

# Optimierung von Abfallverbrennungsanlagen

Michael Beckmann und Wolfgang Spiegel

1.	Thermische Abfallbehandlung mit Rostsystemen .....	210
2.	Prozessführung in Rostsystemen .....	212
2.1.	Feststoffumsatz in Rostsystemen .....	213
2.2.	Nachverbrennungsprozess .....	219
3.	Beispiele und Ergebnisse .....	222
3.1.	Feststoffumsatz auf dem Rost .....	222
3.2.	Nachverbrennung .....	228
3.3.	Vergasungs-Nachverbrennungsfahrweise .....	236
3.4.	Korrosion und Verschmutzung .....	242
3.5.	Optimierung des Wirkungsgrades von Abfallverbrennungsanlagen .....	253
4.	Zusammenfassung .....	259
5.	Literatur .....	260

Bei der Prozessführung der Verbrennung und Vergasung von Abfällen in Rostsystemen sind insbesondere seit Beginn der 90er Jahre des vergangenen Jahrhunderts eine Reihe von Entwicklungen und Verbesserungen im Hinblick auf wesentliche Teilaufgaben wie

- die Senkung der Abgasströme,
- den Abbau von Schadstoffen und damit
- die Reduzierung der Schadstofffrachten,
- die Verbesserung der Aschequalität,
- die Steigerung des Gesamtwirkungsgrades sowie
- die Verminderung von Korrosionen

erreicht worden. Dabei ist das Potential der Maßnahmen zur Verbesserung der Prozessführung noch nicht ausgeschöpft. Künftige Weiterentwicklungen sind insbesondere in der Kombination von Maßnahmen zur umfassenden Optimierung verschiedener Teilaufgaben zu sehen. Das erfordert eine sorgfältige Abstimmung der Primärmaßnahmen untereinander.

In dem vorliegenden Beitrag wird auf das Zusammenwirken verschiedener Maßnahmen zur Prozessoptimierung eingegangen. Insgesamt wird deutlich, dass sowohl zur Optimierung einzelner Teilaufgaben wie auch im Hinblick auf das Zusammenwirken verschiedener Primärmaßnahmen zur Optimierung verschiedener Teilaufgaben bei der Verbrennung wie auch bei der Vergasung auf dem Rost noch eine Reihe von wichtigen Fragestellungen gegeben sind.

## *Kap. 1.*

# Thermische Abfallbehandlung mit Rostsystemen

Im Bereich der thermischen Behandlung von Hausmüll und hausmüllähnlichen Gewerbeabfällen (Restmüll) werden derzeit verschiedene Verfahren mit Pyrolyse-, Vergasungs- und Verbrennungsgrundbausteinen eingesetzt oder erprobt. Die thermischen Hauptverfahren lassen sich jeweils in eine

- erste Einheit zur Umwandlung der festen und pastösen Abfälle und in eine
- zweite Einheit zur Behandlung der aus der ersten Einheit stammenden Gase, Flugstäube oder von Pyrolysekoks (Tabelle 1)

aufteilen [58].

Tabelle 1: Systematische Aufteilung für thermische Hauptverfahren

	1. Stufe	2. Stufe	Verfahren
A.	Verbrennung <sup>1</sup>	Verbrennung	Verbrennungs-Nachverbrennungs-Verfahren (z.B. klassische Müllverbrennung) [22]
B.	Thermolyse <sup>2</sup>	Verbrennung	Thermolyse-Nachverbrennungs-Verfahren (z.B. Schwel-Brenn-Verfahren nach Siemens KWU) [15]
C.	Vergasung <sup>3</sup>	Verbrennung	Vergasungs-Nachverbrennungs-Verfahren (weiterentwickelte klassische Müllverbrennung) [5, 62]
D.	Thermolyse	Vergasung	Thermolyse-Nachvergasungs-Verfahren (z.B. Konversionsverfahren nach Noell, Thermoselect-Verfahren usw.) [66]
E.	Vergasung	Vergasung	Vergasungs-Nachvergasungs-Verfahren (z.B. Vergasung mit Gasspaltung nach Lurgi) [1]

<sup>1</sup> hier: zusammenfassende Bezeichnung für Trocknungs-, Entgasungs-, Vergasungs- und Verbrennungsvorgänge

<sup>2</sup> hier: zusammenfassende Bezeichnung für Trocknungs-, Entgasungs- und Pyrolysevorgänge

<sup>3</sup> hier: zusammenfassende Bezeichnung für Trocknungs-, Entgasungs- und Vergasungsvorgänge

Quelle: Scholz, R.; Beckmann, M.; Schulenburg, F.: Abfallbehandlung in thermischen Verfahren. Stuttgart, Leipzig, Wiesbaden: B.G. Teubner, 2001

Die konventionelle thermische Behandlung von Restmüll, oftmals auch als *klassische Restmüllverbrennung* bezeichnet, stellt eine lang erprobte und bewährte Technik dar. Die systematische Einordnung von Verfahren ist wichtig, um prozesstechnische Möglichkeiten besser erörtern und optimieren zu können und um Verfahren untereinander einem Vergleich überhaupt erst zugänglich zu machen. Zunächst können die Verfahren der thermischen Abfallbehandlung in das so

genannte thermische Hauptverfahren und die Verfahren oder Anlagen zur Abgasreinigung, Energieumwandlung, Aschebehandlung, Erzeugung von Hilfsstoffen usw. unterteilt werden. Die klassische Abfallverbrennung ist gemäß der Einteilung in Tabelle 1 als ein Verbrennungs-Nachverbrennungsverfahren mit einem Rostsystem in der ersten Einheit und einem Brennkammersystem in der zweiten Einheit anzusehen. Das Bild 1 zeigt einen Schnitt des Gesamtverfahrens als Beispiel.

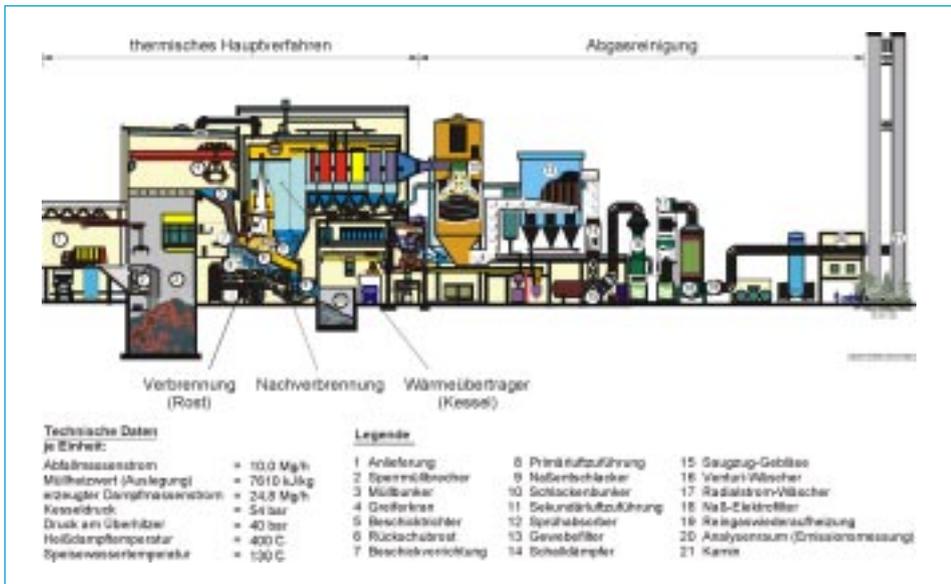


Bild 1: Schematische Darstellung einer Abfallverbrennungsanlage – klassische Hausmüllverbrennungsanlage –

Quelle: Emissionsminderung bei Müllverbrennungsanlagen. Endbericht eines Verbundvorhabens zwischen Firma MARTIN GmbH, München, NOELL GmbH, Würzburg, L.&C. Steinmüller GmbH, Gummersbach, Projektträger UBA-Berlin, 1994

In den letzten Jahren wurde bei den *klassischen* Verfahren insbesondere die Abgasreinigungstechnik – *Sekundärmaßnahmen* – weiterentwickelt. Die entsprechend dem Stand der Technik ausgerüsteten Anlagen erfüllen die gesetzlich vorgeschriebenen Grenzwerte für das Einleiten und Deponieren von Schadstoffen in Luft, Wasser und Boden.

Gegenwärtig liegt der Schwerpunkt auf der Entwicklung, Modellierung und Optimierung der Prozessführung – *Primärmaßnahmen* – des thermischen Hauptverfahrens. Hier zeigt sich, dass noch ein erhebliches Entwicklungspotential insbesondere im Bereich des Rostes und der Nachverbrennung vorhanden ist, um beispielsweise

- die Abgasmassenströme – Abgasreinigungsanlagen, Emissionsfrachten – zu verkleinern,
- die Energienutzung zu verbessern,

- die Reststoffeigenschaften zu beeinflussen,
- Korrosionen zu vermindern und
- Durchsatz sowie Verfügbarkeit zu erhöhen.

Diesbezüglich sind bei den *klassischen* Verfahren mit Rostsystemen – u.a. auch durch die *neuen* Verfahren mit ausgelöst – bereits erhebliche Entwicklungsschritte durchgeführt worden. Erwähnt seien hier beispielsweise Optimierung der Feuer-raumgestaltung [19, 22, 39, 50], Abgasrückführung [54, 57], Sauerstoffanreicherung der Primärluft [27, 35], wassergekühlte Rostelemente [39], Weiterentwicklung der Regelung (z.B. IR-Kamera) [25, 43, 53, 68] usw.

Darüber hinaus wurden im Pilotmaßstab für künftige Entwicklungen auch neue, veränderte Prozessführungen mit Rostsystemen, z.B.

- die Vergasung mit Luft auf dem Rost und damit zusammenhängend
- die eigenständige Nachverbrennung der erzeugten Gase

erprobt [12, 62]. Die mit den vorstehend genannten Zielstellungen angestrebten Verbesserungen treten dabei noch deutlicher hervor.

Im Folgenden werden zunächst kurz allgemeine Gesichtspunkte der Prozessführung in Rostsystemen erläutert. Danach werden Beispiele von Prozessführungen an bereits in der Praxis umgesetzten Anlagen und Ergebnisse aus Versuchen an Industrie- und Pilotanlagen sowie im Technikums- und Labormaßstab behandelt.

## *Kap. 2.*

### **Prozessführung in Rostsystemen**

Die Leistungsfähigkeit der thermischen Verfahren zur Abfallbehandlung wird maßgeblich zunächst durch die Prozessführung des thermischen Hauptverfahrens bestimmt. Hier müssen die vorhandenen Möglichkeiten zur Reduzierung von Schadstoffen und Abgasmassenströmen durch Primärmaßnahmen ausgeschöpft werden. Danach entscheidet sich, welcher Aufwand im Bereich der Sekundärmaßnahmen beispielsweise zur Abgasreinigung erforderlich ist. Vor diesem Hintergrund wird hier besonders auf das thermische Hauptverfahren der klassischen Abfallverbrennung eingegangen, das sich wie eingangs erwähnt in zwei Einheiten als Verbrennungs-Nachverbrennungskonzept aufteilen lässt. In der ersten Einheit erfolgt eine Verbrennung auf dem Rost. Anschließend werden in der zweiten Einheit die vom Rost kommenden Gase und Flugstäube in der Nachverbrennungszone nachverbrannt. Aufgrund der unterschiedlichen Aufgabenstellung in der ersten und zweiten Einheit werden die Teilschritte des Feststoffumsatzes auf dem Rost (erste Einheit) und die Nachverbrennung der Gase (zweite Einheit) im Folgenden getrennt weiter behandelt.

Die jeweiligen Reaktionsbedingungen werden durch die Haupteinflussgrößen (Bild 2) maßgeblich bestimmt. Bei der Diskussion der Teilschritte des Feststoffumsatzes und der Nachverbrennung der dabei erzeugten Gase – insbesondere auch im Hinblick auf das Verständnis der jeweiligen Reaktionsmechanismen (z.B. Schadstoffbildungs- und Abbaumechanismen) müssen die in Bild 2 genannten Haupteinflussgrößen [58] hinsichtlich des Niveaus und auch der Steuerungsmöglichkeiten durch die Anlagentechnik (Apparatetechnik) betrachtet werden. Wichtig für die Prozessoptimierung sind dabei insbesondere die verschiedenen Steuerungsmöglichkeiten entlang des Reaktionsweges.

Haupteinflussgrößen	Variationen		
<b>Einsatzstoffe</b>	physikalische Eigenschaften	gasförmig, flüssig, pastös, fest (staubförmig oder stückig)	
	chemische Eigenschaften	Zusammensetzung ( <i>Problemstoffe</i> )	
<b>Sauerstoffangebot</b>	Thermolyse $\lambda = 0$	Vergasung $\lambda < 1$	Verbrennung $\lambda \geq 1$
<b>Reaktionsgase</b>	Luft, Sauerstoff, (Stickstoff, Kohlendioxid, Wasserdampf, rückgeführtes Abgas, usw.)		
<b>Reaktorverhalten</b>	Rührkessel (RK) vollkommene Durchmischung ( $Pe = 0$ )	Realer Reaktor $0 < Pe < \infty$	Kolbenströmer (KS) keine Durchmischung ( $Pe \rightarrow \infty$ )
<b>Art der Stoffzufuhr</b>	Eintragsimpuls, Drall, Zerstäubung, Dispergierung, usw. <small>z.B. für Einsatzstoffe, Reaktionsgase, Zusatzstoffe</small>		
<b>Verweilzeit</b>	kurz einige s	lang einige min bis h	sehr lang einige h bis d
<b>Temperatur</b>	Nieder- $\theta < 800$ °C	bis $\theta = 800$ °C - 1.000 °C	Hochtemperatur $\theta > 1.000$ °C (ggf. b. 2.000 °C und höher)
<b>Druck</b>	Nieder- $p \ll 0,1$ MPa	Umgebungs- $p = 0,1$ MPa	Hochdruck $p \gg 0,1$ MPa
<b>Zusatzstoffe</b>	Additiv (z.B. zur Schadstoffbindung, zur Beeinflussung des Schmelzverhaltens usw.) Zusatzbrennstoff Bettbeeinflussung (z.B. Wirbelbett, Festbett, Umlaufbett, Trägermatrix, Ascherückführung usw.)		

Bild 2: Haupteinflussgrößen bei thermischen Verfahren

Quelle: Scholz, R.; Beckmann, M.; Schulenburg, F.: Abfallbehandlung in thermischen Verfahren. Stuttgart, Leipzig, Wiesbaden: B.G. Teubner, 2001

### *Kap. 2.1.*

## Feststoffumsatz in Rostsystemen

Der Feststoffumsatz auf einem Rost lässt sich entlang des Reaktionsweges mehr oder weniger deutlich in die Teilvorgänge:

- Trocknung,
- Entgasung,

- Vergasung und
  - Restausbrand
- aufteilen (Bild 3).

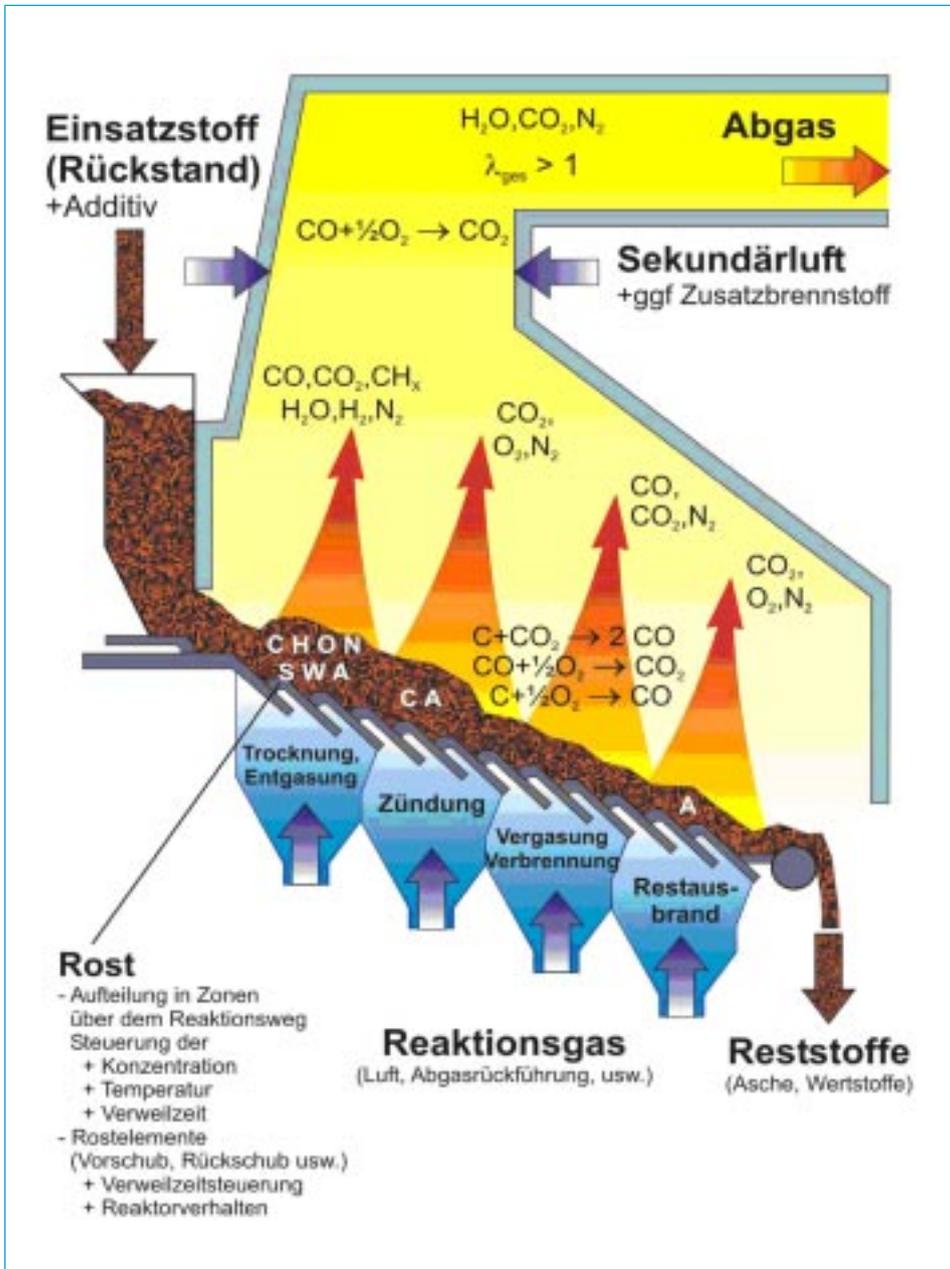


Bild 3: Feststoffumsatz in Rostsystemen

Es kann hier deshalb zusammengefasst von *Verbrennung auf dem Rost* gesprochen werden, weil der insgesamt dem Rost mit dem Reaktionsgas – in der Regel Luft – zugeführte Sauerstoff, bezogen auf den zugeführten Abfall, zu überstöchiometrischen Verhältnissen (z.B.  $\lambda \approx 1,3$ ) führt.

