

# Thermische Behandlungsverfahren für Abfälle mit hohem Schadstoffanteil\*

**Prof. Dr.-Ing. K. Görner, Dr.-Ing. P. Gillmann, Dipl.-Ing. Th. Klasen**

**LUAT** Lehrstuhl für Umweltverfahrenstechnik und Anlagentechnik,  
Universität Duisburg-Essen, Standort Essen

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

## Inhalt

1	Einführung .....	1
2	Technikumsanlage MARS .....	2
2.1	Technische Detail-Konstruktion der Verbrennungseinheit .....	2
2.2	Abgasreinigung .....	4
2.3	Mess- und Analystechnik .....	4
2.4	Untersuchungsschwerpunkte .....	5
2.5	Exemplarische Untersuchungsergebnisse .....	6
2.5.1	Verbrennungsuntersuchung an der MARS-Anlage .....	6
2.5.2	Schadstoffverbleib .....	8
3	Mathematische Modellierung .....	11
3.1	Beschreibung der Gasphase .....	11
3.2	Beschreibung des Brennbettes .....	12
4	Ergebnisse der Simulation .....	14
5	Zusammenfassung und Ausblick .....	17
	Literatur .....	17

## 1. Einführung

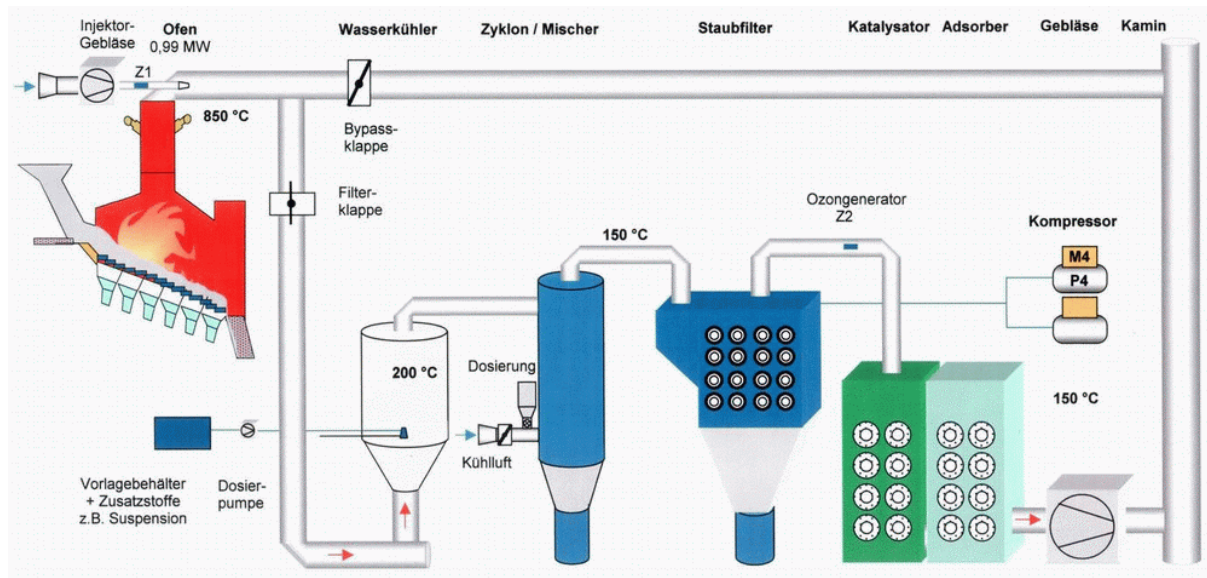
Bei Restmüllverbrennungsanlagen in Deutschland ist in den letzten Jahren eine signifikante Veränderung der Abfalleigenschaften zu beobachten. Dabei ist insbesondere der Anstieg des Heizwertes von entscheidender Bedeutung für den Anlagenbetrieb. Waren in der letzten Dekade sehr viele Anlagen auf einen sinkenden Heizwert vorbereitet worden, z.B. durch das Einbringen von besser wärmeisolierenden Feuerfestmaterialien, das weitere Auskleiden des Strahlraumes mit Keramiken oder bei Neuanlagen durch die Realisierung einer Gleichstromfeuerung mit weit heruntergezogener Zünddecke, so ist derzeit bei einem Heizwertband des Restmülls von oft deutlich über 10.000 kJ/kg der gegenläufige Trend zu beobachten. Notwendig werden Eingriffe in die Anlage oder den Anlagenbetrieb durch sehr hohe Temperaturen in der Hauptverbrennungszone, die eine direkte Schädigung der Anlage, verstärkte Schlackeansätze an der Zünddecke und/oder den Seitenwänden und verstärkte Korrosion im gesamten Rauchgasweg zur Folge haben. Der Betreiber erwartet vor den durchzuführenden Umbaumaßnahmen oft einen Nachweis für den gewünschten Erfolg. Dies nicht nur, um die direkten Investitionskosten zu rechtfertigen, sondern auch, um die Einnahmehausfälle durch höhere Stillstandszeiten zu minimieren. Solche Fragestellungen können durch experimentelle Untersuchungen und/oder durch eine numerische Simulation beantwortet werden ([1.1, 1.2]). In diese beiden Methoden gliedert sich der vorliegende Beitrag.

## 2. Technikumsanlage MARS

Bei der MARS-Technikumsanlage (**M**odulare **A**nlage zur **R**ückstandsoptimierten **S**toffbe-  
handlung) 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**

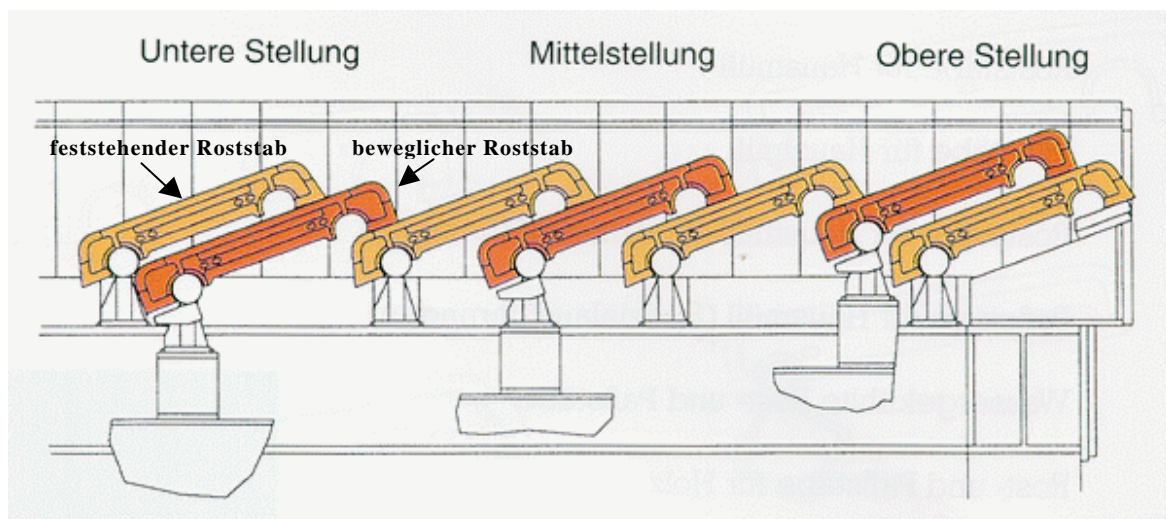
Diese Anlage wurde an der Universität Duisburg-Essen, Standort Essen in Zusammenarbeit mit Fraunhofer UMSICHT aufgebaut.

