

**Erstellung und Validierung eines mathematischen Modells  
für die heterogene Verbrennung auf dem Müllrost  
und dessen Anwendung bei CFD-Simulationen  
hinsichtlich einer optimierten Feuerungstechnik**

Universität-Gesamthochschule Essen  
Fachbereich 12, Maschinenwesen  
(Energie-, Maschinen- und Verfahrenstechnik)

Dissertation zum Erwerb  
des Grades  
Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

vorgelegt von Thomas Klasen  
Mülheim an der Ruhr

Tag der mündlichen Prüfung: 22.07.2003

1. Gutachter: Professor Dr.-Ing. K. Görner
2. Gutachter: Professor Dr.-Ing. I. Romey

# Inhaltsverzeichnis

	Seite
1 Einleitung .....	4
1.1 Einführung und Motivation .....	4
1.2 Stand der Technik .....	5
1.3 Aufgabenstellung .....	8
2 Müllverbrennung .....	9
2.1 Allgemeine Grundlagen .....	9
2.2 Verbrennungsroste .....	10
2.2.1 Luftgekühlter Rost .....	10
2.2.2 Wassergekühlter Rost .....	11
2.2.3 Verbrennungszonen auf dem Rost .....	12
2.3 Feuerräume von Müllverbrennungsanlagen .....	13
2.3.1 Feuerraumgeometrie .....	13
2.3.2 Ursprüngliche Sekundärluftzuführung in den Feuerraum .....	15
2.3.3 Neue Konzepte zur Sekundärlufteindüsung in den Feuerraum .....	16
2.4 Keramische Auskleidungen und Feuerfest-Systeme .....	21
2.4.1 Feuerfestmaterialien .....	21
2.4.2 Aufbau eines Feuerfest-Systems .....	23
2.4.3 Wärmetechnische Berechnungen .....	24
2.5 Korrosionsvorgänge in Hausmüllverbrennungsanlagen .....	28
2.5.1 Korrosionsproblematik .....	28
2.5.2 Grundlagen der Korrosion .....	28
2.5.3 Korrosion durch Chlor und Chloride .....	31
2.5.4 Korrosion durch CO in reduzierender Gasatmosphäre .....	33
2.5.5 Reaktionen mit Schwefel .....	34
2.5.6 Korrosion durch Salzschmelzen .....	34
2.6 Verschlackung und Verschmutzung .....	35
2.6.1 Verschlackungs- und Verschmutzungsproblematik .....	35
2.6.2 Ansatzbildung .....	35
2.6.3 Schmelzverhalten von Ascheteilchen .....	36

3	Verbrennungsprozesse .....	38
3.1	Allgemeine Grundlagen .....	38
3.2	Verbrennungsreaktionen .....	41
3.3	Brennstoffe .....	44
3.4	Schadstoffe .....	45
4	Mathematische Modellierung und numerische Simulation .....	49
4.1	Einführung in die Modellbildung .....	49
4.2	Allgemeine Transportgleichung .....	50
4.3	Beschreibung einer turbulenten Strömung .....	51
4.3.1	Transportgleichung für die Bilanzierung einer Strömung .....	51
4.3.2	Turbulenzmodellierung .....	52
4.3.2.1	Eigenschaften der Turbulenz .....	52
4.3.2.2	Zeitmittelung .....	52
4.3.2.3	Reynolds-Spannungs-Modell .....	54
4.3.2.4	Algebraisches Spannungs-Modell .....	55
4.3.2.5	k- $\epsilon$ -Modell .....	55
4.3.2.6	Wandnahe Bereiche .....	57
4.4	Beschreibung der Wärmeübertragung .....	58
4.4.1	Transportgleichung für die Bilanzierung der Enthalpie .....	58
4.4.2	Modellierung der Strahlung .....	59
4.4.2.1	Eigenschaften der Strahlung .....	59
4.4.2.2	Strahlungsmodelle .....	60
4.4.2.3	Zonen-Modell .....	61
4.4.2.4	Fluss-Modell .....	64
4.4.2.5	Randbedingungen bei Strahlungsmodellen .....	65
4.5	Beschreibung von reagierenden Strömungen .....	66
4.5.1	Stofftransportgleichung .....	66
4.5.2	Reaktionsmodelle bei kinetisch kontrollierten Reaktionen .....	67
4.5.3	Reaktionsmodelle für turbulent reagierende Strömungen .....	68
4.5.3.1	Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion .....	68
4.5.3.2	Wirbelzerfallsmodelle .....	68
4.6	Diskretisierung und numerische Lösungsverfahren .....	71
4.7	Beschreibung von starren, kugelförmigen Partikeln .....	75
5	Modellierung der Rostverbrennung .....	77
5.1	Heterogene Verbrennung auf dem Rost .....	77
5.2	Aufgabenstellung für die CFD-Modellierung .....	82
5.3	Stand der Modellierung .....	83
5.4	Weiterentwicklung der mathematischen Modelle .....	90