Um prozesstechnische Möglichkeiten erörtern zu können, müssen die Haupteinflussgrößen näher betrachtet werden [58]. Dabei ist nicht nur das jeweilige Niveau, sondern auch die Verteilung der Haupteinflussgrößen längs des Reaktionsweges zu beachten. Bei Rostsystemen sind sehr vielfältige Möglichkeiten zur Steuerung der o.g. Haupteinflussgrößen und damit zur gezielten Beeinflussung der einzelnen Teilvorgänge entlang des Reaktionsweges vorhanden (Bild 3). Von Vorteil sind diese Steuerungsmöglichkeiten insbesondere bei sich aufgrund von Schwankungen in der Abfallzusammensetzung ergebenden Veränderungen des Reaktionsverhaltens. Die nachfolgenden Darstellungen der verfahrenstechnischen Möglichkeiten werden durch die Übersicht in Tabelle 2 und das Fließschema in Bild 4 ergänzt.<sup>1</sup>

Vorangestellt sei bemerkt, dass Quenchreaktionen an Wandoberflächen zu vermeiden sind und deshalb in beiden Einheiten – Rost und Nachverbrennung – entsprechend hohe Wandtemperaturen durch geeignete Feuerfestauskleidung anzustreben sind. Das bedeutet gleichzeitig, dass die Wärmeübertragung weitgehend vom Feststoffumsatz und der Nachverbrennung getrennt erfolgen muss, d.h., Verbrennung und Wärmeauskopplung sind wie in Bild 4 schematisch dargestellt in Reihe zu schalten.

Weiter wird aus Bild 4 deutlich, dass die beiden Verbrennungseinheiten in Reihe und getrennt eingezeichnet sind. Damit soll deutlich gemacht werden, dass sich die verschiedenen Teilaufgaben

- Feststoffumsatz auf dem Rost und
- Nachverbrennungsprozess

um so leichter optimieren lassen, je besser die Entkopplung der beiden Einheiten ist. Hierfür ist allerdings nicht allein eine geometrische Trennung, sondern wie im Zusammenhang mit dem Nachverbrennungsprozess noch erläutert wird, auch eine strömungstechnische Entkopplung möglich.

Bei der Beurteilung der Steuerungsmöglichkeiten bei Rostsystemen ist zunächst die Aufteilung der Rostfläche in mehrere Rostzonen, die hinsichtlich der Reaktionsgaszufuhr voneinander getrennt sind, zu erwähnen. Damit können entlang des Reaktionsweges durch unterschiedliche Zufuhr von Reaktionsgas das Sauerstoffangebot und die Temperatur im Bett so gesteuert werden, dass die einzelnen Teilschritte bis zum Restausbrand abgestimmt auf die Eigenschaften der Einsatzstoffe, auch bei Schwankungen in der Zusammensetzung, ablaufen können.

<sup>1</sup> In dem hier gesteckten Rahmen steht die Prozessführung für feste Einsatzstoffe in Rostsystemen im Vordergrund. Bei der Erörterung der Möglichkeiten der Prozessführung müsste man jedoch zunächst mit der Diskussion von Feuerungen für gasförmige, flüssige und staubförmig feste Einsatzstoffe beginnen, da bei diesen Stoffen in der Regel nur eine Einheit erforderlich ist. Danach kann man darauf aufbauend zu der Prozessführung für stückige und pastöse Einsatzstoffe, für die i.d.R. zwei Einheiten erforderlich sind, übergehen. Eine solche systematische Darstellung würde sehr viel Raum beanspruchen, deshalb sei an dieser Stelle nur der Hinweis auf diese Vorgehensweise und auf das Schrifttum gegeben (z.B. [54, 58, 61]).

Tabelle 2: Charakterisierung von Rostsystemen

Haupteinflussgrößen		Bemerkungen
Einsatzstoffe		stückig, in Verbindung mit einem Feststoffbett auch pastös
Sauerstoffangebot	Niveau	überstöchiometrisch (Verbrennung) üblich; unterstöchiometrisch (Vergasung) möglich; Sauerstoffabschluss (Thermolyse) nicht üblich, jedoch auch möglich
	Steuerung längs des Reaktionsweges	getrennt in einzelnen Zonen sehr gut einstellbar (z.B. Luft-/Sauerstoffstufung, Abgasrückführung usw.); in Verbindung mit Temperatursteuerung sind die Teilschritte Trocknen, Entgasen, Vergasen, Restausbrand des Feststoffes beeinflussbar
Temperatur	Niveau	Bettoberflächentemperatur bis etwa 1.000 °C; mittlere Betttemperaturen niedriger
	Steuerung längs des Reaktionsweges	durch Einteilung in mehrere Zonen ebenfalls sehr gut möglich, wie bei der Steuerung der Sauerstoffkonzentration (Luftvorwärmung, Abgasrückführung, Wasser-/Dampfkühlung)
Druck		bei Umgebungsdruck, in der Regel aus anlagentechnischen Gründen wenige Pa Unterdruck
Reaktorverhalten	Staub/Gas	je nach Bewegung der Rostelemente können die einzelnen Zonen einer Rührkessel-Charakteristik (z.B. Rückschubrost) oder einer Kolben-Strömer-Charakteristik (z.B. Walzenrost) angenähert werden; über der gesamten Reaktorlänge ergibt sich angenähert eine Kolben-Strömer-Charakteristik
	Gas	a) Oxidationsmittel usw. strömt zwangsweise durch das Bett und wird gleichmäßig über dem Rost verteilt; damit sehr guter Kontakt zwischen Gas und Feststoff b) Strömungsführung über dem Bett im Gegen- und Gleichstrom möglich, Nachverbrennung erforderlich
Verweilzeit (Feststoff)	Niveau	im Bereich von Minuten bis Stunden; durch Rostelementgeschwindigkeit und Massenstrom einstellbar; bei Projektierung durch Gesamtlänge und -breite beeinflussbar
	Steuerung längs des Reaktionsweges	durch getrennte Geschwindigkeitseinstellungen der Rostelemente in den einzelnen Zonen sehr gute Anpassung möglich; falls erforderlich für zusätzliche Verbesserung des Ausbrandes am Rostende Steuerung durch Austragswalze
Zusatzstoffe		Additive z.B. zur Schadstoffeinbindung in den Feststoff und Beeinflussung der Eigenschaften der verbleibenden Reststoffe (Asche, angeschmolzene Asche, Schlacke); Inertbett z.B. Trägermatrix für eventuell leicht schmelzende Stoffe (z.B. Kunststoff)
Einsatzbereiche (Beispiele)		Feststoffumsatz in der ersten Einheit bei Hausmüllverbrennungsanlagen; Separieren von Metallen aus Verbundstoffen durch Vergasung bei niedrigen Temperaturen

Quelle: Scholz, R.; Beckmann, M.; Schulenburg, F.: Abfallbehandlung in thermischen Verfahren. Stuttgart, Leipzig, Wiesbaden: B.G. Teubner, 2001



Rostende der Trocknungs- und Entgasungszone am Rostanfang Wärme zuführen. Bei einer Trennung der Nachverbrennungszone (2. Einheit) von der Rostzone (1. Einheit) können jedoch sowohl die im Gleich- als auch die im Gegenstrom geführten Gase unabhängig von ihrem Zustand am Eintritt in die Nachverbrennung in dieser optimiert nachverbrannt werden. Dabei können dann bekannte Primärmaßnahmen zur  $\text{NO}_x$ -Minderung bei gleichzeitig hohem Ausbrand umgesetzt werden. Ebenso sind die Temperaturverhältnisse in der Trocknungs- und Entgasungsstufe nicht nur von der Strömungsführung abhängig. Die Wärmeübertragungsverhältnisse lassen sich u.a. durch *Sekundärheizflächeneffekte*, d.h., durch Strahlungsaustausch zwischen den umliegenden feuerfest ausgekleideten heißen Wänden und der Gutoberfläche beeinflussen. Diese Überlegungen sollen zeigen, dass hier nicht einer bestimmten Strömungsführung von vornherein der Vorzug gegeben werden kann.

Einen weiteren Freiheitsgrad bei der Optimierung des Verbrennungsablaufes im Hinblick auf Verweilzeit und Verweilzeitverteilung erhält man bei einer zonenweise getrennten Bewegung der Rostelemente. Eine getrennte Bewegung der Rostelemente in den Rostzonen entlang des Rostweges bedeutet einerseits zwar einen erhöhten konstruktiven Aufwand, andererseits lässt sich damit jedoch die Verweilzeit und die Betthöhe in den einzelnen Reaktionszonen unabhängig steuern. Der Rost selbst kann als Vorschub-, Rückschub- oder Walzenrost ausgeführt sein.

Durch eine zusätzliche Wasserkühlung der Rostelemente, die konstruktiv aufwendiger im Vergleich zu einem herkömmlichen Rost ist, ergibt sich der Vorteil, dass im Unterschied zu dem nur durch Reaktionsgas gekühlten Rost die Reaktionsgasverteilung, -sauerstoffkonzentration und -temperatur in einem breiteren Variationsbereich ohne Rücksicht auf die Rostkonstruktion (Kühlung) eingestellt werden kann. Die o.g. Maßnahmen und zugehörigen Vorteile können dann noch deutlicher umgesetzt werden. Die Luftzahl, die Abgas- und Flugstaubströme können gesenkt werden. Die Temperaturen in der Ausbrandstufe können soweit erhöht werden, dass die Asche in einem gesinterten Zustand anfällt, was im Hinblick auf das Eluatverhalten bei Restmüll zu einer deutlichen Verbesserung führt [29, 71]. Darüber hinaus ergeben sich bei einem wassergekühlten Rost eine niedrigere Verschleißgefahr durch thermische Einflüsse insbesondere bei heizwertreichen Abfallstoffen und ein geringerer Rostdurchfall (geringere thermische Ausdehnung gestattet engere Spielräume zwischen den Rostelementen).

Abschließend sei in Verbindung mit der Regelung des Verbrennungsprozesses auf dem Rost der Einsatz von Infrarotkameras zur Erfassung der Temperaturen der Brennbettfläche erwähnt. Durch die Ausmessung von Temperaturfeldern lässt sich beispielsweise die Lage der Hauptreaktionszone erkennen. Diese kann dann z.B. durch Umverteilung der Primärluft je nach Erfordernis mehr zum Rostanfang oder Rostende (geregelt) verschoben werden. Durch gezielte Veränderung der Primärluft (Reaktionsgaszugabe) ist eine schnelle Anpassung an Schwankungen der Restmüllzusammensetzung, eine Vermeidung von Durchbläsern und von Strähnenbildungen, eine Verbesserung des Reststoffausbrands und eine Vermeidung von Emissionsspitzen zu erwarten.

*Kap. 2.2.***Nachverbrennungsprozess**

Im Zusammenhang mit dem Nachverbrennungsprozess ist insbesondere auf die Haupteinflussgrößen und die zugehörigen Steuerungsmöglichkeiten

- Reaktor- bzw. Verweilzeitverhalten (Durchmischung),
- Verweilzeit,
- Temperatur und
- Sauerstoffkonzentration

einzugehen. Eine Übersicht hierzu ist in Tabelle 3 enthalten.

Zunächst sei das Verweilzeitverhalten in Verbindung mit Bildungs- und Abbaureaktionen von Schadstoffen betrachtet. In der chemischen Verfahrenstechnik unterscheidet man hinsichtlich des Verweilzeitverhaltens zwei Grenzfälle, den idealen Rührkesselreaktor und den idealen Rohrreaktor [41]. In Bild 5 ist für diese Grenzfälle das Abbauverhalten für CO in Abhängigkeit von der Verweilzeit dargestellt. Es zeigt sich, dass der ideale Rohrreaktor für den Abbaugrad zunächst die günstigere Reaktorcharakteristik aufweist. Dabei wird jedoch vorausgesetzt, dass ein einheitliches Temperatur- und Konzentrationsprofil über dem Reaktionsquerschnitt vorliegt. Für die Verhältnisse in dem Nachverbrennungsprozess bedeutet das wiederum die Vorschaltung eines Rührkesselelements zur Durchmischung (Bild 4, zweite Einheit).

Im Zusammenhang mit einem möglichst einheitlichen Temperaturniveau sei an dieser Stelle wiederholt (Bild 4), dass eine verstärkte Wärmeauskopplung, verbunden mit Quencheffekten an kalten Wänden, im Verbrennungsraum vermieden werden sollte. Für die Vermischung im Bereich der Nachverbrennung scheiden aufgrund des hohen Temperaturniveaus, der Korrosion usw. mechanische Einbauten in der Regel aus.

Es bieten sich im Wesentlichen nur zwei fluiddynamische Rührmechanismen an:

- *überkritische Drallströmungen* mit interner Rückführung bzw. Rückvermischung heißer Gase [18, 40] bei Anlagen kleinerer Leistung oder aber
- einzelne oder mehrfach über- bzw. nebeneinander angeordnete Freistrahlen, die als Injektoren das umgebende Medium ansaugen und umwälzen [54, 60].

Die Einrichtung einer solchen intensiven Durchmischungszone – Rührkesselelement – am Eintritt der Nachverbrennung führt, wie in Bild 4 schematisch dargestellt, zu der vorangestellt erwähnten strömungstechnischen Trennung. Unterstützend wirkt, wenn die Durchmischungszone in einem eingezogenen Querschnitt angeordnet wird. Nach der Mischungszone schließt sich dann eine Beruhigungsstrecke (Rohrreaktor als geeignete Reaktorcharakteristik für den Abbau) an. Bei der Auslegung der Nachverbrennungszone ist darauf zu achten, dass

Tabelle 3: Charakterisierung von Brennkammersystemen – Nachverbrennungseinheit (zweite Einheit) bei Rostsystemen

Haupteinflussgrößen		Bemerkungen
Einsatzstoffe		gasförmig, flüssig, staubförmig
Sauerstoffangebot	Niveau	unter- bis überstöchiometrisch; in weiten Bereichen variabel; falls am Reaktoraustritt Überstöchiometrie: Bezeichnung <i>Brennkammer</i> ; falls am Ende Unterstöchiometrie: Bezeichnung <i>Vergasungsreaktor</i>
	Steuerung längs des Reaktionsweges	durch Stufung von Oxidationsmittel und Brennstoff längs des Verbrennungsweges sehr gut möglich (Einbringen über Rührkessellemente)
Temperatur	Niveau	Verbrennungstemperaturen im Bereich von 1.000 °C bis 2.000 °C ggf. auch höher; Bereich sehr variabel
	Steuerung längs des Reaktionsweges	neben der Stufung von Oxidationsmittel und Brennstoff über dem Reaktionsweg, insbesondere Eingriffe durch Abgasrückführung, Wassereindüsung usw. möglich; indirekte Wärmeein- bzw. -auskopplung durch entsprechende Heiz- bzw. Kühlsysteme
Druck		bei Umgebungsdruck, in der Regel aus anlagentechnischen Gründen wenige Pa Unterdruck; Hochdruckvergasung und Hochdruckverbrennung seltener
Reaktorverhalten	Staub/Gas	strömungstechnisch können sowohl Rührkessel- als auch Kolben-Strömer-Charakteristiken für Staub und Gas angenähert werden
Verweilzeit (Gas)	Niveau	im Bereich von Sekunden (bei höherem Druck entsprechend länger); durch Lastzustand einstellbar und bei Projektierung durch geometrische Abmessungen beeinflussbar
	Steuerung längs des Reaktionsweges	nur schwer möglich; Verweilzeitverteilung über Reaktorverhalten steuerbar
Zusatzstoffe		Additive insbesondere über Rührkessellemente einbringen, sowohl zur Schadstoffeinbindung (z.B. Schwefeldioxid, Stickstoffoxide) als auch zur Beeinflussung der Schlackeeigenschaften und Schmelztemperaturen der Stäube (falls flüssiger Abzug gewünscht)
Einsatzbereiche (Beispiele)		Verbrennung von flüssigen Rückständen; Nachverbrennung von Gasen und Stäuben in der letzten thermischen Einheit des Behandlungsverfahrens; Hochtemperatur-Vergasung von Rückständen zur Erzeugung von Prozessgas

