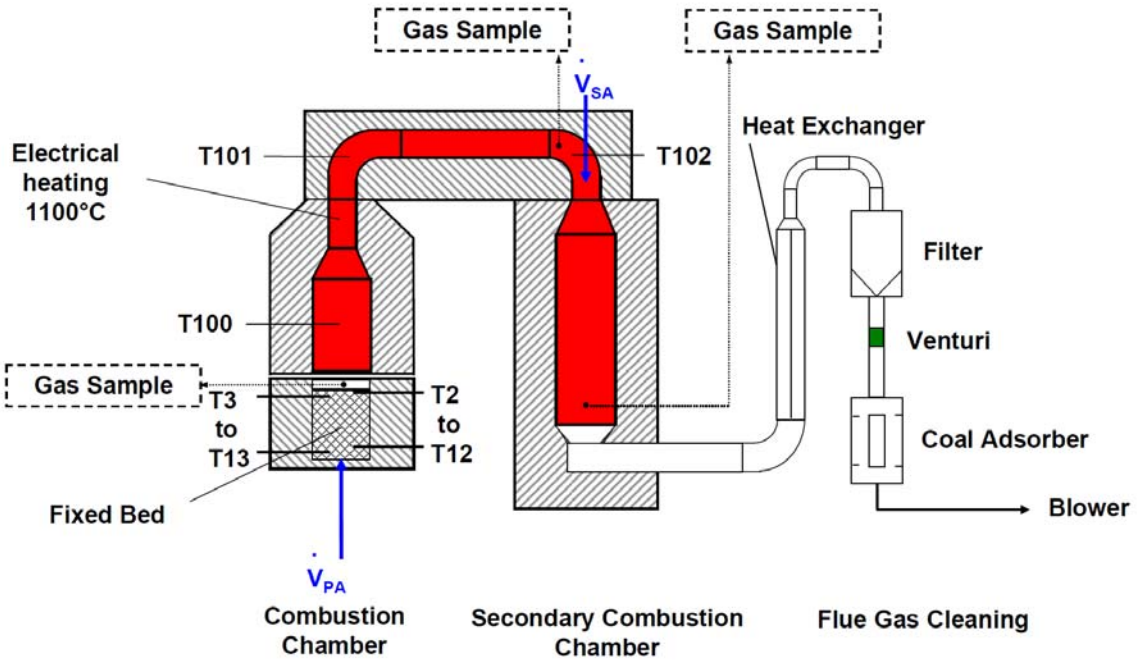

Abbildung 3.10: Labor-Festbettreaktor KLEAA

Die experimentellen Untersuchungen zur Charakterisierung der Abbrandeigenschaften fester Brennstoffe wurden am Festbettreaktor KLEAA durchgeführt. Das Volumen der zu untersuchenden Brennstoffschüttung beträgt ca. 10 l. Am Festbettreaktor KLEAA können somit im Vergleich zu thermogravimetrischen Verfahren, bei denen Probemengen im

Grammbereich eingesetzt werden, technische Brennstoffe mit einer Stückigkeit bis 10 cm untersucht werden. Der Feuerraum sowie die Nachbrennkammer können elektrisch auf maximal 1100 °C aufgeheizt werden. Die Primärluft wird von unten durch eine Sintermetallplatte zugeführt und kann auf maximal 300 °C vorgewärmt werden. Die Hauptkomponenten der Anlage sind schematisch in Abbildung 3.10 dargestellt. Zur Durchführung der Abbrandexperimente wird das verfahrbare Brennkammerunterteil, in dem sich die bei Umgebungstemperatur eingefüllte Brennstoffschüttung befindet, luftdicht mit dem Feuerraum verbunden. Die Brennstoffprobe wird durch die Strahlungswärme aus dem Feuerraum gezündet und brennt in entgegengesetzter Richtung zum Primärluftstrom ab. Die Konzentration der wesentlichen Rauchgaskomponenten wird an drei verschiedenen Messstellen entlang des Gasweges kontinuierlich gemessen (siehe Abbildung 3.11).

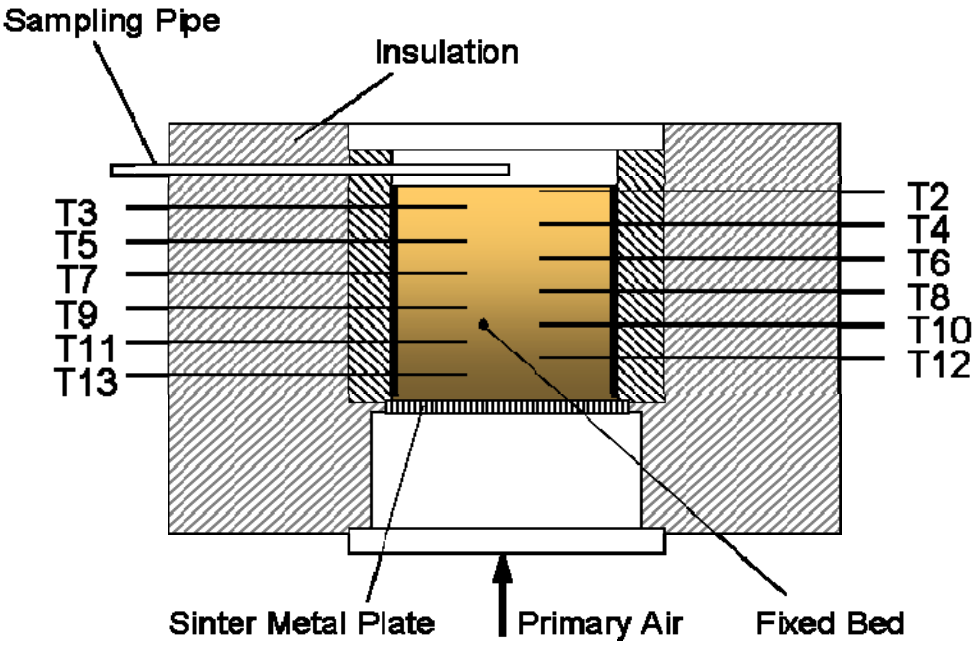

Abbildung 3.11: Anordnung der Thermoelemente

Die Temperaturen werden ortsaufgelöst im Gutbett über der gesamten Betthöhe erfasst. Der Brennstofftopf sitzt auf einer Wägezelle, mit der die zeitliche Massenabnahme des Brennstoffes bestimmt werden kann. Zur optischen Bewertung des Feststoffabbrandes ist über der Brennstoffschüttung eine Kamera angebracht.

Besonders interessant ist der Messschrieb der Temperaturen über die Zeit (Abbildung 3.12).

