

14. DVV Kolloquium Tagungsband, 19.11.2004 TU Wien

## Thermische Nutzung von festen Biomassen und Abfällen im Projekt MARS\*

**Prof. Dr.-Ing. K. Görner <sup>+</sup>, Dr. rer. nat. Kai Keldenich <sup>++</sup>**

<sup>+</sup> Lehrstuhl für Umweltverfahrenstechnik und Anlagentechnik, **LUAT**  
Universität Duisburg-Essen, Standort Essen  
Leimkugelstr. 10 45141 Essen Tel. ++41/201/183-7511 e-mail: klaus.goerner@uni-duisburg-essen.de

<sup>++</sup> Institut für Umwelt-, Sicherheits-, Energietechnik, **UMSICHT**  
Fraunhofer-Gesellschaft, Oberhausen

\* Dieser Beitrag ist in Farbe auf der Instituts-Homepage verfügbar unter [www.luat.uni-duisburg-essen.de](http://www.luat.uni-duisburg-essen.de)

### Inhalt

1	Einführung.....	1
2	Technikumsanlage MARS.....	2
	2.1 Wassergekühlte Rost-Verbrennungseinheit.....	2
	2.2 Abgasreinigung.....	3
	2.3 Mess- und Analysetechnik.....	3
	2.4 Untersuchungsschwerpunkte.....	4
	2.5 Untersuchte Einsatz-/Brennstoffe.....	5
3	Mathematische Modellierung.....	5
4	Vergleich von Mess- und Simulationsergebnissen.....	6
5	Zusammenfassung und Ausblick.....	8
	Literatur.....	8

### 1. Einführung

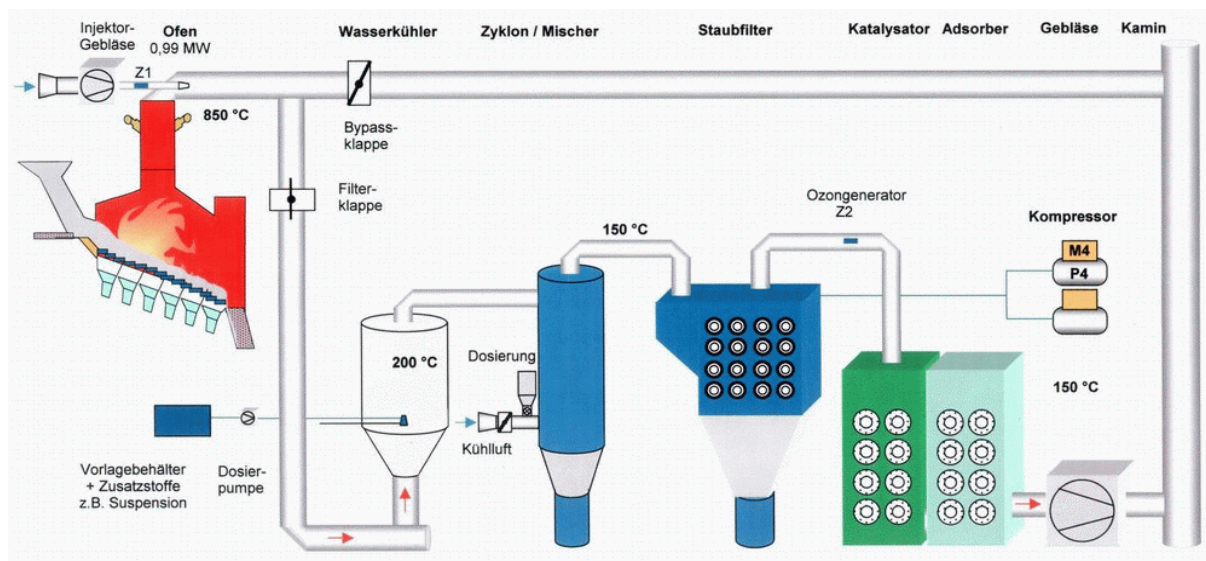
Die energetische Nutzung von Biomassen stellt einen wichtigen Beitrag zur Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen dar. In Deutschland wurde daher deren Einsatz durch eine Stromeinspeisevergütung weiter forciert. Der verstärkte Anlagenausbau hat jedoch zu einer Verknappung des Angebots und damit zu einem nicht unerheblichen Preisanstieg auf der Brennstoffseite geführt. Dies gilt insbesondere für unbelastete Hölzer. Aus diesem Grund ist bei vielen Betreibern der Wunsch aufgekommen, das nutzbare Brennstoffband zu flexibilisieren, was jedoch einen modifizierten Anlagenbetrieb voraussetzt oder gar einen Umbau der Anlage nach sich zieht. Wichtige Fragestellungen in diesem Zusammenhang sind das Verbrennungsverhalten, die Rohgaszusammensetzung, das Verschmutzungsverhalten im Dampferzeuger und in der Gasreinigung u.a.. Um hierzu fundierte Untersuchungen durchführen zu können wurde die Technikumsanlage MARS aufgebaut. In diversen bereits durchgeführten Versuchsserien wurde bereits ein großes Spektrum an Einsatzstoffen untersucht. Parallel wurde ein Simulationsprogramm weiterentwickelt, das es erlaubt, die Versuche zu begleiten, aber auch zur Auslegung von Betriebsanlagen beizutragen.

