

Verbrennung – Grundlagen und Anwendungsbeispiele

F. Arendt, PSA; H. Seifert, ITC

Feuer, also Verbrennung, ist eines der vier mythischen Grundelemente. Es symbolisiert göttliche Macht und Stärke (Engel mit dem Feuerschwert, brennender Dornbusch, Vernichtung von Sodom und Gomorrha, Pfingstflammen auf den Köpfen der christlichen Apostel). Das Fegefeuer dient der Reinigung. Die beiden religiösen Interpretationen beschreiben die heutigen Hauptanwendungen der Verbrennung: Energiewandlung als Stärke, Abfallverbrennung als Reinigung.

Mit Feuer eröffnete Prometheus den Menschen die Möglichkeiten technischer Entwicklung. Er wurde dafür bestraft, und auch heute befürchten viele, dass die Menschheit für manche technischen Entwicklungen büßen muss. Feuer drückt Emotionen und Stimmungen aus, als Freudenfeuer, als Geborgenheit am Kamin, als Angst vor Feuersbrüsten oder dem Grafitbrand von Tschernobyl.

Obwohl sich die Menschen seit altersher mit der Verbrennung befassen und ihre Erklärung durch Lavoisier mit Hilfe einer Waage vor 225 Jahren den Beginn der modernen quantitativen Chemie kennzeichnet, ist sie in vielen Einzelheiten noch unverstanden, wie auch die folgende Beobachtung beschreibt. Wenn Naturwissenschaftler und Ingenieure heute Außenstehenden Details ihrer Arbeit erläutern und begründen wollen, verwenden sie häufig die intensiven Forschungs- und Entwicklungsarbeiten an Verbrennungsmotoren als Beispiel dafür, dass technische Prozesse auch nach mehr als 100 Jahren genau-

er verstanden werden müssen und im Betrieb oder der Wirtschaftlichkeit verbessert werden können. Sie wollen damit sagen, dass sie sich mit komplexen Vorgängen und Systemen beschäftigen. In der Tat sind Verbrennungsvorgänge komplexe, also vielparametrische Prozesse. Wir müssen sie besser verstehen und kontrollieren lernen; denn Verbrennung bleibt eine unverzichtbare Technik, auch in der Abfallwirtschaft.

Worin besteht die Komplexität der Verbrennung in technischen Anlagen? Der Verbrennungsvorgang im engeren Sinne wird definiert als schnellablaufende Oxidationsreaktion von brennbaren Stoffen mit Wärmefreisetzung. Meist geschieht dies unter Aussendung sichtbarer Strahlung, die sich im Falle der Verbrennung von Kohlenwasserstoffen als gelbleuchtende Flamme infolge der Rußfestkörperstrahlung darstellt. Bei rußfreien Flammen dagegen ist nur noch ein schwach blaues Leuchten der Radikalstrahlung zu sehen.

Definitionsgemäß werden zur Verbrennung Brennstoffe und Oxidationsmittel benötigt. Die Einteilung der Brennstoffe bietet gleichzeitig eine Grundstrukturierung der Feuerungstechnik. Brennstoffe können in allen drei Aggregatzuständen vorliegen: gasförmig, flüssig und fest. Entsprechend dieser Einteilung der Brennstoffe unterscheiden sich die Verbrennungsverfahren mit den jeweiligen Einrichtungen.

Grundsätzlich gibt es zwei übergeordnete Ziele der Verbren-

nung: einerseits das Bereitstellen von Wärme – zur weiteren energetischen Nutzung – und andererseits die thermische Entsorgung unerwünschter Stoffe (Abfälle). Dabei ist die Verbrennung mit gutem Ausbrand der brennbaren Stoffe und unter minimierter Schadstoffbildung durchzuführen. Die Wärmefreisetzung und -übertragung soll dem Nutzungsprozess entsprechend gesteuert werden können. Diesen grundsätzlichen Zielvorgaben dient die gesamte Verbrennungsforschung.

Daraus abgeleitete Grundprobleme der Verbrennungstechnik sind zum einen die physikalische Aufgabe der Mischung von Brennstoff und Oxidationsmittel und zum anderen die chemische Fragestellung der Beeinflussung der Oxidations- und Nebenreaktionen.

