



**Gemeinschaftskraftwerk  
Schweinfurt GmbH**

GKS • Hafenstraße 30 • 97424 Schweinfurt

---

Manuskript

# **Brennstoff- und Rostmodell zur Beschreibung der Vor- gänge im Feuerraum - GKS-Feuerungsmodell -**

Erstellt von:  
Dr. Ragnar Warnecke  
Dr. Thomas Marzi  
Dipl.-Ing. Martin Weghaus  
Dr. Siegmund Wirtz

Erstellt für:  
VDI-Wissensforum - Seminar in Frankfurt/Main  
am 12.-13. Juni 2007

---

# Inhalt

<b>1</b>	<b>Einleitung .....</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Feuerungsmodell .....</b>	<b>4</b>
2.1	Auswahl des Modelltyps .....	4
2.2	Module des Feuerungsmodells .....	6
2.2.1	Randbedingungen.....	6
2.2.2	Zustandsänderungen .....	10
2.2.3	Zustand.....	10
<b>3</b>	<b>Feuerraum-Simulationen .....</b>	<b>10</b>
3.1	Statisches Beispiel .....	10
3.2	Instationäre Veränderungen.....	18
<b>4</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>20</b>

# 1 Einleitung

Die Vorgänge im Feuerraum sind wesentliche Ursache für die Prozesse in den nachgelagerten Anlagenkomponenten. Dies betrifft u.a. die Wärmetechnik ebenso wie die Schadstoffbildung von z.B. CO, NO<sub>x</sub>, aber auch von korrosionsfördernden Spezies wie Chloride. Allerdings sind nicht alle Probleme in thermischen Behandlungsanlagen der Feuerung zuzuordnen. Auch die nachgelagerten Aggregate bieten genügend Potential für Fehler.

Das Potential einer Verbesserung der Feuerung, ist allein schon Grund genug zu versuchen, die Vorgänge in der Feuerung aufzudecken und zu beschreiben. Möglicherweise kann, wie jetzt schon bei der feuerungsseitigen CO- und NO<sub>x</sub>-Minderung, auch die Korrosion und Belagsbildung durch primäre, d.h. feuerungsseitige, Maßnahmen vermindert werden. Derartige Maßnahmen werden teilweise schon von Anbietern versprochen, jedoch sind die meisten Realisierungen nicht erfolgreich gewesen, d.h. statistisch ist der Umbau einer Feuerung im Bezug auf eine Verbesserung hinsichtlich Korrosion und Verschmutzung nicht erfolgreicher als der Neubau von Anlagen. Auch bei letzteren hat jeder Anlagenbauer „gute“ und „schlechte“ Anlagen, ohne wirklich zu wissen, wo die Ursachen für den Erfolg oder Misserfolg liegen.

Hoffnung gibt die Tatsache, dass es Anlagen gibt, die nahezu störungsfrei laufen. Eine aufwändige Auswertung konstruktiver und verfahrenstechnischer Parameter mit multivariaten, statistischen Methoden hat noch kein eindeutiges Ergebnis einer „optimalen“ Anlage liefern können. Möglicherweise werden die wirklich signifikanten Daten im Rahmen der konventionellen Verfahrenstechnik und Konstruktion nicht aufgenommen. Daher ist ein alternativer Lösungsweg die Entwicklung eines Feuerungsmodells, mit dem ggf. diese relevanten Parameter deutlich gemacht werden können.

Dieses Feuerungsmodell soll allgemein zugänglich werden. Für eine hohe Akzeptanz sollen die besten Teilmodelle verschiedener Entwickler in dieses Modell integriert werden. Dafür besteht bereits eine Zusammenarbeit zwischen GKS, Lehrstuhl für Energieverfahrenstechnik der Universität Bochum und FhG-Institut Umsicht, Oberhausen, sowie ein Gedankenaustausch mit den Firmen Fisia-Babcock sowie Lentjes.

## 2 Feuerungsmodell

### 2.1 Auswahl des Modelltyps

Die modellhafte Darstellung in der Verfahrenstechnik greift auf zwei Modellvarianten zu:

1. Rührkessel-Modell
2. Kolbenströmungs-Modell.

In thermo-chemischen Prozessen hat sich insbesondere das **Rührkessel-Modell** bewährt. Durch Kopplung mehrerer Rührkessel („Rührkessel-Kaskade“) kann auch ein Kolbenströmungs-Modell mit Hilfe des Rührkessel-Modells abgebildet werden. Insgesamt weist das Rührkessel-Modell eine größere Flexibilität auf und wurde daher für die nachfolgende Modellbildung ausgewählt.

Für die Berechnung gibt es die Möglichkeiten:

1. Analytische Lösung
2. Diskretisierte Lösung
  - a. Gekoppelte, differenzielle Gleichungen
  - b. Iterative Differenzen-Gleichungen

Da eine analytische Lösung bei den komplexen Vorgängen im Feuerraum nicht möglich ist, wird ein Lösungsweg über eine sukzessive, partielle Beschreibung der Vorgänge angestrebt. Dies führt auf eine iterative Lösung, die in jedem Rührkessel eine zeitliche Veränderung beschreibt. Durch Kaskadierung von vielen Rührkesseln und Änderungen im Rahmen kleiner Zeitschritte kann eine Lösung mit **iterativen Differenzen-Gleichungen** herbeigeführt werden.

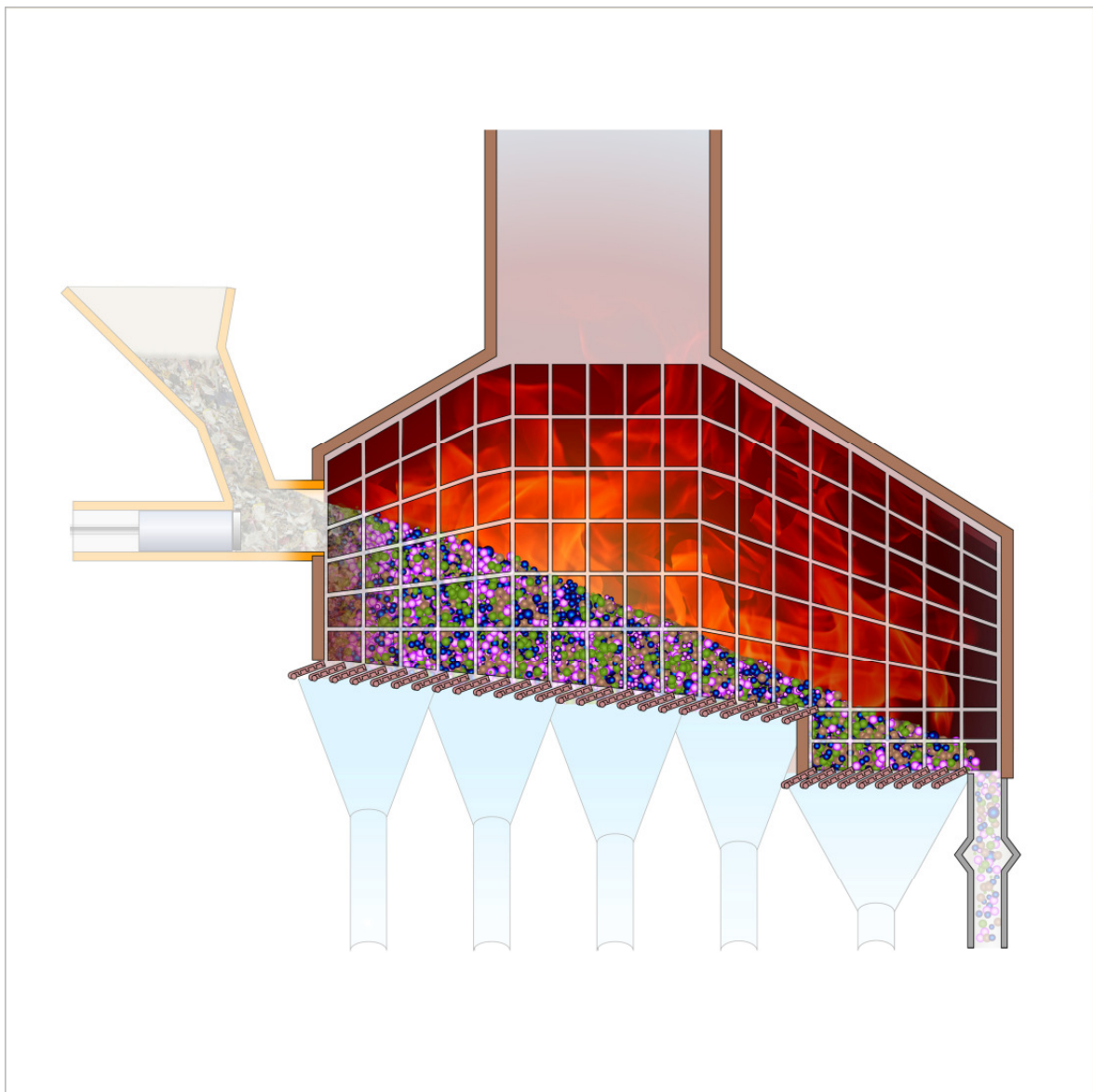
Um die lokalen Vorgänge beschreiben zu können, muss der Feuerraum in kleine Einheiten aufgeteilt werden. Diese Einheiten oder auch Zellen müssen so klein gewählt werden, dass man homogene Verhältnisse in dieser Zelle erwarten kann. Allerdings können auch nicht unendlich viele Zellen angesetzt werden, da die Berechnung jeder Zelle eine gewisse Zeit in Anspruch nimmt und somit mit zunehmender Zellenanzahl die Rechenzeit zunimmt. Es ist also ein geeigneter Kompromiss zu finden.