## 2. Technikumsanlage MARS

Bei der MARS-Technikumsanlage (**M**odulare **A**nlage zur **R**ückstandsoptimierten **S**toffbehandlung) handelt es sich um eine zweiteilige Anlage bestehend aus:

- Verbrennungseinheit (10 stufiger Verbrennungsrost, Nachbrennkammer, Abgaskühler)
- Gasreinigungseinheit betrieben im Hoch- und Niedertemperaturbereich

**Bild 1** gibt einen Überblick über die Hauptaggregate der Anlage.



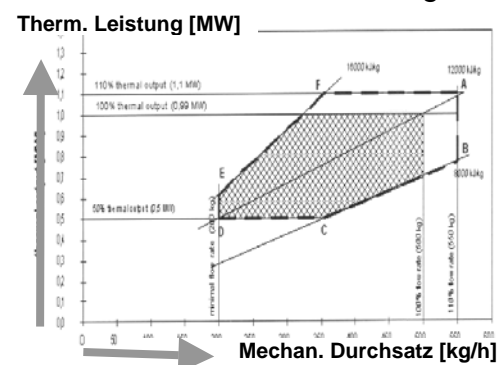
**Bild 1: Schema der Versuchsanlage**

Diese Anlage wurde an der Universität Duisburg-Essen, Standort Essen in Zusammenarbeit mit Fraunhofer UMSICHT aufgebaut.

### 2.1. Wassergekühlte Rost- Verbrennungseinheit

Die wassergekühlte Rostfeuerung ist für eine thermische Leistung unterhalb von einem Megawatt ausgelegt. Der Heizwert der verwendeten Brennstoffe kann zwischen 6 MJ/kg und 22 MJ/kg betragen, wobei ein Mittelwert von ca. 12 MJ/kg bei der Auslegung berücksichtigt wurde. Die bei Vollastbetrieb zugeführte Verbrennungsluftmenge beträgt ca. 1600 Nm<sup>3</sup>/h, die Rohgasmenge liegt - je nach Brennstoff und Betriebsweise - zwischen 3500 und 6000 Nm<sup>3</sup>/h. Der Verbrennungsrost hat eine Länge von 4,3 m und eine Breite von 1,19 m. Die gesamte Rostfläche beträgt somit 5,11 m<sup>2</sup>. Das Feuerungsleistungsdiagramm ist in **Bild 2** dargestellt.

**Bild 2** Feuerungsleistungsdiagramm



## 2.2 Abgasreinigung

Das Abgasreinigungssystem besteht aus den folgenden Komponenten:

- Luftquenche,
- Wasserquenche,
- Zyklonabscheider,
- Patronenfilter,
- katalytische Quecksilberabscheidung (Amalgator<sup>®</sup>),
- Adsorber.

Im laufenden Folgeprojekt wird ein Schlauchfilter integriert.

## 2.3 Mess- und Analysetechnik

Die Gesamtanlage ist mit einem umfassenden Messsystem ausgestattet, das in den Messbereichen in einen Rohgas- und ein Reingas-Bereich aufgeteilt ist (**Tabelle 1**).