### 2.1. Technische Detail-Konzeption der Verbrennungseinheit

Die wassergekühlte Rostfeuerung ist für eine thermische Leistung unterhalb von einem Megawatt ausgelegt. Der Heizwert der verwendeten Brennstoffe kann zwischen 4 MJ/kg (z.B. Hausmüll) und 24 MJ/kg (z.B. BRAM) betragen, wobei ein Mittelwert von ca. 12 MJ/kg bei der Auslegung berücksichtigt wurde. Die bei Volllastbetrieb 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>.

Der wassergekühlte Verbrennungsrost [2.1] hat inklusive Aufgabetrichter und Stößelbeschickung einen äußeren Flächenbedarf von 7,5 m x 2,5 m und eine Bauhöhe von 5,5 m. Der Rost ist auf ein Containermaß hin konzipiert und erbaut worden. Die Abmessung des Containerrahmen beträgt 8,4m x 2,5m, wobei unterhalb der Rahmenkonstruktion die Entaschung platziert wurde.

Über die Rostlänge sind vier Luftzonen verteilt, d.h. die Primärluftzufuhr kann in diesen vier Bereichen den jeweiligen Bedürfnissen der Verbrennung angepasst werden. Im Müllaufgabeschacht, der mit Feuerfestmaterial ausgekleidet und mit einer Brand-Löscheinrichtung versehen ist, befindet sich eine hydraulische Klappe zur Vermeidung von Falschlufteinbrüchen bzw. gegen den Austritt von Rauchgasen. Für die Brennstoffzufuhr auf den Rost wird ein hydraulischer Zuteilungsstößel eingesetzt. Durch diesen Stößel wird der Brennstoff in langsamen Hubbewegungen auf das erste Rostsegment befördert. Die abwechselnd angeordneten fünf feststehenden und fünf beweglichen Segmente (**Bild 2**) verfügen über zwei Antriebseinheiten, die ebenfalls durch Hydraulikzylinder bewegt werden. Die erste Antriebseinheit bewegt synchron drei Segmente, die zweite Antriebseinheit zwei Segmente.



**Bild 2: Bewegungsablauf der beweglichen Roststäbe**

Beide Antriebseinheiten sind in der Hubfrequenz unabhängig voneinander regelbar. Dadurch kann eine gleichmäßige Bedeckung des gesamten Rostes mit Brennstoff gewährleistet werden. Zum Antrieb für die insgesamt vier Hydraulikzylinder dient ein Hydraulikaggregat, welches unter dem Müllaufgabeschacht installiert ist.

Die Besonderheit dieses Vorschubrostes ist die Wasserkühlung der Rostsegmente. Durch die innere Kühlung der aus Grauguss hergestellten Segmente wird eine sehr gute Wärmeabfuhr und eine hohe Standzeit erreicht. Im Kühlkreislauf des gesamten Rostes befindet sich Deionat (vollentsalztes Wasser), das über einen Kühler zurückgekühlt wird (Entkopplung der Funktion Kühlung des Rostes und Verbrennungsluft).

Als Anfahrbrönnner und gegebenenfalls als Nachbrönnner ist ein Heizöl-El-Stützbrönnner an der Stirnseite der Rostfeuerung oberhalb des Schlackeabwurfs installiert.

Das Rauchgas wird im Gleichstrom mit dem Brennstoff geführt und am Ende des Feuer-raumes nach oben in die Nachbrönnnkammer geleitet. Die Rostasche wird in den bereits erwähnten Entascher (Wasserbad mit Stegkettenförderer) abgeworfen und von dort in einen bereitgestellten Container transportiert. In der ausgemauerten Nachbrönnnkammer - nach Zugabe von Sekundär-Verbrennungsluft - erreicht das Abgas eine Verweilzeit von über 2 Sekunden bei einer Mindest-Temperatur von 850°C .

## **Luftbypass und Quench**

Nach dem Austritt aus der Nachbrennkammer kann der Abgasstrom bei Bedarf mittels Bypass-Luft durch ein Injektorgebläse auf eine Temperatur von ca. 450°C bis 500°C abgekühlt werden. Die Rauchgase werden anschließend durch eine Wassereindüsung (Quench) und -verdampfung auf etwa 200°C eingestellt. Die schnelle Abkühlung durch das Eindüsen von Wasser dient in erster Linie zur Unterdrückung der DeNovo-Synthese, die im Temperaturfenster von 250°C bis 400°C besonders intensiv erfolgt, aber auch der Verminderung von thermischen Belastungen in den nachfolgenden Aggregaten. Ferner wird die Agglomeration des Flugstaubes gefördert, d.h. die Partikel neigen durch die Erhöhung der Luftfeuchte zur Verklebung untereinander.

## **2.2 Abgasreinigung**

Die erste Stufe der Abgasreinigung dient der Abscheidung der groben Staubpartikel. Sie wird in einem Zyklon durchgeführt. Feinere Partikel werden im nachgeschalteten Staubfilter zurückgehalten. Dieser wird mit 24 Kevlar®-Nomex®-Filterelementen ausgestattet und verfügt über eine gesamte Filterfläche von 492 m<sup>2</sup>. Damit ist die Abscheidung von Feststoffpartikeln aus dem Rauchgasstrom weitestgehend abgeschlossen.

In den letzten beiden Stufen der Rauchgasreinigung wird die Umwandlung bzw. Zerstörung von gasförmigen Schadstoffen realisiert. Der Katalysator (Amalgator®) ist mit Ozongeneratoren ausgestattet, die O<sub>3</sub> für eine beschleunigte katalytische Reaktion erzeugen. Im Adsorber schließlich werden noch vorhandene Schwermetalle und gasförmige Schadstoffe festgehalten, er dient als sogenannter „Polizeifilter“. Das gereinigte Abgas kann nun über ein Saugzuggebläse in den Kamin befördert werden.

## **2.3 Mess- und Analysetechnik**

In einem Raum mit Fensterfront (direkter Blick auf die Anlage) befinden sich zwei Fouriertransformations-Infrarot-Spektrometer (FTIR) mit jeweils nachgeschaltetem Flammenionisationsdetektor (FID) für die kontinuierliche Rauchgasanalyse. Für die Mess- und Prüfgasversorgung der FTIR stehen an gleicher Stelle zwei Gassicherheitszellen und eine Gasverteilung zur Verfügung. Die Gasproben, die von der Versuchsanlage über Teflon-Schläuche und die Gasverteilung in die FTIR geleitet werden, müssen beheizt werden, um ein Auskondensieren von Säure und Wasser zu vermeiden. Zu diesem Zweck sind die Zuführungsschläuche mit Heizleitern umwickelt und die Gasverteilung in einem Heizschrank untergebracht. Die FTIR ermöglichen eine kontinuierliche Erfassung folgender Rauchgaskomponenten: HCl, CO, CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, NO, NO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>, N<sub>2</sub>O, HF, O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O und C<sub>ges</sub>. **Tafel 1** zeigt die Roh- und Reingasmessbereiche des FTIR abhängig von den verschiedenen Komponenten.

Zur kontinuierlichen Erfassung von Quecksilber wird an der MARS-Anlage ein Hg-CEM®-Messgerät der Firma Seefelder Messtechnik eingesetzt. Das Meßsystem bestimmt mit Hilfe eines Festwellenlängen-UV-Photometer die Gesamtkonzentration an Quecksilber in Rauchgasen. Das gesamte Quecksilbermesssystem besteht aus einem Photometer, einer Probenaufbereitung mit Amalgamierungseinheit und einer thermokatalytischer Entnahmesonde. Der Messbereich des Analysators beträgt 0 – 75 µg Hg/m<sup>3</sup> im Amalgamierungsmodus gemäß 17.

BImSchV bzw. 0 – 500 µg Hg/m<sup>3</sup> im Conti-Modus mit einer Nachweisgrenze von 0,1 µg Hg/m<sup>3</sup>.