Es ist also ein Netz, d.h. Gesamtheit aller Zellen, die das Rechengebiet beschreiben, zu finden, dass den Anforderungen an Genauigkeit und Rechengeschwindigkeit genügt. Für den vorliegenden Ansatz wählen wir ein strukturiertes Netz. Dies bedeutet, dass die einzelnen Zellen über Laufvariablen in den 3 Koordinaten-Richtungen angesprochen werden, können. Möchte man z.B. in einer beliebigen Zelle wissen, wie bestimmte Werte in Zellen in Flussrichtung sind, so kann auf diese Werte durch Erhöhung der Laufvariable der gewünschten Richtung zugreifen.

Der in **Abbildung 1** dargestellte Feuerraum wird sich nach der Diskretisierung als Summe einzelner Zellen darstellen, die den Feuerraum in seinen geometrischen Ausmaßen mehr oder weniger genau wiedergeben. Für jede einzelne Zelle muss eine Beschreibung der darin ablaufenden chemischen und physikalischen Vorgänge erfolgen.

Gegenüber einer CFD-Simulation können in diesem Modell nicht Millionen von Zellen verwandt werden, sondern nur einige Hundert, um dem Ziel einer sehr kurzen Rechenzeit von höchstens wenigen Minuten, entsprechend einem Rechenzeit- zu Echtzeit-Verhältnis von 10 : 1 bis 50 : 1, gerecht zu werden. Bei Realisierung dieser kurzen Zeiträume können drei Anforderungen an das Programm erfüllt werden:

1. Test- und Schulungs-Programm zur Steigerung des Verständnisses der Feuerung
2. Startwertberechnungen für die direkte Kopplung mit CFD-Programmen
3. Modellbasierte Ankopplung an die Feuerungsregelung.



**Abbildung 1:** „Diskretisierter“ Feuerraum

## 2.2 Module des Feuerungsmodells

Beim gewählten Modelltyp sind drei Bereiche zu definieren:

1. Randbedingungen (Startwerte)
2. Zustandsänderung (dynamisches Modell)
3. Zustand (als neuer Zustand nach Zustandsänderung).

Eine Übersicht über diese drei Bereiche und die darin zu definierenden Eigenschaften gibt Abbildung 2.

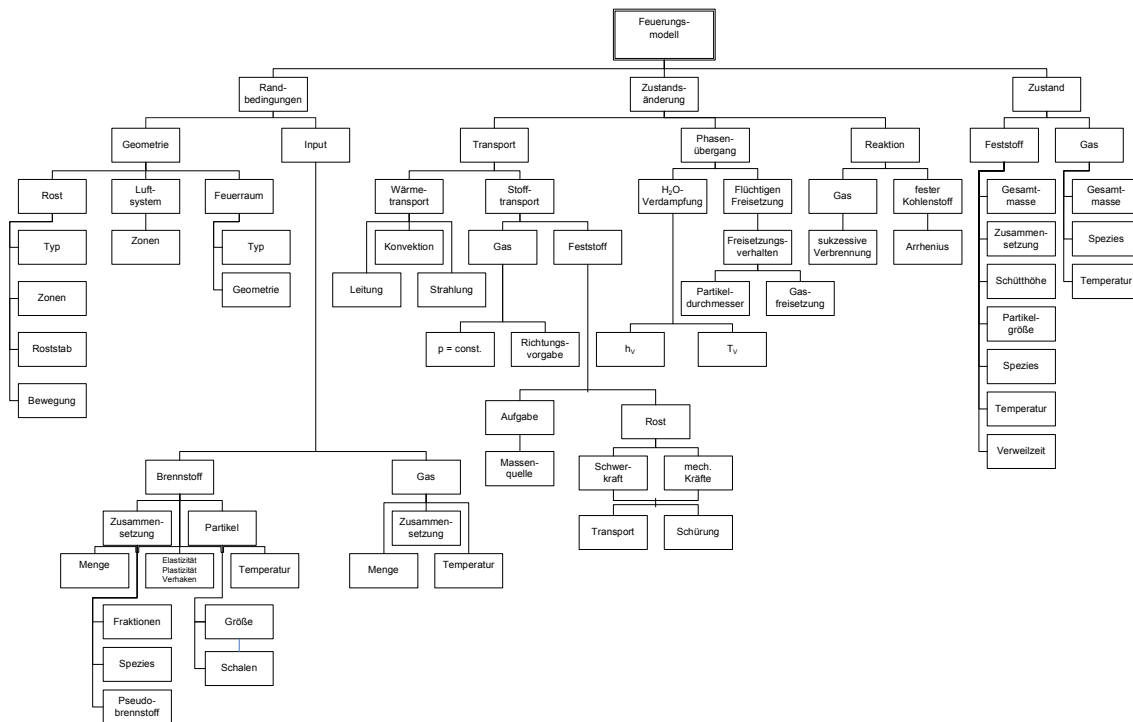


Abbildung 2: Module innerhalb des Feuerraum-Modells

### 2.2.1 Randbedingungen

Die Randbedingungen, die aus der **Geometrie** des Feuerraumes abgeleitet werden können, sind vergleichsweise einfach den Feuerungs- und Kessel-Zeichnungen zu entnehmen bzw. durch Vermessung der realen Anlage zu bestimmen. Im Rahmen des Modells

werden sicher nicht alle kleinsten geometrischen Gegebenheiten abgebildet werden können, was zunächst aber auch für eine gute Beschreibung der Feuerungsverhältnisse nicht erforderlich ist.

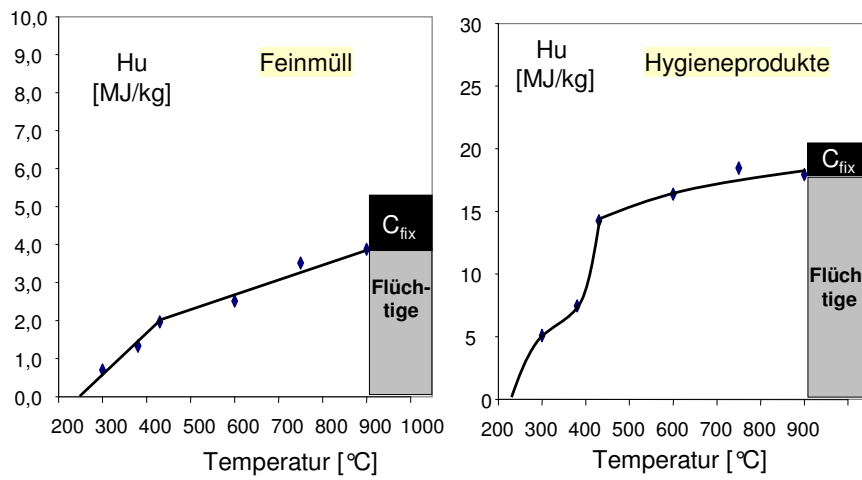
Bezüglich des **Inputs** wurde auf der Brennstoffseite mit einem Ansatz gearbeitet, wie er zusammen mit Umsicht entwickelt wurde. Aus Abfallanalysen des bayerischen Landesamtes für Umwelt (LfU), die uns freundlicherweise zur Verfügung gestellt wurden, sind 10 brennbare Fraktionen definiert worden (zuzüglich 3 nicht brennbare - Glas, Metall, sonstige Inerte-, die sich hier zunächst undifferenziert in der Asche wiederfinden). Dieser definierten Fraktionierung ging ein Literaturstudium voraus, das alle wesentlichen Analysen der vergangenen Jahre vergleichend ausgewertet hat und daraus diese 10 brennbaren Fraktionen als Konsens bestimmt hat, die sich im Übrigen mit der Aufteilung des LfU weitgehend decken (**Tabelle 1**).

**Tabelle 1:** Abfallfraktionen

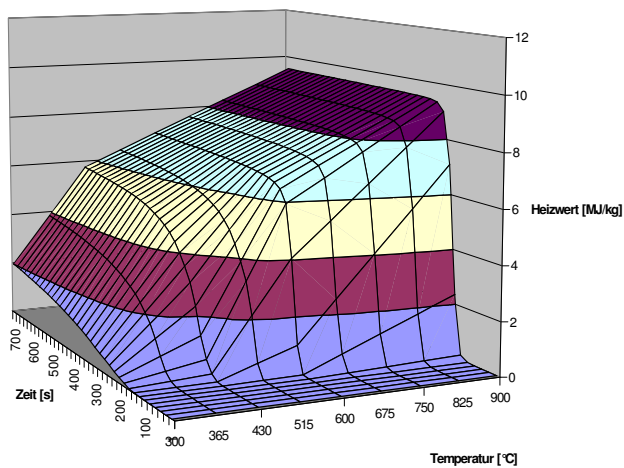
Mischfraktion	zusammengesetzt aus den Analysestoffgruppen:	Anteil am Restmüll [% TS]	Wassergehalt* [%]
Feinmüll	Feinmüll	12,6	28,7
Mittelmüll	Mittelmüll	11,6	49,7
Organik	Organik	14,1	61,3
Papier, Pappe, Kartonagen	Papier, Pappe, Kartonagen	10	21,9
Kunststoffe	Kunststoffverpackungen inkl. Folien Sonstige Kunststoffe	9,5	14,3
Textilien	Textilien Schuhe	5,2	12,0
Verbunde	Sonstige Verbunde Verbundverpackungen Elektronikschrott Staubsaugerbeutel Renovierung	10,5	9,4
Holz	Holz	1,6	13,9
Hygieneprodukte	Hygieneprodukte	9	61,8
Leder, Gummi, Kork		0,5	6