Quelle: Scholz, R.; Beckmann, M.; Schulenburg, F.: Abfallbehandlung in thermischen Verfahren. Stuttgart, Leipzig, Wiesbaden: B.G. Teubner, 2001

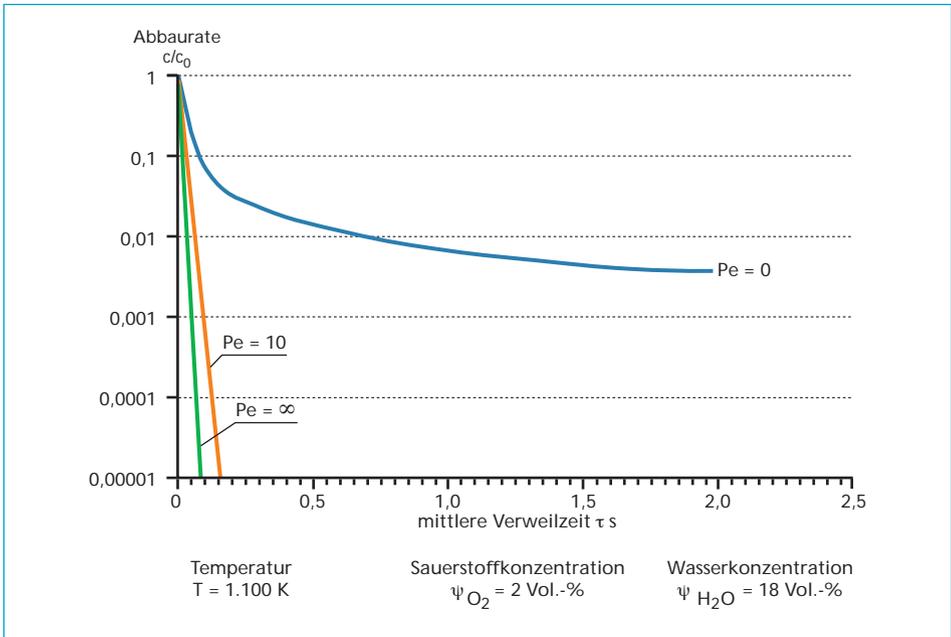


Bild 5: Abhängigkeit des CO-Abbaus von der mittleren Verweilzeit und dem Mischungsverhalten des Reaktors

Quellen:

Scholz, R.; Beckmann, M.; Schulenburg, F.: Abfallbehandlung in thermischen Verfahren. Stuttgart, Leipzig, Wiesbaden: B.G. Teubner, 2001

Dryer, F. L.; Glasman, I.: 14th International Symposium On Combustion. Combustion Institute Pittsburgh, 1973

*Kamineffekte* vermieden werden, d.h., dass auch bei früher und kurzer Feuerlage auf dem Rost gleichmäßige Bedingungen – Temperatur, Konzentration, keine Strähnen – in der Nachverbrennungseinheit erreicht werden.

Im Hinblick auf einen möglichst hohen Ausbrand – CO, Kohlenwasserstoffe, Flugasche – muss eine hohe Intensität in der Durchmischungszone angestrebt werden. Bei Anlagen mit größerer Leistung werden in der Regel Injektorstrahlen vorgesehen. Dabei muss durch die richtige Auslegung der Düsengeometrie, Düsenanzahl und -anordnung sowie Eintrittsimpuls eine gute Überdeckung des Querschnittes, eine hinreichende Eindringtiefe der Injektorstrahlen und ein ausreichendes Ansaugen des zu vermischenden Grundstromes – Abgasstrom vom Rost – erreicht werden.

Maßnahmen zur Steuerung des Sauerstoffangebotes entlang des Reaktionsweges sind beispielsweise:

- Luftstufung,
- Brennstoffstufung,

- Abgasrückführung,
- Sauerstoffzufuhr
- usw.

Mit den Gesichtspunkten zur Steuerung der o.g. Haupteinflussgrößen stehen ausreichend Möglichkeiten zur Verfügung, um die Prozessführung im Hinblick auf die Schadstoffbildungs- und Abbaumechanismen zu optimieren. An dieser Stelle sei auf die umfangreichen Erfahrungen und Kenntnisse, insbesondere zur Reduzierung von Stickstoffoxiden und zur Verbesserung des Ausbrandes bei gasförmigen, flüssigen und staubförmigen Brennstoffen verwiesen. Diese Erfahrungen sind bei der Nachverbrennung entsprechend zu übertragen.

### *Kap. 3.*

## **Beispiele und Ergebnisse**

Mit den voranstehenden Erläuterungen zu den Haupteinflussgrößen und den prinzipiellen Steuerungsmöglichkeiten durch die Prozessführung lassen sich nun einerseits bestehende Anlagenkonzepte diskutieren und gleichzeitig auch noch vorhandene Entwicklungspotentiale deutlich machen. Die Diskussion von Einzelaspekten der Prozessführung ohne Bezug auf die Haupteinflussgrößen (Bild 2) beispielsweise in der Form der Fragestellung, ob Gegen- oder Gleichstromführung, Vorschub- oder Rückschubrost besser für die Abfallverbrennung geeignet sind, erscheint wegen der Komplexität der ablaufenden Prozesse nicht zweckmäßig. Es ist immer im Zusammenhang mit der hier beschriebenen Systematik zu diskutieren. Es sei vorweg erwähnt, dass z.B. bei Anlagenkonzepten mit einem Vorschubrost und solchen mit einem Rückschubrost gleichermaßen gute Ergebnisse in der Praxis erreicht werden können. Die folgende Diskussion der Auswirkungen bestimmter Prozessführungen ist im Hinblick auf das Verständnis der ablaufenden Prozesse der Abfallverbrennung wichtig, aus der Beurteilung der Einzelaspekte allein kann aber noch keine Wertung für ein Gesamtkonzept einer Anlage abgeleitet werden.

Zunächst wird in einem ersten Abschnitt wiederum auf den Feststoffumsatz auf dem Rost und danach auf den Nachverbrennungsprozess eingegangen.

### *Kap. 3.1.*

## **Feststoffumsatz auf dem Rost**

Die wesentlichen Zielstellungen des Feststoffumsatzes auf dem Rost sind im Hinblick auf eine Weiterverwendung der Asche in einem hohen Ausbrand (niedriger Rest-Kohlenstoffgehalt) und möglichst geringen (verfügbaren) Konzentrationen an Schwermetallen und Salzen zu sehen.

Diese Zielstellungen werden neben der Zusammensetzung der Abfallstoffe vor allem durch die Haupteinflussgrößen Temperatur, Sauerstoffkonzentration und Verweilzeit sowie Verweilzeit- und Durchmischungsverhalten beeinflusst. Durch

die intensive Durchmischung des Bettes bei Rückschubrostsystemen wird insbesondere im Hinblick auf die Durchzündung des Bettes eine Rückführung von *Zündkernen* [43, 44] und eine Vergleichmäßigung der Temperaturverhältnisse im Bett erreicht. Aufgrund der frühen Durchzündung des Bettes erfolgt bei Rückschubrostsystemen die Zugabe der Primärluft mit einem Maximum in der Regel bereits in der zweiten Primärluftzone. Entsprechend wird bereits in diesem Bereich das Maximum der Temperatur im Bett erreicht. Rückschubroste können in den einzelnen Abschnitten hinsichtlich des Verweilzeitverhaltens als Rührkessel-Element angenähert werden [9, 11]. Bei Vorschubrostsystemen liegt in Bezug auf das Vermischungsverhalten eher eine Kolbenströmer-Charakteristik vor. Die Zuführung der Primärluft in der Trocknungs- und Zündphase muss sorgfältig abgestimmt erfolgen, um ein Abreißen der Zündfront zu vermeiden. Die Hauptluft wird in der Regel in der Rostmitte zugeführt. Unabhängig vom Rosttyp muss im Hinblick auf einen hohen Ausbrand die Primärluft in der Ausbrandzone sehr sorgfältig angepasst werden. Ein zu hoher Primärluftstrom in der Ausbrandphase kann ein *Kaltblasen* des Bettes und entsprechend hohe Kohlenstoffgehalte in der Asche zur Folge haben. In diesem Zusammenhang sei weiter auf den Einfluss des Inertstoffgehalts – Asche – des Brennstoffes auf den Ausbrand eingegangen. Dieser dient als *Wärmespeicher*, der in der Hauptverbrennungszone bei hohen Temperaturen Wärme entsprechend seiner Kapazität aufnimmt. In der Ausbrandzone wird aufgrund dieses Wärmespeichers die Gefahr des *Kaltblasens* vermindert. Dieser wichtige Aspekt des positiven Einflusses des Inertanteils ist in Verbindung mit der Forderung nach einer Abtrennung des Inertanteils z.B. durch mechanisch-biologische Verfahren mit dem Ziel, weniger *Ballast* durch eine Feuerung zu schleusen, zu bedenken.

Der Einfluss der Luftstufung und des Inertanteils auf den Ausbrand lässt sich deutlich aus Berechnungen mit Hilfe eines mathematischen Modells zum Feststoffumsatz zeigen. Auf das Modell kann in dem hier gesteckten Rahmen nicht näher eingegangen werden, es sei jedoch erwähnt, dass man mit Hilfe des Modells für unbekannte Brennstoffe den Feststoffumsatz auf Rostsystemen für stationäre und instationäre Vorgänge tragfähig für die Praxis beschreiben kann [3]. Das Diagramm in Bild 6 zeigt den Restkohlenstoffgehalt bezogen auf den Ausgangsgehalt in einem Bettelement über der Zeit für unterschiedliche Randbedingungen (siehe Legende in Bild 6). Der Einfluss des Inertanteils in der oben beschriebenen Weise als *Wärmespeicher* wird beim Vergleich der Kurven 1 und 2 in Bild 6 deutlich. Mit Inertanteil wird ein wesentlich besserer Kohlenstoffumsatz erreicht im Vergleich zu dem Fall ohne Inertanteil. Die Kurve 4 zeigt für einen Brennstoff ohne Inertanteil den Einfluss einer Luftstufung, durch die ein ebenso niedriger Restkohlenstoffgehalt wie in dem Fall 2 (ohne Luftstufung) erreicht wird.

Für eine gleichmäßige Primärluftverteilung muss unabhängig vom Rosttyp darauf geachtet werden, dass der Druckverlust der Rostelemente sehr viel größer ist als der in dem Müllbett. Liegt der Hauptströmungswiderstand für das Reaktionsgas (Unterwind) in den Rostelementen, so erfolgt unabhängig von der Belegung der Rostelemente mit Müll (Brennstoffbett) zunächst eine gleichmäßige Verteilung über der Rostfläche.

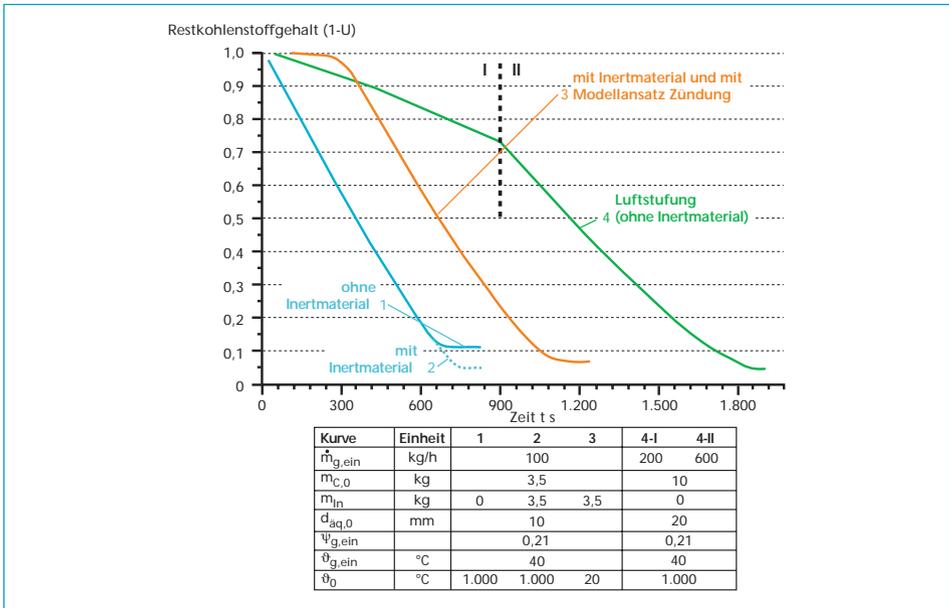


Bild 6: Mathematische Modellierung des Feststoffumsatzes in Rostsystemen – Kohlenstoffumsatz in Abhängigkeit der Reaktionszeit für verschiedene Modellparameter

Quelle: Beckmann, M.: Mathematische Modellierung und Versuche zur Prozessführung bei der Verbrennung und Vergasung in Rostsystemen zur thermischen Rückstandsbehandlung. CUTEC-Schriftenreihe, 1995

Entsprechend dem unterschiedlichen Verweilzeitverhalten des Bettes auf Vor- und Rückschubrostsystemen bestehen auch für die Verweilzeitsteuerung entlang des Rostweges verschiedene Anforderungen. Bei Vorschubrostsystemen ist i.d.R. eine Steuerung der Rostgeschwindigkeiten in mehreren Rostzonen unabhängig voneinander möglich, bei Rückschubrostsystemen hingegen wird eine solche differenzierte Verweilzeitsteuerung nicht vorgesehen. Zur zusätzlichen Steuerung der Verweilzeit in der Ausbrandzone findet man bei Rückschubrosten dann jedoch häufiger als bei Vorschubrostsystemen eine *Austragswalze* [44].

Der Verbrennungsablauf wird über die Verteilung der Primärluft hinaus weiter durch die Temperatur und die Sauerstoffkonzentration der Primärluft – des Reaktionsgases – beeinflusst. In der Regel wird die Primärluft auf Temperaturen von  $\vartheta = 140 \text{ °C}$  vorgewärmt, was insbesondere für die Trocknungs- und Ausbrandphase von Vorteil ist. Aber auch in der Hauptverbrennungszone werden durch die Luftvorwärmung entsprechend höhere Betttemperaturen erreicht. Die Anhebung der Sauerstoffkonzentration des Reaktionsgases wird z.B. im SYNCOM Verfahren [27, 35] bis 35 Vol.-% durchgeführt. Damit wird ein Ausbrand für die Deponieklasse I [20] sichergestellt und eine Verkleinerung des Abgasstromes (s.u.) erreicht. Darüber hinaus kann der durch das Bett strömende Gasstrom verringert werden, was eine Reduzierung der Flugstaubmengen und des Durchmessers der Flugstaubpartikeln zur Folge hat.

Die Temperatur entlang des Rostweges wird weiter durch die Strömungsführung der Gase über dem Bett beeinflusst. Beim Gleichstromprinzip wird eine Verbrennung der vom Rostanfang kommenden Gase angestrebt. Die heißen Gase

werden dann über die Ausbrandzone geführt. Dagegen sollen beim Gegenstromprinzip die heißen Gase vom Rostende, der Trocknungs- und Entgasungszone am Rostanfang Wärme zuführen. Auf die Strömungsführung wird weiter unten im Zusammenhang mit der Nachverbrennung noch eingegangen. An dieser Stelle muss zunächst im Zusammenhang mit dem Temperaturniveau darauf hingewiesen werden, dass dieses in der Trocknungs- sowie auch in der Ausbrandphase auch durch die Gestaltung der Feuerraumgeometrie (Sekundärstrahlungsfläche) beeinflusst wird. Diesen *Sekundärheizflächen* kommt somit in der Ausbrandzone einer Gegenstromfeuerung eine wesentlich größere Bedeutung zu, als bei einer Gleichstromfeuerung. Bei Gleichstromfeuerungen muss umgekehrt aber – insbesondere bei heizwertreichen Abfällen – auf die Feuerraumgestaltung im Hinblick auf die Vermeidung von Verschlackungen geachtet werden.

Der Einsatz von wassergekühlten Rostelementen führt wie bereits erwähnt zu dem Vorteil einer von der Kühlung der Rostelemente weniger abhängigen Primärluftverteilung, was insbesondere im Hinblick auf die Verbesserung der Aschequalität – Erhöhung der Temperatur und Verringerung der Sauerstoffkonzentration – entsprechend der Untersuchungen im Pilotmaßstab [16, 29, 71] zu weiteren Verbesserungen führen kann. Darüber hinaus wird durch die Absenkung der Primärluft die Flugstaubkonzentration (s.o.) entsprechend reduziert. Weiter hat eine Wasserkühlung den Vorteil [39], dass der Verschleiß durch thermische Einflüsse geringer wird und auch bei hohen Heizwerten keine thermische Überlastung einzutreten droht und der Rostdurchfall verringert wird (geringere Dehnungen gestatten engere Schlitze zwischen den Rostelementen).

Die Abstimmung der Primärluftzuführung, Rostgeschwindigkeit, Abfallbeschickung usw. untereinander im Hinblick auf einen gleichmäßigen Verbrennungsablauf und möglichst hohen Ausbrand wird über die Feuerungsleistungsregelung vorgenommen [22, 25, 68]. Die Feuerungsleistungsregelung kann durch zusätzliche Detektoren und Messsignale wie IR-Kamera [43], Pyrodetektoren [53], *Heizwertensoren* [69], Online-Bilanzierung [7] (siehe Kapitel 3.5.), Wärmestromdichte-Sensoren [8] (siehe Kapitel 3.4.) unterstützt werden.