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

Kursiv gedruckte Werte beziehen sich auf den 2. Messbereich

- Messbereichumschaltung 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

## Tafel 1: Roh- und Reingas-Messbereiche der FTIR

Für die Bestimmung der BET-Oberfläche von Schlacke, Asche und Additiven steht ein Areameter und für die Heizwertbestimmung ein Bombenkalorimeter zur Verfügung, die im Mess- und Überwachungsraum mit untergebracht sind. Für die Messdatenerfassung (Rauchgaszusammensetzung, Temperaturen,...) wird ein leistungsfähiger Rechner mit zugehöriger Peripherie eingesetzt. Die Steuerung und Regelung der Anlage wird von einem SPS-System (Speicherprogrammierbare Steuerung Typ Siemens Simatic S7) übernommen.

## 2.4 Untersuchungsschwerpunkte

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



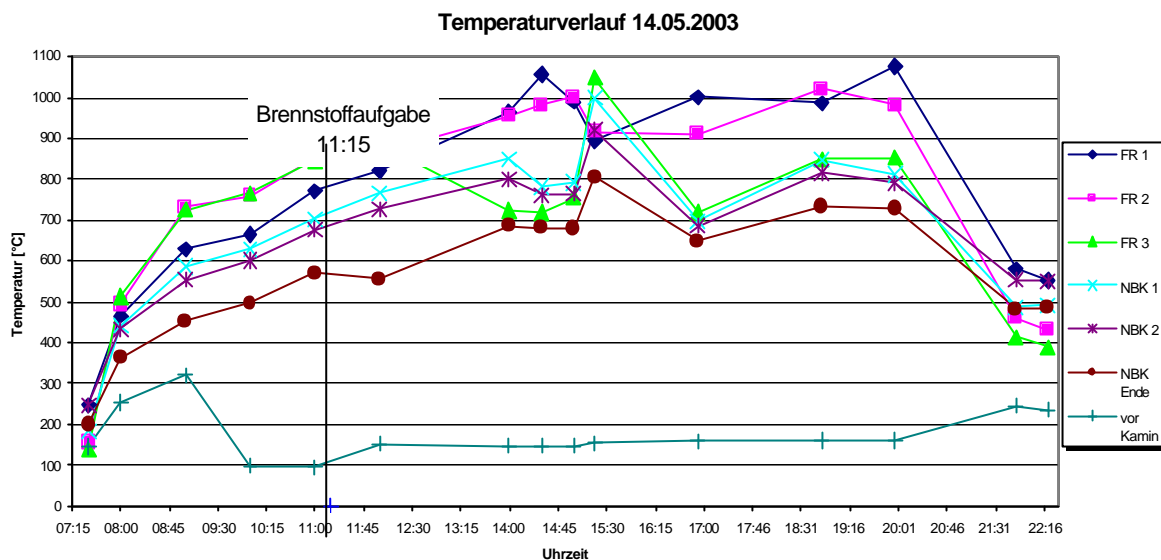
- **schadstoffarme Verbrennung von Feststoffen an der MARS-Anlage (Abfallstoffe, Biobrennstoffe, Produktionsreststoffe).**
- **Analysen zur Nachverbrennung von Abgasen aus der Rostfeuerung.**
- **Erzeugung von Rauchgasen mit speziellen Schadstofffrachten mit nachgeschalteten Rauchgasreinigungsstufen,** 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).
- **Untersuchungen zur emissionsarmen Verbrennung von Biobrennstoffen an Unterschubfeuerungen** (z.B. bei Einsatz von Holzhackschnitzel, Rapsschalen oder Strohfraktionen).
- **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).

## 2.5 Exemplarische Untersuchungsergebnisse

### 2.5.1 Verbrennungsuntersuchungen an der MARS-Anlage

In der Abfallwirtschaft besteht ein zentrales Problem in der Entsorgung energiereicher Fraktionen, die zumeist nur durch thermische Aufbereitungsverfahren umweltgerecht entsorgt werden können. Für eine emissionsarme Verbrennung und weitgehende Inertisierung der verbleibenden Reststoffe müssen solche thermischen Aufbereitungsverfahren auf den jeweiligen Abfallstoff hin optimiert werden. Um für die Praxis übertragbare Ergebnisse zu erzielen, sind eingehende Untersuchungen an Technikumsfeuerungen unabdingbare Voraussetzungen.

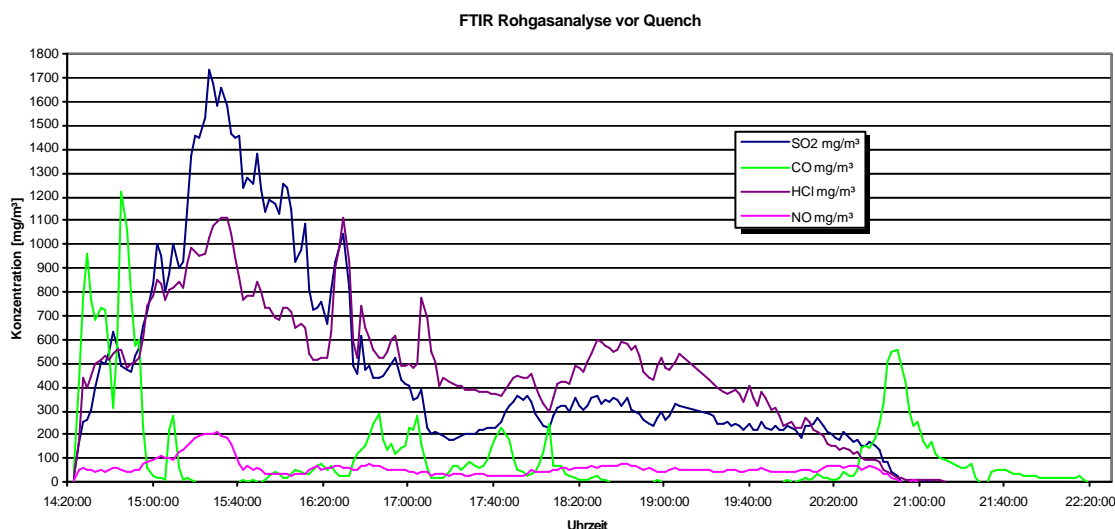
In einer Versuchsreihe wurden an der MARS-Rostfeuerung vorsortierter und konditionierter Gewerbeabfall mit höherem Heizwert untersucht. Dabei wurden Massenströme von etwa 400 kg/h (mit Spitzen von ca. 600 kg/h) eingestellt. Nach einer Aufheizphase, die etwa 6 h mit Heizöl EL benötigte, konnte der Fahrbetrieb auf festen Abfallstoff umgestellt werden. In **Bild 3** sind die Temperaturverläufe in der Rostfeuerung (FR 1 bis 3), in der Nachbrennkammer (NBK 1 und 2, NBK Ende) und vor dem Kamin dargestellt.