**Zunächst wurden die gängigen Brennstoffparameter wie Heizwert, Kurzanalyse (Wasser, Asche, Flüchtige, Koks), Elementaranalyse (C, H, O, N, S, Cl, F) bestimmt. Danach wurde das Freisetzungsverhalten bestimmt. Die entsprechende Methode wurde u.a. bereits im vergangenen Jahr von [Marzi, 2006] vorgestellt. Daraus resultieren Freisetzungskurven der Elemente (z.B. C, H, aber auch Cl) über der Temperatur und der Zeit. Typische Freisetzungskurven zeigt (Abbildung 3 und Abbildung 1 Abbildung 4**

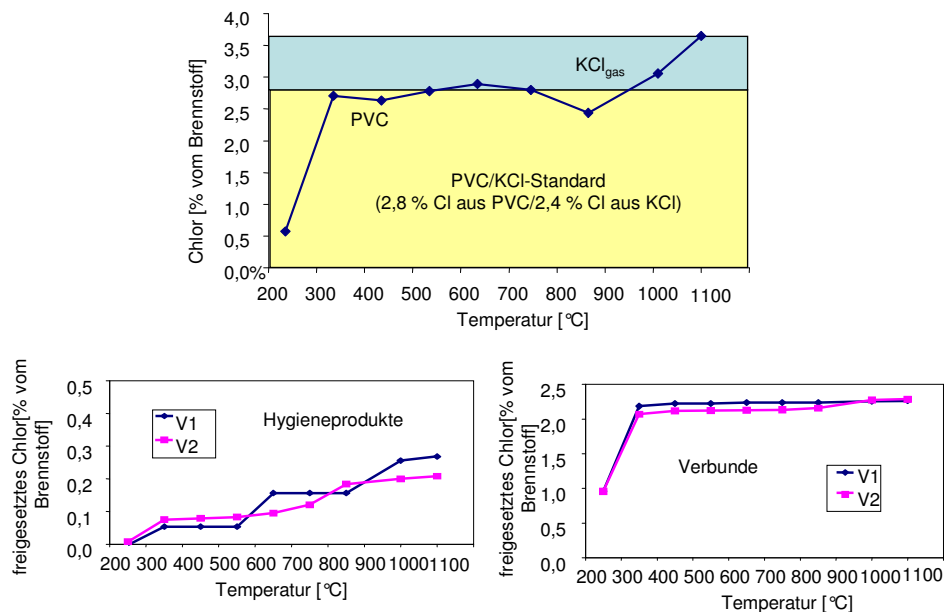
Abbildung 4). Mathematisch kann nun aus dem temporären, Temperatur-abhängigen Verlauf ein „Pseudobrennstoff“ gebildet werden, der zum jeweiligen Zeitpunkt und bei der jeweiligen Temperatur der Verteilung und dem Heizwert der freigesetzten Spezies entspricht. Interessant ist dabei im Übrigen die unterschiedliche Freisetzung von organischem und anorganischem Chlor (**Abbildung 5**).



**Abbildung 3:** Freisetzung von Flüchtigen und deren Heizwertinventar in Abhängigkeit von der Temperatur für die Abfallfraktionen „Feinmüll“ und „Hygieneprodukte“



**Abbildung 4:** Freisetzung von Flüchtigen und deren Heizwertinventar in Abhängigkeit von Temperatur und Reaktionszeit für eine Braunkohle



**Abbildung 5:** Freisetzung von Chlorverbindungen bei unterschiedlichen Temperaturen ein Cellulose/PVC/KCl-Gemisch sowie für die Abfallfraktionen Hygieneprodukte und Verbunde

Neben diesen eher chemischen Eigenschaften, müssen auch die physikalischen Eigenschaften der Partikel beschrieben werden. Dies ist zum einen die Partikelgröße, die hier als gemittelte Einheitsgröße definiert ist (meistens 10  $\mu\text{m}$ ) und die im Rahmen der Prozesse abnimmt. Außerdem wird ein kombiniertes Schalen-Kern-Modell verwendet. Für den Kern wird angesetzt, dass aus ihm lediglich Wasser verdampfen kann (d.h. keine Flüchtige-Freisetzung) und er sowie die Schale somit während der Wasserverdampfung maximal 100 °C heiß werden kann. Dieser Kern ist von einer Schale umschlossen, die die äußeren Temperaturen aufnehmen kann und an den Kern über den Wärmeindringkoeffizient (= Wärmeträgheitsmoment) weitergibt. Das Wachstum der Schale hängt von den Stoffdaten des Partikels (Wärmeindringkoeffizient) und den Wärmeübertragungsbedingungen (Strahlung, Konvektion) ab. In dieser Schale findet das Entgasen (Freisetungsverhalten des Brennstoffs) statt. Zudem wird den Partikeln eine Starttemperatur zugewiesen.

Weiterhin sind die Stoffeigenschaften mit verantwortlich für den mechanischen Transport des Brennstoffes. Die Eigenschaften Elastizität, Plastizität und Verhaken werden durch empirische Funktionen beschrieben. Die Daten gehen in die Transportfunktion ein.

Die Gasphase kann vergleichsweise einfach und zuverlässig über die bekannten Stoffdaten beschrieben werden.

## 2.2.2 Zustandsänderungen

Wichtig ist in diesem Modell, dass die realen Anlagendaten explizit berücksichtigt werden und direkt in das Modell eingehen. So wird die Funktion für den mechanischen **Transport** des Brennstoffes durch die Geometrie des Roststabes bzw. der Aufgabevorrichtung beeinflusst, ebenso wie durch die Doppelhubzahl, die Hubgeschwindigkeiten und –zyklen. Gas wird auf einem vorgegebenen Weg von Zelle zu Zelle geleitet, wobei die Menge des überströmenden Gases durch den Druckausgleich zwischen den Zellen bestimmt wird. Beim Wärmetransport wird sowohl Leitung und Konvektion berücksichtigt, wie auch Strahlung. Dabei kann sich die Strahlung von der Gasphase mit definierten Austauschkoefizienten auf die Oberfläche des Feststoffes fortpflanzen.

Der **Phasenübergang** des Wassers vom flüssigen zum gasförmigen Zustand wird über die Enthalpieaufnahme definiert. Die zugeführte Enthalpie berechnet sich aus den Wärmeübergängen. Für die Beschreibung der Flüchtigen wird das oben beschriebene Modell verwendet.

Die chemischen **Reaktionen** in der Gasphase werden über die vollständige Reaktion des jeweils vorhandenen Sauerstoffs ab einer Zündtemperatur beschrieben. Die Reaktion des festen Kohlenstoffs wird über einen Arrhenius-Ansatz beschrieben.

## 2.2.3 Zustand

Aus der Zustandsänderung ergibt sich ein neuer Zustand, der im nächsten Rechenschritt weiter verändert wird. Dieser Zustand des Feststoffes und der Gasphase ist neuer Startwert für die nächste Iteration.

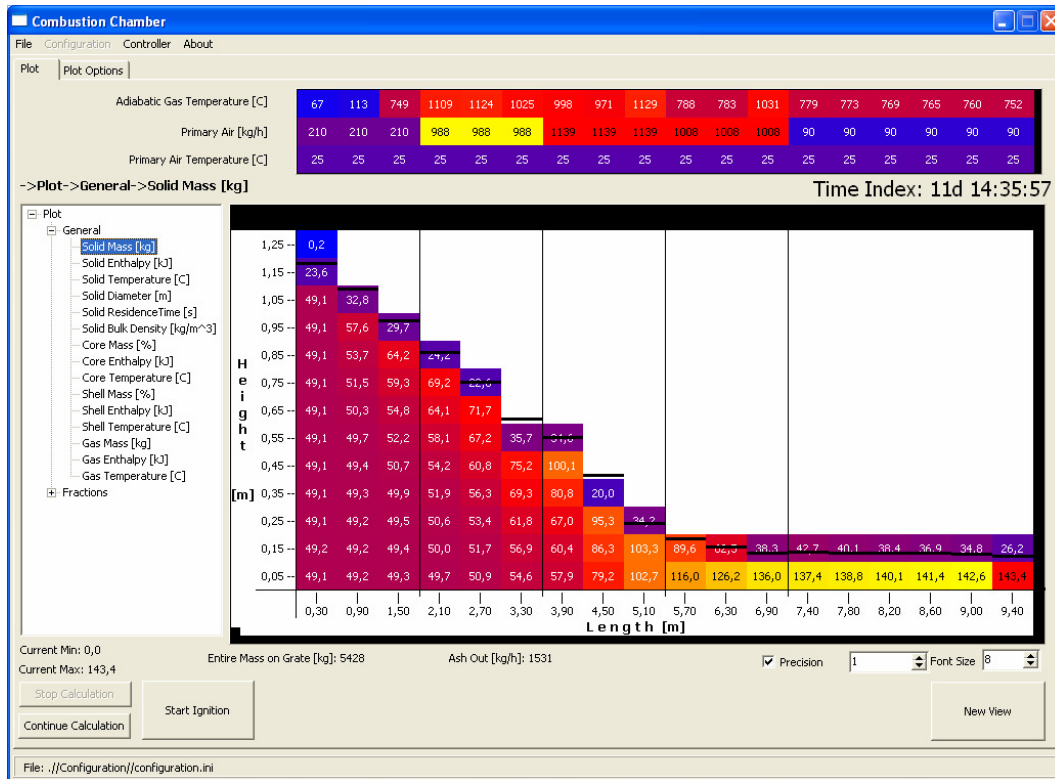
# 3 Feuerraum-Simulationen

## 3.1 Statisches Beispiel

Nachfolgend werden einige Beispiele für Simulationsergebnisse der Müllverbrennungslinien des GKS dargestellt. Die Rost-Geometrie, Luftverteilung und der Input wurde auf die Verhältnisse im GKS angepasst. **Abbildung 6** zeigt die Masse in jeder Zelle (Zahlenwerte in den Zellen) sowie die daraus resultierende Schütthöhe (Anzeige durch einen schwarzen Querstrich in der obersten Zelle). Die Massenabnahme ist auf die Verdampfung von Wasser, die Freisetzung der Flüchtigen und den Umsatz von Koks zurückzuführen. Die Massenzunahme je Zelle ist durch die höhere Dichte der Asche bedingt (**Abbildung 7**).