6	Anlagen-, Betriebs- und Simulationsdaten .....	99
6.1	Modellanlage für eine Vorstudie .....	99
6.2	Modellanlagen für die Hauptstudie .....	103
6.2.1	Untersuchungspunkte und Fragestellungen der Hauptstudie .....	103
6.2.2	Sekundärlufteindüsungskonzepte für Gleich-, Gegen- und Mittelstrom.....	103
6.2.2.1	Feuerraumgeometrie der Modellanlagen .....	103
6.2.2.2	Weitere untersuchte Sekundärluftkonzepte.....	107
6.2.3	Betriebs- und Auslegungsdaten der Berechnungsfälle.....	110
6.2.4	Untersuchte Feuerfest-Systeme .....	113
6.3	Reale Großanlagen .....	117
6.4	Verwendete Modelle und numerische Berechnungsdaten .....	120
7	Ergebnisse .....	121
7.1	Vergleich von Mess-, Literatur- und Simulationswerten .....	121
7.1.1	Berechnete Realanlagen .....	121
7.1.2	Vergleich mit Literaturdaten.....	128
7.2	Vorarbeiten .....	131
7.2.1	Sekundärluftdüsenanordnung .....	131
7.2.2	Symmetrierandbedingungen .....	137
7.2.3	Schütthöhenberechnung mit PFC .....	139
7.3	Hauptuntersuchungen an den Modellanlagen.....	140
7.3.1	Feuerraumgeometrie.....	140
7.3.2	Wärmefreisetzungsverlauf auf dem Rost.....	146
7.3.3	Sekundärluftzuführungskonzept .....	149
7.3.4	Feuerfest-Auskleidung.....	161
7.3.5	Korrosionsgefahr .....	167
7.3.6	Verschlackungs- und Verschmutzungsneigung.....	172
7.4	Anlagenoptimierung von realen Großanlagen.....	175
7.4.1	Sekundärluftverteilung.....	175
7.4.2	Sekundärluftdüsenanstellung .....	179
8	Zusammenfassung .....	185
9	Formelzeichen .....	191
10	Literaturverzeichnis .....	196
A	Anhang (Farbtafel).....	A1

# 1 Einleitung

## 1.1 Einführung und Motivation

Die thermische Entsorgung von Abfällen stellt zunehmend einen unverzichtbaren Teil der heutigen Abfallwirtschaft dar. Rechtliche Rahmenbedingungen, wie z.B. das im Oktober 1996 in Kraft getretene Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz (Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Beseitigung von Abfällen, KrW-/AbfG [1.1]), üben in Deutschland einen großen Einfluss auf die Steuerung der Abfallströme zu einzelnen Entsorgungsverfahren aus. Das KrW-/AbfG verfolgt den Grundgedanken, die anfallenden Rückstände als Sekundärrohstoffe in den Wirtschaftskreislauf zurückzuführen.

Die Situation des deutschen Entsorgungsmarktes sieht momentan so aus, dass etwa 26% (9,6 Mio. t) des Haus- und Gewerbemülls thermisch behandelt werden. Unter der Annahme, dass die TA Siedlungsabfall [1.2] in ihrer heutigen Form umgesetzt und das KrW-/AbfG konsequent angewandt wird, steigert sich die in Deutschland thermisch zu entsorgende Abfallmenge in den kommenden drei Jahren um ca. 100% [1.3].

Verbrennungsanlagen besitzen gegenüber anderen Entsorgungsverfahren (z.B. Deponierung) wesentliche Vorteile. Die im Abfall gebundene Energie kann in technisch nutzbare Energie überführt werden, das Volumen des Mülls wird stark reduziert, toxische oder verseuchte Stoffe können zerstört werden und es besteht bei der Deponierung der Reststoffe praktisch keine Gefahr einer Grundwasserverschmutzung.

