

# Modellierung der Festbettverbrennung

B. Peters, L. Krebs, E. Schröder, H.-H. Frey, IKET

## Einleitung

Verbrennungsvorgänge im Festbett wurden bereits vor ca. 70 Jahren für den Brennstoff Kohle wissenschaftlich untersucht. [1]. Die dabei entwickelten Modellvorstellungen wurden aber weder weitergeführt noch vertieft. Das lag zum einen daran, dass für ein derartig hochkomplexes Problem mit den damals allein möglichen analytischen Lösungsverfahren eine befriedigende Approximation kaum zu erreichen war, zum anderen aber auch daran, dass der Einsatz von Kohlestaubfeuerungen sowie von flüssigen und gasförmigen Brennstoffen zur Energieerzeugung sich seit 1950 immer mehr durchsetzte. Dadurch wurde die Notwendigkeit für eine Modellierung der Festbettverbrennung immer geringer. Dennoch gibt es auch heute noch Anwendungen für die Festbettverbrennung. Hierzu gehören vor allem die Haus- und Sondermüllverbrennung auf Rosten und in Drehrohren. Durch diese Anwendungen wurde der für Anlagenauslegung und Betriebsoptimierung ungenügende Kenntnisstand offenbar. Dies führte neben neueren experimentellen Untersuchungen auch zur Beschreibung der Prozesse durch mathematische Modelle. Gegenüber der Kohlefeuerung kommt bei der thermischen Abfallbehandlung erschwerend hinzu, dass Zusammensetzung und Homogenität des Brennstoffs stark schwanken.

Der für Modellbeschreibungen des Verbrennungsablaufs zu geringe Kenntnisstand und die nur spärlichen Instrumentierungsmöglichkeiten im heißen Bereich

haben eine zumindest teilweise unzureichende Steuerung und Regelung von Müllverbrennungsanlagen zur Folge. Die gesetzlichen Regelungen können dann nur durch zusätzliche Sekundärmaßnahmen eingehalten werden. Beispielsweise kommen zur Schadstoffrückhaltung beim Rauchgas Wäscher, Katalysatoren und Filter in Betracht und für nicht ausreichend ausgebrannte Schlacke kann ggf. ein nachträgliches Aufschmelzen notwendig werden. Die erforderlichen Apparate zur Nachbehandlung der Verbrennungsprodukte nehmen einen beträchtlichen Teil der Gesamtanlage ein und verursachen somit hohe Investitions- und Betriebskosten.

Demgegenüber wird der Möglichkeit der primären Schadstoffminderung im Kernstück der Anlage, dem Brennraum, bisher kaum Aufmerksamkeit geschenkt. Gerade hier liegt jedoch der Schlüssel zur Verbesserung der Prozessführung und damit zur Reduzierung der Kosten. Ein bereits im Festbett besser kontrollierbarer Verbrennungsvorgang, kann den Erfordernissen entsprechend eingestellt werden. Damit entfallen Sekundärmaßnahmen zwar nicht vollständig, können aber signifikant reduziert werden [2]. Dieses vorhandene Potenzial zur Optimierung der Verbrennung ist vor dem Hintergrund des gestiegenen Umweltbewusstseins und verschärfter Umweltschutzaufgaben zu sehen, die die Ausführung von technischen Verbrennungsanlagen in immer stärkerem Maße vorschreiben [3].

In diesem Artikel werden Vorgehensweise und Ansätze zur Modellbildung für die Festbettverbrennung vorgestellt. Die zugehörigen thermodynamischen und strömungsmechanischen Vorgänge sind bezüglich der Beschreibung der Freisetzung thermischer Energie während des Verbrennungsvorgangs in hohem Maße komplex. Ihre Bearbeitung stellt innerhalb der Verbrennungstechnik eine herausfordernde Aufgabe dar. Mit den abzuleitenden Themenstellungen befasst sich das Institut für Kern- und Energietechnik (IKET) des Forschungszentrums Karlsruhe sowohl theoretisch [4] als auch experimentell [5]. Dies erfolgt seit 1999 in dem HGF-Strategiefondsvorhaben „Primärseitige Stickoxidminderung“. Das Ziel dieser Arbeiten ist es, durch eine optimierte Verbrennungsführung in Müllverbrennungsanlagen die Emission von Stickoxiden unter der gesetzlich zulässigen Norm zu halten, ohne eine sekundärseitige Entstickungsanlage vorsehen zu müssen.

Im folgenden wird über die am IKET und im Teilprojekt 3 des HGF-Vorhabens „Numerische Feuerraumsimulation“ bereits durchgeführten Arbeiten berichtet.

## Vorgehensweise

In den vergangenen Jahren wurden auf dem Gebiet der Modellierung homogener Gasverbrennung große Fortschritte erzielt. Arbeiten zur Modellierung der heterogenen Feststoffverbrennung lassen jedoch noch einen großen Klärungsbedarf erkennen. Zu Be-

ginn der Problemanalyse werden die in der Literatur identifizierten und beschriebenen relevanten physikalischen und chemischen Mechanismen behandelt, danach erfolgt die Erarbeitung erforderlicher Ergänzungen. Aus der Betrachtung des Gesamtprozesses wird dann ein Modellkonzept abgeleitet, dessen Hauptbestandteile aus der Beschreibung der Partikelumsetzung beim Verbrennungsvorgang, der Festbettbewegung, der Berechnung der Verbrennungsvorgänge im Gasraum sowie deren Einzel- und Gesamtvalidierung besteht.