Während die Abstimmung der Prozessführung auf einen hohen Ausbrand in der Praxis als Stand der Technik bezeichnet werden kann, ist die Optimierung der Prozessparameter im Hinblick auf eine gezielte Freisetzung oder Einbindung von Schwermetallen aus oder in die Asche – Primärmaßnahmen zur Verbesserung der Aschequalität – heute noch Gegenstand der Forschung. Bei der Restmüllverbrennung verbleiben etwa 300 kg/(t Abfall) Rostasche, von der sich noch etwa 40 kg/(t Abfall) Eisenschrott abtrennen lassen. Zurzeit fallen in Deutschland etwa 3 Mio. t/a Rostaschen an, wovon etwa 50 bis 60 % im Wesentlichen als sekundäres Baumaterial im Straßen- und Wegebau weiter verwendet und der übrige Anteil auf ober- und untertägigen Deponien abgelagert wird [70]. Das Ziel weiterer Entwicklungen muss es sein, bereits durch Primärmaßnahmen die Qualität der Rostaschen so zu verbessern, dass auch eine höherwertige Verwertung möglich ist. Schwermetalle, Chlor, Schwefel und Fluor usw. werden je nach Verbrennungsbedingungen im Brennbett freigesetzt und in die Asche eingebunden. Man unterscheidet hochflüchtige Stoffe, z.B. Quecksilber, Chlor, Cadmium, Arsen, mittelflüchtige Stoffe, z.B. Blei, Zink, Schwefel und schwerflüchtige Stoffe, z.B. Kupfer.

Untersuchungen mit unterschiedlichen Abfallmenüs an einer Pilotanlage zeigen (Bild 7 und Bild 8; HM = Hausmüll, Referenzbrennstoff; ASR = Autoschredder-Leichtfraktion; E+E = Kunststoffabfall aus dem Elektro- und Elektronikbereich), dass die Verflüchtigung der Schwermetalle (Beispiel Kupfer, Zink und Blei) mit den Gutbetttemperaturen und den Chlorgehalten des Abfalls korreliert [71].

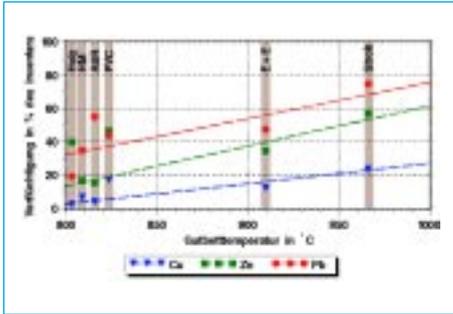


Bild 7: Abhängigkeit der Verflüchtigung von Kupfer, Zink und Blei von der Gutbetttemperatur

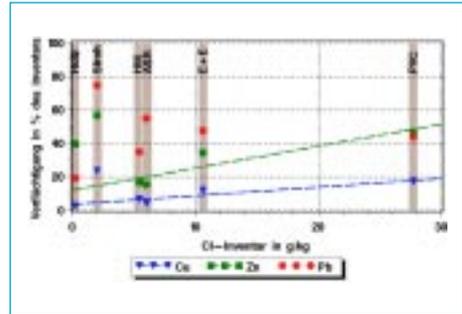


Bild 8: Abhängigkeit der Verflüchtigung von Kupfer, Zink und Blei von dem Chlor-Inventar

Quelle: Vehlow, J.; Hunsinger, H.: Einfluss verschiedener Abfallmenüs auf die Metallfreisetzung bei der Verbrennung auf dem Rost. BAT- und preisorientierte Dioxin/Gesamtemissionsminimierungstechniken 2000. VDI Bildungswerk Seminar 43-59-12 am 14.09.-15.09.2000 in München

Quelle: Vehlow, J.; Hunsinger, H.: Einfluss verschiedener Abfallmenüs auf die Metallfreisetzung bei der Verbrennung auf dem Rost. BAT- und preisorientierte Dioxin/Gesamtemissionsminimierungstechniken 2000. VDI Bildungswerk Seminar 43-59-12 am 14.09.-15.09.2000 in München

Ein weiterer Parameter für die Verflüchtigung ist die Sauerstoffkonzentration. Ergebnisse aus Versuchen mit radioaktiven Tracern ( $^{69m}\text{Zn}$ ) an einer Pilotanlage [16] zeigen deutlich die Unterschiede im Verhalten der Freisetzung von Zink bei reduzierender und oxidierender Fahrweise. Bild 9 zeigt die Verflüchtigung von Zink entlang des Rostweges (Pilotanlage, drei Rostzonen für Luftstufung, Vorschubrost) für drei verschiedene Versuchseinstellungen. Bei überstöchiometrischer Fahrweise und niedrigen Wassergehalten des Brennstoffes ( $w_2 < w_1$ ) findet die Freisetzung von Zink bereits in der ersten Rostzone statt und erreicht nahezu 100 %. Die Erhöhung des Wassergehaltes bewirkt über die entsprechende Herabsetzung des Heizwertes des Brennstoffes und damit auch der Temperaturen im Brennbett eine Verschiebung der Freisetzung in die zweite Rostzone und insgesamt eine verminderte Freisetzung (etwa 50 %) von Zink. Werden jedoch bei dem höheren Wassergehalt des Brennstoffes reduzierende Bedingungen eingestellt, so ergibt sich ebenso wie im ersten Fall eine nahezu vollständige Freisetzung von Zink.

Auf die Möglichkeit, dass durch die reduzierende Wirkung des heißen Kohlenstoffs im Brennbett bei hohen Temperaturen eine thermische Mobilisierung von Schwermetallen gefördert wird, wird u.a. auch in [71] hingewiesen.

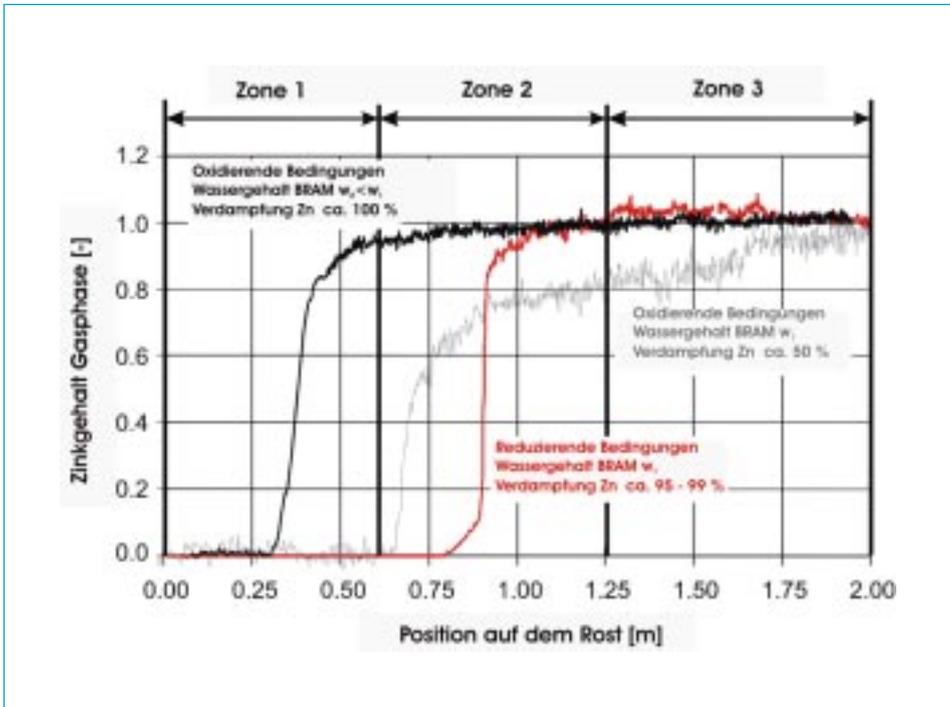


Bild 9: Relative Zink-Freisetzung entlang des Rostweges

Quelle: Biollaz, S.; Ludwig, C.; Beckmann, M.; Davidovic, M.; Jentsch, T.: Volatility of Zn and Cu in Waste Incineration: Radio-Tracer Experiments on a Pilot Incinerator. IT3 Conference, May 2000, USA

Bei sehr stark reduzierenden Bedingungen ( $\lambda_{\text{Rost}} < 0,5$ ) verringert sich jedoch die Tendenz der Verflüchtigung mit abnehmender Temperatur im Brennbett (siehe z.B. [30]).

Weiter sei im Zusammenhang mit der Aschequalität erwähnt, dass bereits durch einen *angesinterten* Zustand der Asche eine deutliche Verminderung der Auslaugbarkeit von Schadstoffen gegenüber dem *trockenen Zustand* erreicht werden kann. Durch den Übergang vom *angesinterten* Zustand zur geschmolzenen Schlacke werden in Bezug auf die Auslaugfestigkeit dann nur noch verhältnismäßig geringe weitere Verbesserungen erreicht [71].

Bei dem *Martin-Syncom-Plus-Verfahren* werden durch die Sauerstoffanreicherung der Primärluft Brennbetttemperaturen von über 1.150 °C erreicht, was zu einer Sinterung der Reststoffe vom Rost von 50 % bis 80 % führt. Insgesamt entsteht durch die kombinierte nass-mechanische Aufbereitung der Reststoffe vom Rost und die Rückführung unvollständig gesintertes Reststofffraktionen in die Feuerung ein vollständig gesintertes Granulat (ohne Verglasung), das Glühverluste kleiner 0,1 Ma.-% und eine hohe Auslaugbeständigkeit aufweist [27].

## Kap. 3.2

## Nachverbrennung

Als wesentliche Zielstellung des Nachverbrennungsprozesses ist zunächst insbesondere der Abbau von CO und organischer Spurenstoffe sowie der Ausbrand des Flugstaubes zu nennen (insgesamt hoher Ausbrand). Gegenwärtig wird auch die Minderung von NO durch Primärmaßnahmen verstärkt auch für die unmittelbare praktische Umsetzung untersucht. Im Zusammenhang mit Feuerungssystemen für gasförmige, flüssige und staubförmige Brennstoffe gehört die Prozessführung zur Minderung von NO bei gleichzeitig hohem Ausbrand bereits seit langer Zeit zum Stand der Technik [58].

Einflussgrößen für diese Zielstellung sind wiederum die Temperatur, Sauerstoffkonzentration, Verweilzeit- und Verweilzeitverhalten. Diese Einflussgrößen werden von einer Reihe Einzelaspekten der Prozessführung und nicht nur durch die Strömungsform, die häufig im Zusammenhang mit einer ersten Nachverbrennung der Gase (z.B. Gleichstrom) oder mit der Minderung von NO im Feuerraum diskutiert wird, bestimmt. Bei entsprechender Trennung der Nachverbrennungszone (2. Einheit) von der Rostzone (1. Einheit) können die im Gleich- oder Gegenstrom geführten Gase unabhängig von ihrem Zustand am Eintritt in die Nachverbrennung in dieser optimiert nachverbrannt werden (Hinweis auf Bild 22). Ausführlicher wird auf die Trennung der Nachverbrennung von dem Rost, wie sie in Bild 10 dargestellt ist, z.B. in [58] eingegangen. Die Trennung muss nicht geometrisch sein, sie kann auch strömungstechnisch erfolgen.

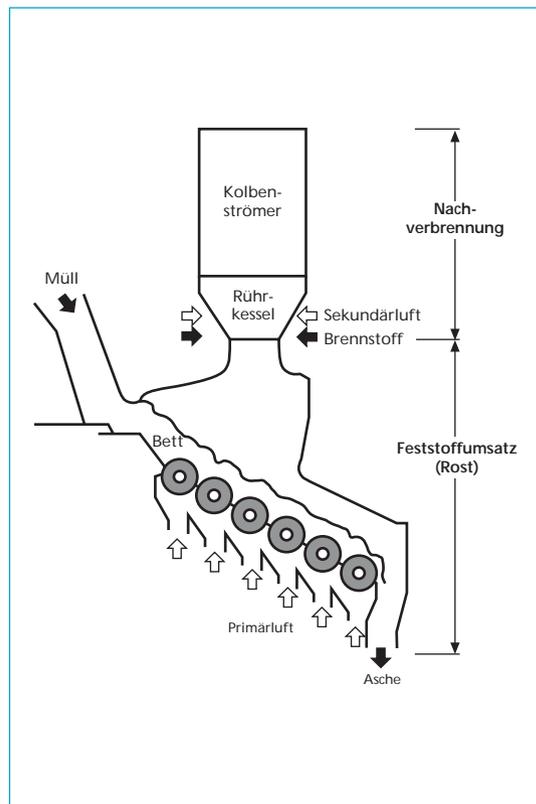


Bild 10: Schematische Darstellung der Trennung von Rost und Nachverbrennungszone

Quelle: Scholz, R.; Beckmann, M.; Schulenburg, F.: Entwicklungsmöglichkeiten der Prozessführung bei Rostsystemen zur thermischen Abfallbehandlung. Proceedings: *Die thermische Abfallverwertung der Zukunft*, FDBR, 23. 02. 1996, Rostock



*Eindringtiefe* der Injektorstrahlen erreicht werden. In der Regel führt dies zu Düsenfeldern in mehreren Ebenen (Bild 12). Nach Möglichkeit sollten zwecks guter Überdeckung an allen Kanalseiten Düsenfelder angeordnet sein. Unterstützend wirkt, wenn die Eindüsung an einem *eingezogenen* Strömungsquerschnitt der Nachverbrennungszone angeordnet ist (Bild 11). Diese strömungstechnische Trennung führt gleichzeitig zur Bildung des in Bild 4 dargestellten Rührkessel-elements. Oberhalb der Düsenfelder (Bild 10, Bild 11) ist dann die Beruhigungsstrecke angeordnet (*Kolbenströmerzone*).

Die mittlere Geschwindigkeit  $w_x$  eines über die Sekundärluftdüsen mit der Geschwindigkeit  $w_0$  in den Feuerraum eindringenden Injektorstrahles nimmt annähernd hyperbelförmig mit der Eindringtiefe des Strahles  $x$  ab. Im Feuerraum wird der Strahl je nach Verhältnis der Strömungsgeschwindigkeit der aufsteigenden Gase  $w_y$  zur Austrittsgeschwindigkeit des Strahles an der Düse  $w_0$  proportional dem Quadrat der Eindringtiefe  $x^2$  in Richtung der aufsteigenden Gase  $y$  abgelenkt. Durch die Verminderung der Geschwindigkeit  $w_x$  und durch die

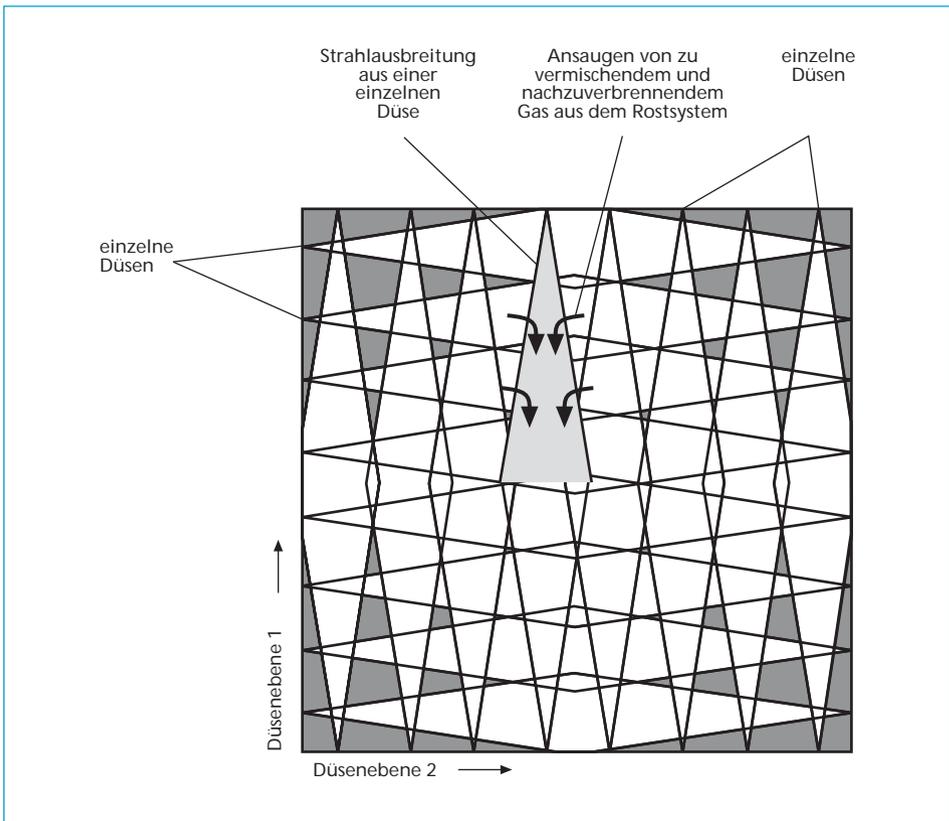


Bild 12: Möglichkeit der Anordnung von Düsenfeldern in zwei Ebenen zur Erzeugung eines Rührkessel-Elements

Quelle: Scholz, R.; Beckmann, M.: Möglichkeiten der Verbrennungsführung bei Restmüll in Rostfeuerungen. VDI-Berichte Nr. 895, VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf, 1991

Strahlableitung  $\Delta y$  verschlechtert sich die Durchmischung entsprechend. Insbesondere für ältere Anlagen mit großen Querschnitten im Bereich der Sekundärlufteindüsung und dementsprechend großen Eindringtiefen für die Injektorstrahlen hat sich zur Verbesserung der Mischungsbedingungen der Einbau eines so genannten *Prisma* in den Feuerraum (Bild 13) bewährt. Bei diesem System, welches erstmals in der Abfallverbrennungsanlage Bonn installiert wurde, erfolgt eine Aufteilung des Gasstromes vom Rost in zwei Teile *A* und *B* in Bild 13 durch ein *Prisma*. Das *Prisma* ist wassergekühlt – Membranwand – und feuerfest zugestellt. Die erforderliche Wurfweite für die Sekundärluftstrahlen verringert sich durch den Einbau eines *Prisma*.