Industrie- und Sonderabfälle werden üblicherweise in Drehrohröfen behandelt, wobei eine sichere thermische Zersetzung insbesondere durch sehr hohe Temperaturen erzielt wird. Das klassische Feuerungssystem für kommunalen Müll ist die Rostfeuerung. In den meisten Hausmüllverbrennungsanlagen ist der Rost entweder als Walzen- oder als Schubrost ausgeführt. Der Rost hat die Aufgabe den Abfall zu transportieren und zu schüren, d.h. gut durchzumischen, da das größte Problem bei der Verbrennung von Müll die zeitlich stark veränderliche Abfallzusammensetzung ist. In Zeitabständen von Minuten können sich die Brennstoffeigenschaften deutlich verändern, was eine Beeinflussung der Abbrenngeschwindigkeit und somit auch des lokalen Luftbedarfes auf dem Verbrennungsrost zur Folge hat. Außerdem ist der Heizwert des Mülls in den letzten Jahren stetig angestiegen, was sich vor allem in der Erhöhung der Feuerraumtemperatur nachteilig bemerkbar machte. Bei einer Vielzahl der vorhandenen Anlagen offenbarten sich daher nach gewissen Reisezeiten die beiden folgenden Probleme:

- Korrosionserscheinungen (insbesondere an den Wänden des Feuerraumes sowie der Nachbrennkammer und an den Überhitzerheizflächen) und
- Verschlackungen und Verschmutzungen (vor allem der Kesselheizflächen).

Dies ist problematisch, da der Betrieb von Abfallverbrennungsanlagen heutzutage durch einen harten Wettbewerb geprägt ist und Auslastung sowie Verfügbarkeit sehr wichtige Voraussetzungen für einen wirtschaftlichen Betrieb einer solchen Anlage sind. Ausfallzeiten, Reinigungs- und Reparaturkosten, die in erster Linie auf Grund von Verschmutzungen, Verschlackungen und Korrosionen entstehen, können schnell zu einem großen wirtschaftlichen Problem für Anlagenbetreiber werden. In der Regel liegen die Kosten für einen Kessel-Stillstand bei ca. 50.000 Euro/Tag.

## 1.2 Stand der Technik

Die in vielen Ländern vom Gesetzgeber vorgeschriebenen Grenzwerte [1.4, 1.5, 1.6] lassen sich in hohem Maße nur mittels eines kontrollierten Verbrennungsprozesses erzielen. Außerdem werden infolgedessen Verschlackungs-, Verschmutzungs- und Korrosionsneigungen teilweise deutlich reduziert. Nach der 17. BImSchV '90 [1.6] darf die Temperatur für einen vollständigen Ausbrand der Rauchgase zwei Sekunden lang nicht unter 850°C liegen. Gleichzeitig muss der Sauerstoffgehalt mindestens 6 Vol.-%, tr. betragen. In der Praxis werden zum Nachweis Netzmessungen an verschiedenen horizontalen Ebenen durchgeführt. Eine Optimierung der Verbrennungsprozesse anhand dieser Netzmessungen ist allerdings schwierig und kostenintensiv, da Spezieskonzentrationen, Geschwindigkeiten und Temperaturen -wenn überhaupt- nur punktuell erfasst und darüber hinaus vorwiegend als 10-Minuten-Mittelwerte nicht gleichzeitig, sondern nacheinander experimentell bestimmt werden.

In den letzten Jahren wurden anlagenspezifische Modifikationen durchgeführt, um den Verbrennungsprozess zu optimieren und die beschriebenen Bedingungen einzuhalten. Hierbei sind vor allem folgende Punkte zu nennen:

- Sekundärluftzuführung:  
Zum einen wurden die Winkelanstellungen der einzelnen Düsen variiert, um bestimmte Strömungseffekte zu induzieren [1.7, 1.8], zum anderen kamen zusätzliche verfahrens- und anlagentechnische Varianten mit dem Ziel einer Strömungsvergleichmäßigung im Bereich des Übergangs vom Feuerraum in den 1. Zug zum Einsatz (engster Querschnitt) [1.9, 1.10].
- Feuerraumgeometrie:  
Neben Gleichstromfeuerungen wurden auch Mittel- und Gegenstromfeuerungen konzipiert.
- Feuerfestmaterial:  
Mit neuen Produkten und Bindesystemen, verstärktem Einsatz von dichten vorgeformten Materialien und speziellen Haltesystemen haben die Hersteller von Feuerfestprodukten auf die höheren thermischen und komplexeren chemischen Betriebsbedingungen reagiert [1.11, 1.12, 1.13].