Bei der Verbrennung gasförmiger Stoffe ist durch intensive experimentelle Forschung in Verbindung mit inzwischen weit entwickelten mathematischen Modellen bereits ein hoher Wissensstand erreicht worden. Der Strömungszustand in den Gasflammen kann sowohl laminar sein, z. B. bei der Kleinflamme eines Feuerzeuges, als auch im hochturbulenten Bereich liegen, wie es bei den meisten technischen Anwendungen der Fall ist. Das Mischen von Brennstoff und Oxidationsmittel kann bereits vor der Zündung stattfinden, z.B. beim Bunsenbrenner, meistens jedoch wird die Luft im Flammenbereich selbst durch den Brennstoffstrahl eingesaugt. Solche Diffusionsflammen können in sehr unterschiedlichen Größen ausgelegt

werden. Die größten technischen Ausführungen findet man bei Fackelflammen mit Flammenlängen von weit über hundert Metern.

Sollen flüssige Stoffe verbrannt werden, muss der flüssige Brennstoff zunächst zerstäubt werden, um die Verdampfung zu beschleunigen. Die eigentliche Verbrennung läuft dann in der Gasphase ab.

Bei festen Brennstoffen ist der Verbrennung zunächst eine Trocknungsphase, dann die Entgasung (Pyrolyse) von flüchtigen brennbaren Bestandteilen und schließlich die Vergasung des festen Kohlenstoffs vorgeschaltet. Neben homogenen Verbrennungsreaktionen finden bei der Feststoffverbrennung auch heterogene Reaktionen statt, bei denen noch erheblicher Forschungsbedarf besteht. Neben der Kohleverbrennung in Kraftwerken ist das Hauptanwendungsfeld der Feststoffverbrennung die Verbrennung von Abfällen, die sowohl aus dem Siedlungsbereich als auch aus der Industrie kommen können.

Fehler und Unzugänglichkeiten der Feststoffverbrennung führen zu unvollständiger Verbrennung, die Einbußen im Wirkungsgrad (Energiewandlung) mit sich bringt. Unter stofflichen Gesichtspunkten sind die Produkte der unvollständigen Verbrennung mit Umweltproblemen verbunden, bei der Verbrennung von Kohlenwasserstoffen etwa durch die Bildung von Ruß, Kohlenmonoxid und potenziell toxischen Zwischenprodukten. Außerdem be-

steht die Gefahr, dass feste Reststoffe wie Aschen und Stäube unzulässig hohe Konzentrationen an unverbrannten Kohlenwasserstoffen enthalten.

Auch Folgeprozesse der Verbrennung zur Energiewandlung müssen beachtet werden. Außer bei der direkten Nutzung der Verbrennungsgase in Gasturbinen ist die Übertragung der erzeugten Wärme auf einen geeigneten Wärmeträger wie Dampf erforderlich. Das geschieht in Kesseln, deren wesentliche Komponenten Rohrbündel sind. Die Stäube der heißen Rauchgase scheiden sich auf den Wärmeübertragungsflächen ab und behindern den Wärmeübergang. Andererseits bilden sie eine Schutzschicht gegen die Korrosion der Metallflächen durch aggressive Spurenstoffe im Gas. Die Lösung liegt entweder in einer Verbrennungsführung, die den Staubaustrag durch geringe Strömungsgeschwindigkeit vermindert, in der Entwicklung von wirtschaftlich arbeitenden, d. h. abreinigbaren Filtern für Betriebstemperaturen oberhalb 800°C oder in der periodischen Kesselreinigung. Die Art des Brennstoffs und wirtschaftliche Überlegungen bestimmen die Wahl der geeigneten Option.

Im allgemeinen wird mit Luft verbrannt, die kostenlos zur Verfügung steht und bei den meisten Brennstoffen die Einstellung einer Temperatur ermöglicht, bei der die Oxidationsprozesse hinreichend schnell und vollständig ablaufen. Die zunehmend preiswerte Verfügbarkeit von hochkonzentriertem, „technischem“

Sauerstoff und die Größe und Kosten von nachgeschalteten Rauchgasreinigungskomponenten, die aus Umweltschutzgründen gefordert werden (Staub, SO₂ etc.), erlauben aber Überlegungen, den Luftstickstoff als Trägergas zu ersetzen und/oder die Sauerstoffkonzentration zu verändern. So kann beispielsweise der Stickstoff durch CO₂ ersetzt werden, indem der größere Teil des Rauchgases nach einer Sauerstoffanreicherung in den Brennraum zurückgeführt wird. Die gegenüber Stickstoff höhere Wärmekapazität von CO₂ eröffnet neue Möglichkeiten zur Änderung der Parameter Temperatur und Verhältnis Sauerstoff zu Trägergas; die Bildung von thermischem Stickoxid wird reduziert. Für die Rauchgasreinigung ergeben sich drastisch reduzierte Volumenströme mit höherer Schadstoffkonzentration, die neue Reinigungstechniken ermöglichen, bis hin zur fast vollständigen Kondensation von Wasserdampf und der Gewinnung von CO₂ für technische Anwendungen. Mit Sauerstoffanreicherung lässt sich auch der Bereich von Eingangsstoffen für die Verbrennung erweitern, etwa auf Abfälle mit sehr hoher Feuchte und geringem Heizwert oder auf Reststoffe mit hohem Inertanteil wie bei Altdeponien oder der Bodenreinigung. Schließlich lässt sich im Durchflussbetrieb die Sauerstoffkonzentration auch so weit vermindern, dass die Verbrennung in andere thermische Prozesse wie Pyrolyse und Vergasung übergeht. Insgesamt enthält die thermische Stoffumwandlung im Gassystem O₂/N₂/H₂O/CO₂ eine Fülle von Optionen und For-