Bereits am Ende der dritten Unterwindzone ist die Schütthöhe auf ca. 20 bis 25 cm gesunken. Optische Messungen am GKS bestätigen diese Schütthöhe sehr gut.

Die Temperaturen der Zellen (gewichtete Temperatur des Kerns und der Schale) zeigt **Abbildung 8**. Die Temperaturen auf der Oberfläche der Schüttung sind deutlich höher als in der Schüttung. Im vorderen Dreieck zwischen Aufgabe und der gleichmäßigen Schütthöhe nahezu in der Mitte des Rostes, ist die Temperatur vergleichsweise niedrig und weitgehend unter der Verdampfungstemperatur von Wasser (**Abbildung 9**).



**Abbildung 6:** Masseninhalt der Zellen und Schütthöhe über der Rostlänge

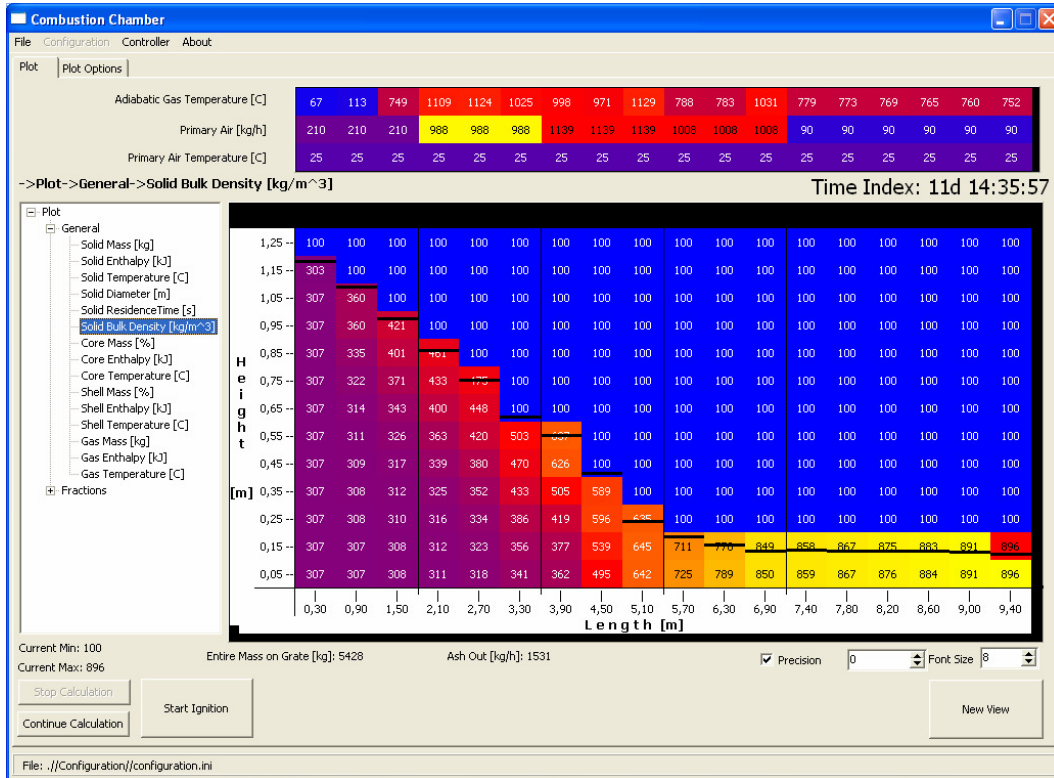


Abbildung 7: Schüttdichte in jeder Zelle. Die blauen Felder sind numerische bedingte Dichten

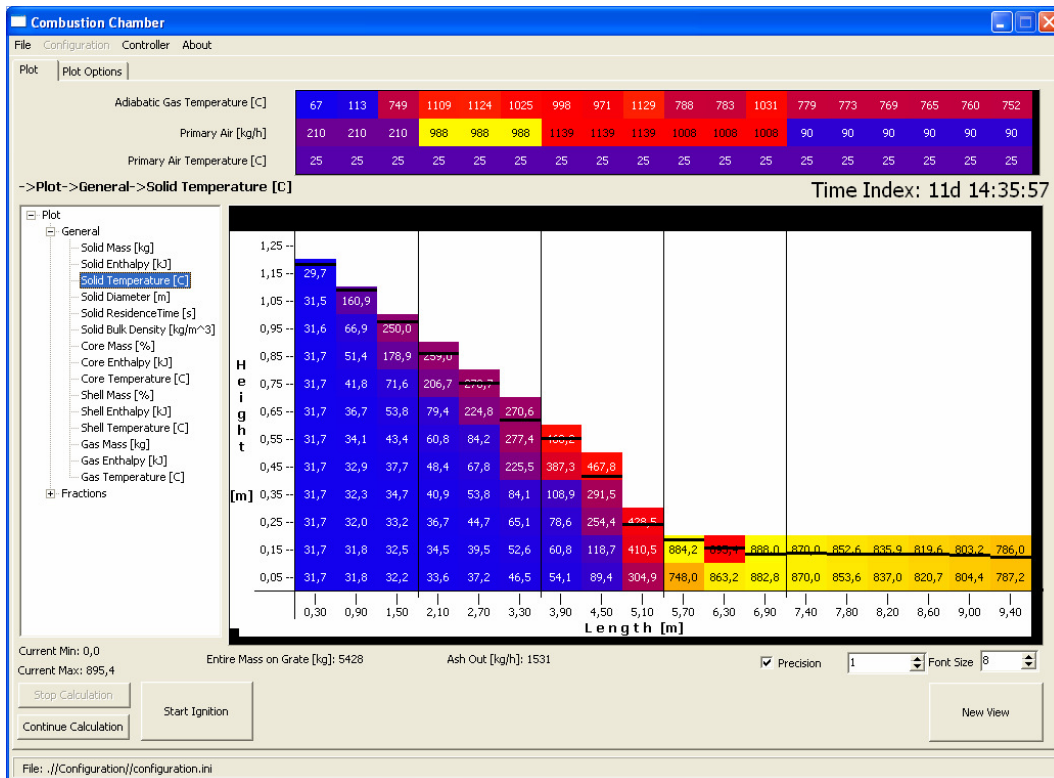


Abbildung 8: Temperaturen der Zellen

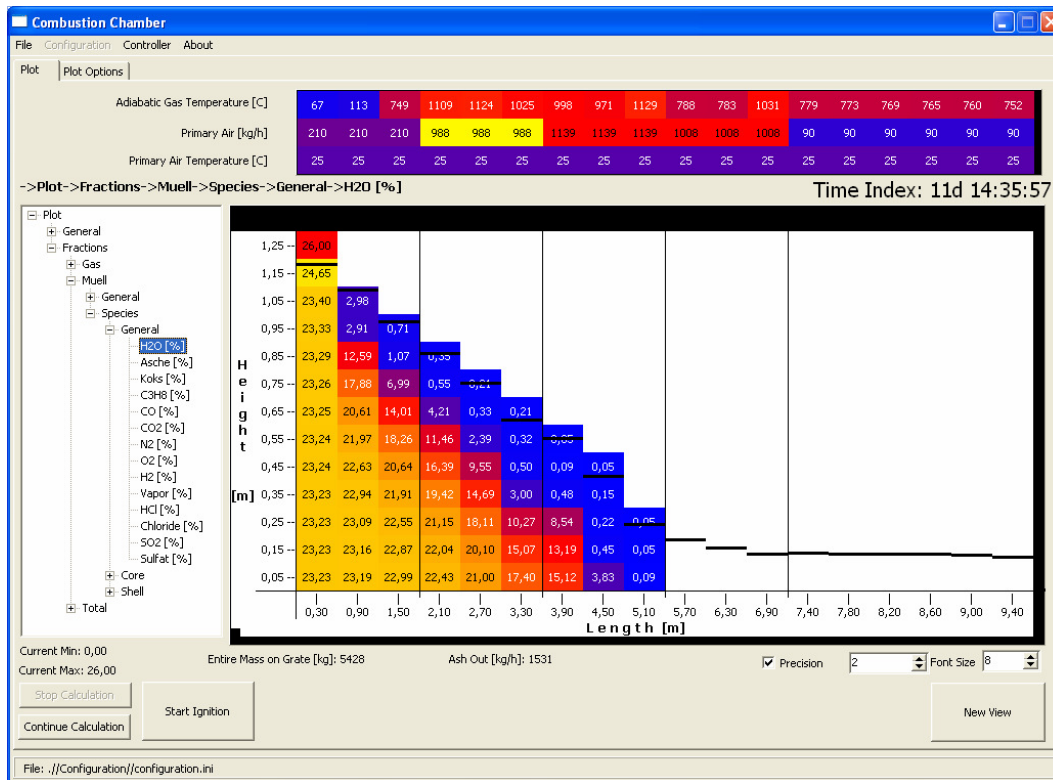


Abbildung 9: Wassergehalt im Brennstoff

Bis zur dritten Luftzone ist das Wasser komplett verdampft worden. Dabei wird die Verdampfungsenthalpie des Wassers berücksichtigt. Der Anteil der Flüchtigen, hier als  $C_3H_8$ , ist bis zur Mitte des Ausbrandrosts freigesetzt (pyrolysiert) (Abbildung 10).