Die 12 Temperaturen zeigen zu Anfang des Versuchs eine einheitliche Temperatur (Umgebungstemperatur). Mit dem Start des Versuches wird eine Strahlungsquelle oberhalb der Schüttung aktiviert, die die Oberfläche des Brennstoffes aufheizt. Hierdurch wird dieser zuerst getrocknet und zündet dann, was in dem Temperaturanstieg von T2 zu sehen ist. Die Schicht unterhalb dieses Thermoelements bleibt nahezu bei Umgebungstemperatur. Nach einer gewissen Zeit ist die obere Schicht abgebrannt und die Zone bei T3 zündet. Wieder ist zu erkennen, dass die darunter liegende Zone kalt bleibt. Dieses Verhalten setzt sich bis zum Erreichen der untersten Zone fort.

Der Versuch zeigt zwei Effekte.

Zum einen wird deutlich, dass Zünden/Brennen in die Schüttung nicht stattfindet. Die Temperatur bleibt zwar nach Erreichen der 900 °C erhalten. Dies zeigt aber nicht, dass die Schüttung lokal bei der Temperatur verharrt und die Wärme nach unten in die Schüttung eindringt. Vielmehr ist nach dem Abbrand der entsprechenden Zone diese Zone leer, da der geringe Ascheanteil zusammenfällt, die Oberfläche der Schüttung nach unten wandert (die Videoaufnahmen bestätigen diese Aussage).

Zum anderen kann eine Aussage über die Wärmeleitung in die Schüttung getroffen werden. Es kann kein Anstieg der Temperatur der unteren Zonen vor Erreichen der Zündtemperatur festgestellt werden. Im vorliegenden Experiment wurde die Schüttung mit ca. 1 $^{m}/_{s}$ angeströmt. Dies bedeutet, dass die Wärmeleitung in die Schüttung kleiner als die Konvektion ist.

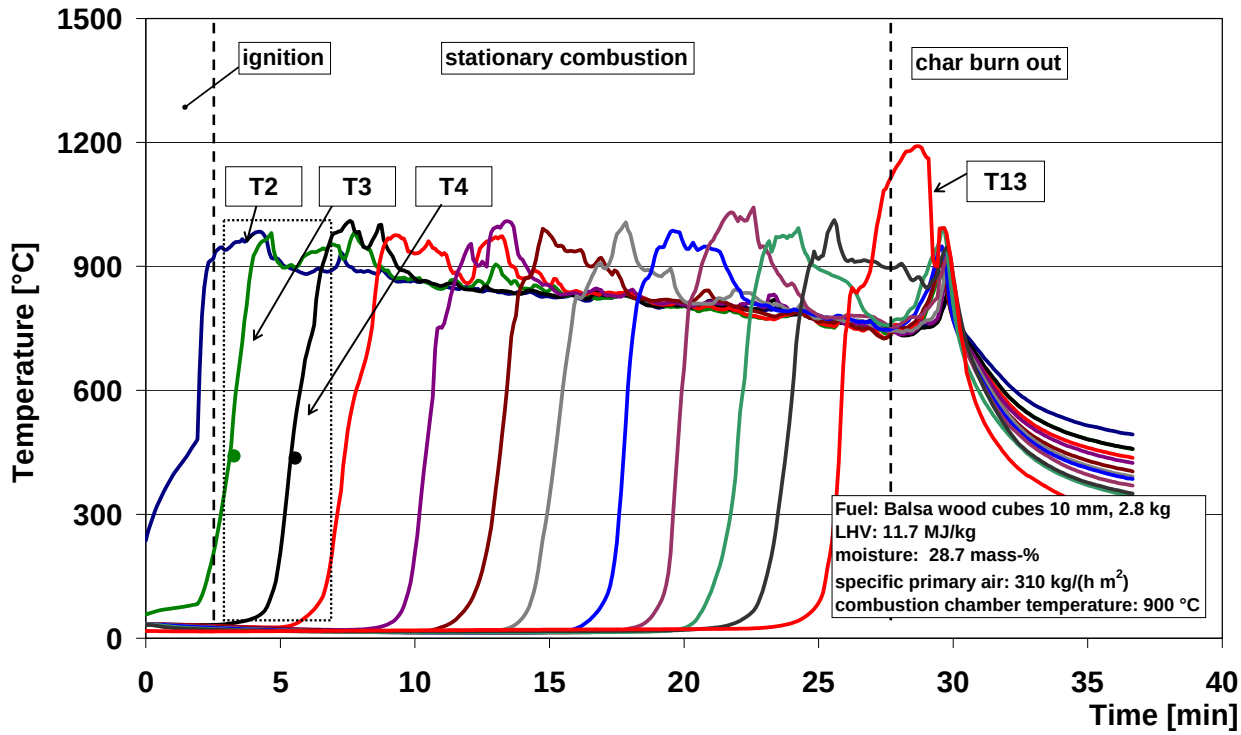

Abbildung 3.12: Temperaturen

Zur Validierung wurde das Experiment mit dem vorliegenden Programm „CombAte“ nachgerechnet.