**Bild 3: Temperaturverlauf in der MARS-Versuchsanlage vom 14.5.2003**

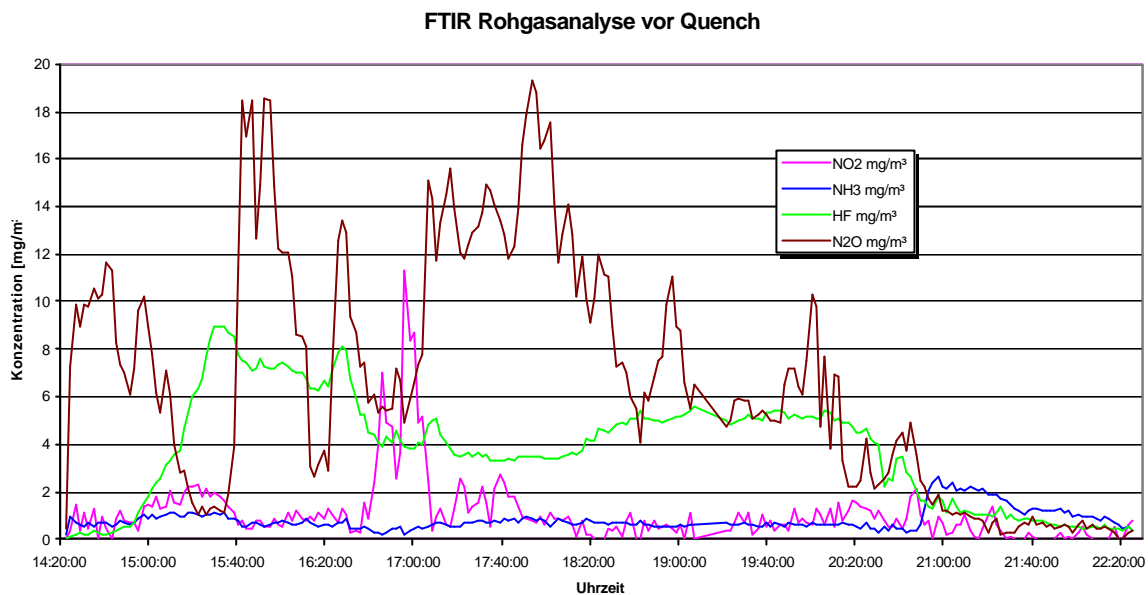
Die Abfall-Brennstoffmenge wurde ab 11.15 Uhr stufenweise bis 12.30 Uhr auf den Volllastwert erhöht, während die Heizölmenge entsprechend reduziert wurde. Die Temperaturschwankungen in der Feuerung sind vor allem durch sehr unterschiedliche Brennstoffzusammensetzungen in den einzelnen angelieferten Abfallgebinden zusehen.

Die Unterschiede durch Brennstoffqualität und Feuerungstemperatur zeigen sich auch deutlich in der Schadstofffreisetzung, wie man aus den Bildern 4 und 5 ersehen kann. In **Bild 4** sind die Rauchgaskonzentrationen an  $\text{SO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{HCl}$  und  $\text{NO}$  (vor Quench) in zeitlicher Abfolge dargestellt. Bemerkenswert sind die niedrigen  $\text{NO}$ -Gehalte, die vor allem durch den wassergekühlten Verbrennungsrost und die stärker gestufte Frischluft erklärt werden kann.



**Bild 4: Rohgaskonzentrationen der Schadgase an der MARS-Anlage vor Quench**

Im **Bild 5** sind die Konzentrationen an Spurengasen wie HF, NO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub> und N<sub>2</sub>O dargestellt, die in vielen Versuchsanlagen kontinuierlich messtechnisch nicht zu erfassen sind. Der Ammoniakgehalt erhöht sich danach signifikant in der Abfahrphase (nach 20.20 Uhr). Ein NO<sub>2</sub>-Emissionsmaximum wurde wie Bild 5 zeigt gegen 17 Uhr festgestellt, während N<sub>2</sub>O einen stärker schwankenden Konzentrationsverlauf aufwies.



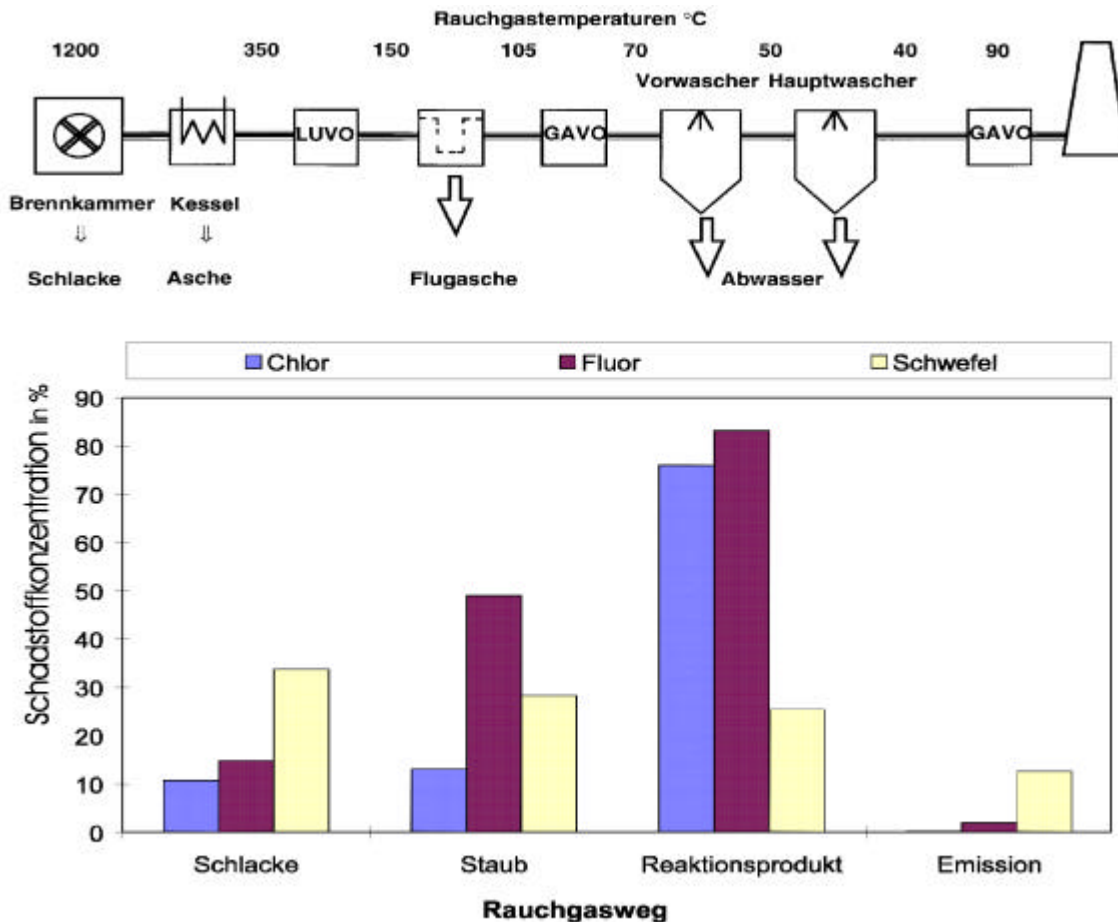
**Bild 5: Rohgaskonzentrationen der Spurengasen an der MARS-Anlage vor Quench**

## 2.5.2 Schadstoffverbleib

Mit Hilfe von Technikumsfeuerungsanlagen (Schmelzkammer-Staubfeuerung) wurden u.a. Aufgaben zur thermischen Entsorgung und Inertisierung von Abfällen bearbeitet ([2.2, 2.3]). Nachfolgend werden beispielhaft einige Ergebnisse diskutiert.

In den Bildern 6, 7 und 8 sind Untersuchungsergebnisse für den Verbleib wichtiger Stoffe bei der Abfallverbrennung mit schmelzflüssigem Schlackeanfall dargestellt. Die Bilanzierung einzelner Komponenten erfolgt vom Input der Verbrennung bis zu den verschiedenen Output Senken wie Schlacke, Staub, Reaktionsprodukt und abgasgetragene Restemission. Bei diesen Untersuchungen musste eine stoffliche Gleichgewichtseinstellung in der Technikumsanlage und in deren Austrittsprodukten gewährleistet sein. In Voruntersuchungen zeigte sich, dass eine 2-wöchige stationäre Betriebsfahrweise vor der Komponentenanalyse erforderlich wurde. In **Bild 6** ist der Verbleib wesentlicher anorganischer Schadstoffe bei der Abfallverbrennung (Feuerraumtemperaturen über 1200 °C) dargestellt. Chlor und Fluor wurden in der Hauptsache im Reaktionsprodukt gefunden, während Schwefel in hohem Umfang in der Schlacke und im Flugstaub nachgewiesen wurde.