FTIR	Rohgas		Reingas	
Multi - FID für org. C gesamt	bis 10.000	ma/m <sup>3</sup>	bis 10.000	ma/m <sup>3</sup>
Messkomponenten u. -bereiche	2 Messbereiche		2 Messbereiche	
HCl	0.....500	ma/m <sup>3</sup>	0.....15	ma/m <sup>3</sup>
	<i>0...1.000</i>	ma/m <sup>3</sup>	<i>0.....90</i>	ma/m <sup>3</sup>
CO	0.....500	ma/m <sup>3</sup>	0.....75	ma/m <sup>3</sup>
	<i>0...1.000</i>	ma/m <sup>3</sup>	<i>0...300</i>	ma/m <sup>3</sup>
SO <sub>2</sub>	0...1.000	ma/m <sup>3</sup>	0.....75	ma/m <sup>3</sup>
	<i>0...3.000</i>	ma/m <sup>3</sup>	<i>0...300</i>	ma/m <sup>3</sup>
NO	0.....500	ma/m <sup>3</sup>	0...200	ma/m <sup>3</sup>
	<i>0...2.000</i>	ma/m <sup>3</sup>	<i>0...390</i>	ma/m <sup>3</sup>
H <sub>2</sub> O	0.....40	Vol%	0.....40	Vol%
O <sub>2</sub>	0.....25	Vol%	0.....25	Vol%
org. C	0.....100	ma/m <sup>3</sup>	0.....15	ma/m <sup>3</sup>
	<i>0...1.000</i>	ma/m <sup>3</sup>	<i>0.....30</i>	ma/m <sup>3</sup>
NH <sub>3</sub>	0.....500	ma/m <sup>3</sup>	0.....15	ma/m <sup>3</sup>
CO <sub>2</sub>	0.....25	Vol%	0.....20	Vol%
NO <sub>2</sub>	0...2.000	ma/m <sup>3</sup>	0.....60	ma/m <sup>3</sup>
N <sub>2</sub> O	0...1.000	ma/m <sup>3</sup>	0...200	ma/m <sup>3</sup>
HF	0.....100	ma/m <sup>3</sup>	0.....10	ma/m <sup>3</sup>

Kursiv gedruckte Werte beziehen sich auf den 2. Messbereich

- Messbereichsumschaltung für HCl, CO, SO<sub>2</sub>, NO
- Messwerte bezogen auf trockenes Gas
- Messwerte normiert mit O<sub>2</sub>
- Beheizte Messgasleitung
- elektrochemischer O<sub>2</sub>-Sensor

**Tabelle 1:** Roh- und Reingas-Messbereiche

## 2.4 Untersuchungsschwerpunkte

An der MARS-Anlage sowie den am LUAT zur Verfügung stehenden Versuchseinrichtungen werden zur Zeit folgende Untersuchungsschwerpunkte verfolgt:

- Schadstoffarme Verbrennung von Feststoffen (**Abfallstoffe, biogene Brennstoffe, Produktionsreststoffe**) an unterschiedlichen Verbrennungseinrichtungen.
- **Untersuchungen zur emissionsarmen Verbrennung von biogenen Brennstoffen an Unterschubfeuerungen** (z.B. bei Einsatz von Holzhackschnitzel, Rapsschalen, Strohfraktionen u.a.).
- **Optimierung der Nachverbrennung von Abgasen aus der Rostfeuerung.**
- **Erzeugung von Rauchgasen mit speziellen Schadstofffrachten zur Optimierung der nachgeschalteten Rauchgasreinigungsstufen**, wobei spezifische Untersuchungen zur Abscheidung mit den vorhandenen Komponenten oder neu zu integrierenden Abscheidern möglich sind.
- **Konzeptionierung von Mono- und Mischverbrennungstechniken mit vorhabensbegleitenden Technikums- und Laboruntersuchungen** (z.B. Mono-Klärschlammverbrennung mit schmelzflüssigem Schlackeaustrag, Braunkohlenfeuerungen mit Zusatz energiereicher Abfallfraktionen wie Klärschlamm oder Papiergemischen).
- **Untersuchungen von Rückstandsgemischen hinsichtlich Verwertung oder Deponieeignung** (Ermittlung von kalorischen oder elutionsrelevanten Stoffdaten).
- **Analytik von Schadstoffen bei der Abfallbehandlung** (z.B. Bestimmung polychlorierter Dioxine und Furane, Quecksilber und -verbindungen).
- **Erstellung von Energie- und Stoffbilanzen auch im Hinblick auf schadstoffarme Abfallbehandlungsverfahren** (z.B. Verbleib wesentlicher Schadstoffe bei der Abfallverbrennung bis hin zur Spurenanalyse im Reingas).
- **Entwicklung und Optimierung von Schadstoffminderungsverfahren** (z.B. Minderung von Hg-Emissionen mit verwertungsoptimierten Adsorbentien).
- **Online-Korrosionsuntersuchungen zur Optimierung von Werkstoffen im Anlagenbereich** (z.B. Erfassung des Korrosionseinflusses von Chlor und Schwefel bei höheren Temperaturen).