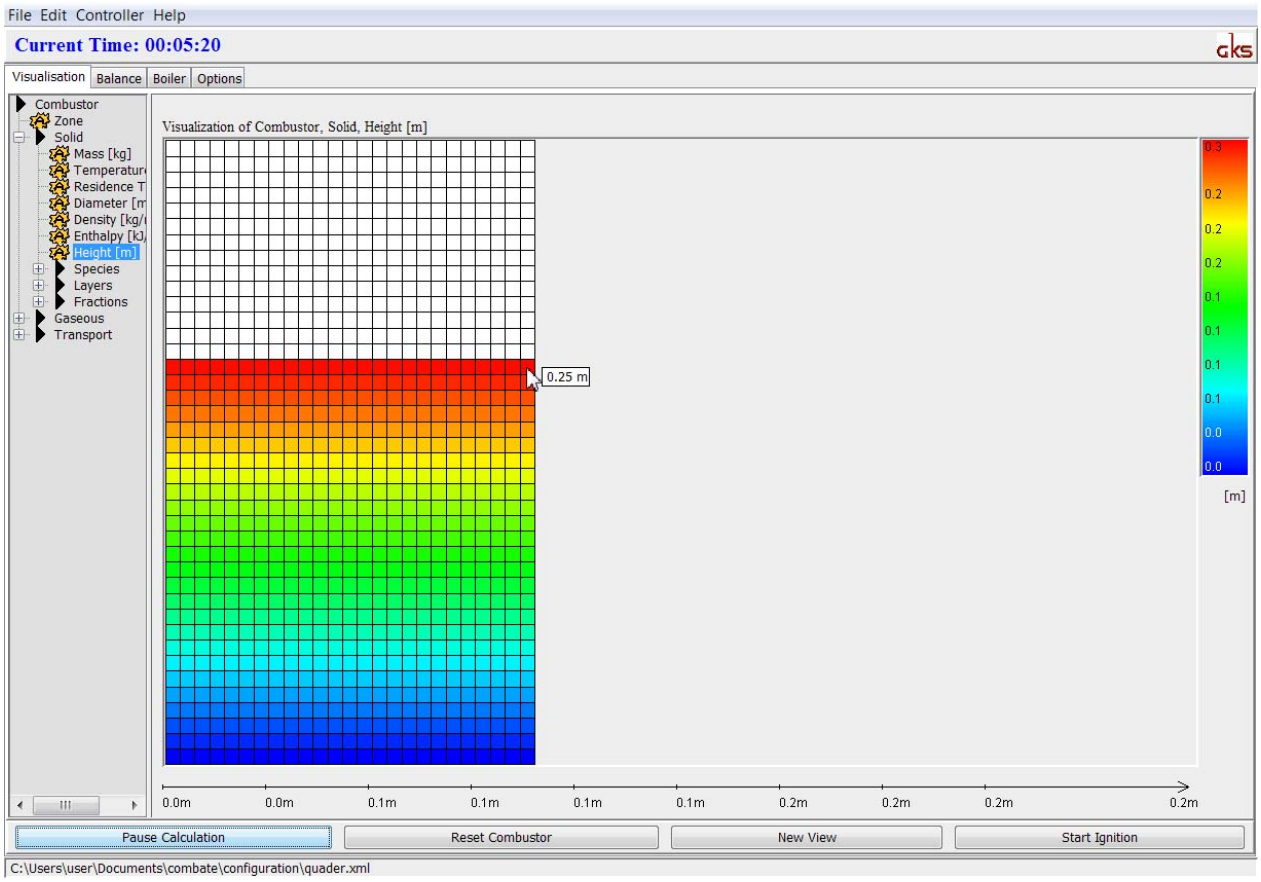

Abbildung 3.13: Versuch FZK in CombAte

Abbildung 3.13 zeigt die Anordnung des FZK-Versuches in CombAte. An der Oberfläche wurde analog zum Laborversuch eine Strahlungsquelle implementiert.

In nachfolgenden Abbildungen sind die Feststofftemperaturen aufgetragen, die unter den Temperaturen des verbrannten Gases liegen müssen.

Abbildung 3.14 zeigt die ersten 10 Minuten des Prozesses. Zu Anfang wird der Feststoff aufgeheizt. Mit Erreichen der Zündtemperatur des Feststoffes wandert die Oberfläche langsam nach unten. Ein Erwärmen der unteren Schichten kann nicht festgestellt werden.

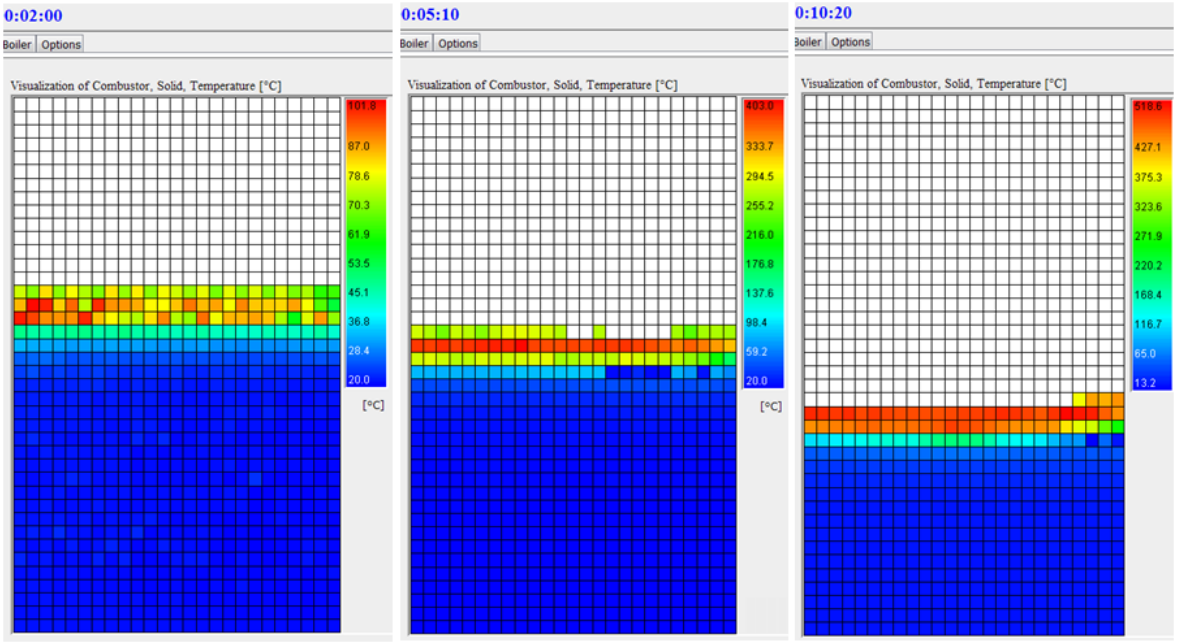

Abbildung 3.14: Versuch FZK in CombAte / Beginn

Nach 25 Minuten ist die Verbrennungszone am Boden angekommen, der Brennstoff ist umgesetzt. Die Verbleibende Asche wird weiter angestrahlt und erreicht nahezu die Temperatur der Strahlungsquelle. Vergleicht man die Zeit mit dem Plot in Abbildung 3.15, so kann eine sehr gute Übereinstimmung festgestellt werden.

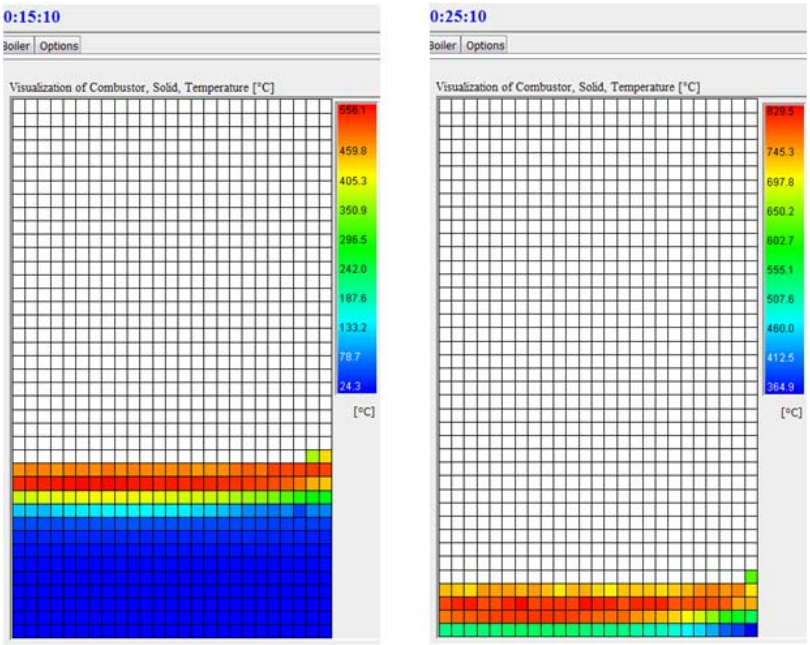

Abbildung 3.15: Versuch FZK in CombAte / 15 min und Versuchsende

Aus diesem Experiment können erste Rückschlüsse auf die Modellqualität für Strahlung, Wärmeleitung und Konvektion getroffen werden. Auch die Übereinstimmung der Ab-

brandgeschwindigkeit zeigt, dass Trocknung, Pyrolyse und Koksabbrand im Modell gut wiedergegeben werden.