Um Temperatur-, Strömungs- und Konzentrationsfelder betrachten und analysieren zu können, wurden mathematische Modelle entwickelt, bei denen die chemischen und physikalischen Vorgänge mit Hilfe von Gleichungen oder Gleichungssystemen beschrieben werden. Das Lösen dieser Gleichungen erfolgt auf Grund der Komplexität in den meisten Fällen durch eine numerische Berechnung. Die Güte der Modelle, die beispielsweise aus theoretischen Ansätzen oder empirischen Daten gewonnen werden können, kann schließlich aus der Abweichung zwischen den vorhergesagten und den experimentell bestimmten Werten ermittelt werden. Im letzten Jahrzehnt hat die numerische Berechnung von reagierenden Strömungen an vielen Stellen dazu beigetragen, komplexe verfahrenstechnische Anlagen zu simulieren und zu verbessern. Die numerische Simulation von Strömungs-, Mischungs- und Reaktionsvorgängen hat inzwischen einen Stand erreicht, der einen industriellen und wissenschaftlichen Einsatz gestattet. Bei der Abbildung von Feuerungsanlagen bzw. Einzelflammen kommen Strömungs-, Reaktions- und Wärmeübertragungsmodelle zum Einsatz. Seit 1970 sind mit Hilfe dieser Modelle beispielsweise Simulationen für Kohlenstaubflammen sehr erfolgreich durchgeführt worden [1.14, 1.15].

Publikationen über numerisch berechnete Müllverbrennungsanlagen sind in erster Linie wegen des inhomogenen Feststoffes "Müll" nur sehr selten zu finden. Obwohl die Rechnerkapazitäten in den letzten Jahren bei stark sinkenden Preisen enorm gestiegen sind, wurden weltweit nur sehr wenige numerische Simulationen von Müllverbrennungen durchgeführt. Einzig in Korea (Department of Mechanical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Taejon [1.16]), England (Department of Chemical and Process Engineering, University of Sheffield [1.17]), USA (School of Mechanical Engineering and Aerospace Engineering, University of Cornell [1.18]) und Deutschland (Lehrstuhl für Energieanlagentechnik, Universität Bochum [1.19], Forschungszentrum in Karlsruhe [1.20] und Lehrstuhl für Umweltverfahrenstechnik und Anlagentechnik, Universität Essen [1.21, 1.22, 1.23, 1.24, 1.25, 1.26, 1.27]) konnten bedeutsame wissenschaftliche Ergebnisse mit Hilfe von Strömungssimulationen im Rahmen von Forschungstätigkeiten gewonnen werden.

Vor etwa 10 Jahren wurden am „Department of Mechanical Engineering“ in Korea die ersten zweidimensionalen Simulationen begonnen und mit sogenannten Kaltluft- oder Wasser-Modellen verglichen. An einer Gegenstromversuchseinrichtung konnten gute Übereinstimmungen zwischen dem numerisch bestimmten zweidimensionalen Geschwindigkeitsfeld und dem visualisierten "kalten" Strömungsverlauf gefunden werden [1.28]. Allerdings treten hierbei grundsätzlich einige Schwierigkeiten auf. Verkleinerte „Cold-Flow“-Modelle weisen das Problem einer unzureichenden geometrischen, aerodynamischen, chemischen und thermischen Ähnlichkeit auf. Vor allem kann die in der Realität auftretende Wärmeübertragung durch Strahlung nicht berücksichtigt werden, sodass sich nahezu isotherme Bedingungen im Berechnungs-

raum ergeben. Ein zusätzlicher Nachteil bei zweidimensionalen Modellen ist die Auswahl der Schnittebene, da sich die Düsenreihen beispielsweise in Düsenanzahl oder -durchmesser unterscheiden können.

Das Werkzeug "numerische Simulation" ist zur Optimierung von Müllverbrennungsanlagen im Vergleich zu anderen Feuerungssystemen relativ selten in der Vergangenheit eingesetzt worden. Spezies-, Temperatur- und Strömungsverläufe können aber mit Hilfe von dreidimensionalen Simulationsrechnungen im Gegensatz zu den beispielsweise relativ teuren und nicht sehr abbildungsgenauen Cold-Flow-Modellen innerhalb kürzester Zeit für verschiedene Betriebsfälle untersucht und optimiert werden. Vor allem sind Unterwindverteilungen, Wärmeprofile auf der Müllbahn, Sekundärlufteindüsungen (Eindüsungsgeschwindigkeit, Geometrie, Anströmwinkel, Luftverteilung, ...), Feuerfestmaterialien und Lastpunkte beliebig variierbar, sodass Prozess- und Anlagenoptimierungen auf der Basis von mathematischen Modellen die Anlagenauslastung erheblich steigern können und sich ein Umbau häufig schon nach kurzer Zeit amortisiert.