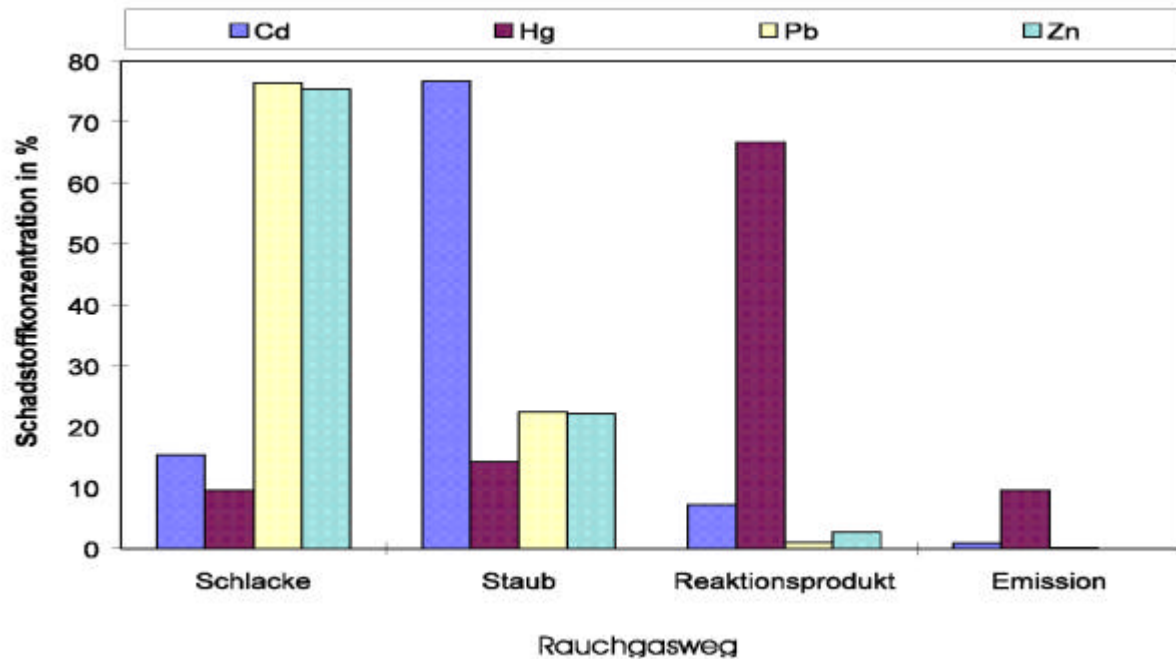




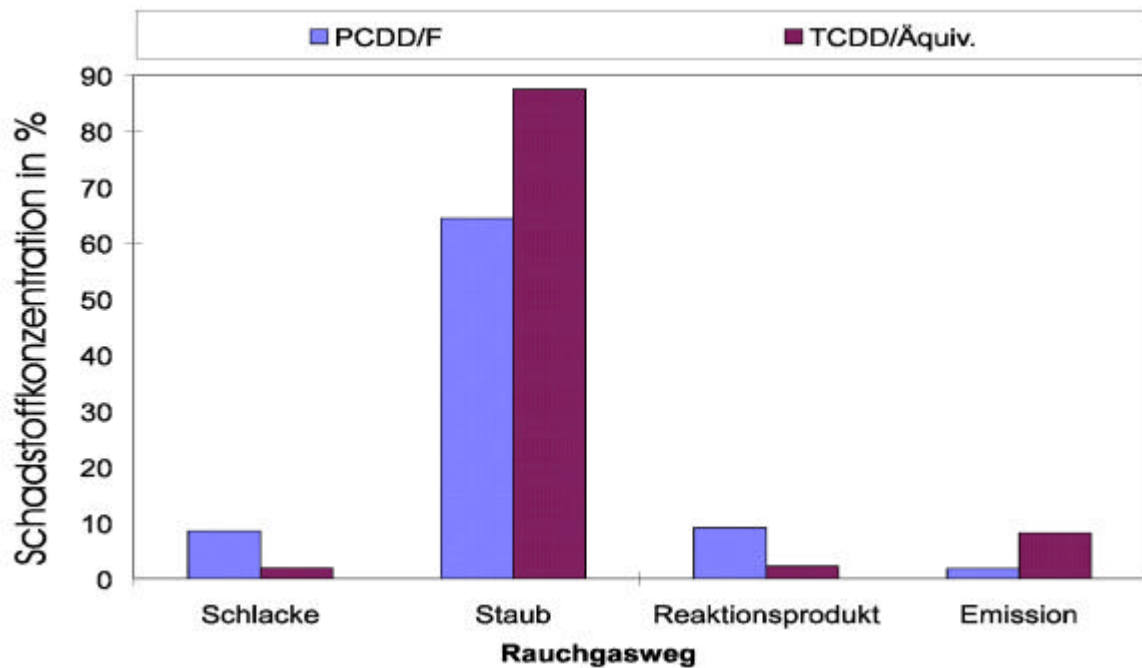
**Bild 6: Verbleib anorganischer Schadstoffe bei der Abfallverbrennung**

In **Bild 7** ist der Verbleib wesentlicher Schwermetalle wiedergegeben. Erwartungsgemäß hoch war der Quecksilbergehalt in den Reaktionsprodukten der nassen Rauchgasreinigung (70 % des In-Put). Dagegen wurde Zink und überraschender Weise auch Blei überwiegend in der Schlacke eingebunden, während Cadmium vor allem in der Flugasche anzutreffen war. Als Restemissionen traten in nachweisbaren Konzentrationen nur Quecksilber und in Spuren Cadmium auf.

Der Verbleib hochtoxischer organischer Spurenverbindungen (PCDD, PCDF, TCDD) zeigt **Bild 8**. Bei den hohen Verbrennungstemperaturen wurden Konzentrationen an chlororganischen Aromaten in der Schlacke im Bereich der Nachweisgrenze ermittelt. Durch den Einfluss der DeNovo-Synthese (katalytische Bildung von chlororganischen Aromaten im Temperaturbereich von etwa 850 bis 150 °C), die bevorzugt an schwermetallhaltigen Stäuben im Rauchgas stattfindet, ergaben sich höhere Gehalte sowohl an PCDD/F als auch an TCDD in der abgeschiedenen Flugstaubfraktion. In den Reaktionsprodukten der Rauchgaswäsche und im gereinigten Abgas wurden, wie Bild 8 zeigt, dagegen nur geringe Gehalte an polychlorierten Verbindungen festgestellt, die im Bereich der analytischen Nachweisgrenze lagen.



**Bild 7: Schwermetallsenken bei der Abfallverbrennung**



**Bild 8: Verbleib von PCDD/PCDF bei der Abfallverbrennung**

### 3. Mathematische Modellierung

Unter einer mathematischen Modellierung wird die Abbildung von chemischen und physikalischen Vorgängen mit Hilfe mathematischer Beziehungen verstanden. Die Gleichungssysteme sind vorwiegend so komplex, dass sie nicht analytisch, sondern numerisch gelöst werden.

Messungen dienen zur Überprüfung, aber auch zur Verifikation des angewendeten Modellkonzepts. Wird 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.