3.2.2 Reale Anlage

Validierungen an realen Anlagen sind weitaus schwieriger.

Ein erster Versuch wurde mit der Verweilzeit auf dem sog. Ausbrandrost durchgeführt. Charakteristisch für diesen Bereich ist es, dass keine merklichen Flammen die Sicht behindern. Der Versuch gestaltet sich dadurch relativ einfach. Die geometrischen Abmessungen des Rostes sind bekannt. Durch die hinteren Schaugläser wird der Rost beobachtet. Findet sich ein Objekt wie z.B. eine Metalldose (siehe blaue Ellipse) am Anfang der Rostzone, wird die aktuelle Zeit festgehalten. Das Objekt wird beobachtet, bis es die betrachtete Zone verlässt. Es wird erneut die Zeit genommen. Die Differenz der beiden Zeiten ergibt die Verweilzeit in dieser Zone. Die Differenz von Zonenlänge und Verweilzeit ist die mittlere Geschwindigkeit in der Zone.

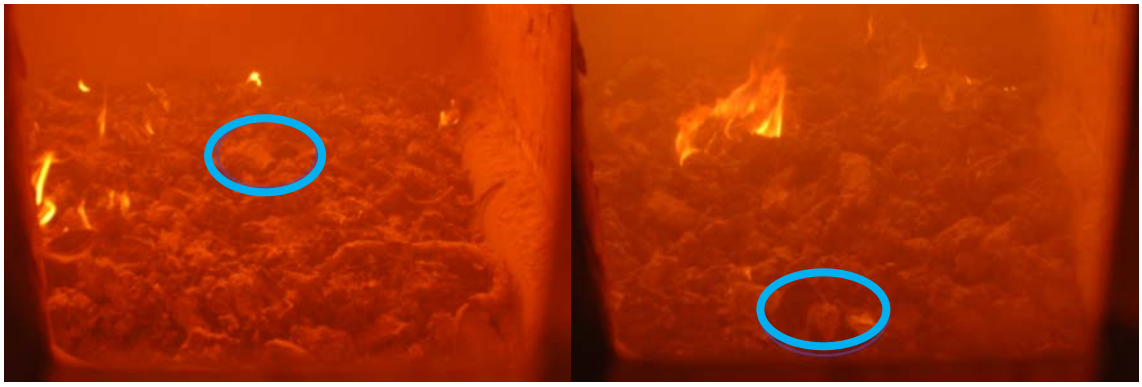

Abbildung 3.16: Versuch GKS / Verweilzeit in realer Anlage

Die gemessene Verweilzeit für diesen Rostabschnitt betrug ca. 30 min. Dieser Wert stimmt gut mit dem Wert aus der Simulation überein (Abbildung 3.17).

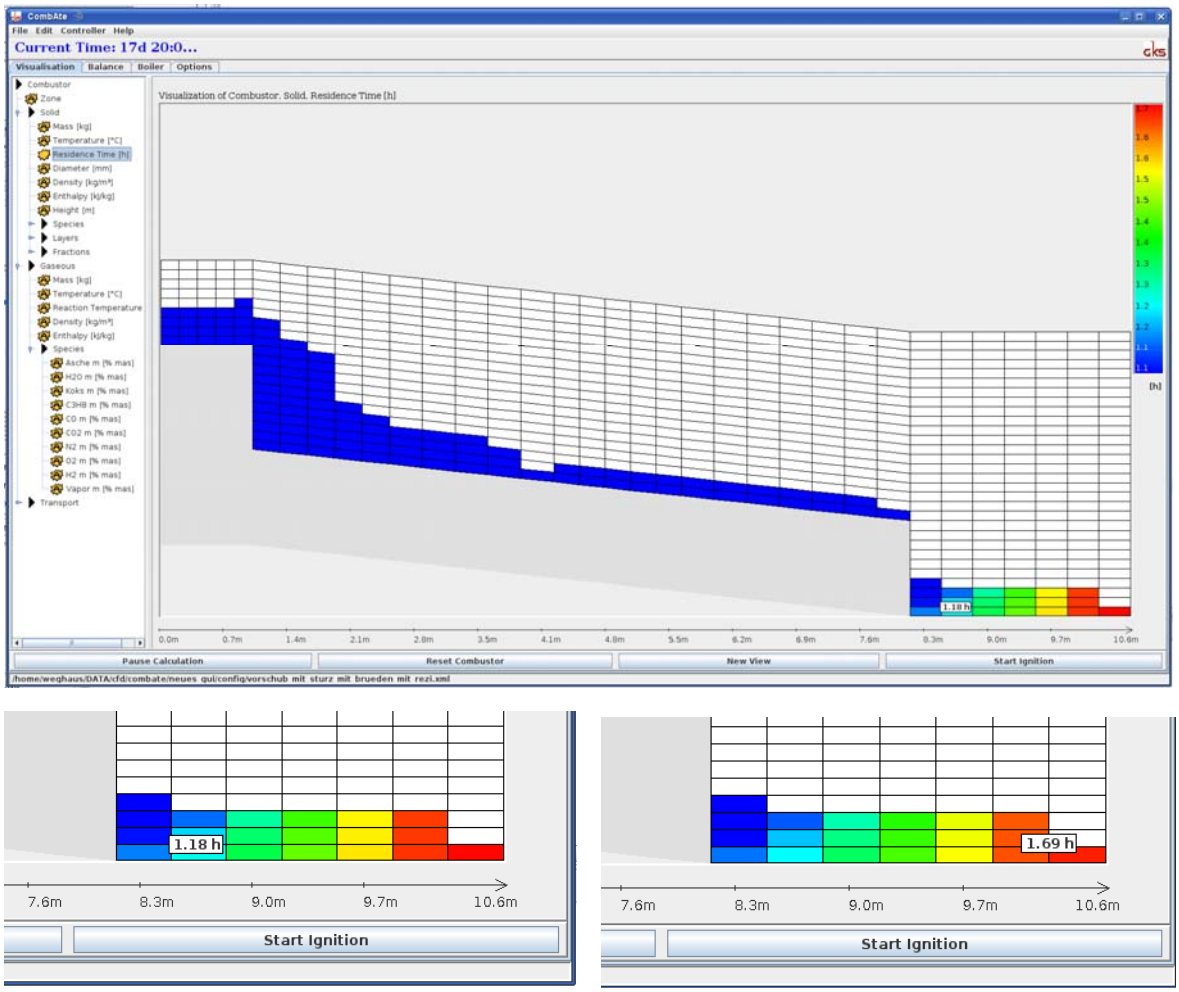

Abbildung 3.17: Versuch GKS / Verweilzeit und Schichthöhe (eine Zelle hat 10 cm Höhe) im Modell

Aus der korrekten Verweilzeit resultieren noch weitere Ergebnisse. Auf Rost 3 ist der Brennstoff nahezu komplett umgesetzt. Die Dichte der Schlacke ist bekannt, somit sollte auch die Schütthöhe in diesem Abschnitt korrekt sein. Die Simulation zeigt hier eine Schütthöhe von ca. 20-25 cm. In Abbildung 3.18 lassen sich die seitlichen Verschleißsteine erkennen. Diese Verschleißsteine sind rund 20 cm hoch. Bis zur Unterkante der Verschleißsteine sind es gemessen ab Mitte Oberfläche-Roststab noch einmal etwa 20 cm. Man erkennt, dass das Schlacke-Müll-Gemisch bis etwa an die Unterkante der Verschleißsteine reicht und damit rund 20-25 cm hoch liegt. Damit zeigt auch diese Validierung, dass das Modell eine gute Übereinstimmung mit der Realität hat.