### Gesamtprozess

Wegen der Vielfalt der in einem Festbett gleichzeitig ablaufenden Prozesse, werden in einem ersten Ansatz für die Modellbildung nur die für den Gesamtprozess signifikanten Zustandsgrößen berücksichtigt. Dazu gehören sowohl die die Energiebilanz bestimmenden Größen wie Temperatur- und Geschwindigkeitsfeld im Festbett und im Brennraum als auch die Konzentrationen der für die Verbrennung wesentlichen Spezies. Sie alle steuern die Energiefreisetzung im Brennraum. Die lokal unterschiedlichen Temperaturen stellen die treibende Kraft für die chemische Umsetzung dar, während das Strömungsfeld die Verteilung und Verweilzeit der einzelnen Komponenten bestimmt. Die Kenntnis von Temperatur- und Geschwindigkeitsverteilung im Brennraum und im Festbett bildet eine tragfähige Basis, um in einem darauf aufbauenden Schritt Entstehung und Zerstörung von Schadstoffen im Feuerraum gezielt zu untersuchen.

Die programmtechnische Realisierung wird mit dem im IKET in Entwicklung befindlichen Software-Paket TOSCA (Tools of Object-Oriented Software for Continuum-Mechanics Applications) ausgeführt. Die objekt-orientierte Rechentechnik eignet sich hierfür hervorragend, da jedes Teilsystem als eigenständiges Modell innerhalb der Klassenhierarchie entwickelt und getestet werden kann. Die Koppelung zwischen den einzelnen Modellen wird durch eine geeignete Schnittstelle hergestellt. Diese Vorgehensweise hat zusätzlich den Vorteil, dass sich der Entwicklungsprozess nicht andauernd auf das Gesamtsystem konzentrieren muss und damit auch effizienter innerhalb einer Arbeitsgruppe aufgeteilt werden kann.

Eine phänomenologische Beschreibung des Gesamtprozesses ist in Abb. 1 gegeben. Der Feuerraum ist in das Festbett und den darüber liegenden Gasraum unterteilt. In den Teilbereichen finden unterschiedliche Verbrennungsvorgänge statt. Die Verbrennung im Gasraum wird durch die Gasfreisetzung im Festbett gespeist.

In der Regel bleibt der Brennstoff vor der Beschickung für Drehrohre und Rostfeuerungen unbehandelt. Er kann jedoch bei Bedarf homogenisiert, getrocknet oder zerkleinert werden. Zur Verbrennung wird das Festbett häufig überstöchiometrisch mit Verbrennungsluft versorgt und in Abhängigkeit vom Temperaturniveau wird in verschiedene Bettzonen unterschieden, wobei die Übergänge zwischen den einzelnen Zonen fließend sind.

In der ersten Zone nach dem Eintritt wird der Brennstoff bei etwa 100 °C unter der Wirkung von Strahlungswärme aus dem Feuerraum oder durch vorgewärmte Verbrennungsluft getrocknet. Die im Brennstoff gebundene Feuchtigkeit wird verdampft und mit den Rauchgasen als sogenannte Trocknungsbrüde abgeführt. Dabei ist darauf zu achten, dass die Brüden eine Zone heißer Temperatur durchlaufen, um Geruchsfreiheit und Sterilität zu gewährleisten [6].

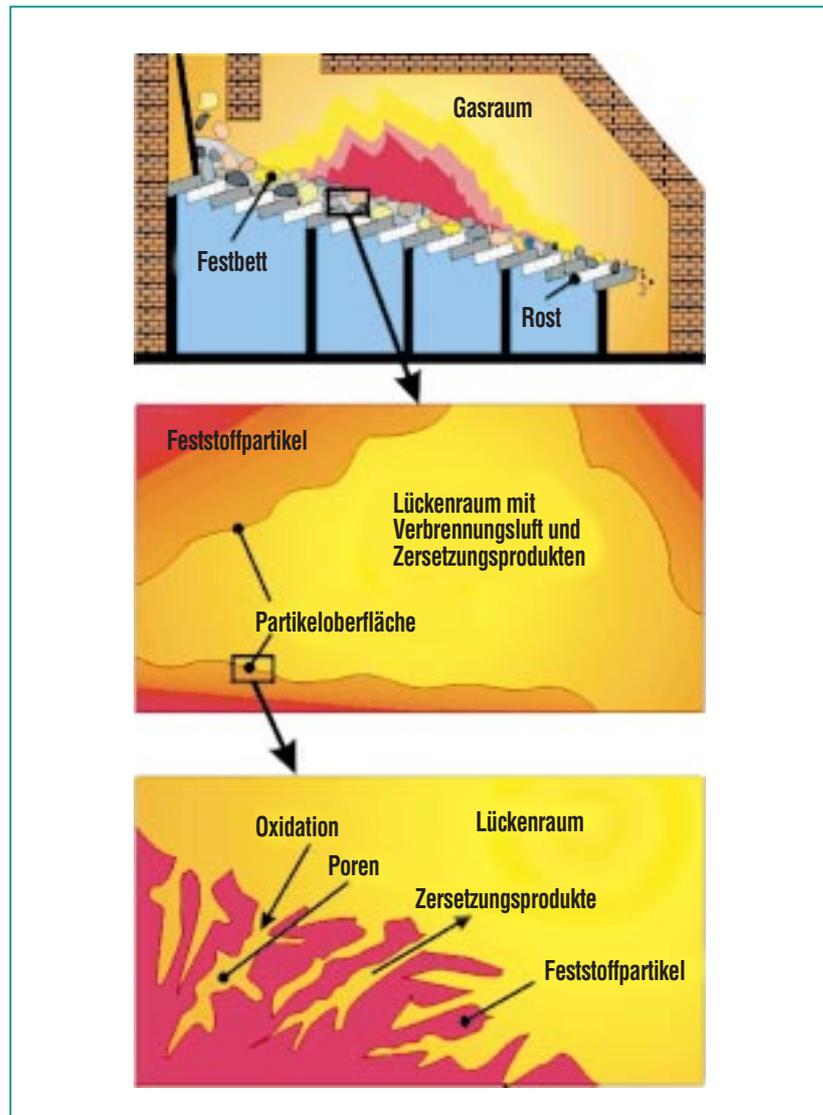
Bei höheren Temperaturen zwischen 250 °C und 600 °C treten unter weiterer Wärmezufuhr Schwelgase aus. Zusätzlich treten im Brennstoff unter Sauerstoffabschluss oder bei stark unterstöchiometrischer Mischung Zersetzungsreaktionen auf. Die entstehenden gasförmigen Produkte werden als Schwelgase ausgetrieben. Sie zünden bei ca. 500 °C und verbrennen innerhalb der Gasphase über dem Festbett.