#### 3.1 Beschreibung der Gasphase

Zur Beschreibung der homogenen Gasphase dient folgende differentielle Transportgleichung mit der allgemeinen Zustandsgröße  $\phi$  (Euler-Darstellung) [1.1]:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\mathbf{r} \mathbf{f}) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\mathbf{r} u_j \mathbf{f}) = \frac{\partial}{\partial x_j} D_f \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial x_j} + S_f$$

Term 1       +       Term 2       =       Term 3       +       Term 4

Diese instationäre Transportgleichung berücksichtigt die zeitliche Änderung (Term 1), den konvektiven (Term 2) und diffusiven (Term 3) Transport sowie lokale Quellen und Senken.  $D_\phi$  steht für einen allgemeinen Austauschkoefizienten,  $S_\phi$  bilanziert alle Quellen und Senken.

Die Bilanzgleichungen der drei Hauptverbrennungsvorgänge erhält man durch eine Substitution von  $\phi$  mit der entsprechenden Größe des Teilbereiches:

- Geschwindigkeit  $u_i$                       Impulsbilanzgleichungen (Strömung + Mischung)
- Enthalpie  $h$                                 Enthalpiebilanzgleichungen (Wärmeübertragung)
- Spezies  $c_i$                                 Speziesbilanzgleichungen (Stofftransport + chem. Reaktion)

Bei den Bilanzierungen spielen vor allem folgende Modelle eine wesentliche Rolle:

- Strömung                                      Turbulenzmodelle
- Wärmeübertragung                        Strahlungsmodelle
- Stofftransport                                Reaktionsmodelle

Als Ergebnis einer solchen numerischen Berechnung erhält man 3-dimensionale Verteilungen folgender Größen:

- Geschwindigkeit/Turbulenz (Mischung),
- Spezies ( $C_xH_y$ , CO,  $CO_2$ ,  $H_2O$  und  $O_2$ ) und
- Temperaturen.

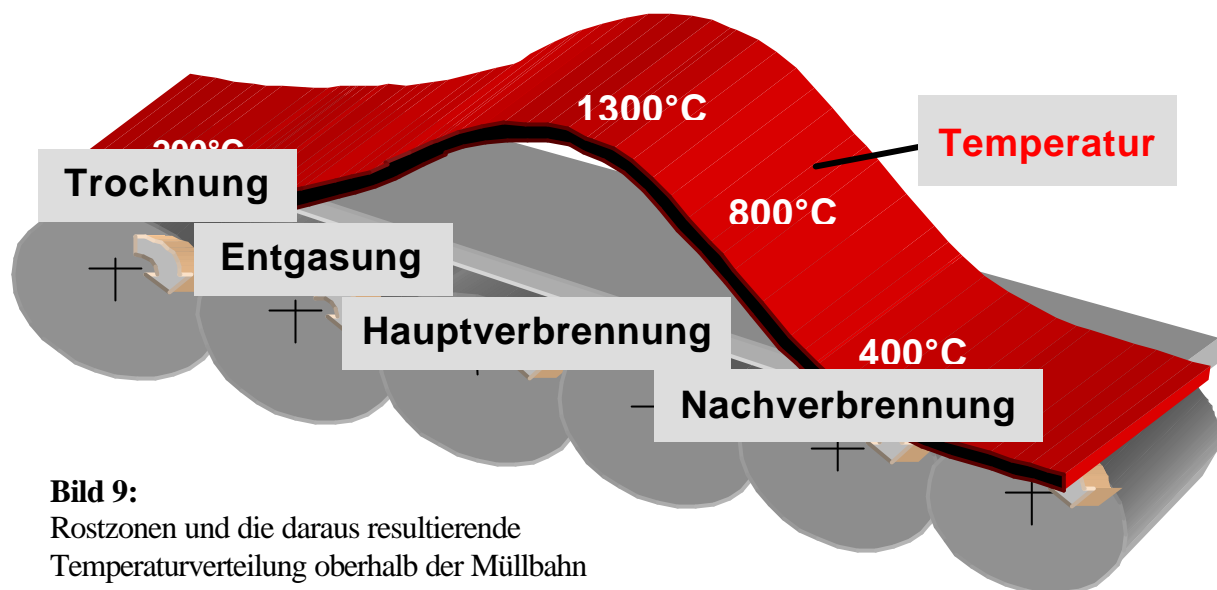
Die Modelle für die Gasphase können erfolgreich im Feuer- und Strahlraum einer Müllverbrennungsanlage angewendet werden. Für die heterogene Verbrennung auf dem Rost gelten diese Ansätze nicht mehr.

### 3.2 Beschreibung des Brennbettes

Probleme bereiten die in 3.1 beschriebenen Ansätze für die heterogene Phase, nämlich das Festbett, da die chemischen und physikalischen Vorgänge, die auf dem Müllrost ablaufen, sehr komplex sind. Die wesentlichen Ursachen sind in der breiten und meist kaum zu definierenden Partikelgrößenverteilung (Stückigkeit) des Mülls und seiner chemischen Zusammensetzung zu suchen. Infolgedessen stellt die Kopplung zwischen Müllbett und Feuerraum, insbesondere der Strahlungsaustausch sowie die Beschreibung der Transport- und Reaktionsvorgänge, ein großes Problem bei der Modellierung dar ([3.1, 3.2, 3.3]).

Bei der heterogenen Verbrennung auf dem Rost (Bild 9) laufen die folgenden Prozesse ab:

- Erwärmung durch Strahlungswärmeaustausch zwischen Müllbett Oberfläche und Feuerraum und durch Wärmeleitung sowie Konvektion innerhalb der Schüttschicht,
- Trocknung (Freisetzung des "physikalischen Wassers"),
- Pyrolyse (Entgasung von brennbaren Kohlenwasserstoffen) und
- Abbrand des festen Kohlenstoffes.



**Bild 9:**

Rostzonen und die daraus resultierende  
 Temperaturverteilung oberhalb der Müllbahn

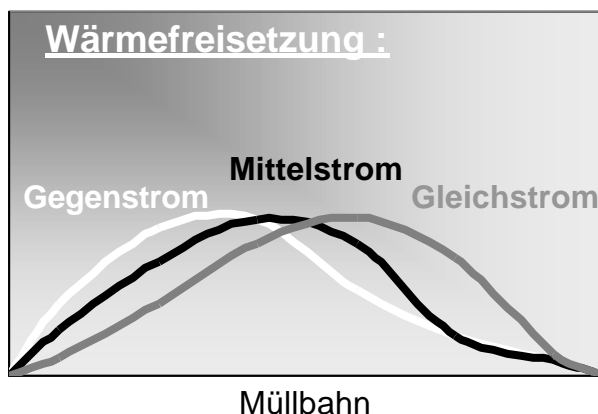
Im Feuerraum erfolgen dann homogene Gasphasenreaktionen, nämlich die Oxidation der Kohlenwasserstoffe sowie des Kohlenmonoxids.

Prinzipiell würde eine dreidimensionale Modellierung alle chemischen und physikalischen Vorgänge sowie die Wechselwirkung zwischen Müllbett und Gasphase berücksichtigen können. Die sich ständig ändernde Zusammensetzung des Mülls und die Stückigkeit erschweren aber die Beschreibung in hohem Maße, so dass oft zweidimensionale oder sogar nur eindimensionale Modelle zum Einsatz kommen. Die wesentlichen Alternativen sind:

- eindimensionales Modell:  
Wärme- und Speziesfreisetzungverteilung entlang der Müllbahn
- zweidimensionales Modell:  
Freisetzungverteilung auch über die Rostbreite
- zweidimensionales Modell:  
Abbrandvorgänge innerhalb der Abfall-Schüttschicht in vertikaler Richtung (Profile)
- dreidimensionales Modell:  
gesamte Abbrandvorgänge in alle Richtungen

Am LUAT wurde für die Müllbahn ein eindimensionales Modell entwickelt, mit dem sich folgende Profile über dem Müllrost näherungsweise angeben lassen (Randbedingung für eine Gasphasensimulation):

- Wärmefreisetzung (Bild 10) bzw. Temperatur,
- Spezieskonzentrationen und
- Geschwindigkeit.