Abbildung 3.18: Versuch GKS / Schütthöhe auf Rost 2

Weitere Validierungen zeigen ebenfalls eine gute Übereinstimmung zwischen Modell und realer Anlagen.

Im Rahmen eines vom Bayerischen Staatsministerium für Umwelt und Gesundheit geförderten Projektes wird darüber hinaus die Kopplung des Modells mit einer Feuerungsregelung realisiert. Daraus wird unter anderem erwartet, dass die Sensitivität des Modells in Relation zu der Sensitivität der realen Anlagen verglichen werden kann und daraus Rückschlüsse auf die Qualität des Modells gezogen werden können. Dem Bayerischen Staatsministerium für Umwelt und Gesundheit sei für seine Unterstützung sehr herzlich gedankt.

4 Kopplung von CFD mit CombAte

Wesentliches Ziel von CombAte ist es, verlässliche Randbedingungen für CFD-Berechnungen zu bekommen. Die direkte Kopplung von CombAte mit CFD garantiert verlässliche Randbedingungen für die aus dem Feststoff austretenden Stoffe. Das Entgasungsprofil wird nur durch Betriebsweise und vorliegende Geometrie der Feuerung bestimmt. Die Rückstrahlung aus dem Feuerraum bzw. dem 1. Kesselzug wird mit großer Genauigkeit durch das CFD-Programm übergeben.
Zusätzlich zu dem korrekten Entgasungsprofil berechnet CombAte auch die Schütthöhe des Brennbettes. Die Strömung in der Brennkammer wird nicht nur durch die Geometrie des Feuerraumes sondern auch durch die Schütthöhe des Brennstoffes bestimmt. Durch die Kopplung mit CombAte ist es nun möglich, die für den Betrieb korrekte Feuerraum-Geometrie zu berücksichtigen, was wiederum zu höherer Qualität der CFD-Ergebnisse führt.

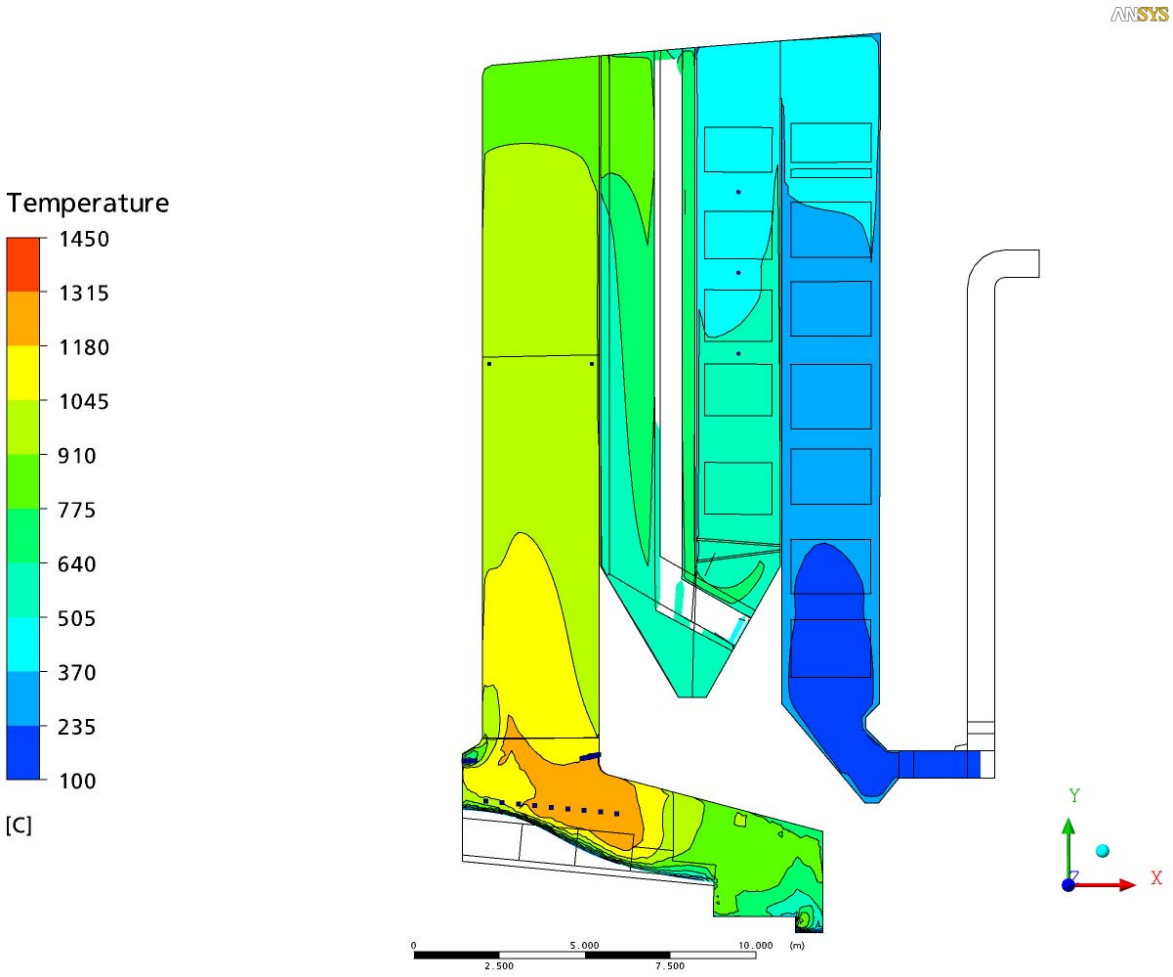

Abbildung 4.1: Kopplung CombAte mit CFD – Temperaturprofil im Mittenschnitt der Anlage