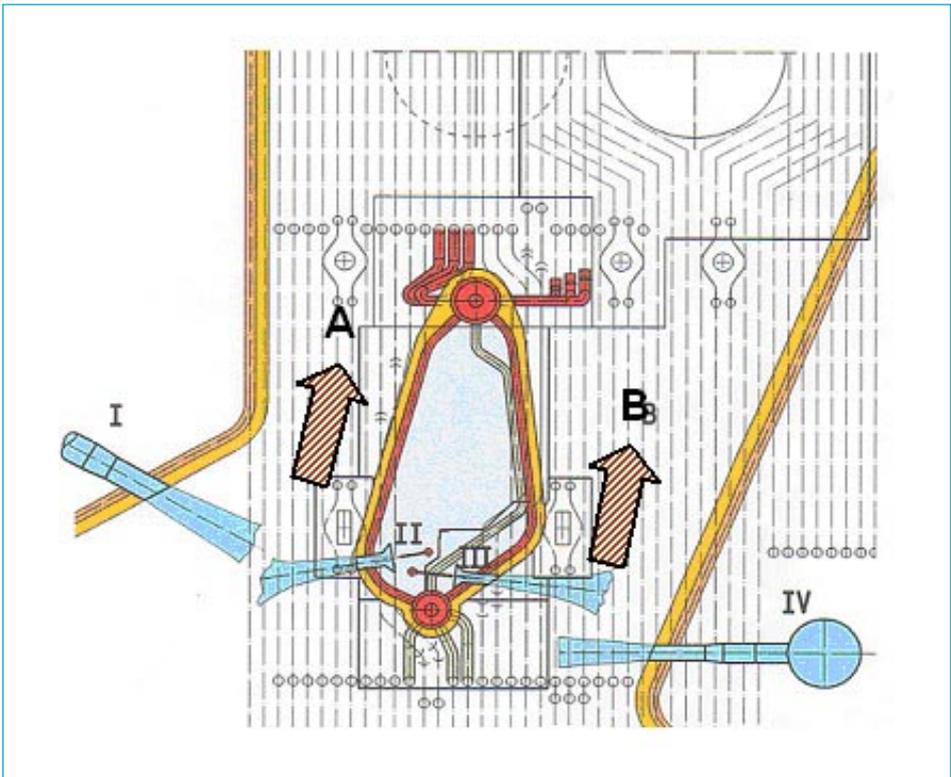


Bild 13: Prisma

Quelle: Périlleux, M.; Creten, G.; Kümmel, J.: Improving combustion and boiler performance of new and existing EFW plants with the seghers-ibb-prism. 6th EUROPEAN CONFERENCE on INDUSTRIAL FURNACES and BOILERS INFUB Estoril – Lisbon – Portugal, 02.-05. April 2002

Der Ersatz von Sekundärluft durch rückgeführtes Abgas verringert einerseits den Abgasmassenstrom (am Kamin) und vermeidet andererseits bei richtiger Auslegung der Injektorstrahlen durch intensive Vermischung gleichzeitig Temperaturspitzen in der Nachverbrennung, was zu einer verminderten thermischen NO-Bildung führt. Beispielhaft ist der Einfluss der Abgasrückführung in den Nachverbrennungsprozess einer Abfallverbrennungsanlage in Bild 14 dargestellt [57].

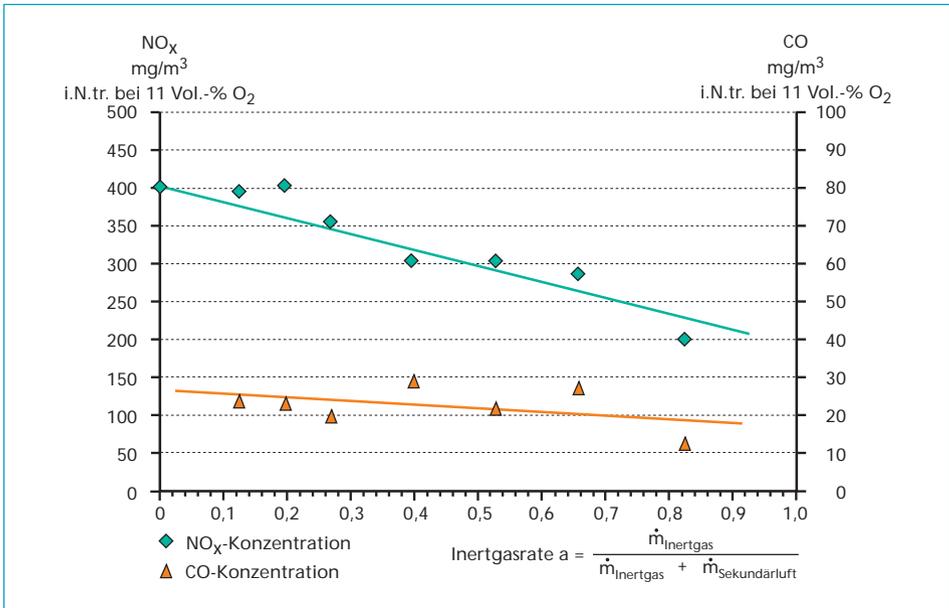


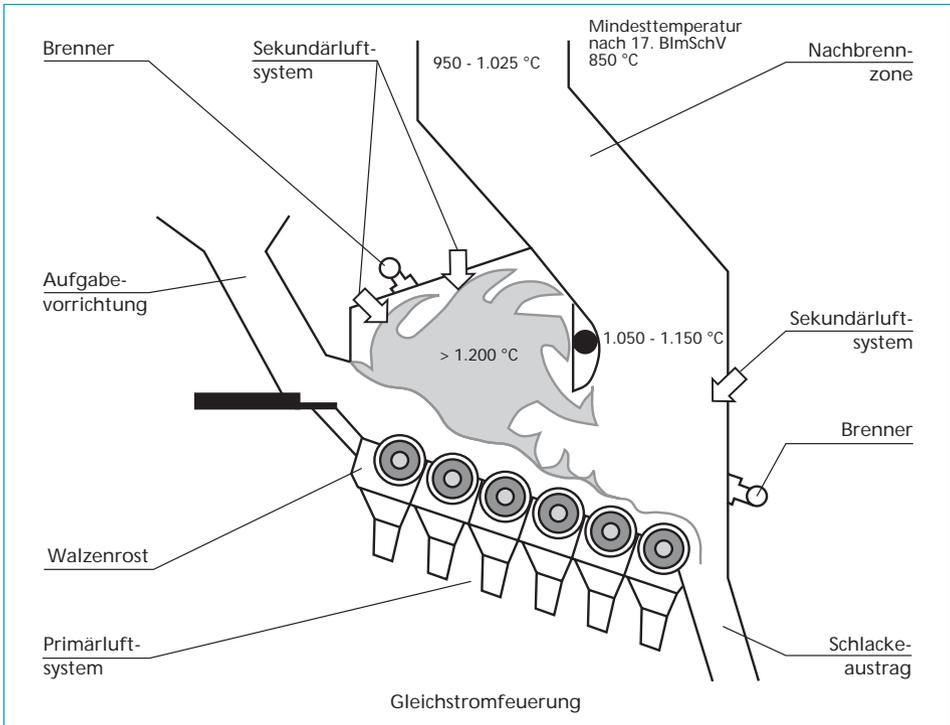
Bild 14: NO- und CO-Rohgaskonzentration in Abhängigkeit von der Inertgasrate

Quelle: Scholz, R.; Beckmann, M.; Horn, J.; Busch, M.: Thermische Behandlung von stückigen Rückständen – Möglichkeiten der Prozeßführung im Hinblick auf Entsorgung oder Wertstoffrückgewinnung. In: Brennstoff-Wärme-Kraft (BWK) /TÜ/ Umwelt-Special 44 (1992), Nr. 10

Dabei wurde die Abgasrückführung durch die Zufuhr von Stickstoff (Inertgas) simuliert. Die Durchmischung der vom Rost kommenden Abgase erfolgt bei einem hohen Inertgasverhältnis mit Injektorstrahlen, die kaum Sauerstoff enthalten. Damit können hohe Temperaturspitzen vermieden werden. Insgesamt erhält man so eine Absenkung der NO<sub>x</sub>-Konzentration. Die über dem Inertgasverhältnis gleichbleibend niedrige CO-Konzentration zeigt, dass bei einer entsprechend ausgelegten Durchmischungsleistung der CO-Umsatz im vorliegenden Fall nicht unmittelbar von dem Sauerstoffangebot abhängt.

Eine andere als im Bild 10 dargestellte Trennung zwischen Rost- und Nachverbrennung zeigt Bild 15. Hier ist das Rührkessellement für die Nachverbrennung der vom Rost stammenden Gase bereits über der ersten Hälfte eines Walzenrostes angeordnet, die Nachverbrennungszone beinhaltet *nur noch* die *beruhigte Ausbrandstrecke* (Kolbenströmerzone in Bild 10).

Die Europäische Verbrennungsrichtlinie, die sich an der 17. BImSchV anlehnt, gibt prozessinterne Verfahrensbedingungen als Mindestwerte nur für die Sauerstoffkonzentration, Temperatur und Verweilzeit (6 Vol.-% O<sub>2</sub>, 850 °C, 2 s) mit dem Ziel vor, einen ausreichenden Ausbrand zu gewährleisten. Diese Vorgabe zwingt die Betreiber, z.B. durch Absenken der Primärluftzahl, das Temperaturniveau im Feuerraum entsprechend anzuheben. Diese Verschärfung der Verbrennungsbedingungen führte in Verbindung mit den in den letzten Jahren angestiegenen Heizwerten zu höheren Wärmebelastungen und einem Anstieg der


 Bild 15: Walzenrost mit *Feuerraumwalze*

Quelle: Christmann, A.; Quitteck, G.: Die DBA-Gleichstromfeuerung mit Walzenrost. VDI-Berichte 1192, VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf, 1995

Korrosionen und damit insgesamt zu geringeren Verfügbarkeiten der Anlagen [49]. Im Zusammenhang mit den prinzipiellen Anforderungen an die Nachverbrennungsstufe (s.o.) sowie mit den voranstehend diskutierten Beispielen wurde hingegen bereits deutlich, dass für einen hohen Abbaugrad von CO und organischen Spurenstoffen insbesondere die Haupteinflussgrößen Sauerstoffkonzentration, Temperatur, Verweilzeit und Reaktorverhalten (Durchmischung) nicht losgelöst voneinander diskutiert werden können. Dieser Zusammenhang wurde deutlich an einer Praxisanlage (MHKW Mannheim) im Rahmen eines Forschungsprojektes bestätigt [45]. An dem Müllkessel 2 der HMVA Mannheim wurden fünf Versuchseinstellungen durchgeführt, bei denen die Parameter Verbrennungsluft und Müllmenge variiert wurden, um die Sauerstoffkonzentration, Temperatur und Verweilzeit zu beeinflussen. Die Versuchseinstellungen wurden durch ein umfangreiches Mess-, Beprobungs- und Analysenprogramm bezüglich des Abgasstromes – Gas und Staub – und der Rostasche begleitet. Der bei den Versuchen bestimmte Verweilzeitbereich für das Abgas oberhalb einer Temperatur von 850 °C lag zwischen  $\tau_{850} = 0,7$  s bis 2,27 s. Ein wesentliches Ergebnis der Untersuchungen ist, dass zwischen der Schadstoffkonzentration im Rohgas und der Verweilzeit im Nachverbrennungsraum kein unmittelbarer Zusammenhang

besteht. In dem hier gesteckten Rahmen sei im Zusammenhang mit den in Bild 16 dargestellten Ergebnissen besonders auf den Einfluss der Vermischung – Reaktorverhalten – hingewiesen.<sup>2</sup> Die Versuchseinstellungen V5 (Volllast) und V2 (Teillast) wiesen nahezu identische Bedingungen hinsichtlich Heizwert, Feuerlage, Feuerraumtemperatur und Abgaszusammensetzung auf, unterscheiden sich jedoch wegen der unterschiedlichen Lastverhältnisse in Bezug auf die Abgasmassenströme und damit in den Verweilzeiten im Nachverbrennungsprozess. Bei einer kürzeren Verweilzeit im Versuch V5, jedoch mit besserer Vermischung, werden im Vergleich zu V2 nahezu die gleichen CO-,  $C_{org}$ - und PCDD/F-Rohgaskonzentrationen erreicht. Die Ergebnisse an der Praxisanlage bestätigen in vollem Umfang bereits zuvor an Pilotanlagen durchgeführte Untersuchungen [6, 13, 46].

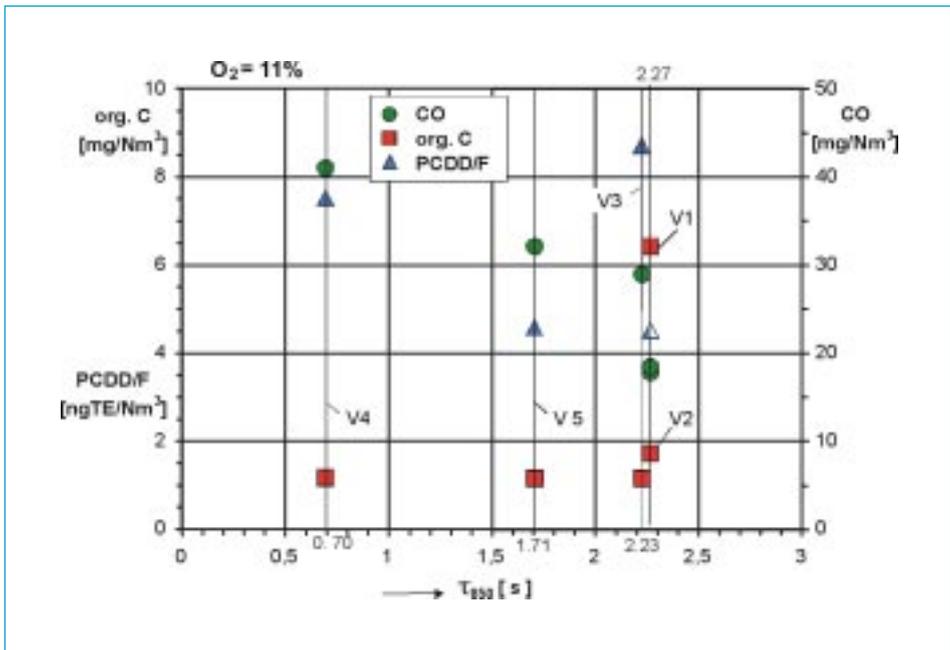


Bild 16: PIC-Konzentrationen (CO,  $C_{org}$ , PCDD/F) im Abgas in Abhängigkeit von der Verweilzeit des Abgases bei Temperaturen oberhalb 850 °C

Quelle: Merz, A.; Seifert, H.: Verweilzeit von Verbrennungsgasen. Abschlussbericht zum Forschungsprojekt VGB-Nr. 194, November 2000

Zur primären NO-Reduzierung bei der klassischen Restmüllverbrennung liegen bereits eine Reihe von Erkenntnissen vor [4, 32, 51, 67]. Die daraus abgeleiteten Minderungsmaßnahmen betreffen sowohl die Fahrweise des Rostes (1. Einheit, Feststoffumsatz) als auch die Nachverbrennung (2. Einheit). Bereits am Rostanfang treten flüchtige Brennstoffstickstoffverbindungen ( $NH_3$ ,  $N_{org}$ ) aus dem Brennstoffbett aus, die bei entsprechendem Sauerstoffangebot zu NO umgesetzt

<sup>2</sup> Zu weiterführenden Gesichtspunkten sei auf den Gesamtbericht [45] verwiesen.

werden können. Mit zunehmender Freisetzung flüchtiger Bestandteile und der Bildung insbesondere von  $\text{CH}_4$  erfolgt die Umsetzung von  $\text{NH}_i$ -Radikalen zu  $\text{HCN}$ . Diese Reaktionsverläufe sind u.a. aus Chargenrostversuchen bekannt [67] und lassen in Bezug auf die  $\text{NO}$ -Minderung bereits in der Rosteinheit die Annahme zu, dass gebildetes  $\text{NO}$  mit  $\text{NH}_i$  zu  $\text{N}_2$  abgebaut werden kann. Bei diesem so genannten internen Exxon-Prozess im Feuerraum des Rostes ist jedoch im Vergleich zu dem SNCR-Verfahren ein höheres Temperaturniveau anzustreben. Um eine Umsetzung von  $\text{NH}_i$ -Radikalen mit  $\text{CH}_4$  zu  $\text{HCN}$  zu unterdrücken, sind Temperaturen oberhalb von  $1.000\text{ }^\circ\text{C}$ , die zu einem Zerfall von  $\text{CH}_4$  führen, erforderlich. Aus diesen Überlegungen lässt sich ableiten, dass im Hinblick auf die Freisetzung der Flüchtigen und die Zersetzung von  $\text{CH}_4$  am Rostanfang zunächst die Temperatur in der ersten Rostzone  $\vartheta_{G,RI}$  eine wichtige Einflussgröße ist. Weiter nimmt die Sauerstoffzufuhr bzw. Luftzahl  $\lambda_{RI}$  in der ersten Rostzone auf die Einstellung eines günstigen  $\text{NO}$  zu  $\text{NH}_i$ -Verhältnisses entscheidend Einfluss.