In der dritten Zone findet die Vergasung und der Abbrand des verkokten Materials im Temperaturbereich bis zu 1100 °C bei hohem Luftüberschuss und stark bewegtem Festbett statt. Daran schließt sich die Ausbrandzone des Kohlenstoffs in der Asche an.

Unter den genannten Teilprozessen beanspruchen der Trocknungs- und Entgasungsvorgang fast die Hälfte der zur Verfügung stehenden Ofenlänge. Die in diesen Zonen freigesetzten flüchtigen Komponenten müssen ausreichend mit der Verbrennungsluft vermischt werden, um Strahlenbildung und unvollständige Verbrennung zu vermeiden [7].

Eine Ausschnittsvergrößerung in der Bildmitte von Abb. 1 zeigt, dass das Volumen des Festbets aus dem festen Brennstoff und dem Lückenraum, der die Verbrennungsluft mit den Brenngasen enthält, besteht. Feste und gasförmige Bestandteile in dem betrachteten Volumen sind durch Wärme- und Stofftransport miteinander gekoppelt. Während in der Trocknungszone Wärme hauptsächlich vom Gas auf den Feststoff übertragen wird, wird in den übrigen Zonen Wärme vom heißen Brennstoff in die Gasphase im Lückenraum abgeführt. Die Produkte der Trocknungs- und Entgasungsphase werden ihrerseits in den Lückenraum des Festbets freigesetzt und anschließend mit der Verbrennungsluft abtransportiert und über dem Festbett verbrannt. Dadurch befindet sich der feste Brennstoff in einer sehr sauerstoffarmen bis sauerstofffreien Atmosphäre. Sobald die Entgasungsphase und damit die Gasverbrennung zum Erliegen kommt, hat der Luftsauerstoff Zugang zur Brennstoffoberfläche. Dies leitet den Prozess der Vergasung ein. Dieser Prozess kann, wie im unteren Teilbild gezeigt, in verschiedene geschwindigkeitsbestimmende Teilschritte zerlegt werden.

Luftsauerstoff gelangt durch die Grenzschicht an die Brennstoffoberfläche, die mit Poren durchsetzt ist. Anschließend dringen Sauerstoffmoleküle durch die Porenstruktur in das Innere des Feststoffs ein. Dabei spielt der konvektive Transport eine zu vernachlässigende Rolle. Durch Wechselwirkung zwischen den Gasmolekülen und innerer Porenoberfläche wird



**Abb. 1: Prinzipieller Aufbau einer Müllverbrennungsanlage mit Gasraum, Festbett und Rost (oberes Bild), Detailaufbau des Festbettes mit Lückenraum und Feststoffpartikel (mittleres Bild), chemische Umsetzung an der Partikeloberfläche (unteres Bild).**

Sauerstoff adsorbiert und kann mit dem Brennstoff reagieren.

Die auf der Oberfläche gebundenen Reaktionsprodukte müssen zunächst desorbieren. Sie diffundieren durch den Porenraum und aus der äußeren Grenzschicht in den Gasraum. Die Geschwindigkeit des Gesamtprozesses wird

dabei durch die Geschwindigkeit des langsamsten Teilprozesses bestimmt.

Diese Betrachtungen zeigen, dass sich die Längenskalen des thermischen Zersetzungsprozesses vom Porendurchmesser im Bereich von Mikrometern bis zu den globalen Längen des Brennraums im Be-

reich von Metern erstrecken. Auf diesen Skalen sind alle Vorgänge prozessbestimmend und miteinander gekoppelt, so dass sich Änderungen innerhalb eines Teilprozesses auf das Verhalten des Gesamtprozesses auswirken. Dieser Sachverhalt bedingt die Schwierigkeiten bei der mathematisch-physikalischen Modellbildung, die den gesamten Bereich der Längenskalen zu berücksichtigen hat. Häufig werden deshalb Prozesse auf den kleinsten Längenskalen durch Integralmodelle approximiert, und die Ergebnisse werden in die größeren Skalen eingebettet. Überlagert sind den reaktiv diffusiven Vorgängen im Festbett die Bewegung und Vermischung der Brennstoffteilchen, die im Drehrohr durch die Rotation und bei Rostfeuerungsanlagen durch die Kinematik der Rostelemente bestimmt wird.