Die verschiedenen Fragestellungen werden in unterschiedlichen Projekten verfolgt, so dass im Folgenden ein projektunabhängiger Einblick in einzelne Themen gegeben wird.

## 2.5 Untersuchte Einsatz-/Brennstoffe

Die **Tabelle 2** soll einen Einblick in die bisher untersuchten Einsatz-/Brennstoffe vermitteln.

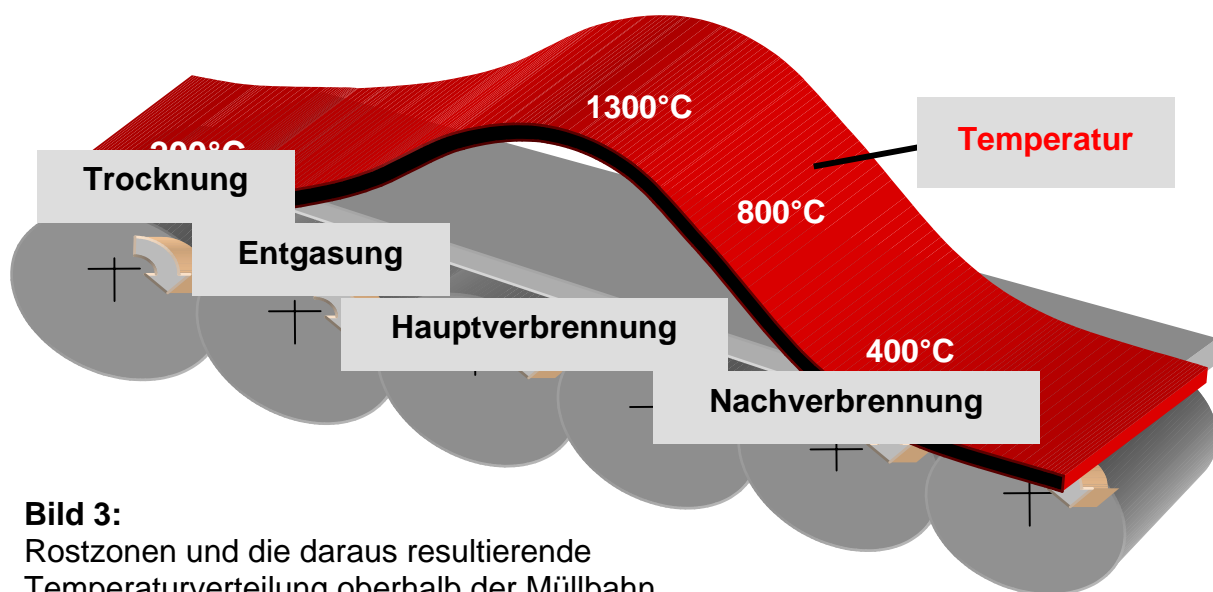
Biogene Brennstoffe	Holzhackschnitzel	Holzpellets
	Stroh	Heu
	Graspellets	Haferhäckleie
	Maishäcksels	Maisfrüchte
	Maissilage	div. Mischungen
Abfallstoffe	Hausmüllähnli Gewerbemüll	div. Sekundärbrennstoffe
	Mischungen aus Abfällen und Biomassen	

**Tabelle 2:** Eingesetzte Brennstoffe

## 3 Mathematische Modellierung

Parallel zu den experimentellen Untersuchungen werden am LUAT mathematische Modelle für die unterschiedlichsten technischen Verbrennungssysteme entwickelt und eingesetzt.