Parallel zu den Flüchtigen nimmt auch der Koks ab (Abbildung 11). Allerdings benötigt die Umsetzung des Kokes eine längere Zeit und ist bis zum Rostende noch nicht vollständig abgeschlossen. Der Wert von 0,5 Mas.-% entspricht den realen Verhältnissen von einem TOC < 1 %.

Der Rest des festen Brennstoffes besteht vollständig aus Asche (Abbildung 12). Der verbleibende Restdurchmesser entspricht in etwa der Abnahme der Masse (Abbildung 14).

Durch die nachfolgenden Abbildungen kann das Konzept der Brennstoffaufgliederung in Kern und Schale besser verständlich gemacht werden. Die Masse der Schale nimmt in den Zonen hoher Wärmeübertragung zu (Abbildung 15 und Abbildung 16). Während die Schalentemperatur teilweise recht hoch ist, sind die Kerntemperaturen an gleicher Stelle noch weit unter 100 °C (Abbildung 17). In Richtung des Entschlackers hat auch der Kern eine Temperatur erreicht, die etwa gleich hoch ist wie die der Schale.

Eine weitere wichtige Größe für die Validierung ist die mittlere Verweilzeit der Partikel (Abbildung 18). Es zeigt sich eine mittlere Verweilzeit der Partikel von etwa  $1\frac{3}{4}$  Stunden. Für die hintere Hälfte des Rostes konnte durch Beobachtung und Zeitnahme die im Programm ausgegebenen Verweilzeiten exakt bestätigt werden. Eine Messung für den vorderen Teil des Rostes steht noch aus.

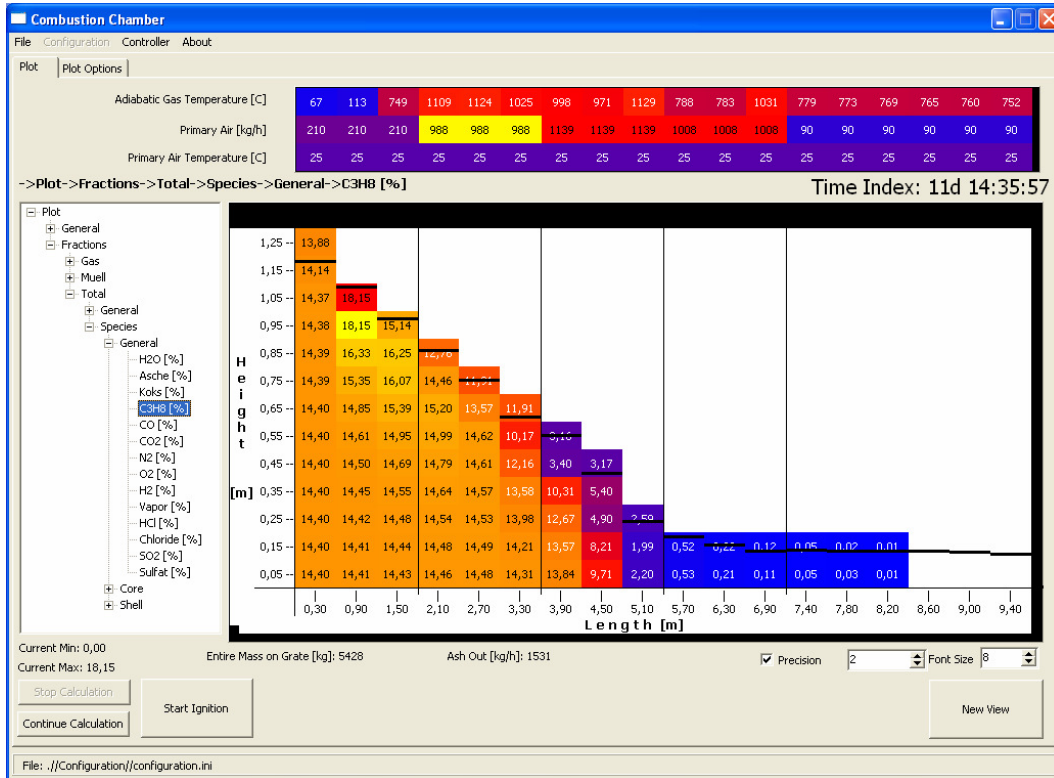


Abbildung 10: Freisetzung der Flüchtigen am Beispiel von C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>