### Modellkonzept

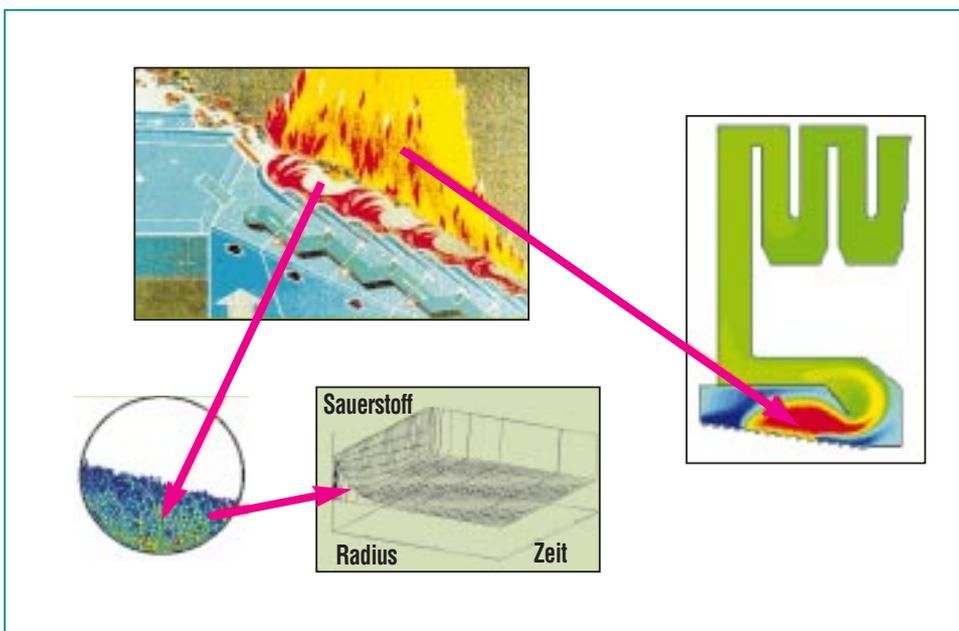
Um schon während der Auslegung einer Anlage Aussagen über Betriebsverhalten, Sicherheitstechnische Fragen oder Schadstoffausstoß machen zu können oder auch während des Betriebs die Wirkung von Änderungen abschätzen zu können, muss ein möglichst genaues Modell des o.g. Gesamtprozesses erstellt werden. Nach Abb. 2 wird das Gesamtsystem in Teilsysteme zerlegt, für die jeweils ein Modell gestellt wird. Zusammen mit der Wechselwirkung zwischen den Teilmodellen wird das Gesamtsystem beschrieben.

Aufgrund der Existenz von zwei typischen Aggregatzuständen bietet sich eine erste Unterteilung des Systems in Festbett- und Gasverbrennung an. Letztere fin-

det hauptsächlich in einer turbulenten reaktiven Strömung statt.

Demgegenüber wird die Festbettverbrennung durch den Umsatz des Brennstoffs in Abhängigkeit von Luftzufuhr und Strahlung sowie durch die Partikelbewegung des Feststoffes charakterisiert. Im Unterschied zu der kontinuumsmechanischen Betrachtung für das Festbett ist in dieser Arbeit angenommen, dass sich das Festbett aus einer endlichen Zahl von Einzelpartikeln verschiedener Größe und stofflicher Zusammensetzung aufbaut. Die bereits vorliegenden Ergebnisse aus Untersuchungen am Einzelpartikel können so für jedes Partikel angewendet werden und erlauben somit eine genauere Beschreibung der festbettspezifischen Umsetzungsvorgänge. Folglich kann das numerische Modell den Gesamtprozess des Festbetts als die Summe der Einzelprozesse von Partikeln nachbilden. Ergänzt wird diese Methode durch ein Partikelbewegungsmodell, das die Bewegung des Festbetts und die Vermischung der Einzelpartikel im Drehrohr oder auf dem Rost beschreibt. Aus der Berechnung der Bewegungsbahn eines jeden Einzelpartikels lässt sich dann der Transport des Festbetts integral ermitteln.

Dieser Ansatz hat den Vorteil, dass zunächst einmal durch die partikel aufgelöste Betrachtungsweise keine Informationen über die Zusammensetzung des Festbetts verloren gehen. Jedes Partikel ist durch Größe und spezifische Stoffeigenschaften charakterisiert, was eine genaue Beschreibung der Partikelprozesse für jedes Partikel im Festbett von



**Abb. 2:** Schematische Darstellung von Feuerraum und Kessel einer Hausmüllverbrennungsanlage (Bild rechts); Teilprozesse Festbett- und Gasverbrennung (Bild links oben); Partikelbewegung in einem Drehrohr (Bild links unten); Verlauf des Partikelabbrands (Bild Mitte unten).

der Trocknung über die Pyrolyse bis zur Verbrennung zulässt.

Mit diesem Ansatz kann die thermische Belastung von Rosten oder Drehrohren für verschiedene Brennstoffzusammensetzungen untersucht werden. Derartige Schwankungen sind beispielsweise in der Müllverbrennung regional oder jahreszeitlich bedingt. Eine thermische Überlastung der Anlage lässt sich vermeiden, wenn nur Brennstoffmischungen mit einem zuvor berechneten maximal zulässigen Brennwert eingesetzt werden. Ebenso kann für bestehende Anlagen über den Grad der Vorbehandlung, wie beispielsweise Schreddern oder Mischen, der am Ende des Rostes vorgeschriebene Ausbrandgrad eingestellt werden oder auch für einen vorgegebenen Brennstoff die minimale Rost- oder Drehrohrlänge einer Neuanlage bestimmt werden.

Außerdem können die Wege von Brennstoffpartikeln durch den Brennraum mit der Temperatur und der Zusammensetzung des die Partikel umgebenden Gases berechnet werden. Dieses erlaubt die Modellierung der Reaktionskinetik speziell interessierender Schadstoffe. Eine solche Vorgehensweise sollte es ermöglichen, Zusammenhänge zwischen Verweilzeit, Temperatur und Gaszusammensetzung herzustellen und Ursachen dafür anzugeben, warum ein Schadstoff nicht zu unbedenklichen Stoffen thermisch zersetzt wird. Ein interessantes erstes Beispiel stellt in diesem Zusammenhang die Verringerung der NO<sub>x</sub>-Bildung dar.