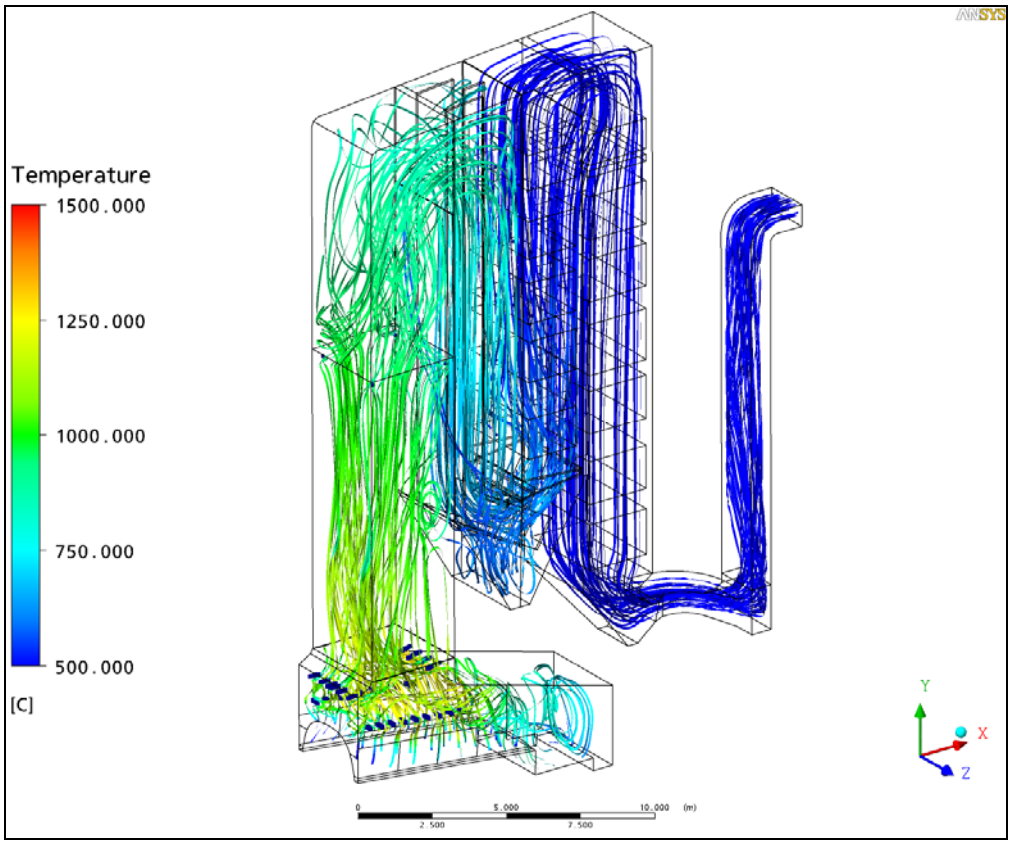

Abbildung 4.2: Kopplung CombAte mit CFD – Temperaturen entlang der Strombahnen von Partikeln

Je detaillierter die Simulation sein soll, desto empfindlicher reagiert sie auch auf die Randbedingungen. Beispielsweise zeigt eine Simulation der Verbrennung mit einer detaillierten CO-Kinetik mit etwa 30 Spezies und 50 Detailreaktionen bei der CO-Umsetzung eine sehr genaue Abbildung der lokalen CO-Konzentrationen (Abbildung 4.3). Es ist leicht verständlich, dass eine lokal unterschiedliche Freisetzung aus dem Brennbett eine komplett unterschiedliche Verteilung der CO-Spezies zur Folge hat.

Allerdings zeigt auch Abbildung 4.4, dass die Auswahl der Modelle bzw. die Implementierung detaillierterer Modelle einen erheblichen Einfluss auf die Ergebnisse haben können. Im Falle des CO wurde allerdings eine logarithmische Darstellung gewählt, bei der insbesondere im Bereich geringer Konzentrationen, wie sie zur Überwachung von Emissionen sinnvoll ist, ein besonders starker Unterschied zu erkennen ist, wenn man an den Vorgängen innerhalb des Kessels interessiert ist. Am Kesselende sind die Unterschiede jedoch marginal.