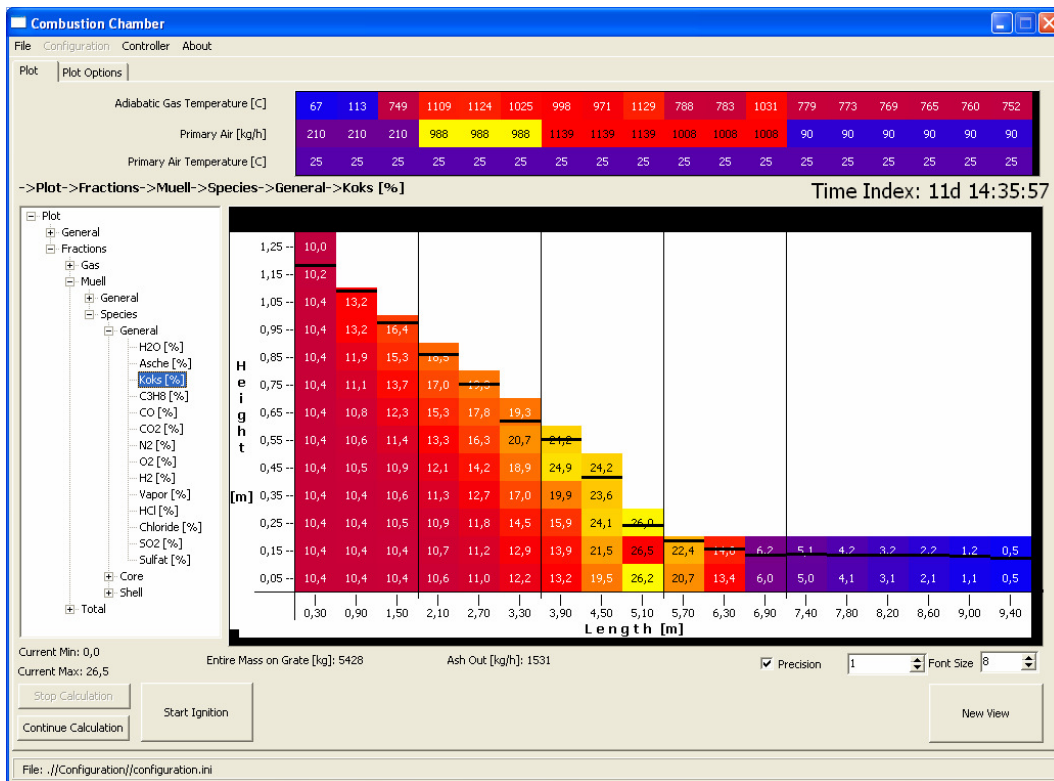


Abbildung 11: Koksgehalt in den Zellen in Massen-%

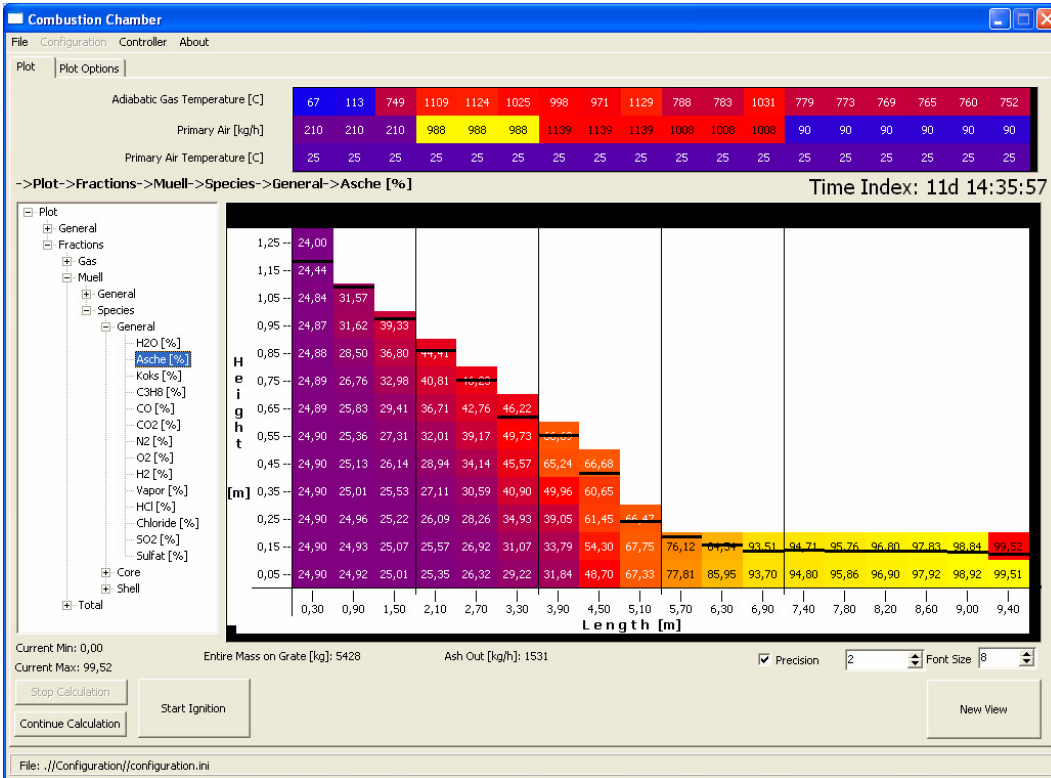


Abbildung 12: Aschegehalt in den Zellen

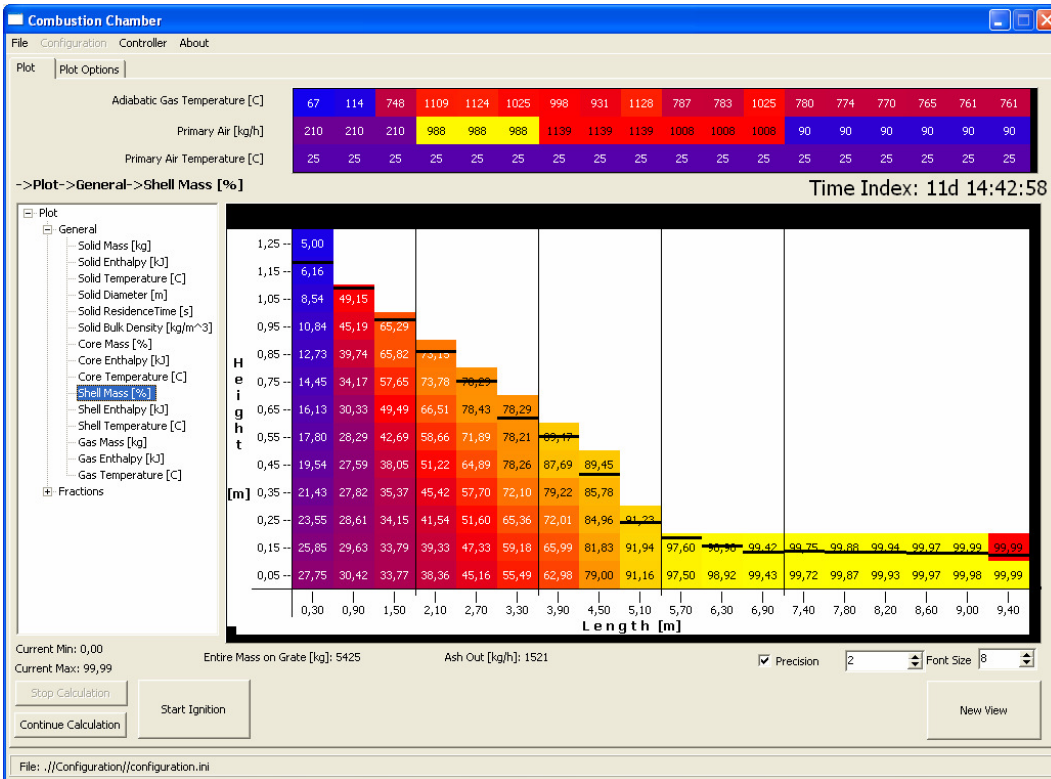


Abbildung 13: Massenanteil der reagierenden Schale

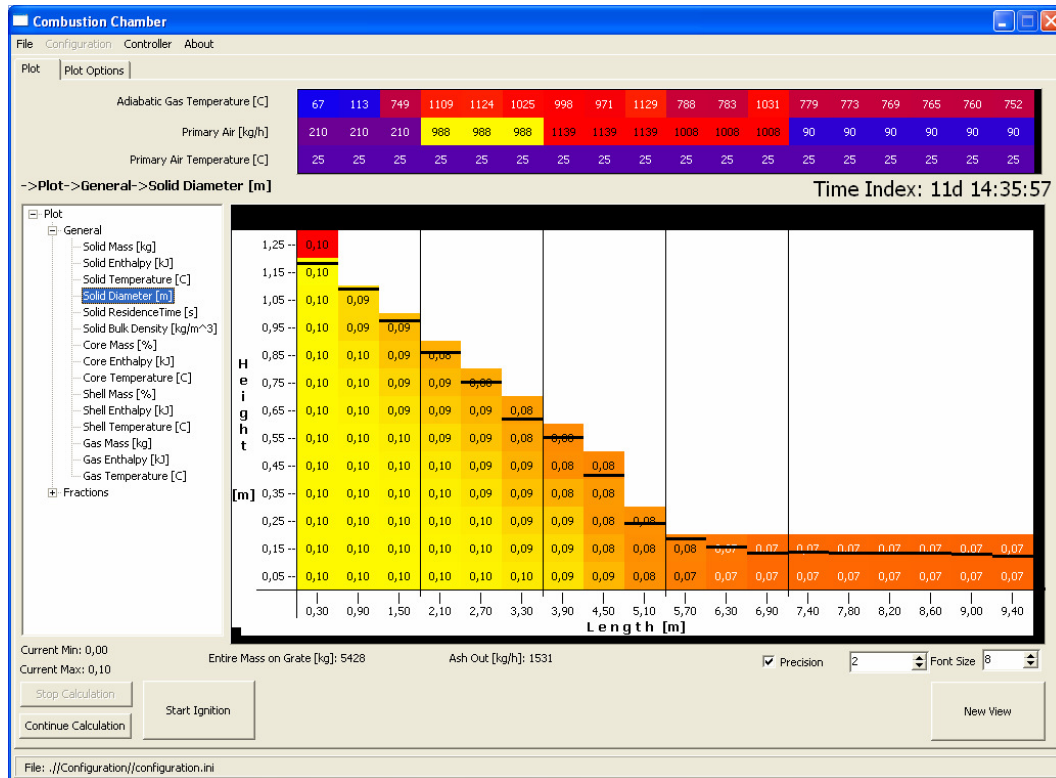


Abbildung 14: Pseudo-Durchmesser

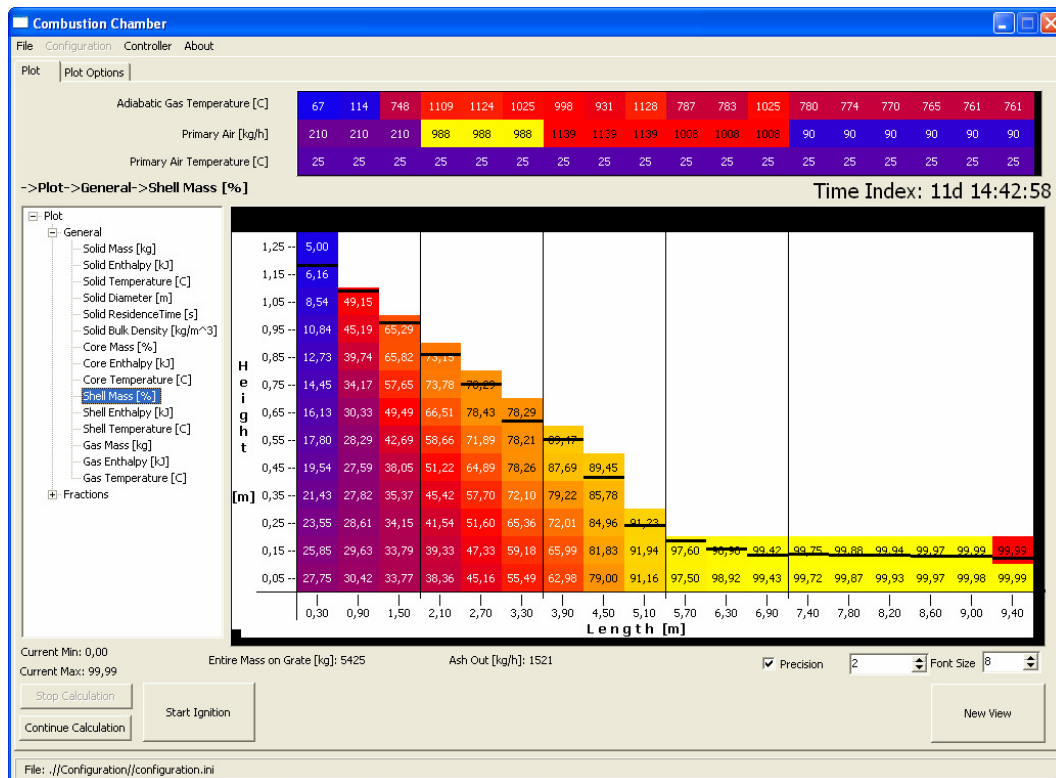


Abbildung 15: Massenanteil der Partikelschale (Differenz zu 100 % ist der Kernmassenanteil)