Es gibt mehrere Möglichkeiten die Verbrennung auf dem Rost zu modellieren. Der Unterschied liegt in erster Linie in der Approximationsgüte. Die wesentlichen Alternativen sind:

- eindimensionales Modell:  
Wärme- und Speziesfreisetzung entlang der Müllbahn
- zweidimensionales Modell:  
Freisetzung auch über die Rostbreite
- zweidimensionales Modell:  
Abbrandvorgänge innerhalb der Schüttschicht in vertikaler Richtung
- dreidimensionales Modell:  
gesamte Abbrandvorgänge in alle Richtungen

Die meisten Institute und Firmen [1.16, 1.18, 1.20, 1.21, 1.29] verwenden eindimensionale Modelle. Hierbei werden die Randbedingungen für die in den Feuerraum eintretenden Stoff- und Energieströme entlang der Müllkontur als Verteilung vorgegeben.

Ein Abbrandmodell zur Beschreibung der Brennstoffumsetzung auf dem Rost wird bei zweidimensionalen Betrachtungen eingesetzt, was allerdings im Vergleich zu eindimensionalen Modellen mit einem sehr erhöhten Rechenaufwand verbunden ist.

Dreidimensionale Modelle werden seit einigen Jahren an der Universität in Sheffield [1.30] angewandt, um z.B. Zusammensetzungen innerhalb der Müllschicht oder Müllbetthöhen in Abhängigkeit des Ortes berechnen zu können.



Im letzten Jahrzehnt hat sich sowohl für technische Großanlagen als auch für kleinere Versuchseinrichtungen das Simulationsprogrammpaket FLUENT für Verbrennungsrechnungen bewährt [1.31, 1.32]. Die Standardversion von FLUENT enthält mehrere allgemein gültige Strömungs-, Reaktions- und Wärmeübertragungsmodelle und ist problemlos durch Unterprogramme erweiterbar, sodass auch projektspezifische Modelle eingesetzt werden können.

FLUENT wurde 1996 daher auch im Rahmen einer Diplomarbeit [1.21] eingesetzt, um den Beweis zu erbringen, dass Temperatur-, Spezies- und Geschwindigkeitsverteilungen im Feuer- und Nachbrennraum von Abfallverbrennungsanlagen mittels vereinfachter mathematischer Modelle und Annahmen für die heterogene Verbrennung auf dem Rost ausreichend genau und schnell vorhergesagt werden können.

### **1.3 Aufgabenstellung**

Im Rahmen dieser Arbeit war zum einen die Approximationsgüte der in der Diplomarbeit eingesetzten Modelle für die heterogene Verbrennung im Müllbett anhand von Messwerten zu analysieren und gegebenenfalls zu verbessern, zum anderen sollten auf Basis dieser Modelle teils praxisnahe, teils theoretische Untersuchungen durchgeführt werden.

Ausgehend von den Grundlagen der Verbrennungstechnik sowie der mathematischen Modellierung von Verbrennungsprozessen, lag das Hauptaugenmerk der theoretischen Studien an einer Modellanlage auf allgemein gültige Aussagen zur Anlagenoptimierung hinsichtlich Feuerraumgeometrie (Gleich-, Mittel- oder Gegenstromfeuerung), Feuerfestmaterial, gefährdete Gebiete (Korrosions-, Verschlackungs- und Verschmutzungsneigung) und Art der Sekundärluftzuführung (z.B. mit Verdrängungskörper oder tangentiale Eindüsung).

Die praxisnahen Berechnungen sollten anhand eines Referenzfalles zeigen, dass die vorhergesagten Temperaturen und Konzentrationen mit den Messwerten weitestgehend übereinstimmen. Zusätzlich waren an den realen Großanlagen Optimierungsmöglichkeiten aufzuzeigen.

## 8 Zusammenfassung

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit waren mehrere Aufgabenstellungen zu erörtern. Ausgehend von den Grundlagen der Verbrennungstechnik und der mathematischen Modellierung von Verbrennungsprozessen, lag das Hauptaugenmerk auf folgenden Punkten:

- Entwicklung eines Rostmodells für die heterogene Verbrennung im Müllbett und Kopplung mit einem CFD-Code,
- Validierung des Modells mit Hilfe von Messwerten aus Netzmessungen,
- Systemstudie: Simulationsergebnisse aus theoretischen Studien an Modellanlagen sollten wichtige allgemein gültige Erkenntnisse hinsichtlich Feuerraumgeometrien, Sekundärluftzuführungen, Wärmeentbindungen auf dem Rost, Feuerfestsystemen und gefährdeten Gebieten liefern und
- Reale Großanlagen: Simulationsergebnisse sollten aufzeigen, welche Parameter die Verbrennungsbedingungen erheblich verbessern und somit die einzelnen Verteilungen homogenisieren können.