**Bild 10:**  
 Typische Wärmefreisetzungsprofile  
 entlang der Müllbahn

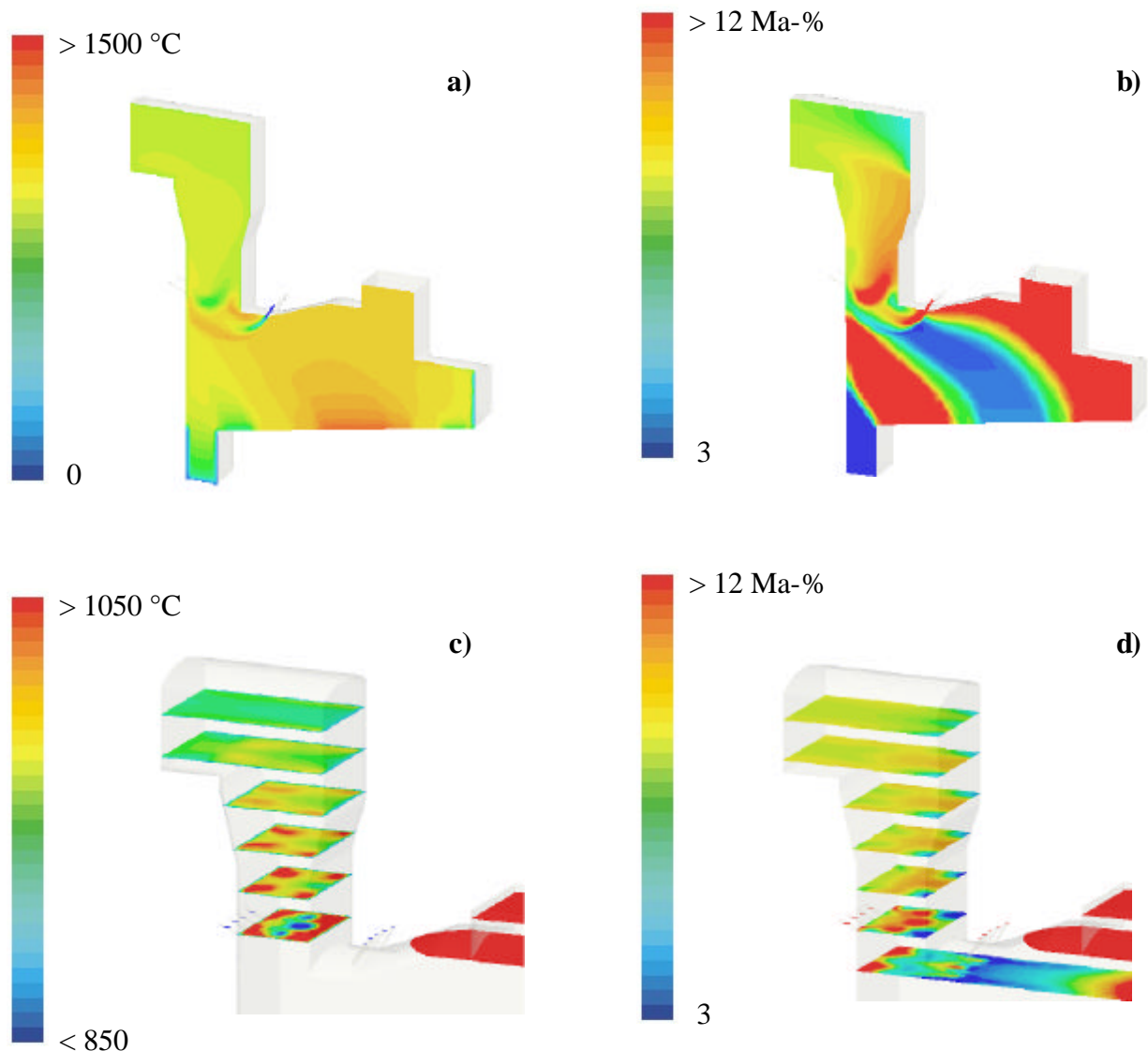
Der gesamte thermische Input ist als Integral der Wärmefreisetzungsfunktion über der Müllbahn definiert. Der Anteil der fühlbaren Wärme (Temperaturprofil) beträgt je nach Luftaufteilung zwischen 50 und 80% der gesamten Wärmemenge. Die latente Wärme wird erst bei der Oxidation von CO und  $C_xH_y$  frei. Ausgehend von einer Reaktionsannahme für C und H des Mülls mit dem Luft- und Müll-Sauerstoff zu CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, O<sub>2</sub> und CH<sub>4</sub>, können durch eine integrale Bilanzierung die „Müllbahnprofile“ approximiert werden.



## 4 Simulationsergebnisse

Für einen Vollastfall mit typischer Müllzusammensetzung und einem thermischen Input von 1 MW wurde die in Kapitel 2 beschriebene Technikumsanlage „MARS“ simuliert. Die Aufteilung Primär- zur Sekundärluft betrug 70 zu 30. Über die Sekundärluftreihen 1 und 2 wurden dem Feuerraum jeweils 50% Verbrennungsluft zugeführt.

Die numerisch berechneten Temperaturen und Sauerstoffgehalte sind in den Bildern 11 a)-d) dargestellt.

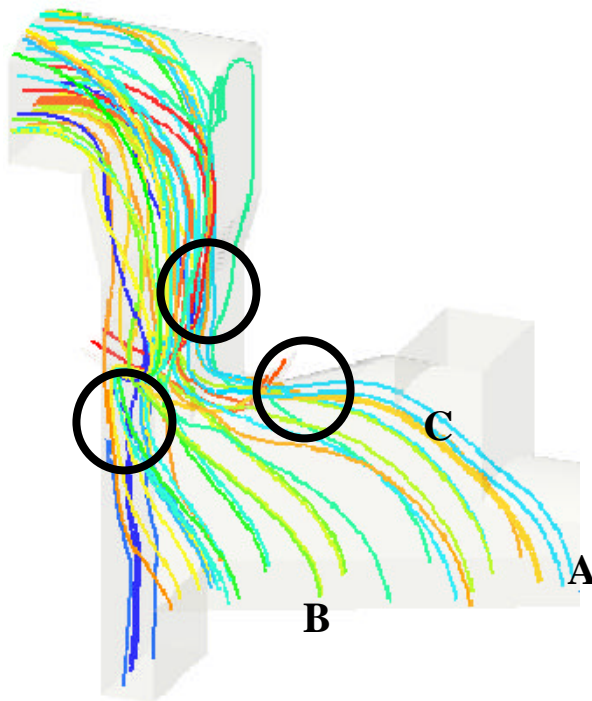


**Bild 11:**

- a) Temperaturverteilung in der Symmetrieebene
- b) Sauerstoffverteilung in der Symmetrieebene
- c) Temperaturverteilungen in horizontalen Schnitten
- d) Sauerstoffverteilungen in horizontalen Schnitten

Die Ergebnisse sind grundsätzlich positiv zu beurteilen. Gerade im Hinblick auf gesetzliche Anforderungen lässt sich anhand der Simulationsergebnisse erkennen, dass die Temperatur oberhalb der letzten Sekundärluftzuführung nicht unter 850°C liegt. In den Ecken lassen sich relativ geringe Sauerstoffgehalte und infolgedessen auch hohe Temperaturen beobachten. Hier besteht durchaus noch Optimierungspotenzial. Beispielsweise kann die Verteilung der Sekundärluft auf die beiden Reihen noch verändert werden, sodass die Sekundärluftstrahlen den gesamten Querschnitt abdecken.