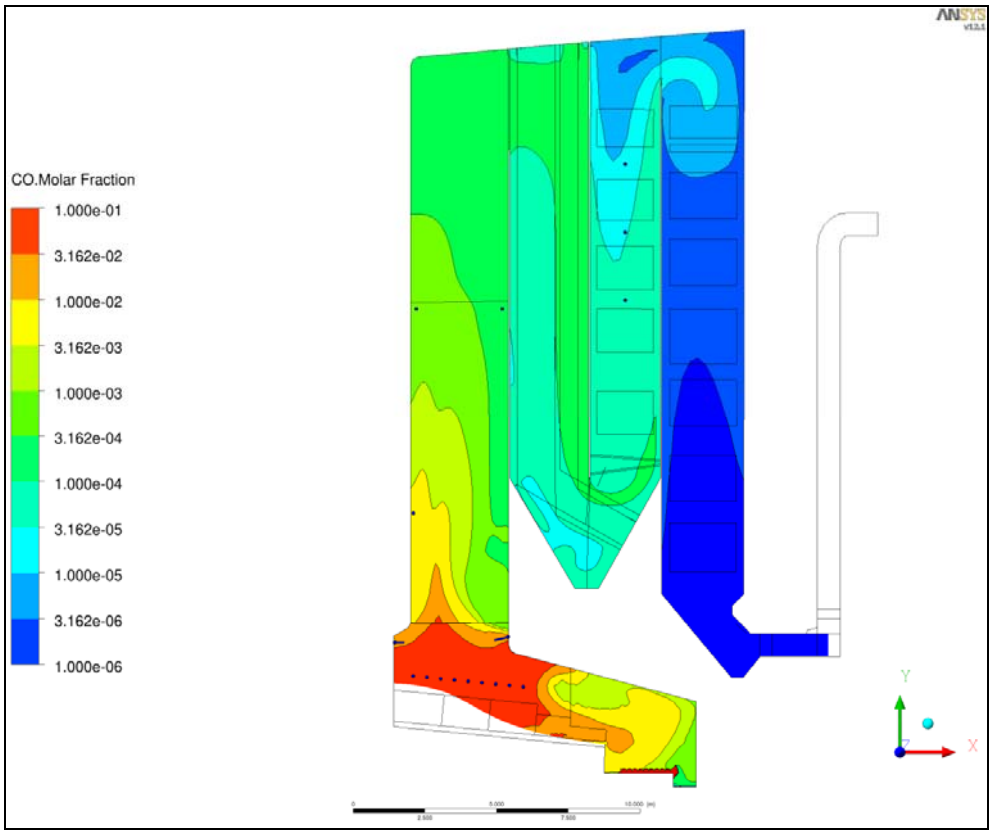

Abbildung 4.3: CO-Molanteile auf der Basis detaillierter Reaktionskinetik

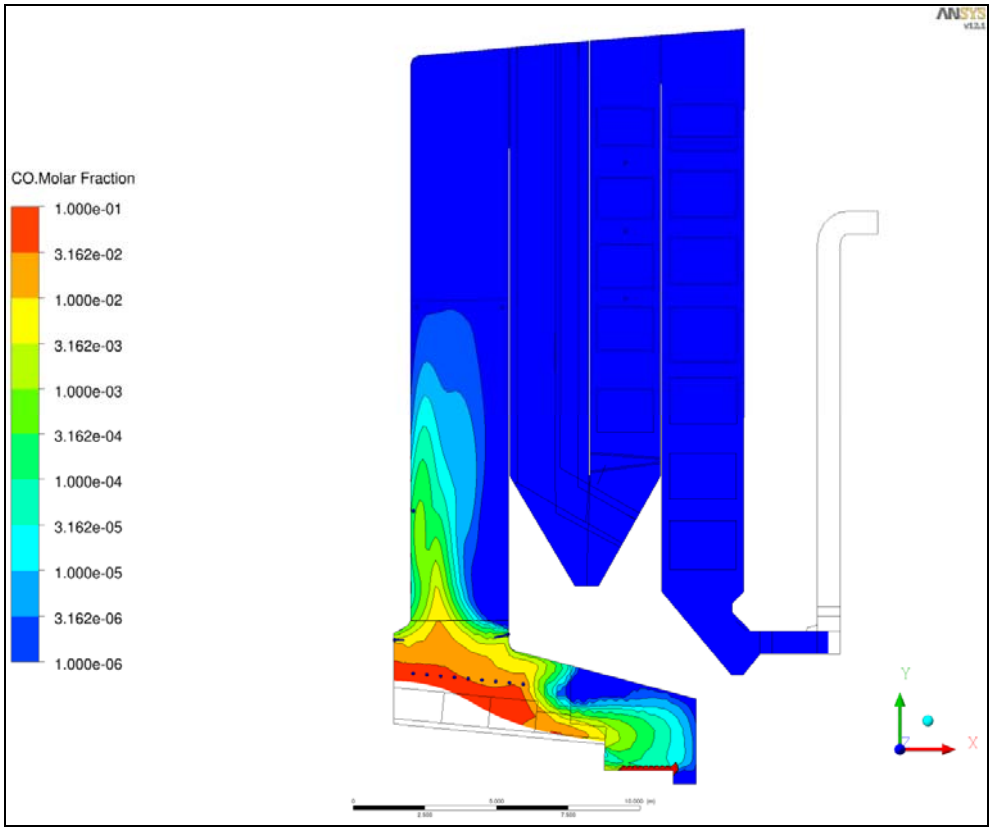

Abbildung 4.4: CO-Molanteile auf der Basis eine einfachen Reaktionskinetik bei gleichen Randbedingungen wie in Abbildung 4.3

5 Freisetzung von Chloriden

Ein weiterer wesentlicher Aspekt von CombAte ist der Beitrag zur Anlagenoptimierung. Insbesondere die Darstellung der Zusammenhänge mit der Korrosion ist eine wesentliche Entwicklungsmotivation gewesen. Erste Messungen der Gas- und Partikelphase im Brennraum sowie Messungen des Freisetzungsverhaltens von Chloriden und Sulfaten [Marzi, 2006] sollen in der nächsten Zeit in CombAte umgesetzt werden.

In vorläufigen Berechnungen wurde die Freisetzung von Alkalichloriden (KCl und NaCl) und von HCl in CombAte auf der Basis temperaturabhängiger Verdampfungsfunktionen implementiert. Dabei ist die Grundlage, dass HCl aus dem Brennstoff bei Temperaturen um 200 °C und die Alkalichloride ab 500 °C freigesetzt werden. Die Anteile in der Gasphase zeigt Abbildung 5.1 für die Alkalichloride und Abbildung 5.2 für HCl.

Auf Grund der notwendigen höheren Brennstoffpartikel-Temperatur, kommen die Alkalichloride erwartungsgemäß in einem weiter hinteren Bereich des Rostes als das im Allgemeinen von organischen Substanzen bei niedrigeren Temperaturen freigesetzte HCl. Grund dafür ist, dass die Brennstoffpartikel im vorderen Bereich des Rostes noch nicht die für die Freisetzung der Alkalien notwendigen Temperaturen erreicht haben.

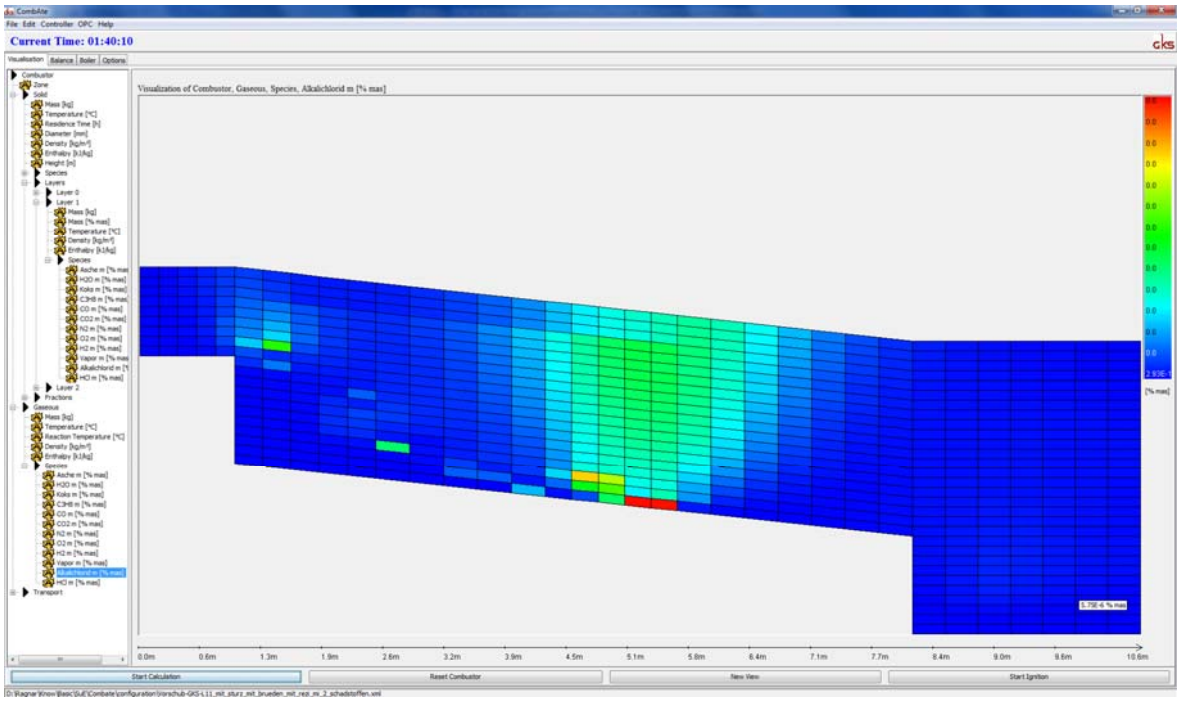

Abbildung 5.1: Vorläufige Berechnungen für die Freisetzung der Alkalichloride aus dem Brennbett in die Gasphase