Das entwickelte Rostmodell stellt ein vereinfachtes, eindimensionales Modell dar, das die Verbrennung auf dem Rost mit den homogenen Gasphasenreaktionen im Müllkessel auf indirektem Wege koppelt. Ausgehend von einem Wärmefreisetzungsprofil, individuellen Betriebsdaten und einer Verteilungsannahme für C und H des Mülls zu CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, O<sub>2</sub> und CH<sub>4</sub>, wurden Temperatur-, Geschwindigkeits- und Speziesverteilungen entlang der Müllkontur mittels einer integralen Bilanzierung näherungsweise bestimmt. Die Müllkontur wurde mit Hilfe eines Partikelsimulationsprogrammes abgeschätzt. In der Nähe der Müllaufgabe wurde eine Schütthöhe von ca. 600 mm berechnet, am Rostende von etwa 100 mm.

Diese Profile dienten als Randbedingung für eine reine Gasphasensimulation und zeigten bei einer Gegenüberstellung mit diversen Literaturdaten (Mess- und Simulationsdaten) eine tendenziell richtige Abbildung.

An zwei europäischen Großanlagen wurden Netzmessungen durchgeführt, an denen die Modelle bzw. Müllbahnprofile überprüft werden konnten. Nicht nur das Niveau der gemessenen Temperatur- und Konzentrations-Mittelwerte konnte für alle Messebenen gut abgebildet werden, sondern teilweise auch Ungleichverteilungen innerhalb einer Ebene.

Da die Abweichungen zwischen den Mess- und Simulationswerten vorwiegend unbedeutend klein waren, konnte gefolgert werden, dass die verwendeten Modelle, Ansätze sowie Reaktionsparameter die Vorgänge in der Gasphase ausreichend genau abbilden können. Die Modelle sind allgemein gültig auf jede Anlage anwendbar und wurden daher auch im Rahmen von Simulationsstudien an den Modellanlagen eingesetzt.

Aus den theoretischen Untersuchungen konnten wichtige Erkenntnisse bezüglich der Feuerraumgeometrie und der Sekundärlufteindüsung gewonnen werden. Bei konstanter thermischer Leistung und gleichem Verbrennungsrost wurden Gleich-, Gegen- und Mittelstromfeuerungen auf charakteristische Merkmale untersucht. Das Hauptaugenmerk war vor allem auf gleichmäßige Strömungs-, Konzentrations- und Temperaturverteilungen gerichtet. Vergleiche von absoluten Temperatur-, O<sub>2</sub>- und CO-Niveaus im Feuer- und Strahlraum der Modellanlagen (basierend auf acht realen europäischen Großanlagen) offenbarten die Vor- und Nachteile des jeweiligen Feuerraum- sowie Sekundärlufteindüsungskonzeptes.

Die Intention lag nicht darin, ein spezielles Konzept besonders hervorzuheben, sondern allgemeine Eigenschaften aufzuzeigen und z.B. folgende Fragestellungen zu beantworten:

- bei welchem Feuerraumkonzept kann eine mögliche Optimierung der Verbrennungsbedingungen am ehesten realisiert werden,
- welche Feuerraumgeometrie ist gegenüber einer Verschiebung der Hauptverbrennungszone empfindlich,
- welches Feuerraum- sowie Sekundärlufteindüsungskonzept sollte bei rechteckigen bzw. eher quadratischen Feuerraumquerschnitten verwendet werden und/oder
- bei welchem Sekundärluftzuführungskonzept ergeben sich akute Korrosions- und Verschlackungsgefahren?

Aus den Simulationsergebnissen lässt sich allgemein folgern, dass die Mittelstromfeuerung im Vergleich zur Gleich- sowie Gegenstrombetriebsweise homogenere Verteilungen zur Folge hat, was u.a. eine geringere Korrosions- und Verschlackungsgefahr bedeutet. Dies liegt vor allem an der etwas günstigeren Strömungsführung. Bei der Gleichstromfeuerung ist die Umströmung der Umlenknahe häufig problema-

tisch, bei der Gegenstromfeuerraumgeometrie kann die Anströmung des 1. Zuges gelegentlich ebenfalls ungleichmäßig werden.