Als Ursache für Verschlackungserscheinungen ist der Flugstaub anzusehen, der aus reaktionsfähigen und klebrigen Partikeln besteht. Entscheidend ist hierbei das Erweichungsverhalten, das von der Zusammensetzung und der Temperatur abhängig ist. Weil die Anströmung der Feuerraumwände durch die Gas- und Partikelphase ebenfalls eine wichtige Rolle spielt, lassen Partikelbahnen z.B. tendenziell erkennen, wo eine Verschmutzungs-, Verschlackungs- oder Erosionsgefahr besteht. Qualitativ kann gefolgert werden, dass an Stellen, an denen viele Partikel auftreten, eine erhöhte Gefahr vorliegt. Bei der Technikumsanlage „MARS“ sind in Bild 12 drei gefährdete Stellen (a, b und c) eingezeichnet.



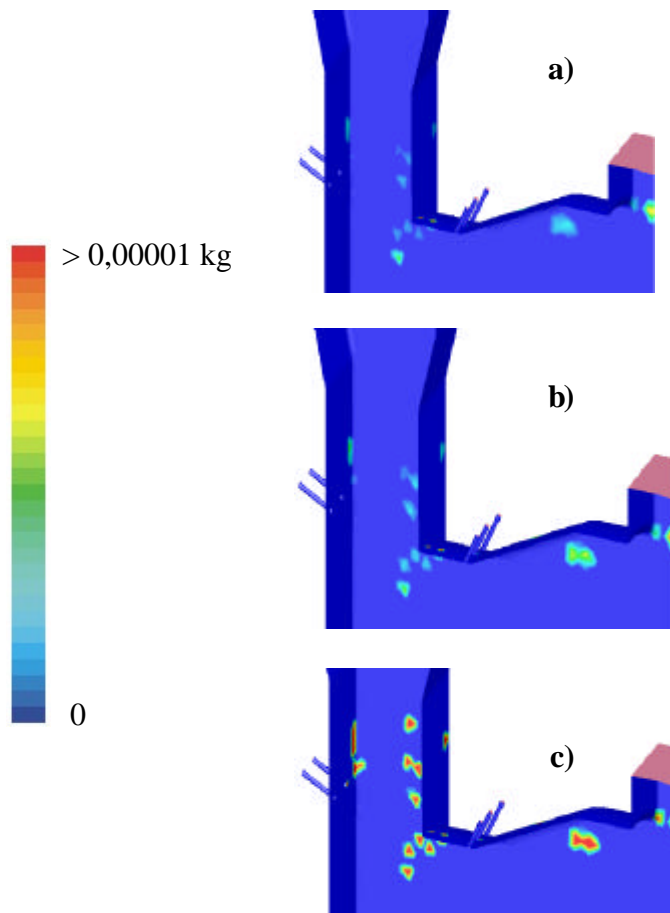
**Bild 12:**  
 Stromlinien und gefährdete Stellen  
 hinsichtlich Partikel/Wand-Kontakten

Partikel, die im vorderen Bereich des Rostes initiiert werden, strömen entlang der Zünddecke und zwischen den Sekundärluftdüsen (Stelle „A“). Anlagerungen im Bereich der Sekundärluftdüsen sind besonders kritisch, weil sich somit der Eindüsungswinkel und infolgedessen der gesamte Verbrennungsprozess verändern kann.

Die Stelle „B“ kennzeichnet ein Gebiet, in dem Partikel aus dem hinteren Rostbereich durch die Hauptströmung so eingeeengt werden, dass sie auf die Rückwand auftreffen.

Basis für die Gefahrenstelle „C“ ist die bei diesen Simulationen gewählte Aufteilung der Sekundärluftmenge. Es bilden sich in der Ebene Sekundärströmungen, die dafür verantwortlich sind, dass Partikel oberhalb der Umlenkung nach außen zu den Seitenwänden abgelenkt werden.

Wie erwähnt, können mit berechneten Stromlinien oder Partikelbahnen nur tendenzielle Aussagen hinsichtlich der Verschlackungsneigung gemacht werden. Für detaillierte Beurteilungen müssen mathematische und thermodynamische Modelle gekoppelt werden. Dies wurde im Rahmen von Forschungstätigkeiten am LUAT durchgeführt [3.4]. Auch für die Anlage „MARS“ konnten somit abgelagerte Massen berechnet werden. Die Ergebnisse für verschiedene Zeitschritte sind in den Bildern 13 a-c dargestellt.



**Bilder 13:**

- a) abgelagerte Masse nach 300 s
- b) abgelagerte Masse nach 600 s
- c) abgelagerte Masse nach 1 Tag

Anhand der thermodynamischen Berechnung ist erkennbar, dass die Stellen „A“ und „C“ kritisch im Hinblick auf mögliche Verschlackungserscheinungen zu beurteilen sind.

Die Partikel, die vom Rostende in den Feuerraum gelangen und in Richtung Rückwand abgelenkt werden (Stelle „B“), stellen nur eine geringe Gefahr dar. Offensichtlich erfolgen nur sehr geringe Partikel-Wand-Kontakte bzw. stellt sich die thermodynamische Situation, d.h. Kombination aus Zusammensetzung und Temperatur, recht positiv dar.

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Die Betreiber kommunaler Restabfallverbrennungsanlagen sind derzeit durch eine Reihe von Teilproblemen gefordert, Modifikationen an ihren Anlagen durchzuführen

Für die Planung von Umbaumaßnahmen und die Optimierung des Anlagenbetriebs können in diesem Zusammenhang experimentelle Untersuchungen und/oder Simulationsrechnungen gewinnbringend eingesetzt werden.

In der vorliegenden Arbeit wurde die Versuchsanlage MARS von ihrem grundsätzlichen Aufbau dargestellt. Erste Ergebnisse dokumentieren einen gesicherten Betrieb und die grundsätzliche Eignung der Anlage für die beabsichtigten Detailuntersuchungen.

Die grundsätzliche Eignung des Werkzeugs Computersimulation (CFD computational fluid dynamics) wurde bereits an anderer Stelle gezeigt [3.1, 3.2, 3.3]. Auf Basis eines solchen evaluierten Modells wurden erste Rechnungen durchgeführt, die wichtige Zusatzinformationen zu einzelnen Betriebszuständen und Prozessgrößen liefern. Solche Rechnungen werden den zukünftigen Anlagenbetrieb grundsätzlich begleiten

## Literatur

- [1.1] Görner, K.: Technische Verbrennungssysteme. Springer Verlag, Berlin, 1991
- [1.2] 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-essen.de](http://www.luat.uni-essen.de))
- [2.1] Koch AG: Rostbeläge für die thermische Abfallverwertung. Firmenprospekt
- [2.2] 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)
- [2.3] Gillmann, P.: Beiträge des Instituts für Umweltverfahrenstechnik zu aktuellen Problemen der Abfalltechnik. VDI-Fortschrittberichte, Reihe 15, Nr. 195, 1997, Düsseldorf (zu beziehen über LUAT, Uni Essen, Leimkugelstr.10, 45141 Essen)
- [3.1] 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-essen.de](http://www.luat.uni-essen.de))
- [3.2] 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-essen.de](http://www.luat.uni-essen.de))
- [3.3] 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-essen.de](http://www.luat.uni-essen.de))
- [3.4] Liebethuth, M.: Mathematische Modellierung des Mineralansatzverhaltens disperser Brennstoffe. (Diss. eingereicht)