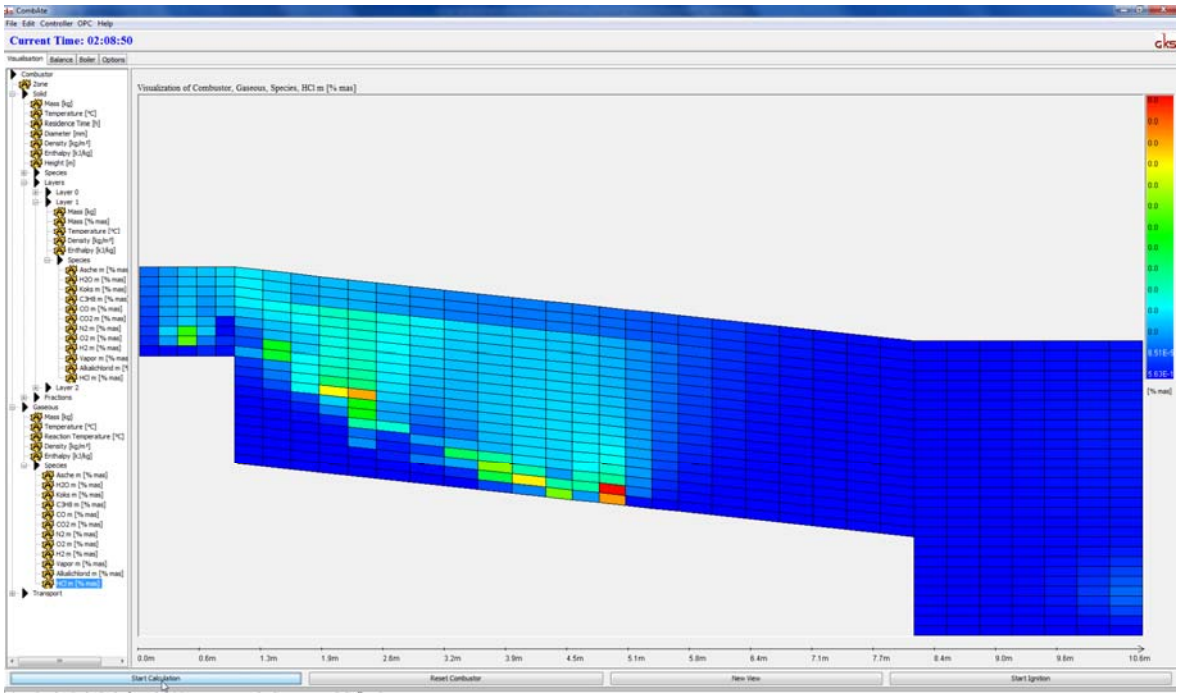

Abbildung 5.2: Vorläufige Berechnungen für die Freisetzung von HCl aus dem Brennbett in die Gasphase

Diese Untersuchungen sind in der nächsten Zeit Schwerpunkt der Erweiterung und Validierung des Programmes.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Der aktuelle Stand des Feuerungsprogrammes „CombAte“ gibt die Prozesse auf einem Verbrennungsrost sehr realitätsnah wieder. Nicht nur, dass zahlreiche Messwerte die Simulationen bestätigen, sondern gerade auch die instationären Berechnungen zeigen gute Übereinstimmungen mit dem Verhalten der realen Anlage. Es konnten sowohl Laborexperimente wie auch Vorgänge realer Anlagen in verlässlicher Weise nachgerechnet werden.

Diese Ergebnisse beziehen sich nicht nur auf eine einzige Anlage, sondern sie können auch auf andere Rosttypyen übertragen werden. Für Betreiber von Anlagen ist insbesondere wichtig, dass die Benutzung des Programmes lediglich die Kenntnis der konstruktiven und verfahrenstechnischen Kenngrößen erfordert und mehr oder weniger intuitiv benutzt werden kann. Das Programm selbst ist auf der Website des GKS

http://www.gks-sw.de

unter „Online Anwendungen“ zu finden. Ein jeder Interessierte ist aufgerufen durch konstruktives Feedback das Programm noch besser zu machen. Dies ist auch der Wunsch des Bayerischen Staatsministeriums für Umwelt und Gesundheit, dem die Verfügbarkeit eines derartigen „Tool für Alle im Web“ am Herzen lag und ohne dessen Förderung eine solche Arbeit nicht möglich gewesen wäre. Zusätzlich zu der im Internet leicht nutzbaren Version gibt es noch eine „Experten-Version“, in der es noch größere Freiheitsgrad z.B. bezüglich der möglichen Rost- und Feuerungsgeometrien aber auch weiterer Features gibt, die aber nicht ohne detaillierte Programmkenntnisse bedient werden kann.

Vorrangig ist CombAte als Werkzeug zur Schulung und zum Verständnisgewinn entwickelt worden. Daneben dient es dem Einsatz als Generator für CFD-Randbedingungen.

Aber auch der direkte Einsatz in modernen Feuerungsregelungen wurde schon umgesetzt. Dabei wurde eine OPC-Kopplung des Modells mit der Feuerungsregelung realisiert und die zusätzlichen Informationen aus dem Modell, beispielsweise die Schichthöhen des Brennbettes, werden zur Vermeidung von Überschüttungen verwendet.

Beläge und Korrosion in Großfeuerungsanlagen werden im Wesentlichen durch die Freisetzungen aus dem Brennbett bestimmt. Dies wird in die weitere Entwicklung von CombAte verstärkt einfließen. Erste Konzepte zur Implementierung von Modulen zur korrosionsrelevanten Schadstofffreisetzung sind bereits testweise implementiert worden (HCl und Alkalichloride). Hinsichtlich des Partikelaustrages aus dem Brennbett wurden umfangreiche Messungen am GKS durchgeführt. Diese Erkenntnisse sollen in den nächsten Wochen als Flugpartikel-Modell in CombAte eingepflegt werden. Damit soll die geschlossene Darstellung vom Brennstoff bis zum korrodierenden Rohr in einem Programmpaket (CombAte + CFD) realisiert werden. CombAte wird also in der nächsten Zeit nicht „statisch“ bleiben, sondern in den nächsten Monaten noch weitere Möglichkeiten erhalten.

7 Literatur

[GEHRMANN, 2009] GEHRMANN, H.-J.; KOLB, T.; SEIFERT, H.: Charakterisierung der verbrennungstechnischen Eigenschaften fester Brennstoffe. Interner Bericht des FZK. Karlsruhe: FZK, 2009

[MARZI, 2006] MARZI, T.; WARNECKE, R.: Freisetzungsverhalten unterschiedlicher Abfallfraktionen und deren Chlor- und Schwefelfracht zur Beschreibung der Vorgänge im Feuerraum. In: VDI-Wissensforum (Hrsg.): *Beläge und Korrosion, Verfahrenstechnik und Konstruktion in Großfeuerungsanlagen – Seminar am 25.-26. April 2006 in Würzburg.* Düsseldorf: VDI-Verlag, 2006

[WOLF, 2005] WOLF, CHR.: Erstellung eines Modells der Verbrennung von Abfall auf Rostsystemen unter besonderer Berücksichtigung der Vermischung -
ein Beitrag zur Simulation von Abfallverbrennungsanlagen – Dissertation an der Universität-Duisburg-Essen. Essen, 2005