## Partikelumsetzung

Wie bereits erläutert, wird das Festbett als eine Schüttung von Einzelpartikeln betrachtet, die durch ihre Anordnung den Lückenraum im Festbett bilden. Durch den Lückenraum strömt die Verbrennungsluft, die über Wärme- und Stoffaustausch eine Kopplung zu den einzelnen Partikeln herstellt. Die Einzelpartikel unterscheiden sich in der Regel durch Form, Größe und Materialeigenschaften. Im Hinblick auf die thermischen Umsetzungsprozesse im Festbett durchlaufen die Partikel einen oder mehrere der folgenden Prozesse: Aufheizung, Trocknung, Pyrolyse, Vergasung und heterogene Verbrennung. Diese Prozesse werden durch ein Partikelmodell basierend auf den Erhaltungsgleichungen für Masse und Energie beschrieben. In ersten Rechnungen wurde das Modell auf den schon komplexen Brennstoff Holz angewendet, wobei die thermische Umsetzung von Holz bereits alle o. g. Prozesse umfasst. Die folgende Abb. 3 zeigt als Ergebnis dieser Rechnung die Masseabnahme eines

kugelförmigen Holzpartikels (40 mm Durchmesser) aufgrund von Trocknung, Pyrolyse und heterogener Verbrennung.

Durch Wärmetransport aus der Verbrennungsluft heizt sich das Holzpartikel zunächst auf, wodurch im Holz gebundenes Wasser verdunstet. Nachdem der Trocknungsvorgang abgeschlossen ist, steigen die Temperaturen weiter, so dass aufgrund von Pyrolyse Zersetzungsprozesse innerhalb des Holzpartikels stattfinden. Die Zersetzungsprodukte bestehen aus einer gasförmigen Phase mit Kohlenmonoxid und Kohlendioxid und aus einer festen Phase mit Koks als Hauptbestandteil. Während des Pyrolysevorgangs bis zu einem Zeitpunkt von ca. 500 s nehmen die Produkte der gasförmigen Stoffe und des Koks zu. Gegen Ende der Pyrolyse setzt bereits am äußeren Rand des Partikels die heterogene Verbrennung ein, die den gebildeten Koks in Kohlenmonoxid umsetzt. Damit nimmt die Masse des Holzes weiterhin ab, allerdings mit merklich kleineren Raten als während des Trock-

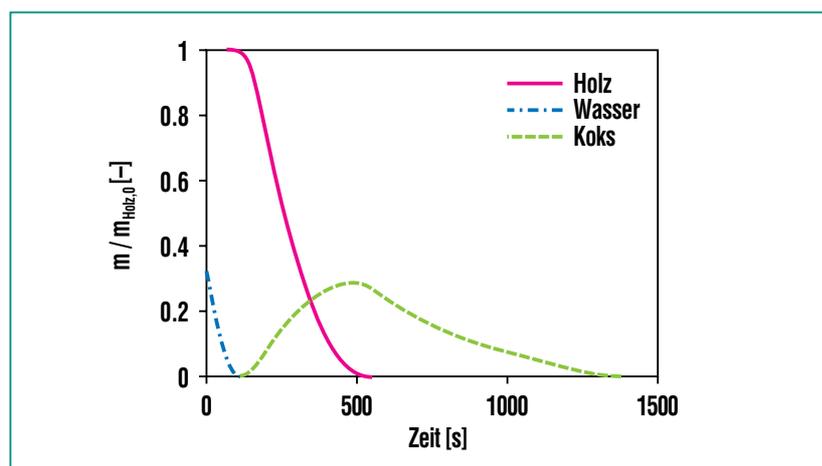


Abb. 3: Masseverlust bei der thermischen Holzumsetzung.

nungsvorganges und der Pyrolyse. Dieses Verhalten stimmt gut mit experimentellen Erfahrungen überein, die zeigen, dass die meiste Zeit und damit der überwiegende Teil der Rostlänge für die Verbrennung der aus Pyrolyse und Trocknung des Holzes entstandenen koksartigen Produkte benötigt wird.

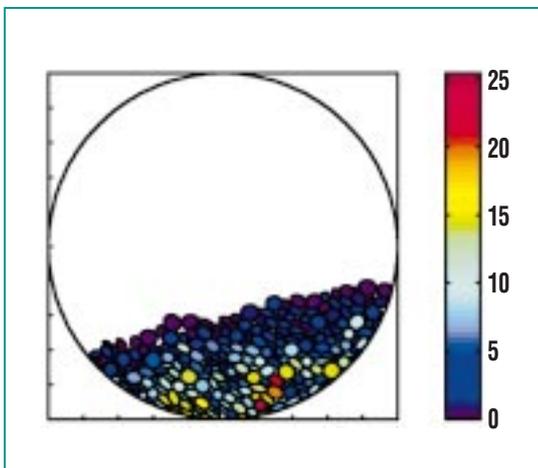


Abb. 4: Partikelbewegung und Kraftverteilung [N] im Drehrohr.

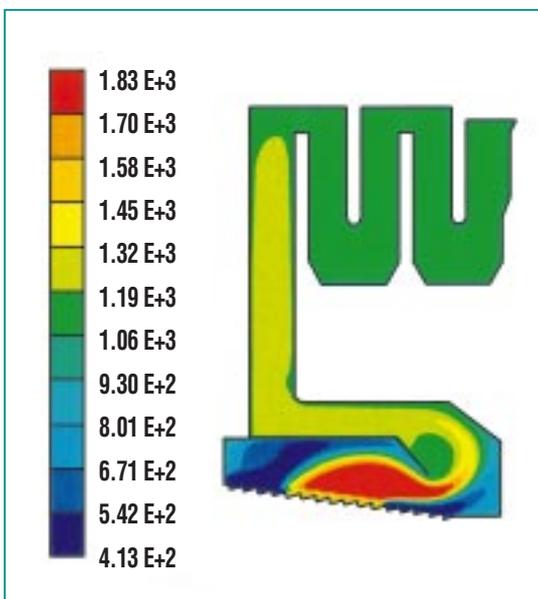


Abb. 5: Temperaturverteilung [K] im Feuerraum der TAMARA.