Bei der Beschreibung von Rostverbrennungssystemen muss dabei die heterogene Umsetzung des Brennstoffs in Bett approximiert werden, da eine rigorose Modellierung für diesen Bereich nicht möglich ist. **Bild 3** zeigt hierfür exemplarisch einen Ansatz.



**Bild 3:**  
Rostzonen und die daraus resultierende  
Temperaturverteilung oberhalb der Müllbahn

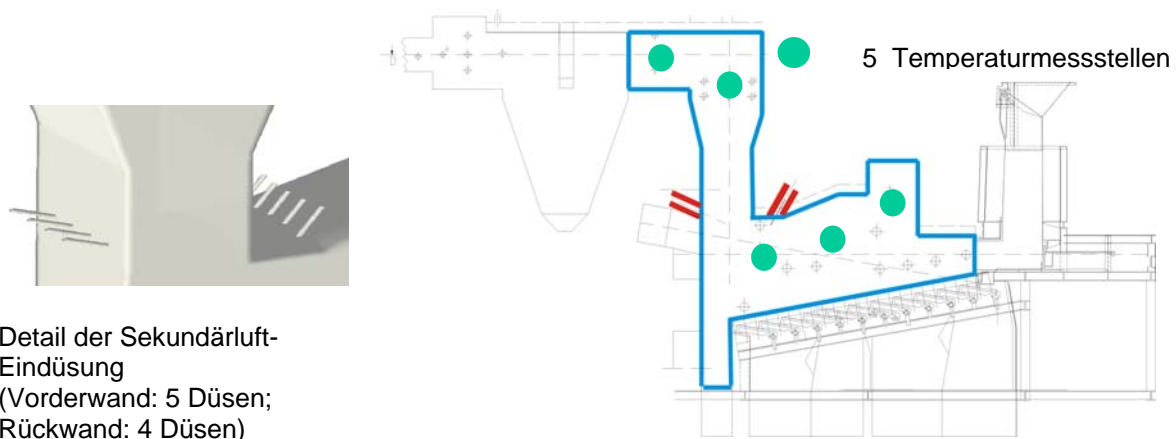
Messungen dienen zur Überprüfung, aber auch zur Validierung des angewendeten Modellkonzepts. Ist die Eignung dieser Ansätze erfolgreich überprüft, so können sie innerhalb ihres Gültigkeitsbereichs dazu eingesetzt werden, experimentelle Messungen aufgrund von Zeit- und Kostenersparnissen zu ersetzen bzw. zu ergänzen.

Die Erhaltungsgleichungen aus der Strömungsmechanik stellen die Grundlage der mathematischen Modellierung von Strömungen jeglicher Art (z.B. turbulent, reagierend oder Mehrphasenströmungen) dar. Die Beschreibung erfolgt entweder in einer Euler- oder in einer Lagrange-Darstellung. Die Euler-Darstellung ist eine makroskopische Betrachtungsweise, d.h. das zu beschreibende Fluid wird als Kontinuum angesehen. Bei der Bilanzierung nach der Lagrange'schen Betrachtungsweise werden Einzelteilchen beschrieben und verfolgt, die Betrachtung ist hierbei also mikroskopisch.

Für zusätzliche Informationen zu den verwendeten Teilmodellen bzw. Modellierungsansätzen wird auf weiterführende Literatur verwiesen ([1-6]).

#### 4 Vergleich von Mess- und Simulationsergebnissen

Anhand von Daten aus Verbrennungsversuchen wurde eine Modellvalidierung vorgenommen. Hierzu wurden an 5 ausgewählten Messstellen (vgl. **Bild 4**) Temperaturen und Spezieskonzentrationen aufgenommen und mit Simulationsergebnissen verglichen. Dabei ist von ausschlaggebender Bedeutung, dass Messungen und Rechnungen unter jeweils identischen Randbedingungen durchgeführt wurden.