schungsaufgaben für die Energie- und Umwelttechnik. Beispielsweise wurde vor ca. 20 Jahren an der Universität Karlsruhe der weltweit beachtete Nachweis erbracht, dass sich in überkritischem Wasser Flammen bilden, wenn Methan und Oxidationsmittel zugegeben werden.

Aus Korrosions- und Umweltschutzgründen spielen Schadstoffe in Brennstoffen und als Verbrennungsprodukte eine Rolle, die in den letzten Jahrzehnten zugenommen hat. In Kraftwerken werden Staub, SO₂ und Stickoxide im allgemeinen in nachgeschalteten Komponenten abgeschieden; für die Stickoxide werden auch brennraumnahe Reduktionsprozesse (SNCR) verwendet. In Abfallverbrennungsanlagen ist das Problem der Schadstoffe mindestens gleichbedeutend mit dem des energetischen Wirkungsgrades, wenn nicht wichtiger. Chlor und (Schwer-)Metalle müssen zusätzlich zurückgehalten werden, und der Gesamtprozess wird durch diese Aufgabe wesentlich bestimmt. Die Erkenntnis, dass Dioxinbildung vor allem durch de-novo-Synthese im Rauchgasreinigung- und Energieverwertungsteil einer Abfallverbrennungsanlage stattfindet und von der Zusammensetzung und der Temperatur der dort verfügbaren Stoffe abhängt, erfordert die Betrachtung einer Verbrennungsanlage als Gesamtsystem. Es ist eine große wissenschaftliche Herausforderung, die Verbrennung eines so heterogenen Brennstoffs wie Siedlungsabfall nach spurenchemischen Kriterien zu optimieren.

Auslegung und Betrieb von technischen Abfallverbrennungsanlagen erfordern unterschiedliche Strategien, die im HGF-Strategiefondsprojekt „Stickoxidminderung“ parallel verfolgt werden. Die Leitung des Projektes liegt beim Bereich Thermische Abfallbehandlung des Instituts für Technische Chemie im Forschungszentrum Karlsruhe. Partner sind weitere Institute des Zentrums, der GSF – Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit – und des Deutschen Zentrums für Luft und Raumfahrt (DLR), Institute der Universitäten Stuttgart und Karlsruhe, das Umweltinstitut CUTEC in Clausthal-Zellerfeld, sowie drei Industriefirmen. Ziel der Arbeiten mit einem Personaleinsatz von mehr als 50 Personenjahren und einer Dauer von drei Jahren ist es, die Konzentration von Stickoxiden am Ende der Verbrennung innerhalb des gesetzlich vorgeschriebenen Grenzwertes von 200 mg NO_x/Nm³ zu halten. Dadurch lassen sich nachgeschaltete Reinigungsstufen für Stickoxide einsparen. Das Ziel entspricht damit der aktuellen Aufgabe, die Kosten für den Umweltschutz unter Einhaltung der strengen Emissionsgrenzwerte zu senken.

Für die Auslegung einer technischen Anlage sind detaillierte Kenntnisse der Prozesse, für die sie errichtet wird, erforderlich. Im Fall der Stickoxidminderung bedeutet das die Identifikation von Verbindungen und Radikalen, die zur Stickstoffbilanz beitragen und bei den Temperaturen der Abfallverbrennung vor allem aus dem Brennstoffstickstoff stammen. Moderne Messtechniken mit und