## Festbettbewegung

Zusätzlich zu den Teilmodellen für die thermischen Umsetzungsprozesse erfordert das Gesamtmodell eine Beschreibung der Festbettbewegung. Das Festbett wird auf dem Rost durch Vorschub/Rückschub oder im Drehrohr durch Rotation befördert. Durch diese Bewegung werden die Partikel eines Festbetts durch den Feuerraum transportiert. Zur numerischen Beschreibung der Festbettbewegung besteht das Bett wiederum aus einer endlichen Anzahl von Einzelpartikeln, die gegenseitig Kräfte aufeinander ausüben. Unter Anwendung des zweiten Newtonschen Gesetzes kann die Summe der Kräfte auf ein Partikel bestimmt werden und daraus die Bahn des Partikels innerhalb des Feuerraums berechnet werden. Basierend auf dieser Modellvorstellung wurde die Bewegung eines Festbettes bestehend aus einer Anzahl von nicht kugelförmigen Partikeln in einem Drehrohr simuliert. Die Verteilung der Partikel im Drehrohr zu einem bestimmten Zeitpunkt während der Rotationsbewegung ist in Abb. 4 dargestellt.

Die Farbskala, mit der die Partikel eingefärbt sind, repräsentiert die Größe der auf die Partikel wirkenden Kräfte. Deutlich erkennt man in der Abbildung die heterogene Verteilung der Partikelkräfte, die sogar bei benachbarten Partikeln große Unterschiede aufweisen können. Die Kräfteverteilungen bilden u. U. brückenähnliche Gebilde, die aus mehreren Partikeln bestehen. Diese tragen entscheidend zum Bewegungsverhalten des Festbettes bei.

## Gasraum

Die physikalisch-chemischen Eigenschaften einer reaktiven, turbulenten Strömung lassen sich mit Hilfe von Differentialgleichungen mathematisch beschreiben. Es handelt sich hierbei um die Transportgleichung für Energie, Impuls und Masse. In diesen Gleichungen setzt sich die zeitliche Änderung einer beliebigen Zustandsgröße aus dem konvektiven und diffusiven Nettotransport sowie den Quellen und Senken zusammen. Da die energetische Umsetzung des Brennstoffs als Quellterm in die Transportgleichungen eingebunden ist, bedingen sich die charakteristischen Parameter Strömung, Temperatur und Konzentration in technischen Flammen gegenseitig.

Zur Berechnung der Umsetzungsprozesse im Feuerraum der TAMARA wurde das kommerzielle Programm FLUENT eingesetzt. Die Abb. 5 zeigt die Temperaturverteilung im Feuerraum der TAMARA unter realen Bedingungen, wobei zunächst vorgegebene Stoffströme aus dem Festbett als Massenströme in den Brennraum zugrunde gelegt wurden. Die höchsten Temperaturen mit ca. 1800 K treten im Bereich des Zentrums des Verbrennungsraumes auf. Links und rechts der Hauptumsatzzone wird Kaltluft von weniger als 400 K mit den warmen Verbrennungsgasen gemischt. Dieser Mischungsprozess setzt sich bis zum Ausgang aus dem Brennraum fort, so dass dort im Mittel Temperaturen von 1300 K herrschen, lokal unterschiedlich aber Werte zwischen

1170 K und 1350 K auftreten können. Dies stimmt mit ebenfalls lokal gemessenen Temperaturen um 1200 K überein.

Für die im Forschungszentrum neu installierte Anlage THERESA ist in der folgenden Abb. 6 das Strömungsverhalten der Nachbrennkammer durch den Verlauf mehrerer Bahnen von verschiedenen masselosen Partikeln dargestellt.

Durch die geometrische Anordnung des Nachbrennkammereintritts können Partikel bzw. Strömungen sowohl in den unteren Teilbereich als auch direkt in den oberen Bereich der Nachbrennkammer gelangen. Dies bedeutet zusätzliche Rezirkulationszonen und damit unterschiedliches Verweilzeitverhalten für den Rauchgasstrom sowie für die in ihm transportierten Partikel. Aufgrund der unterschiedlichen Verweilzeiten wird eine einheitliche Beschreibung des Konvertierungsverhaltens, insbesondere der Schadstoffkinetik, erschwert. Auch wirken sich Maßnahmen zur Beeinflussung der thermischen Umsetzung und der Schadstoffemissionen verschieden aus.

### Validierung

Von großer Bedeutung für die Modellierung des Gesamtprozesses ist die Kenntnis der lokalen und zeitlichen Gasfreisetzungsrate aus dem Festbett als Funktion von Temperatur und Aufheizrate. Es wird angenommen, dass die Gasfreisetzung aus den Feststoffpartikeln in erster Näherung als Pyrolysevorgang betrachtet werden kann, dem festbettabwärts der Partikelabbrand überlagert ist. Für diesen wird angenommen, dass die hierdurch bedingte Änderung der Gaszusammensetzung im Gasraum linear superponiert werden kann. Da Müll ein außerordentlich heterogener Brennstoff ist, ist es für vergleichende Untersuchungen notwendig, dessen wichtige Eigenschaften konstant zu halten. Aus einer repräsentativen Hausmüllanalyse (Bundesdeutsche Hausmüllanalyse 1985) geht hervor, dass Hausmüll mit geringen Abweichungen die in Tabelle 1 angegebene Zusammensetzung aufweist. Das C/H-Gewichtsverhältnis beträgt etwa 7,7 und der mittlere Heizwert liegt bei 8500 kJ/kg. Daher wurde ein Referenzbrennstoff mit der ebenfalls in Tabelle 1 angegebenen Normzusammensetzung definiert, des-