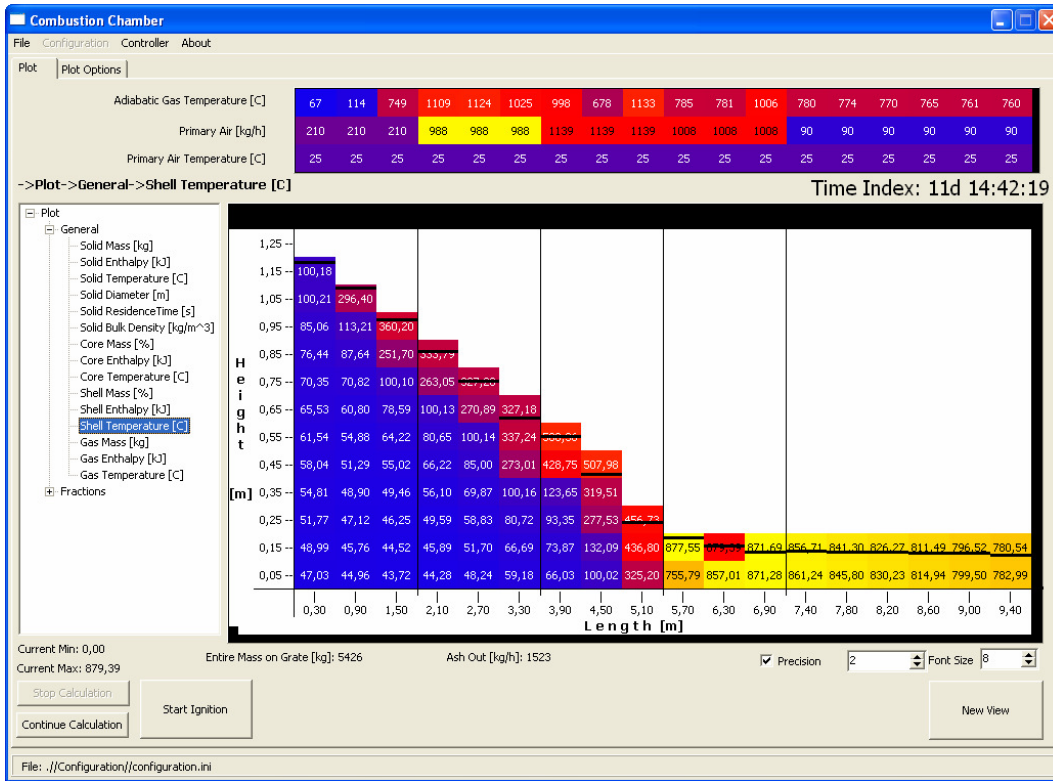


Abbildung 16: Temperatur der Partikelschale

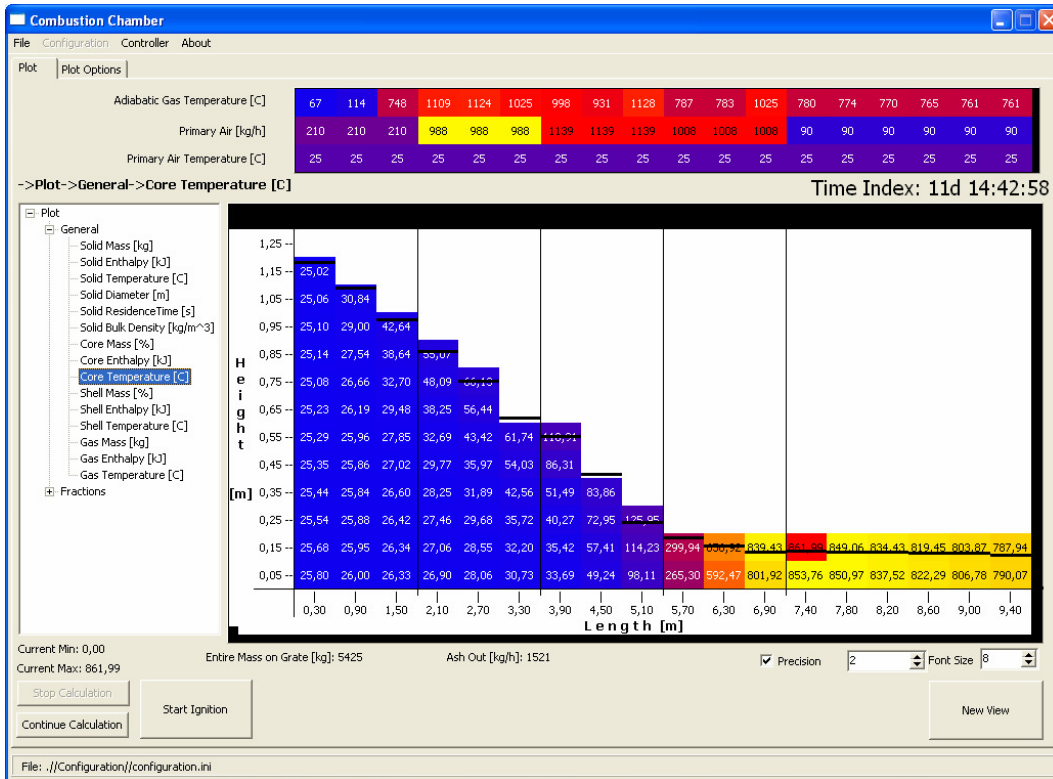
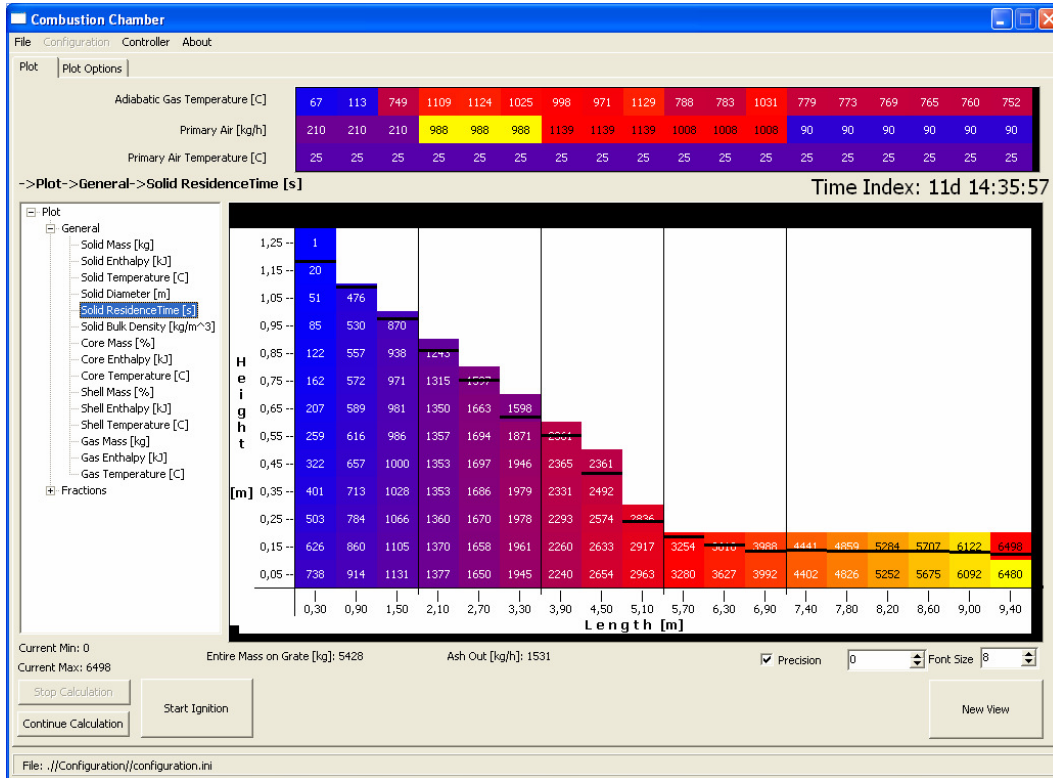


Abbildung 17: Temperatur des Partikelkerns



**Abbildung 18:** Mittlere Verweilzeit der Partikel in den Zellen

Als weitere Ausgabe des Programms kann das auf dem Rost liegende Inventar, das einen Energiespeicher darstellt, visualisiert werden. In obigem Beispiel liegen ca. 5,5 t Brennstoff auf dem Rost. Ferner entspricht die Ascheabgabe in den Entschlacker von rund 1,5 t/h dem im Brennstoff enthaltenen Aschegehalt.

### 3.2 Instationäre Veränderungen

Das Feuerraummodell soll neben der „schönen“ Visualisierung auch dem Verständnis hinsichtlich der Beeinflussbarkeit der lokalen Vorgänge dienen. Dazu sind mehrere Einflussmöglichkeiten vorgesehen, die denen einer realen Anlage entsprechen. So kann die Primärluft hinsichtlich Zusammensetzung (z.B. bei Sauerstoffanreicherung), Temperatur (Luftvorwärmung) und Menge (Veränderung der Luftmengen in den Zonen) variiert werden (**Abbildung 19**). Ferner die Brennstoffmenge, Brennstoffzusammensetzung sowie die Aufgabe- und Rostfrequenzen als Doppelhöhe. Hier kann über Schieberegler bzw. durch explizite Zahlenwerteingabe die jeweilige Größe „vertrimmt“ werden. Zum Beispiel kann jede der 5 Rostzonen so separat „vertrimmt“ werden (**Abbildung 20**). Die Folgen einer Vertrimmung der vierten Rostzone zeigt **Abbildung 21**.