Die beschriebene Wirkung der Haupteinflussgrößen  $\vartheta_{G,RI}$  und  $\lambda_{RI}$  wurde durch Untersuchungen an einer Pilotanlage im Rahmen erster Tastversuche bestätigt.

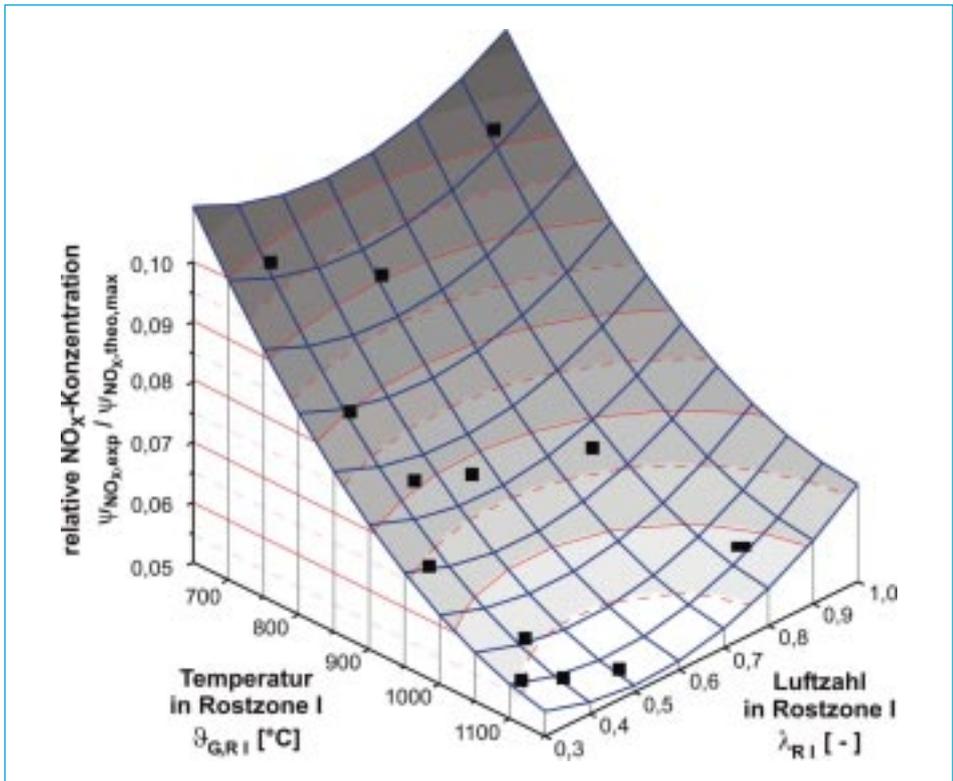


Bild 17:  $\text{NO}_x$ -Konzentration bei Verbrennung auf dem Rost in Abhängigkeit von der Temperatur  $\vartheta_{G,RI}$  und der Luftzahl  $\lambda_{RI}$

Quelle: Beckmann, M.; Davidovic, M.; Gehrman, H.-J.; Scholz, R.: Prozeboptimierung der Verbrennung und Vergasung von Abfällen in Rostsystemen. VDI Berichte 1492 (1999), S. 361-368

Die Ergebnisse sind in Bild 17 dargestellt. Zunächst zeigt sich erwartungsgemäß, dass mit zunehmender Temperatur in der Rostzone I  $\vartheta_{G,RI}$  die NO-Werte sinken. Darüber hinaus ergeben sich für jeweils konstante Temperaturen lokale Minima in einem Bereich von Luftzahlen in der Rostzone I von  $0,4 < \lambda_{RI} < 0,6$ . Anhaltspunkte zur Unterstützung dieser Ergebnisse lassen sich u.a. aus Untersuchungen im Zusammenhang mit der NO-Minderung an einem Festbettvergaser mit getrennter Nachverbrennung [32] ableiten.

Wie weiter unten noch näher gezeigt, erreicht man eine solche **unabhängige** Optimierung der NO-Minderung, über die Optimierung des Feststoffumsatzes hinaus, zusammen mit weiteren Vorteilen, wenn man die Prozessführung der Nachverbrennung deutlich von der Prozessführung auf dem Rost trennt. Durch die Vergasung auf dem Rost und die Erzeugung eines Brenngases ergibt sich ein zusätzlicher Freiheitsgrad für eine eigenständige Nachverbrennung (Möglichkeit der Luftstufung bei einer eigenständigen Nachverbrennung zur NO-Minderung, s.u. Bild 22).

### *Kap. 3.3.*

## **Vergasungs-Nachverbrennungsfahrweise**

Bei einer getrennten Prozessführung, wie in Bild 4 dargestellt, kann man dazu übergehen, den Feststoffumsatz auf dem Rost (erste Einheit) deutlich unterstöchiometrisch (z.B.  $\lambda = 0,4$ ) zu betreiben. Aufgrund der bereits erwähnten Steuerungsmöglichkeiten bei Rostsystemen wird auch bei dieser Betriebsweise ein vollständiger Ausbrand der Reststoffe vom Rost (Asche) erreicht. Im Unterschied zu der klassischen Verbrennungsfahrweise wird jedoch ein Gas erzeugt, das eigenständig in dem Nachverbrennungsprozess in der zweiten Einheit verbrannt werden kann. Die zweite Einheit kann daher wie eine eigenständige Feuerung ausgebildet werden.

Zusammengefasst ergeben sich für die Vergasungs-Nachverbrennungs-Prozessführung mit Rostsystemen (erste Einheit) insbesondere folgende Vorteile gegenüber der konventionellen Verbrennungs-Nachverbrennungs-Prozessführung:

- Abgasmassenströme und damit
  - \* Emissionsfrachten und so genannte
  - \* Abgasverluste
 werden signifikant abgesenkt (Bild 18).
- In der ersten Einheit (Rost) wird ein Schwachgas erzeugt, welches einen eigenständigen Nachverbrennungsprozess ermöglicht.
- Der Nachverbrennungsprozess kann wie eine eigenständige Feuerung durch Übertragung der für gasförmige Einsatzstoffe bekannten Primärmaßnahmen zur  $\text{NO}_x$ -Minderung bei gleichzeitig hohem Ausbrand optimiert werden.

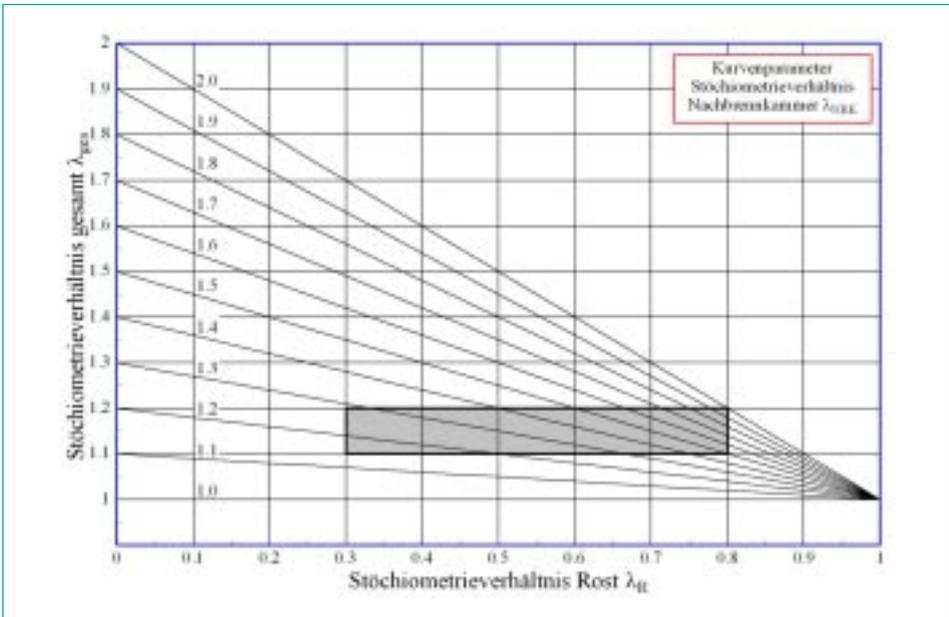


Bild 18: Abhängigkeit des Gesamt-Stöchiometrieverhältnisses vom Stöchiometrieverhältnis in der ersten Einheit (Rost) und der zweiten Einheit (Nachverbrennung)

Quelle: Beckmann, M.: Mathematische Modellierung und Versuche zur Prozessführung bei der Verbrennung und Vergasung in Rostsystemen zur thermischen Rückstandsbehandlung. CUTEC-Schriftenreihe, 1995

Bei den v.g. Punkten handelt es sich ohne Zweifel um Vorteile. Es muss jedoch erwähnt werden, dass eine Reihe von Fragen für beide Varianten der Prozessführung – klassische Verbrennungsführung und Vergasung auf dem Rost – weiterhin Gegenstand von Betriebsuntersuchungen bleiben. Hierzu gehören insbesondere die Freisetzung von Schwermetallspezies und Salzen im Verhältnis zu den reinen Aschekomponenten (ASP, siehe Kapitel 3.4.) und deren Auswirkung auf die Korrosion der Anlage einerseits und der Qualität der Asche andererseits. Im Folgenden seien die genannten Aspekte der Vergasungs-Nachverbrennungs-Prozessführung anhand von Versuchsergebnissen näher erläutert.

Das Diagramm in Bild 18 zeigt, dass bei einer getrennten Prozessführung mit einem Stöchiometrieverhältnis beim Feststoffumsatz auf dem Rost von  $\lambda \approx 0,4$  bis  $\lambda \approx 0,6$  und in der Nachverbrennung von  $\lambda \approx 1,2$  bis  $\lambda \approx 1,8$  sich Gesamtstöchiometrieverhältnisse von  $\lambda \approx 1,2$  bis  $\lambda \approx 1,4$  ergeben. Damit stellen sich bei der getrennten Vergasungs-Nachverbrennungsfahrweise deutlich niedrigere Gesamtstöchiometrieverhältnisse als bei der klassischen Verbrennungs-Nachverbrennungsfahrweise ( $\lambda = 1,6$  bis  $\lambda \approx 2,0$ ) und dementsprechend auch geringere Strömungsgeschwindigkeiten im Brennbett (Staubaustrag) und eine Reduzierung des Abgasmassenstromes gegenüber der klassischen Verbrennungsfahrweise ein.

Wie bereits an anderer Stelle diskutiert [3], stellt sich bei der Vergasung auf dem Rost eine Gaszusammensetzung ein, die stark von der berechneten Gleichgewichtszusammensetzung abweicht. Den höchsten Anteil der brennbaren

Komponenten nimmt Kohlenmonoxid ein ( $\psi_{CO} \approx 8..15$  Vol.-%). Der Wasserstoffgehalt ( $\psi_{H_2} \approx 2..5$  Vol.-%) liegt weit unter den berechneten Gleichgewichtswerten. Das ist insbesondere darauf zurückzuführen, dass der Wasseranteil des Brennstoffes bereits am Rostanfang in die Gasphase übergeht und damit eine Zersetzung des Wasserdampfes an einem heißen Koksbed, entsprechend der heterogenen Reaktion von Kohlenstoff mit Wasserdampf, in Rostsystemen wenig wahrscheinlich ist (vgl. Schema und Reaktionen in Bild 3). Geht man davon aus, dass die CO-Bildung im Brennstoffbett eines Rostes im Wesentlichen über die heterogene Vergasungsreaktion von Kohlenstoff mit Sauerstoff und, bei entsprechenden Betthöhen, zusätzlich über die *Boudouard-Reaktion* abläuft, so sollte nach erfolgter Zündung des Brennstoffes zunächst ein entsprechend heißes Koksbed erzeugt werden. In den nachfolgenden Rostzonen wird wegen des abnehmenden Kohlenstoffgehaltes entlang der Rostlänge entsprechend weniger Reaktionsluft für die Vergasung benötigt. Dieser Sachverhalt wird durch die Ergebnisse in Bild 19 bestätigt. Das als Modellbrennstoff eingesetzte Holz zündet bereits in der ersten Roststufe. Bei Verschieben der Hauptluftzufuhr vom Rostanfang zum Rostende nimmt der CO-Anteil im Brenngas ab. Eine Erhöhung der Roststabgeschwindigkeit hingegen, die zu einer intensiveren Durchmischung und Schürung im Brennbett führt, bewirkt im vorliegenden Beispiel eine Zunahme des CO-Anteils (Bild 19). Bei diesem Beispiel ist jedoch zu beachten, dass in den Zonen 2 bis 4 annähernd gleiche Luftmassenströme zugeführt werden.

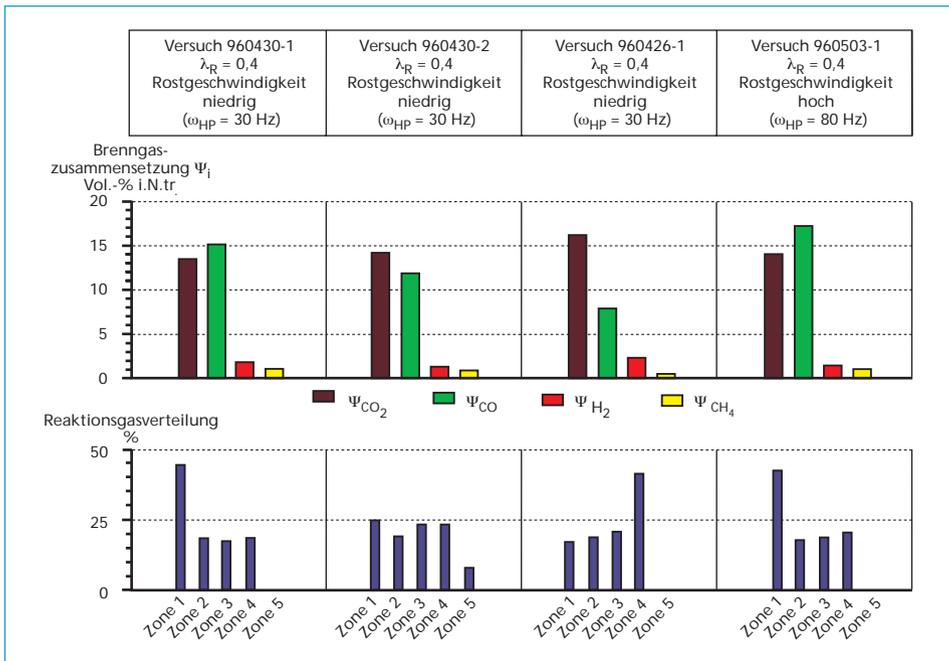


Bild 19: Gaszusammensetzung in Abhängigkeit von Luftverteilung und Rostgeschwindigkeit – Modellbrennstoff Holz –

Quelle: Beckmann, M.; Davidovic, M.; Wiese, C.; Busch, M.; Peppler, E.; Schmidt, W.: Mehrstufige Vergasung von Restmüll auf einem Rost. Abschlußbericht über ein von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) unter dem Aktenzeichen 01746 gefördertes Forschungsprojekt, 1999

Die Luftverteilung entlang des Rostweges ist je nach Brennstoff anzupassen. Die Ergebnisse für Untersuchungen mit BRAM als Modellbrennstoff in Bild 20 machen deutlich, dass eine schonende Entgasung und Vergasung am Rostanfang im Hinblick auf hohe CO- und H<sub>2</sub>-Konzentrationen im Brenngas günstig ist (links in Bild 20). Eine starke Luftzufuhr am Rostanfang hingegen (rechts in Bild 20) führt im vorliegenden Fall zu einer intensiven Freisetzung flüchtiger Bestandteile und zu hohen Temperaturen im Brennbett, die dann Verbackungen und damit eine Verschlechterung des Ausbrandes nach sich ziehen, was letztlich eine entsprechende Verringerung der brennbaren Komponenten bedeutet.