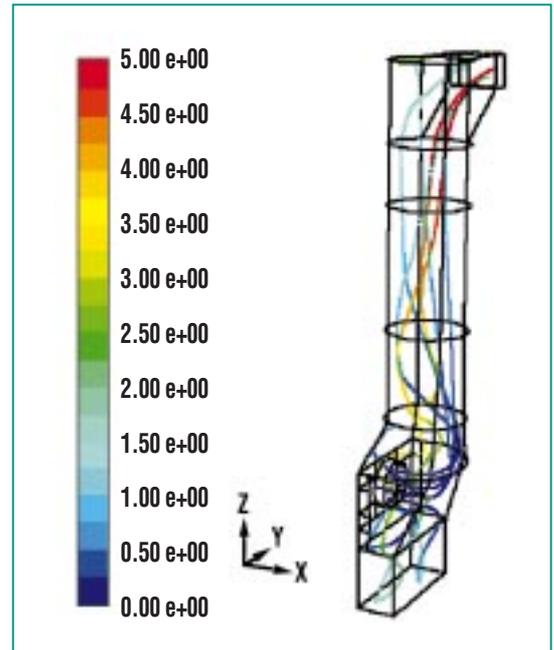


Abb. 6: Partikelbahnen in der Nachbrennkammer von THERESA.

sen Abmessungen im Vergleich zur Stückigkeit des Hausmülls jedoch herunterskaliert sind.

Für diesen Referenzbrennstoff wird in der Pyrolyseanlage PANTHA (Pyrolyse-ANlage zur Thermischen Abfallbehandlung) die Gasfreisetzung als Funktion von maximaler Pyrolysetemperatur und Aufheizrate bestimmt. Abb. 7 zeigt ein Prinzipbild der Laboranlage, die zur Pyrolyse von 3 kg Festbrennstoff ausgelegt ist.

Anteil	Hausmüllanalyse	Referenzbrennstoff
34,5 %	Biomasse	Holzwürfel (Kantenlänge 10mm, Buche, trocken)
5,5%	Kunststoff	Polypropylen (kugelförmig, 10mm Durchmesser)
30 %	Wasser	Wasser
30%	Inertmaterial	Blähschiefergranulat (8-10mm Längenskala)

Tab. 1

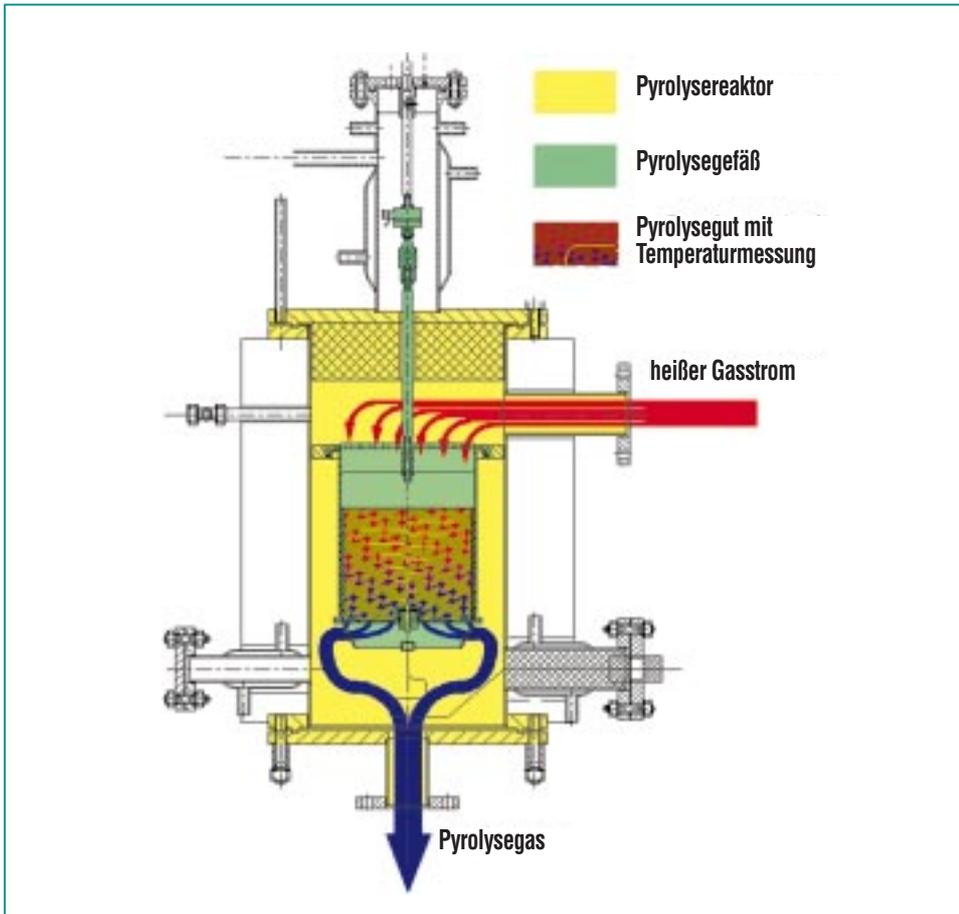


Abb. 7: PANTHA.