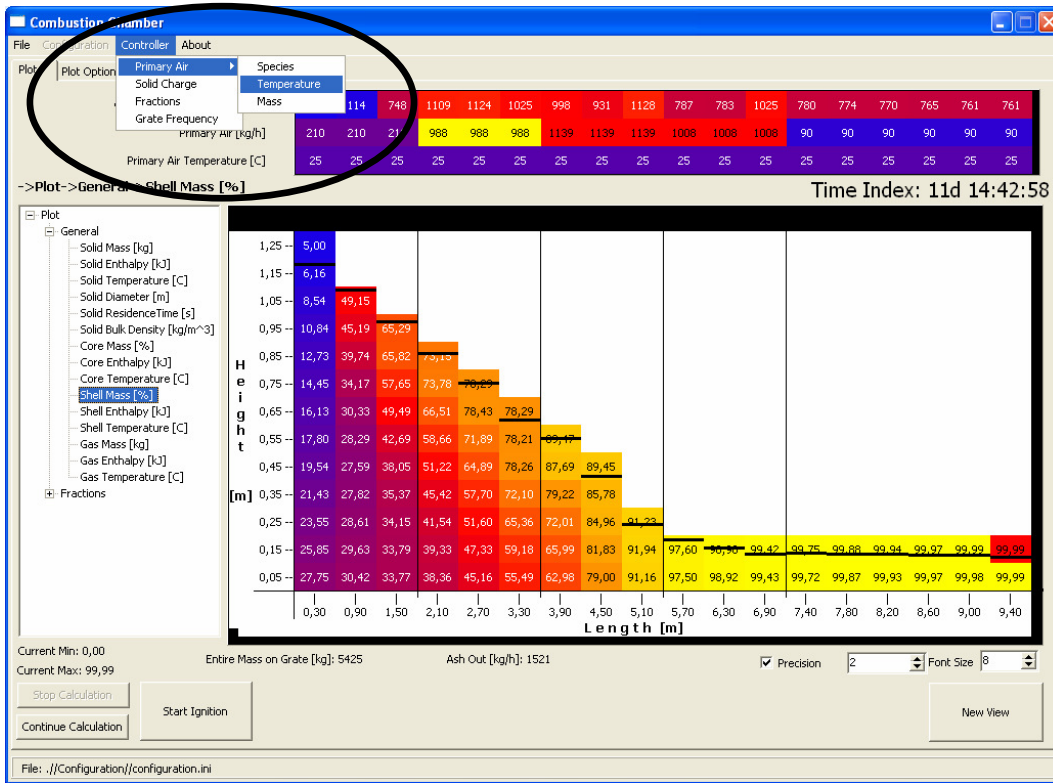


Abbildung 19: Verstellmöglichkeiten für Primärluft, Brennstoffmenge, Brennstoffzusammensetzung und Rostgeschwindigkeiten

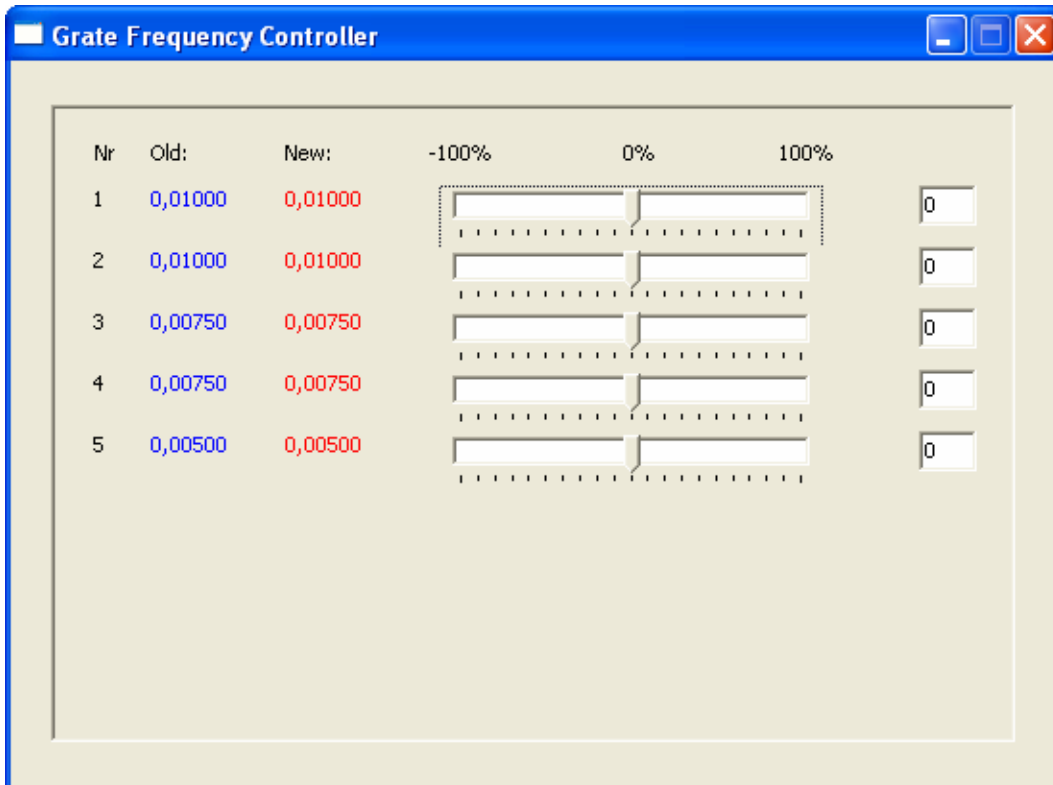
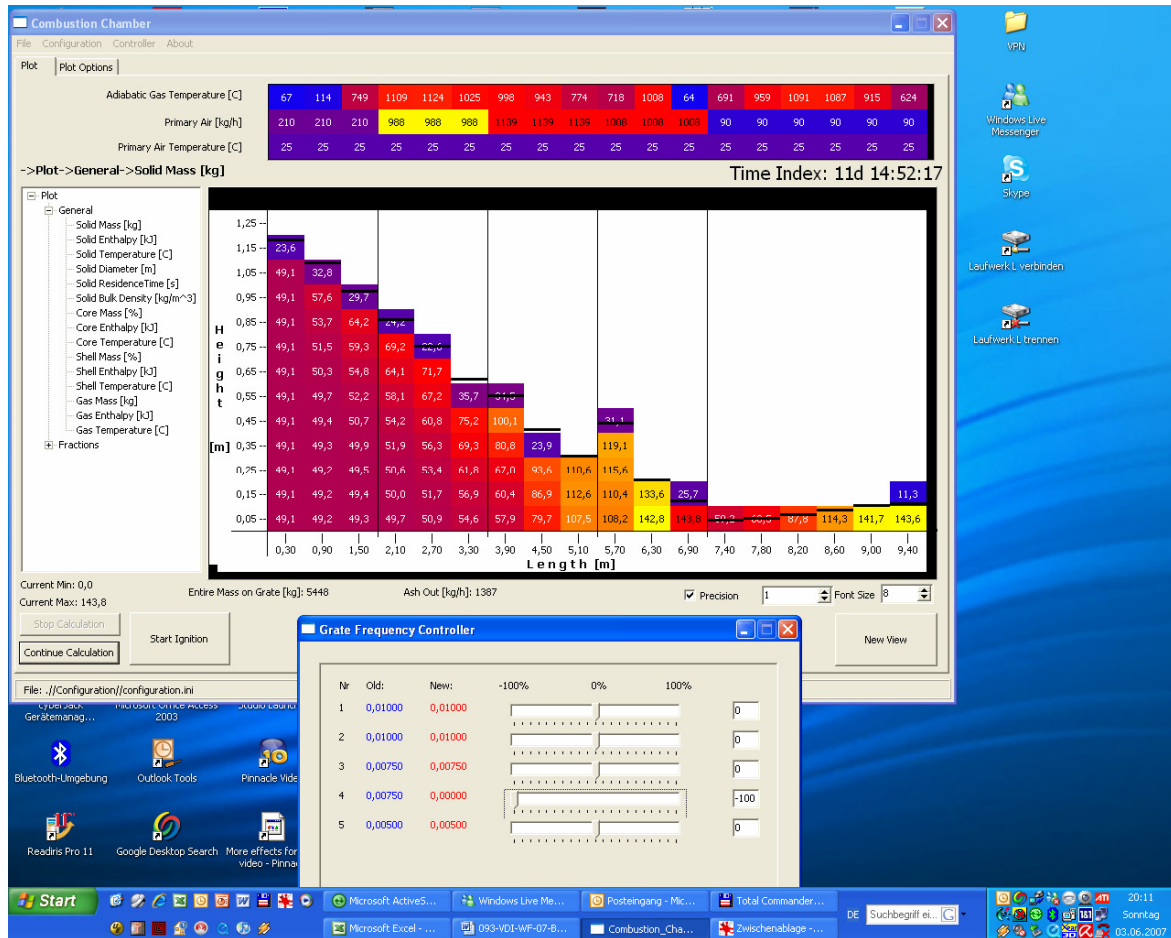


Abbildung 20: „Vertrimm-Möglichkeiten“ für die Rostfrequenz



**Abbildung 21:** Einfluss durch Absenkung der Rostgeschwindigkeit der 4. Rostzone

Die 4. Rostzone läuft durch den verminderten Transport voll, am Anfang der Rostzone 5 findet eine Unterversorgung mit Brennstoff statt.

Ferner ist, wie in einer realen Anlage die Zündung des Brennstoffes durch einen Zündbrenner notwendig („Start Ignition“).

Zahllose Möglichkeiten der Untersuchung ergeben sich aus diesem Konzept.

## 4 Zusammenfassung

Mit dem vorgestellten Feuerungsmodell können sehr schnell Effekte der Feuerung untersucht und plausibel gemacht werden. Es kann bilanzsichere Zahlenwerte mit lokalen Angaben für die Freisetzung der Flüchtigen ausgeben. Zudem liefert das Modell Größen, die nicht durch einfache Messungen im Betrieb ermittelt werden können, aber dennoch für den Betrieb interessant sind (z.B. Schichthöhen, Rostinventar etc.). Zudem liefert es diese Daten rund 20-mal schneller als Echtzeit. Damit bietet es die Möglichkeit:

- 
1. das Verständnis der Feuerung zu steigern
  2. Startwerte für weitere Berechnungen, insbesondere CFD, zu liefern und
  3. Hilfwerte für Regelungen bereitzustellen.

Insgesamt müssen einzelne Module noch weiter optimiert werden und insbesondere für andere Feuerungen validiert werden. Dennoch liegt hier ein vielversprechender Ansatz vor, der im Übrigen auf einer breiten Konsensbasis weiterentwickelt wird und in absehbarer Zeit kostenlos zur Verfügung gestellt werden soll.

Ein weiteres Feedback aus der „Szene“ ist jederzeit erwünscht!