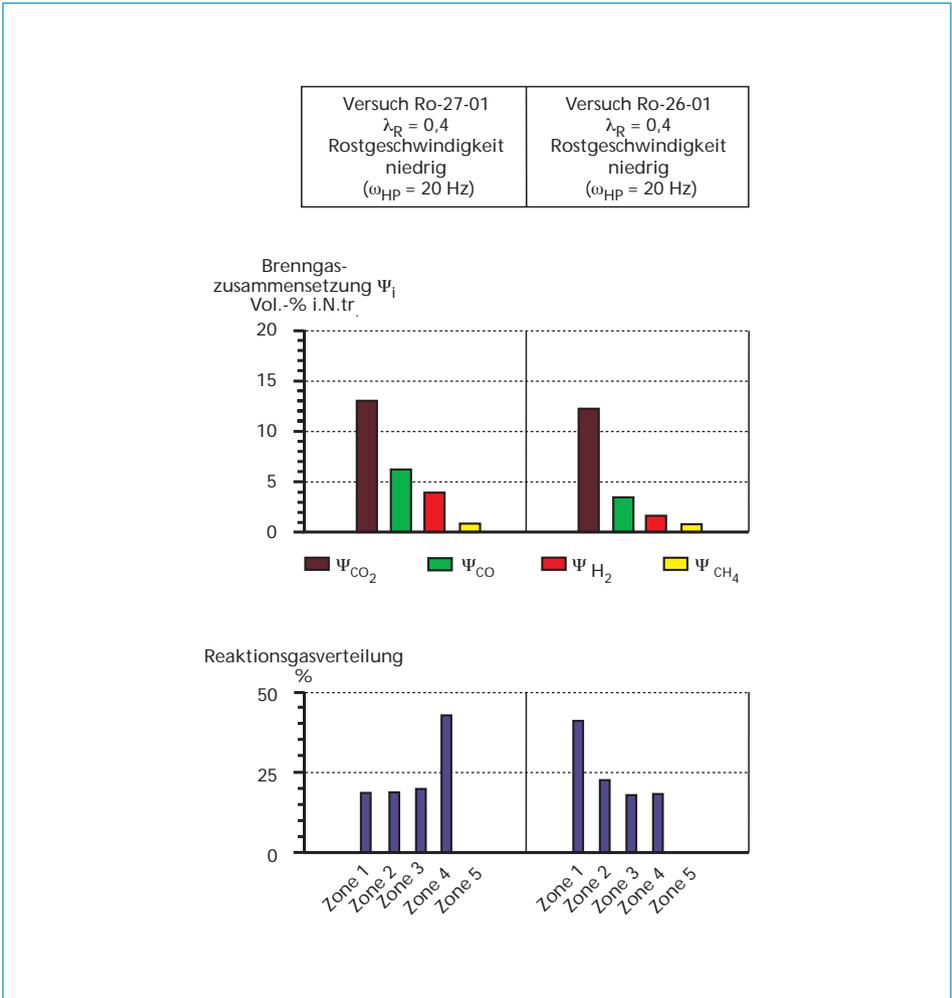


Bild 20: Gaszusammensetzung in Abhängigkeit von der Luftverteilung – Modellbrennstoff BRAM –

Quelle: Beckmann, M.; Davidovic, M.; Wiese, C.; Busch, M.; Peppeler, E.; Schmidt, W.: Mehrstufige Vergasung von Restmüll auf einem Rost. Abschlußbericht über ein von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) unter dem Aktenzeichen 01746 gefördertes Forschungsprojekt, 1999

Bei Vergasungsverhältnissen lassen sich ebenso wie bei einer Verbrennung Restkohlenstoffgehalte um 1 Ma.-% und niedriger erreichen; koksartige Rückstände werden damit vermieden. Das Bild 21 zeigt beispielhaft für den Einsatz von mit Steinkohlenteerpech behandelten Eisenbahnschwellen – kontaminiertes und damit nicht weiter verwendbares Abfallholz – Ergebnisse von unterschiedlichen unter- und überstöchiometrischen Einstellungen des Rostprozesses. Im Zusammenhang mit dem Restausbrand der Asche sei an dieser Stelle angemerkt, dass bei einer insgesamt unterstöchiometrischen Betriebsweise des Rostprozesses (Vergasung), im Bereich der Ausbrandzone, falls erforderlich, durchaus lokal überstöchiometrische Bedingungen bezogen auf den Restkohlenstoff eingestellt werden können.

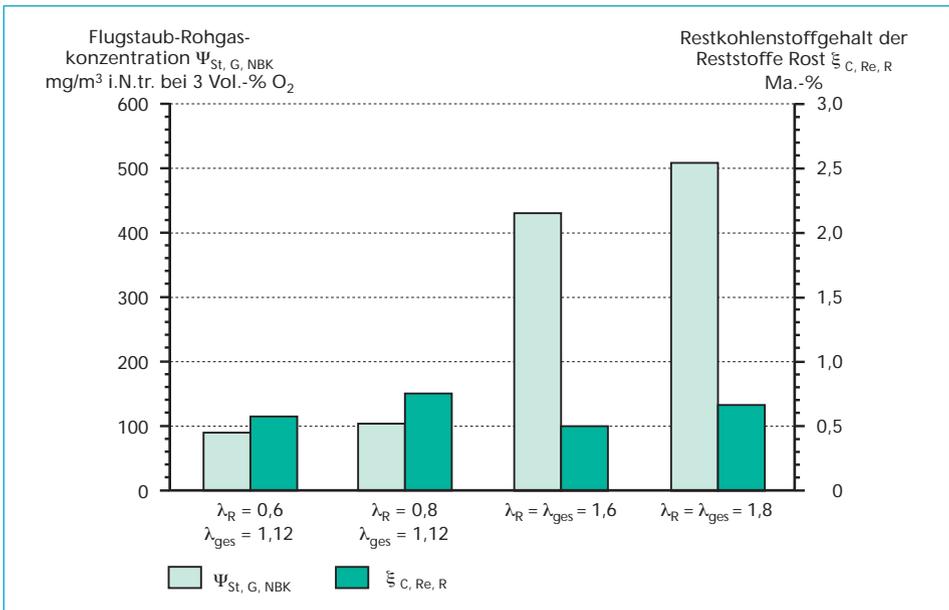


Bild 21: Flugstaub-Konzentrationen (normiert) und Restkohlenstoffgehalte in der Asche für unter- und überstöchiometrische Fahrweise des Rostes

Quelle: Beckmann, M.: Mathematische Modellierung und Versuche zur Prozessführung bei der Verbrennung und Vergasung in Rostsystemen zur thermischen Rückstandsbehandlung. CUTEC-Schriftenreihe, 1995

Ausgeprägte Unterschiede zwischen der Vergasungs- und Verbrennungsfahrweise ergeben sich hinsichtlich der Flugstaubbildung. Die im Vergleich zu der überstöchiometrischen Fahrweise bei Vergasungsbetrieb deutlich niedrigeren Luft- bzw. Reaktionsgasmassentröme haben entsprechend abgesenkte Durchströmungsgeschwindigkeiten durch das Brennbett zur Folge. Die erwartete Tendenz, dass sich mit abnehmenden Stöchiometrieverhältnissen auch die Flugstaubbildung vermindert, wird durch die Ergebnisse in Bild 21 bestätigt. Es ist jedoch zu erwarten, dass dabei das Verhältnis der Asche- zu den Salzbildnern auch abgesenkt wird, was wiederum zu einem erhöhten Korrosionsrisiko führen kann.

Zur Begründung dieser Annahme sind die bisherigen Untersuchungen bei überwiegend überstöchiometrischen Bedingungen auf understöchiometrische Verhältnisse auszudehnen.

Das bei dem understöchiometrischen Feststoffumsatz auf dem Rost (1. Einheit) erzeugte Brenngas weist einen Heizwert von etwa  $h_u \approx 1.500 \text{ kJ/kg}$  bis  $h_u \approx 2.500 \text{ kJ/kg}$  und Temperaturen von etwa  $\vartheta \approx 750 \text{ °C}$  bis  $\vartheta \approx 1.000 \text{ °C}$  auf. Eine eigenständige Nachverbrennung des Gases, ohne Zusatzbrennstoff und unter Berücksichtigung der für Gasfeuerungen bekannten Primärmaßnahmen zur Minderung von Stickoxiden bei gleichzeitig hohem Ausbrand (z.B. [34, 36, 37, 38, 42]) ist damit in der Nachbrennkammer (2. Einheit) ohne weiteres möglich.

Das Bild 22 zeigt  $\text{NO}_x$ -Konzentrationen im Rohgas – Ende Nachbrennkammer, angegeben als  $\text{NO}_2$  – in Abhängigkeit von der Luftzahl in der ersten Stufe der Nachbrennkammer  $\lambda_{\text{NBK1}}$  für zwei unterschiedliche Stöchiometrieverhältnisse in der Roststufe ( $\lambda_R \approx 0,4$  und  $\lambda_R \approx 0,6$ ). Zunächst ergibt sich in beiden Fällen der bekannte Zusammenhang zwischen der Stöchiometriezahl  $\lambda_{\text{NBK1}}$  in der ersten Stufe der Brennkammer und der  $\text{NO}$ -Konzentration  $\psi_{\text{NO}_x}$  im Rohgas bei der Reduzierung von Brennstoff- $\text{NO}$ . Darüber hinaus ist zu erkennen, dass die  $\text{NO}$ -Werte bei einer Primärluftzahl von  $\lambda_R \approx 0,6$  deutlich niedriger sind als bei  $\lambda_R \approx 0,4$ .

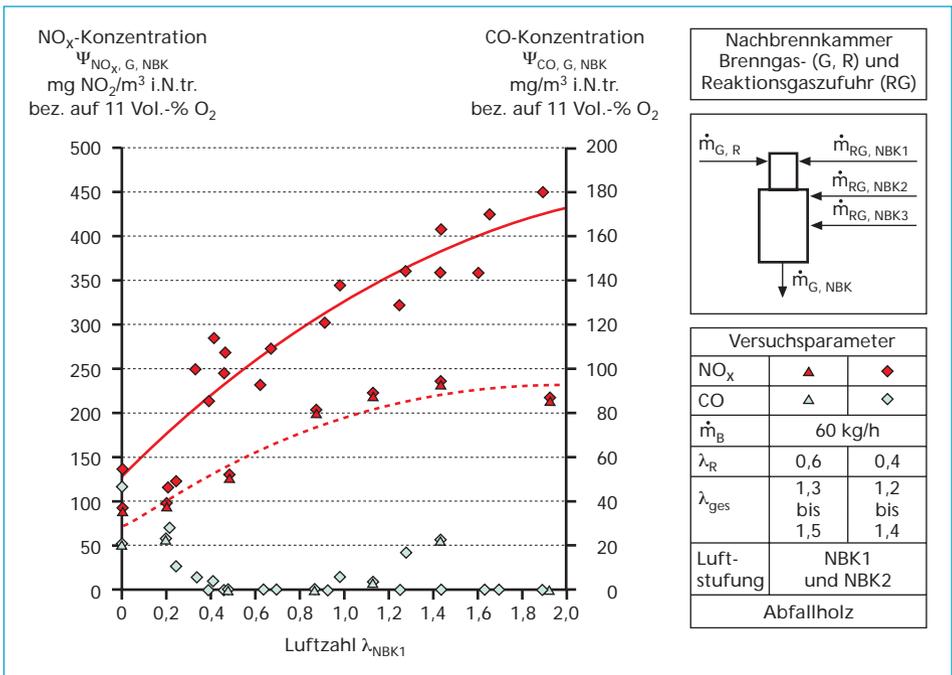


Bild 22:  $\text{NO}_2$ - und CO-Konzentrationen in Abhängigkeit von der Luftzahl  $\lambda_{\text{NBK1}}$  (erste Stufe Nachbrennkammer, 2. Einheit) für verschiedene Luftzahlen  $\lambda_R$  (Rost, 1. Einheit)

Quelle: Beckmann, M.: Mathematische Modellierung und Versuche zur Prozessführung bei der Verbrennung und Vergasung in Rostsystemen zur thermischen Rückstandsbehandlung. CUTEC-Schriftenreihe, 1995

Das höhere Primärluftverhältnis in der Rostanlage bedeutet neben der Erhöhung des Sauerstoffangebotes im vorliegenden Fall einen Anstieg im Temperaturniveau von  $\vartheta_R \approx 700 \text{ °C}$  auf  $\vartheta_R \approx 1.000 \text{ °C}$ . Damit ist bereits in der Roststufe eine höhere Abbaurate von flüchtigen Brennstoff-*N*-Komponenten wie *HCN* und *NH<sub>i</sub>* über *NO* und eine Reduktion von *NO* zu *N<sub>2</sub>* verbunden.

Im vorliegenden Fall (Bild 22) ergibt sich, ausgehend von  $\psi_{NOx} \approx 450 \text{ mg/m}^3$  (i.N.tr. bei 11 Vol.-% *O<sub>2</sub>*) bei  $\lambda_R \approx 0,4$  und bei einer ungestuften Nachverbrennung mit  $\lambda_{NBKI} \approx 1,8$ , für eine annähernd gleiche Gesamtluftzahl  $\lambda_{ges} \approx 1,3$  bei einer Fahrweise mit  $\lambda_R \approx 0,6$  und einer gestuften Nachverbrennung mit  $\lambda_{NBKI} \approx 0,4$  eine *NO*-Minderung auf  $\psi_{NOx} \approx 100 \text{ mg/m}^3$ . Wie die zugehörigen *CO*-Konzentrationen in Bild 22 zeigen, wird dabei ein gleichbleibend niedriges Niveau von  $\psi_{CO} < 10 \text{ mg/m}^3$  erreicht.

### *Kap. 3.4.*

## **Korrosion und Verschmutzung**

Wie in Kapitel 3.2. bereits ausgeführt, zielt die Ausgestaltung und die Prozessführung der Feuerung und Nachverbrennung einer Abfallverbrennungsanlage primär auf die Umweltkompatibilität der Verbrennungsprodukte in den beiden Hauptmassenströmen Gas und Rostasche – hoher Ausbrand, geringe mobilisierbare Konzentrationen an Schwermetallen und Salzen. Für die Realisierung dieser Vorgaben stehen die in Kapitel 3.1. bis 3.4. diskutierten Primärmaßnahmen zur Verfügung, wobei die auf einen hohen Ausbrand gerichtete Prozessführung in der Praxis bereits als Stand der Technik bezeichnet werden kann.

Demgegenüber ist die Konditionierung der Rostasche bezüglich der Schwermetalle und Salze – gezielte Freisetzung oder Inertisierung – noch Gegenstand der Forschung. Die diesbezügliche *Qualität* der Rostasche ist, als unmittelbares Produkt der Feuerung, direkt von der Prozessführung der Feuerung abhängig. Zur Erreichung von Qualitätsanforderungen der Rostasche erscheint es beim Feststoffumsatz auf dem Rost hilfreich, neben der möglichst guten Versinterung/Aufschmelzung der Verbrennungsprodukte, die problematischen Stoffe in das Gas freizusetzen. Die dafür unterstützend wirkenden Primärmaßnahmen werden in den vorausgehenden Kapiteln dieses Beitrags beschrieben. Aus dem Blickwinkel der typischen Problemstoffe bezüglich der Anforderungen an den Inertisierungsgrad von Rostaschen sind hier vor allem die Schwermetallverbindungen – Blei, Kupfer, Zink – zu nennen.

Die Zielvorgabe der Entfrachtung der Rostasche wird durch die Sekundärmaßnahmen der Filter-/Reaktorwirkung der Abgasreinigung – teilweise bereits im Kessel – unterstützt. Solange die Filterwirkung der Abgasreinigung nicht überlastet wird, ist das Gas auf dem Weg zwischen Feuerung und Abgasreinigung, gemessen an den Maßgaben der Umweltkompatibilität, ohne Belag. Es erscheint geradezu erstrebenswert, die unvermeidbaren Nebenmassenströme der Abgasreinigung (Filterstäube usw.), für die eine gesicherte Ablagerung oder aufwendige Nachbehandlung unumgänglich ist, mit den oben genannten Problemstoffen

der Schwermetallverbindungen und Salze möglichst hoch zu beladen. Für den Fall einer Nachbehandlung dieser Massenströme, z.B. zur Separation der darin gebundenen Schwermetalle, ist die hohe Beladung auch mit einem wirtschaftlichen Vorteil verbunden.

Die Zielsetzungen einer möglichst umweltschonenden Auswirkung der thermischen Behandlung von Abfällen – aus dem Blickwinkel von Ressourcen und Stoffkreisläufen – lassen sich somit durch technische Maßnahmen bei der Ausgestaltung und Prozessführung von Feuerung und Nachverbrennung unterstützen. In gleicher Weise sollen die gesetzlichen Anforderungen an die Bedingungen der Nachverbrennung wirken.

Diesem Szenario einer *umweltkompatiblen* thermischen Abfallbehandlung ist das *wettbewerbliche* Interesse einer möglichst effektiven und effizienten Energienutzung aus diesem Prozess beigeordnet. Ein Betreiber hat die Schnittmenge aus beiden Interessen kürzlich mit der Frage nach der diesbezüglich *optimalen Feuerung* umschrieben. Mit Blick auf die zurzeit gegebene Praxis lässt sich erkennen, dass beide Interessen nicht ohne weiteres durch technische Maßnahmen der Prozessführung zur Deckung zu bringen sind. Der Problemcharakter dieses Dualismus Abfall-Energieträger lässt sich bereits an der Tatsache veranschaulichen, dass aus Sicht der Energienutzung das *ausgebrannte* Gas (Rohgas) das entscheidende Prozessprodukt ist. An den unter Umweltaspekten zunächst unbedeutenden, Schwermetall und Salz aufgeladenen Massenstrom zwischen Feuerung und Abgasreinigung werden nun spezifische Anforderungen für die Energienutzung gestellt. Aus dem Vorgang der Entfrachtung der Rostasche wird – wie nachfolgend an Beispielen aufgezeigt wird – eine problematische Befrachtung des Rohgases.

Der Ansatz einer möglichst effektiven Energienutzung bei der thermischen Behandlung von Abfällen erhält aus dem Blickwinkel der Klimarelevanz zusätzliches Gewicht. Der oben angesprochene Dualismus wird durch diesen neuen Umweltaspekt aber nicht gemindert. Im Gegenteil, die technischen Anforderungen an die Prozessführung steigen und der Weg zur *optimalen Feuerung* wird komplexer. In dieser Situation muss sich die Güte der Prozessführung auch am erreichten Wirkungs- und Nutzungsgrad der Anlage bemessen lassen.