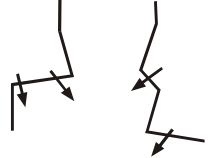
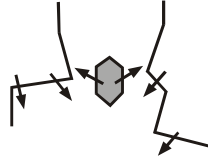

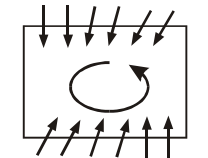
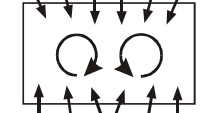
Die Resultate der Mittel- und Gegenstromfeuerung wiesen bei allen Untersuchungspunkten die gleichen Charakteristiken auf. Bei beiden Geometrien konnten ähnliche Tendenzen sowie nahezu identische Temperatur- und Konzentrations-Niveaus beobachtet werden. Die Gleichstromfeuerung zeigte hingegen gänzlich andere Merkmale.

Die konventionelle Art der Sekundärluftzuführung reicht im Hinblick auf optimale Verbrennungsbedingungen nur noch bedingt aus. Wesentliche Verbesserungen wurden mit neuen Sekundärluftzuführungskonzepten erzielt, z.B. mit Hilfe eines Düsenbalkens, der im Übergang vom Feuer- in den Strahlraum angeordnet ist oder durch tangential angestellte Sekundärluftdüsen, die eine Wirbelströmung induzieren.

Beim Düsenbalken wird der Strömungsquerschnitt zu Beginn des 1. Zuges verengt, sodass die Sekundärluftstrahlen im Vergleich zum klassischen Konzept den gesamten Querschnitt völlig abdecken. Die Sekundärluft wird an der engsten Stelle eingedüst, wodurch die Mischleistung deutlich intensiviert wird und der Verdrängungskörper somit praktisch einen statischen Mischer darstellt.

Die Drehströmungen besitzen gegenüber dem klassischen Konzept den Vorteil, dass die Mischwirkung erheblich gesteigert wird. Je nach Betreiber bzw. Anlagenbauer werden verschiedene Wirbelkonzepte in Müllverbrennungsanlagen eingesetzt. Allerdings zeigen die einzelnen Wirbelkonzepte in Abhängigkeit der Feuerraumgeometrie teilweise deutliche Unterschiede auf.

Die allgemein gültigen Aussagen hinsichtlich der drei Feuerraumgeometrien konnten durch verschiedene Simulationsstudien ergänzt und spezifiziert werden. Die detaillierten Erkenntnisse sollen grundsätzlich als Anhaltspunkt bei der Auslegung von Neuanlagen bzw. beim Umbau einer Altanlage dienen und auf systembedingte Gefahren aufmerksam machen. In Tabelle 8.1 und 8.2 werden die Ergebnisse zusammengefasst.

<b>Konzept</b>	<b>Gleichstrom "Gl"</b>	<b>Gegenstrom "Ge"</b>	<b>Mittelstrom "Mi"</b>
<b>klassisch</b> 	sehr inhomogen	ausreichend	ausreichend (+)
<b>Düsenbalken</b> ("DB"-System IBB) 	inhomogen	homogen (-)	homogen
<b>Wirbelkonzept 1</b> (System von Roll) 	homogen unten: schlechter, oben: besser als DB-Mi	homogen (-) unten: schlechter, oben: besser als DB-Ge	homogen unten: schlechter, oben: besser als DB-Mi
<b>Wirbelkonzept 2</b> (System von Roll) 	homogen unten: schlechter, oben: besser als DB-Mi	homogen (-) unten: schlechter, oben: besser als DB-Ge	homogen (-) unten: schlechter, oben: etwa wie DB-Mi
<b>Wirbelkonzept 3</b> (System Babcock) 	homogen	inhomogen	inhomogen

**Tabelle 8.1:** Beurteilung der Verteilungsgüte in Abhängigkeit des Sekundärluftzuführungskonzeptes und der Feuerraumgeometrie

<b>Konzept</b>	<b>Gleichstrom</b>			<b>Gegen- und Mittelstrom</b>		
	<b>klassisch</b>	<b>Düsenbalken</b>	<b>Wirbel 1</b>	<b>klassisch</b>	<b>Düsenbalken</b>	<b>Wirbel 3</b>
<b>Korrosion</b>	hoch	mittel	niedrig	mittel	mittel	niedrig
<b>Ver- schlackung</b>	hoch	mittel	hoch	mittel	niedrig	hoch

**Tabelle 8.2:** Wahrscheinlichkeit von Korrosions- und Verschlackungsgefahren in Abhängigkeit der Sekundärlufteindüsung und der Geometrie

Grundsätzlich ist festzuhalten, dass alle Feuerraum- sowie Sekundärlufteindüsungskonzepte sowohl Vor- als auch Nachteile aufweisen. Eine geeignete Kombination kann allerdings schon schnell zu einer Optimierung, d.h. zu guten Verbrennungsbedingungen führen. Außerdem sollte jede Anlage individuell betrachtet werden.