ohne Probenahme müssen für diese Aufgabe weiterentwickelt, angepasst und eingesetzt werden, ebenso wie für die Bestimmung der Temperaturverteilung im Brennraum. Die Messergebnisse werden in reaktionschemische Modelle für die Gasphase eingebracht. Andere Modelle werden für die Beschreibung des Brennstofftransports und der sich fortschreitend ändernden Brennstoffzusammensetzung („Abbrand“) benötigt, um die Quellen der wichtigen Reaktionspartner zu beschreiben. Solche Modelle für die Feststoffverbrennung sind noch nicht zufriedenstellend. Reaktionskinetik und Feststofftransport werden schließlich mit Optionen der Luftzufuhr verknüpft, über die sich die Temperaturverteilung und das oxidative oder reduktive chemische Milieu im Brennraum einstellen lässt. Damit werden Kenntnisse über die geeignete Gestaltung von Brennräumen sowie über Luft- und Brennstoffführung gewonnen. Insgesamt handelt es sich dabei um ein deterministisches Vorgehen, basierend auf elementaren Reaktionen und Transportvorgängen.

Für den Betrieb einer so ausgelegten Anlage kann ein anderer Ansatz gewählt werden, wenn aufwändige Messungen und Berechnungen aus Zeitgründen online nicht durchgeführt werden können. Einige Messdaten (z. B. Temperatur, Konzentrationen von O₂ und CO, ein Infrarotbild des Brennvorganges) werden mit modernen, lernenden Verfahren der künstlichen Intelligenz verarbeitet und mit Emissions- und anderen Betriebsparametern verknüpft.

Auf diese Weise lassen sich relevante Signale finden, die zur weiteren Verbesserung der Anlagensteuerung verwendet werden können. Insgesamt handelt es sich hier um eine empirisch-heuristische Strategie, die neben den physikalisch-chemischen Modellen zusätzlich eingesetzt werden kann und sich vor allem bei wechselnden Brennstoffeigenschaften empfiehlt.

Die geschilderte Doppelstrategie zur Prozessbeherrschung mit Hilfe deterministischer Modelle und künstlicher Intelligenz, am Beispiel der Stickoxide in Rostfeuerungen entwickelt, soll später auch auf andere primärseitige Minderungsmaßnahmen in Abfallverbrennungsanlagen angewendet werden, etwa auf die Vermeidung von organischen Substanzen, die zur Dioxinbildung beitragen. Darüber hinaus ist dieses Vorgehen auch für andere technische Prozesse geeignet und lässt erwarten, dass das Potenzial moderner Verfahren der Simulation, Messtechnik, Messdatenverarbeitung und Regelung für den produktionsintegrierten Umweltschutz durch Prozesssteuerung weiter erschlossen werden kann. Dies ist ein wichtiger Schritt auf dem Wege zu einer nachhaltigen, d. h. ressourcenschonenden und umweltverträglichen Technik.

In den letzten Jahren wurde die Abfallverbrennung aus zwei Gründen kritisch hinterfragt: einerseits wurden Umweltverschmutzungen aus Emissionen in die Atmosphäre und aus Reststoffen befürchtet; zum anderen wurden zu hohe Entsorgungskosten bemängelt. Mit den Grenzwerten der 17. Verordnung zum Bundesimmissionsschutzgesetz (17. BImSchV) und ihrer Umsetzung in Großanlagen sind die ökologischen Bedenken weitgehend ausgeräumt. Zu dieser veränderten Einstellung der Öffentlichkeit haben die Ergebnisse des Forschungszentrums Karlsruhe beigetragen, insbesondere durch die Aufklärung und Verminderung der Dioxinbildung, die Verfahren zur Senkung der Quecksilber- und anderer Metallemissionen und die Beiträge zur Verwertung und Bewertung von Reststoffen. Es geht nun darum, die durch Wettbewerb in den letzten Jahren bereits gesunkenen Kosten durch technische Fortschritte und bei Wahrung des erreichten ökologischen Niveaus weiter zu senken.

Mit Inkrafttreten des Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetzes 1996 und der Technischen Anleitung Siedlungsabfall begann eine 10-jährige Frist, nach deren Ablauf die Deponierung von organisch belasteten Abfällen ohne Vorbehandlung verboten wird. Depo-

niebetreiber sind daher bestrebt, die verfügbaren Volumina bis 2005 weitgehend zu verfüllen. Gleichzeitig wurde in begrenztem Umfang die Mitverbrennung von Abfällen in Kraftwerken und Industriefeuerungen erlaubt. Beide Vorgänge und zu hohe Kosten der Verbrennung führten dazu, dass die Abfallanlieferung an manche Verbrennungsanlagen zurückging. Allerdings ist ab 2005 mit einer Umkehr des Trends und einer Erhöhung des Verbrennungsanteils am Restmüll der Siedlungsabfälle zu rechnen, der heute in Deutschland bei etwa 30 % liegt.