Sie besteht aus einem von außen beheizbaren Behälter und einem inneren Korb, in den das von einem inerten Heizgasstrom durchströmte Pyrolysegut eingebracht wird. Die Temperatur im Festbett wird mit Thermoelementen kontinuierlich gemessen, der Gewichtsverlust des Pyrolyseguts durch Wägung in vorgegebenen Zeitabständen bestimmt. Die Speziesmessungen werden außerhalb der Anlage im Pyrolysegasstrom durchgeführt.

Auf einfache Weise kann mit dieser Anlage durch Abweichung von der Normzusammensetzung des Referenzbrennstoffs auch der Einfluss eines größeren oder kleineren Anteils an Wasser oder organischer Substanz untersucht und bestimmt werden. Selbst für Hausmüllfraktionen können die charakteristischen Abweichungen vom Referenzbrennstoff festgestellt werden.

Zunächst wurden grundlegende Experimente zur Bestimmung des Wärmeübergangs in einem Festbett durchgeführt. Ergebnisse hierzu sind in der folgenden Abb. 8 dargestellt.

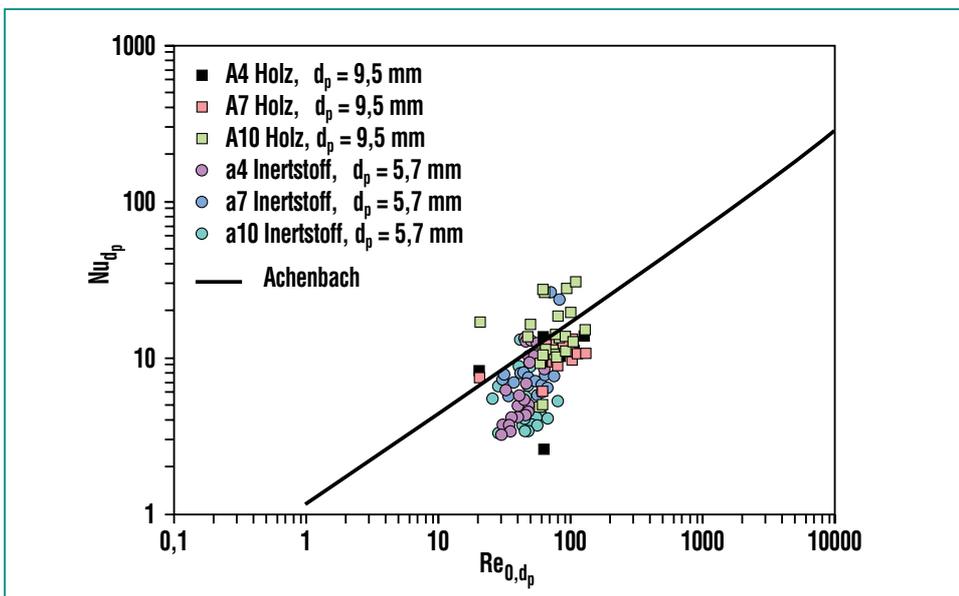


Abb. 8: Wärmeübergang im Festbett.

Aufgetragen ist die Nusselt-Zahl als Funktion der Reynolds-Zahl für Schüttungen aus Blähschiefer und Holzwürfel. Zum Vergleich mit den Messergebnissen ist die empirische Korrelation von Achenbach [8] eingezeichnet. Die Streuung der Messwerte ist neben Messungenauigkeiten auf unzureichende Stoffdaten, Abschätzungsfehler bei der Bestimmung der Partikeloberfläche und ungleichmäßige Strömungsverhältnisse im betrachteten Rey-

nolds-Zahlen-Bereich zurückzuführen. Der Vergleich zeigt jedoch, dass die empirische Korrelation mit ausreichender Genauigkeit zur Beschreibung des Wärmeübergangs für Festbetten verwendet werden kann.

Zur Validierung des Partikelabbrandes und der Partikelbewegung werden in der Literatur beschriebene Experimente verwendet. Nach Fertigstellung des Gesamtmodells sind integrale Validierungsexperimente an TAMARA, THERESA und kommerziellen Müllverbrennungsanlagen vorgesehen.

### Schlussbemerkung

Modelle sind in der Verbrennungstechnik zu einem unverzichtbaren Hilfsmittel für die Anlagenauslegung und die Betriebsoptimierung geworden. Unter der Voraussetzung einer korrekten Validierung und der Anwendung nur innerhalb ihres Gültigkeitsbereiches liefern die Modelle genaue Informationen über den Verbrennungsprozess und tragen damit zum Verständnis der physikalisch/chemischen Abläufe bei. Aus den gewonnenen Erkenntnissen lassen sich durch Parameterstudien Maßnahmen zur

Verbesserung des Verbrennungsprozesses ableiten und vorgegebene Ziele wie beispielsweise hoher Energieumsatz bei gleichzeitig niedrigen Emissionen erreichen. Außerdem stellen Modelle eine wertvolle Ergänzung zu Experimenten dar, da sie in der Regel eine höhere Auflösung besitzen und somit experimentelle Kosten reduzieren können.

### Literatur

- [1] E. Tenner,  
*Universität Darmstadt, 1933*
- [2] K. J. Thome-Kozmiensky,  
*EF-Verlag Berlin, 1983*
- [3] G. Ychobanoglous,  
H. Theisen,  
*McGraw Hill Book Company, 1977,*
- [4] B. Peters,  
*KfK 5385, Karlsruhe 1994*
- [5] E. Schröder,  
*FZKA 6373, Karlsruhe 1999*
- [6] K. Görner,  
Springer Verlag, 1991
- [7] K. Sattler, J. Emberger,  
*Vogel Buchverlag, 1992*
- [8] E. Achenbach,  
*7<sup>th</sup> Int. Heat Transf. Conf., pages 3 – 8, 1982*