Zusätzlich ist erwähnenswert, dass die Verteilungen bei einem quadratischen Querschnitt im Vergleich zum Rechtecksformat etwas schlechter waren. Es ergaben sich tendenziell die gleichen Ergebnisse, allerdings sind z.B. die CO-Niveaus sowohl beim Einsatz eines Düsenbalkens als auch bei dem Wirbelkonzept 4 etwas höher gewesen.

Gegenüber einer Verschiebung der Hauptverbrennungszone ist die Gleichstromfeuerung am unempfindlichsten. Geschieht dies temporär bei der Mittel- oder Gegenstromfeuerung sollte eine relativ schnelle O<sub>2</sub>-Regelung dafür sorgen, dass die Verteilung der Sekundärluft auf die einzelnen Düsenreihen angepasst wird.

Die Anordnung der einzelnen Sekundärluftdüsen in der Modellanlage basierte auf einer Vorstudie. Zunächst wurde durch eine Simulation bestätigt, dass die Strahl-Eindringtiefe mit dem Software-Programm FLUENT näherungsweise richtig abgebildet wird. Ein Vergleich mit experimentellen und numerisch berechneten Werten zeigte dies auf. Es konnte dann beobachtet werden, dass versetzte Düsen eine gleichmäßigere Verbrennung zur Folge hatte. Grund hierfür ist ein durch die Sekundärluftstrahlen praktisch vollständig abgedeckter Querschnitt.

Des Weiteren wurden drei Feuerfestsysteme untersucht, nämlich eine gekittete SiC-Platte, eine SiC-Stampfmasse und eine hinterlüftete Platte mit zusätzlichem Aschebelag. Die Wandinnentemperatur war bei der hinterlüfteten Platte im Vergleich zu den beiden anderen Systemen vor allem auf Grund des Aschebelages deutlich höher. Dies bewirkte eine Anhebung des Temperaturniveaus von durchschnittlich 200 K. Erst dieser enorme Unterschied im Temperaturfeld hatte auch einen erkennbaren Einfluss auf die anderen Größen, wie z.B. das CO-Niveau, das gegenüber den zwei anderen Feuerfestsystemen sichtbar angestiegen war.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden Modelle für die näherungsweise Abbildung der heterogenen Verbrennung auf dem Müllrost entwickelt. Mit Hilfe dieser Modelle konnten dann Gasphasen-Simulationen im Feuer- und Strahlraum von Real- und Modell-Müllverbrennungsanlagen durchgeführt werden, woraus wichtige Ergebnisse hinsichtlich des Verbrennungsprozesses gewonnen werden konnten. Experimentelle Untersuchungen hätten auf Grund der hohen Kosten und der bedingten Zugänglichkeit in der gleichen Zeit weitaus weniger Informationen liefern können. CFD-Simulationen sind daher ein modernes Werkzeug geworden, um Prozessoptimierungen schnell und kostengünstig durchführen zu können. Insbesondere sind bei Müllverbrennungsanlagen Geometrie- und Materialänderungen sehr einfach realisierbar.

Die Studien, die im Rahmen dieser Arbeit gemacht worden sind, konnten vor allem im Hinblick auf die Gestaltung des Feuerraumes in Verbindung mit dem eingesetzten Sekundärlufteindüsungskonzept ganz entscheidende Informationen liefern. Es wurde an verschiedenen Modell- und Realanlagen aufgezeigt, dass je nach Feuerraumgeometrie ein ganz bestimmtes Sekundärlufteindüsungskonzept sinnvoll ist. Außerdem konnten einige Fragestellungen bezüglich der gefährdeten Gebiete (Korrosions-, Verschlackungs- und Verschmutzungsneigung) simulationstechnisch analysiert und damit teilweise geklärt werden. Für weitergehende Studien hinsichtlich kritischer Bereiche bietet es sich an, den CFD-Code FLUENT mit einem thermodynamischen Modell zu koppeln.