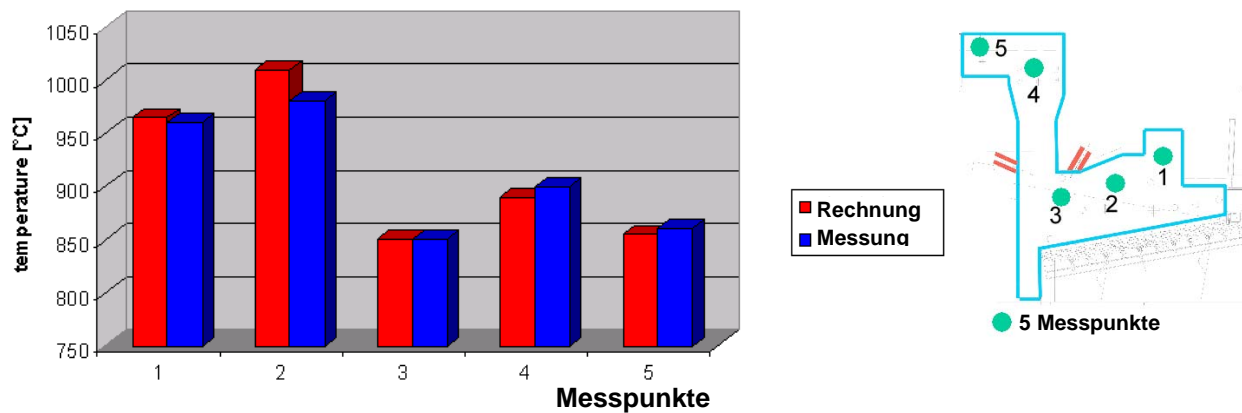


Detail der Sekundärluft-  
Eindüsung  
(Vorderwand: 5 Düsen;  
Rückwand: 4 Düsen)

**Bild 4:** Detail der Sekundärlufteindüsung und Messstellenplan

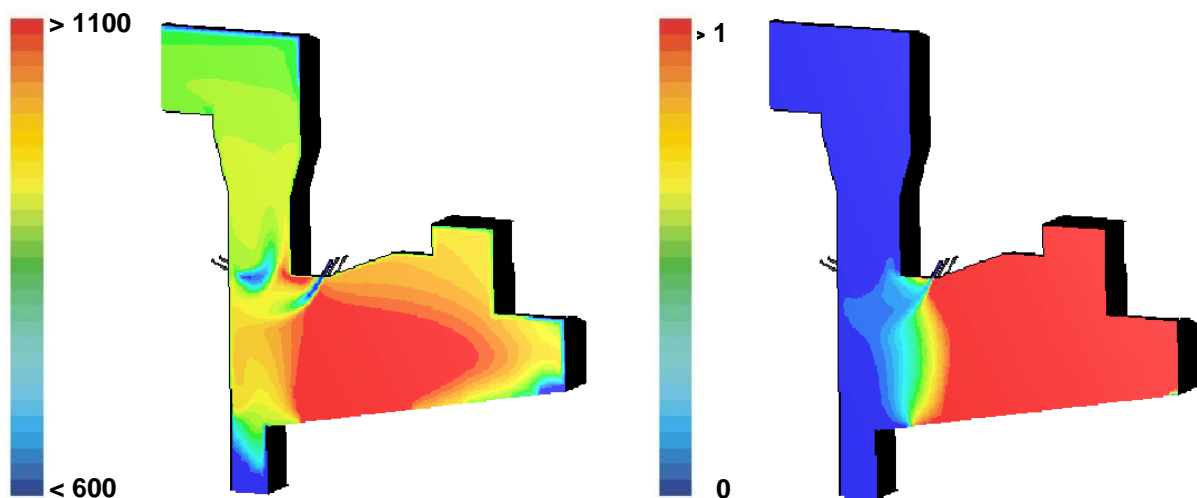
Die Messpunkte lagen auf der vertikalen Symmetrieebene der Anlage. Natürlich ist beim Vergleich zu berücksichtigen, dass die Messung einen zeitlichen Mittelwert über einen Zeitraum von ca. 15 min darstellt und die Versuchsbedingungen natürlich aufgrund der Brennstoffinhomogenitäten nicht exakt stationär sein können. Bei der Simulationsrechnung auf der anderen Seite werden nur zeitgemittelte Randbedingungen berücksichtigt.





**Bild 5:** Vergleich der gemessenen und berechneten Temperaturen in einem vertikalen Schnitt

Diese punktuell sehr gute Übereinstimmung kann anhand weiteren Messorte und Prozessgrößen bestätigt werden. Daher kann aus diesem Vergleich geschlossen werden, dass die wesentlichen physikalisch/chemischen Prozesse im Feuerraum und in der Nachbrennkammer realitätsnah abgebildet wurden.



**Bild 6:** Temperatur- [°C] (links) und Kohlenstoffmonoxidverteilung [Massen-%] (rechts) (vertikaler Schnitt durch die Symmetrieebene)

Mit so validierten Modellen kann eine Übertragung auf Betriebsanlagen (scale up) und auf andere Brennstoffe bzw. Zusammensetzungen erfolgen. Dies ist bereits in mehreren Projekten mit großen Erfolg gelungen.

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Für die Betreiber von Biomasseverbrennungs- sowie von Thermischen Abfallbehandlungsanlagen stellt sich kontinuierlich die Frage nach einem optimierten Anlagenbetrieb. Dieser bezieht sich - je nach Randbedingungen - auf :

- einen wirtschaftlichen Betrieb, d.h. das Spektrum an verfügbaren Einsatzstoffen und deren Preis,
- mögliche betriebliche Probleme wie Verschmutzung, Verschlackung, Korrosion oder
- die Einhaltung von Schadstoffgrenzwerten.

Bei allen diesen Fragestellungen ist ein kombinierter Einsatz von experimentellen Untersuchungen an Pilotanlagen, wie beispielsweise an der MARS-Anlage, und von theoretischen Untersuchungen mit Hilfe von Computer-Simulationen sehr hilfreich und meist auch zielführend.

Validierte Modelle lassen sich zudem für die Planung von Neuanlagen oder von Umbaumaßnahmen einsetzen.

Zur Verbesserung der Aussagefähigkeit der mathematische Modelle müssen noch weitere physikalisch/chemische Effekte berücksichtigt werden. Dies bezieht sich insbesondere auf das Verhalten von Partikeln und Stäuben, die zu Verschmutzungen, Verschlackungen und Korrosion führen können. Hierzu muss aber das sehr komplexe System Partikel-Gasphase über eine Realphasenmodellierung beschrieben werden.

### Literatur

- [1] Görner, K.: Technische Verbrennungssysteme. Springer Verlag, Berlin, 1991
- [2] Görner, K.: Waste Incineration – State-of-the-Art and New Developments. IFRF 13<sup>th</sup> Members' Conference, 15-18 May 2001 Noordwijkerhout, the Netherlands (als pdf-Datei verfügbar auf der Homepage [www.luat.uni-duisburg-essen.de](http://www.luat.uni-duisburg-essen.de))
- [3] Görner, K.: Einführung in die Abfalltechnik und fortschrittliche technische Entwicklungen. VDI-Fortschrittberichte, Reihe 15, Nr. 195, 1997, Düsseldorf (zu beziehen über LUAT, Uni Essen, Leimkugelstr.10, 45141 Essen)
- [4] Klasen, Th.; Görner, K.: Simulation und Optimierung einer Müllverbrennungsanlage. VDI-Tagung: Modellierung und Simulation von Dampferzeugern und Feuerungen, 1./2.4.1998, Braunschweig (als pdf-Datei verfügbar auf der Homepage [www.luat.uni-duisburg-essen.de](http://www.luat.uni-duisburg-essen.de))
- [5] Klasen, Th.; Görner, K.: Numerical Calculation and Optimization of a Large Municipal Solid Waste Incineration Plant. 2nd Int. Symp. on Incineration and Flue Gas Treatment Technologies, 4.-6.7.1999, Sheffield (als pdf-Datei verfügbar auf der Homepage [www.luat.uni-duisburg-essen.de](http://www.luat.uni-duisburg-essen.de))
- [6] Görner, K.; Klasen, Th., Kümmel, J.: Numerische Berechnung und Optimierung der MVA Bonn, VDI-Tagung "Flammentag", 14./15.9.1999, Dresden (als pdf-Datei verfügbar auf der Homepage [www.luat.uni-duisburg-essen.de](http://www.luat.uni-duisburg-essen.de))