Der Nutzungsgrad bemisst sich einerseits an der Verfügbarkeit der Anlage und andererseits an der Stetigkeit des betrieblichen Optimums (z.B. 100 % Dampfleistung). Die Voraussetzungen zur Erzielung eines hohen Nutzungsgrades sind auf der Seite des Brennstoffs aktuell für sehr viele Standorte von Abfallverbrennungsanlagen nahezu optimal (Wirkung des Deponieverbots). Dennoch sind erhebliche Nutzungs-, d.h. Verfügbarkeitsdefizite zu beobachten. Großen Anteil daran haben die Auswirkungen von Art und Fracht an Stoffen im Rohgas auf den Kessel. Die Stichworte hierzu sind: Verschmutzung und Korrosion. Die Frage nach der optimalen Feuerung enthält somit die Teilaufgaben der verschmutzungsoptimierten bzw. der korrosionsoptimierten Feuerung. Ein diesbezügliches Zusammenwirken der bereits verfügbaren Primärmaßnahmen als Zielvorgabe oder

Führungsgröße in einer Feuerungsleistungsregelung ist Zukunftsmusik. Möglicherweise sind auch die in Entwicklung befindlichen Primärmaßnahmen, wie die gestufte Verbrennung oder die Vergasungs-Nachverbrennungsfahrweise, in diesem Zusammenhang zielführend.

Anmerkung 1: Mit *Verschmutzung* sind hier vor allem die Ablagerungen auf den ungeschützten Wärmetauscherflächen im Strahlungs- und Berührungsteil gemeint und weniger die *Verschlackung* im heißen Teil auf Feuerfest.

Anmerkung 2: Die Verfügbarkeitsdefizite durch Verschmutzung ergeben sich aus verkürzter Reisezeit – häufigere Stillstände – und ungeplanten Stillständen durch Zuwachsen des Kesselquerschnitts, meist im Bereich der Endüberhitzer. Bezüglich der Korrosion sind ebenfalls ungeplante Stillstände – Rohrreißer – zu nennen und auch verlängerte Revisionszeiten. Bestimmte Verschmutzungen wirken verstärkend auf die Korrosion (an anderer Stelle im Kessel). Umgekehrt haben Korrosionsvorgänge meist keine Auswirkungen auf die Verschmutzung.

In der aktuellen Praxis ergibt sich die Tendenz, dass die Abfallverbrennungsanlagen entweder verstärkt mit Korrosion oder mit starker Verschmutzung zu kämpfen haben (manche auch weder noch). Bevor die diesbezüglichen Kausalitäten diskutiert werden, sind einige eingrenzende Anmerkungen notwendig:

Zunächst ist klarzustellen, dass mit der Prozessführung der Feuerung bzw. Nachverbrennung bereits die Einheit (gemeinsame Auswirkung) von Brennstoff und Feuerungsleistungsregelung gemeint ist, d.h. die Unstetigkeit des Brennstoffs bezüglich Heizwert, Stückigkeit, Feuchte, chemischer Inhaltsstoffe usw. ist Teil der Prozessführung. Mit anderen Worten: Der Betreiber einer Abfallverbrennungsanlage kann die Brennstoffeigenschaften – oft grundsätzlich, aber auch im Detail – nicht beeinflussen.

Zudem ist zu betonen, dass sich mit den Problemen der Verschmutzung und Korrosion auch abwehrende (sekundäre) Maßnahmen entwickelt haben [17]. Für den Bereich der Verschmutzung ist u.a. zu nennen: Online-Reinigung, Sprengreinigung, Additive und bezüglich Korrosion werden vor allem Nickelbasiswerkstoffe eingesetzt – auftragsgeschweißt oder thermisch gespritzt.

Weiterhin ist zu erwähnen, dass es im Bereich der konstruktiven Merkmale von Wärmetauschern – Gasführung, Wärmeauskopplung, Klopfung/Rußbläser, Mediumstemperaturen usw. – erhebliches Beeinflussungspotential zur Minderung bzw. Meidung von Verschmutzung und Korrosion gibt. Die Prozessführung der Feuerung und Nachverbrennung ist demnach nicht der einzig zur Verfügung stehende Hebel gegen Korrosion und Verschmutzung.

Dennoch machen zwei Aspekte gerade diesen Hebel besonders interessant: Zum einen sind diese Zusammenhänge zwischen Prozessführung und Korrosion/Verschmutzung noch wenig hinterfragt oder gar implementiert, es besteht also noch erhebliches Optimierungspotential. Zum anderen sind diese *primären Maßnahmen* der Prozessführung auch zu bevorzugen, sobald die oben genannten *sekundären Maßnahmen* – Nickelbasiswerkstoffe usw. – erhebliche zusätzliche Kosten erzeugen und damit die Instandhaltungsaufwendungen steigen.

Im Fall von Neuanlagen ist eine Wirtschaftlichkeitsbewertung der unterschiedlichen Optionen vorzunehmen; z.B. erhöht die Investition in eine großflächige Applikation von Nickelbasiswerkstoffen auf den Wärmetauscherflächen auf Seite der Primärmaßnahmen die Freiheitsgrade, d.h. die Korrosionsoptimierung der Prozessführung wird nachrangig.

Das *Wohl* der Schlacke ist das *Wehe* des Kessels. Denn die gezielte Entfrachtung von Salzen und Schwermetallen belädt das Gas mit zusätzlichen, über den unvermeidbaren Anteil hinaus gehenden Stofffrachten dieser Spezies. Bevor die Abgasreinigung diese Frachten – die im erkalteten Abgas als Feststoffpartikel vorliegen – ausschleust, bleiben sie bevorzugt auf den etwa 40 bis 60 Metern Gasweg im Wärmetauscher *hängen*. Und diese zusätzliche Fracht besteht vor allem aus den Stoffen, die für das Ausmaß und die Dynamik von Korrosion und Verschmutzung relevant sind. Alle Stofffrachten im Rohgas, die wie feiner Sand mitfliegen, also in fester Form aus dem Gutbett ausgetragen werden, sind kaum schädlich und in Bezug auf die Korrosion eher abwehrend wirksam. Demgegenüber sind alle Salze – und insbesondere die Schwermetallsalze – nach dem Austreiben aus dem Gutbett kein feiner Sand, sondern im Rohgas gelöst. Erst im Zuge der Abkühlung des Gases werden daraus Partikel, die sehr fein und zunächst als Flüssigkeit vorliegen (Aerosole). Bei lokaler Abkühlung des Gases am Wärmetauscher – Quencheffekte; Kältefalle – entwickelt sich dieser Vorgang gerade dort, wo die Wege zum Kesselrohr und damit zur Belagsbildung mit der Wirkung von Verschmutzung bzw. Korrosion kurz sind. Jede Salzspezies – Bleichlorid, Kalium-Blei-Chlorid usw. – tritt in Abhängigkeit von seiner Fracht im Gas bei einer spezifischen Temperatur in Sättigung. Dadurch wird der Wärmetauscher zu einem Destillationsapparat für Aerosole im Zuge der generellen oder lokalen Abkühlung des Rohgases. Damit kann es zu lokalen Anreicherungen dieser Stoffe im Belag kommen und aus der angestrebten Entfrachtung der Rostasche wird eine ungewollte, aber gezielte lokale Beladung der Ablagerungen auf den Wärmetauscherflächen mit der möglichen Wirkung von *Verschmutzung* bzw. *Korrosion*. Die hier relevanten stofflichen und thermodynamischen Zusammenhänge, sowie die Bedeutung der Belagsbildung und Belagsentwicklung für das Ausmaß und die Dynamik von schädigenden Prozessen sind beschrieben in [17, 48, 64].

Diese Ausführungen verdeutlichen, dass der Aspekt der Korrosions- bzw. Verschmutzungsoptimierung bei der Prozessführung von Feststoffumsatz und Nachverbrennung nur einen rein qualitativen Stellenwert einnehmen kann. Dies steht in klarem Unterschied zu den Zielgrößen Ausbrand der Rostasche und Ausbrand der Verbrennungsgase – mit quantitativen Vorgaben. Wie bereits erwähnt, ist es nicht die Frage, *ob* Salze und Schwermetallverbindungen zum Bestandteil des Rohgases werden, sondern nur *welche Fracht* bzw. *welche Proportionen*.

Die bei der Verbrennung entstehenden Vorläuferstoffe und Zwischenstufen der gelösten Salzfracht des Rohgases sind weitgehend unbekannt und entziehen sich völlig jeglicher (neugierigen) Annäherung, sei es durch Messung oder Modellierung. Zudem erzeugt die Variation von Art, Bindung, Menge und Masse der Salz- und Schwermetallfrachten in den Brennstoffen – die ebenfalls durch Messung nicht sinnvoll erfasst werden kann – zusätzliche Unstetigkeiten.

Diese sehr komplexen stofflichen Wechselwirkungen bedingen, dass die Prozessführung von Feststoffumsatz auf dem Rost und Nachverbrennung nur auf empirische Weise mit dem Ansatz der Korrosionsoptimierung und Verschmutzungs-optimierung verknüpft werden kann. Ein möglicher Weg dafür ist die Erfassung und Analyse der im Rohgas transportierten Partikel in Abhängigkeit von gegebenen – messtechnisch begleiteten – oder gezielt herbeigeführten Betriebssituationen. Entsprechende Vorgehensweisen wurden im Zuge von Forschungsvorhaben und Betriebsuntersuchungen [48] entwickelt (ASP und Belagssonde, Bild 25). Inzwischen steht eine breite Datenbasis von entnommenen Rohgaspartikelfrachten aus Abfallverbrennungsanlagen zur Verfügung. Die Verknüpfung der Befunde aus diesen Messungen mit den jeweils gegebenen Belastungen der Anlagen durch Verschmutzung oder Korrosion (Befunde aus Stillstandsbegehungen) belegen die Aussagekraft dieser Methoden, ein Potential der Korrosion bzw. der Verschmutzung aus der Betriebssituation zum Zeitpunkt der Messung abzubilden. Typischerweise werden diese Messungen im Rahmen einer Untersuchungskampagne etwa fünf- bis zehnmal pro Tag durchgeführt und zwei bis vier Messtage pro Betriebsvariation zu einem Befund integriert.

Einige der untersuchten Abfallverbrennungsanlagen sind mit den in Kapitel 3.2. bis 3.4. beschriebenen Optimierungen der Prozessparameter ausgerüstet. Dies ermöglicht erste Annäherungen an das Zusammenwirken der verschiedenen Primärmaßnahmen aus dem Blickwinkel von Korrosion und Verschmutzung.

In einem nächsten Schritt werden die jeweils gegebenen Betriebssituationen des Feststoffumsatzes und der Nachverbrennung (Betriebsdaten) mit den Befunden aus ASP und Belagssonde verglichen. Zudem sollen durch gezielte Variation z.B. der Luftzahl, des Primär- zu Sekundärluftverhältnisses usw., weitere Varianten der Prozessführung auf ihre Bedeutung für Korrosion und Verschmutzung bewertet werden.

Bild 23, Bild 24 und Bild 25 enthalten schlaglichtartig Stichworte und exemplarische Befunde zu der hier relevanten Kausalkette *Betriebsweise – Belagsentwicklung – Korrosion – Verfügbarekeit*. Die drei Bilder sind wie folgt zu erläutern [17, 48]:

#### **Bild 23: Zusammenhang zwischen Betriebsweise und Belagsentwicklung**

Die beiden REM-Bilder (Länge des Maßstabsbalkens am unteren Bildrand ist 20  $\mu\text{m}$ ) zeigen die Belagssonde nach deren kurzer Verweilzeit (< 60 Sekunden) im Rohgasstrom. Abhängig von der Entnahmeposition (Messöffnung im Kessel) und der damit gegebenen Gastemperatur scheidet sich – isokinetisch – die Fracht der physikalisch (fest, flüssig) und stofflich (Silikate, Oxide, Chloride, Sulfate, Hydroxide usw.) unterschiedlichen Partikel des Rohgases ab. Die verschiedenen Partikeltypen formen signifikante Gefügestrukturen auf der Sonde. Die mineralogische Bewertung dieser *Sedimentationsgefüge* und die chemischen Daten aus Punkt- und Kleinflächenmessungen der abgelagerten Partikel führen zu einer differenzierten Zustandsbewertung der Partikelfracht des Rohgases. Durch Vergleich mehrerer Messpositionen entlang des Gasweges – d.h. Messungen bei unterschiedlichen Gastemperaturen – und/oder durch Vergleich von gezielt unterschiedlichen Betriebssituationen an der gleichen Messposition eröffnet sich die Basis für eine korrosionsmindernde Prozessoptimierung. Das linke REM-Bild zeigt

beispielhaft einen Betriebszustand mit hoher Asche- und geringer Salzfracht (geringes Korrosionspotential). Beim rechten REM-Bild ist der gegenteilige Zustand gegeben.

Ergänzend dazu zeigt das linke Variationsdiagramm einen chemischen Datensatz von Punktmessungen auf der Belagssonde (hier Chloridanteil und Sulfatanteil). Die Symbole bezeichnen verschiedene Entnahmepositionen (Abgas-Temperaturen) an zwei Linien einer Abfallverbrennungsanlage. Es zeigen sich diskrete Lagefelder der verschiedenen Symboltypen. Vorgaben für eine Bewertung der Lagefelder ergeben sich aus den für Abfallverbrennungsanlagen typischen Korrosionsprozessen (Hochtemperatur-Chlorkorrosion), d.h. Betriebsituationen mit einer Dominanz von Sulfaten gegenüber Chloriden sind zu bevorzugen.

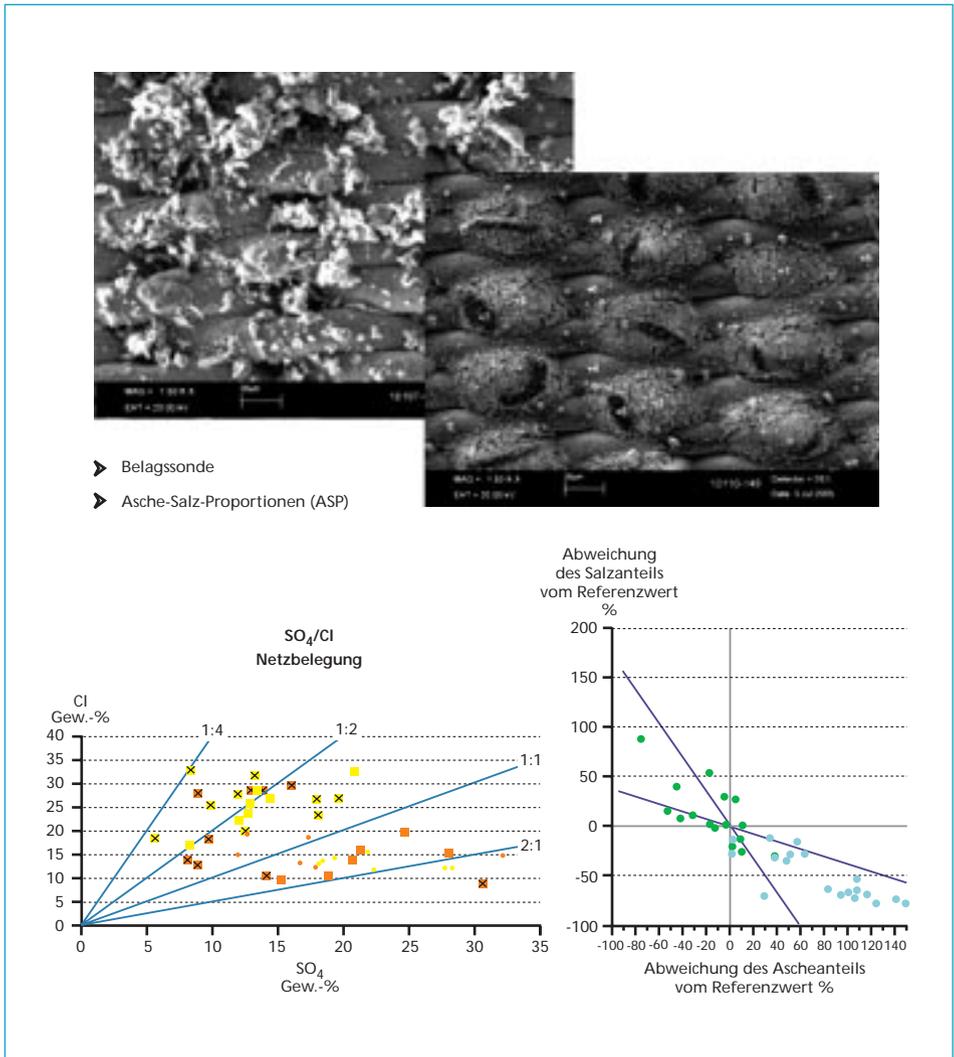


Bild 23: Zusammenhang zwischen Betriebsweise und Belagsentwicklung

Das rechte Variationsdiagramm symbolisiert das ASP-Diagramm. Die Messpunkte repräsentieren die Proportion an Aschekomponenten zu Salzkomponenten im Rohgas (Messzeit etwa 30 Minuten, Messposition am Kesselende). Die hier exemplarisch gezeigten blauen und grünen Punkte beziehen sich auf zwei unterschiedliche Betriebsweisen eines Kessels einer Abfallverbrennungsanlage (blau: höhere Dampfplast, grün: geringere Dampfplast). Entsprechend den Lagefeldern des ASP-Diagramms [48] ist für den Betriebszustand der blauen Punkte ein geringeres Korrosionspotential gegeben als für den der grünen Punkte.

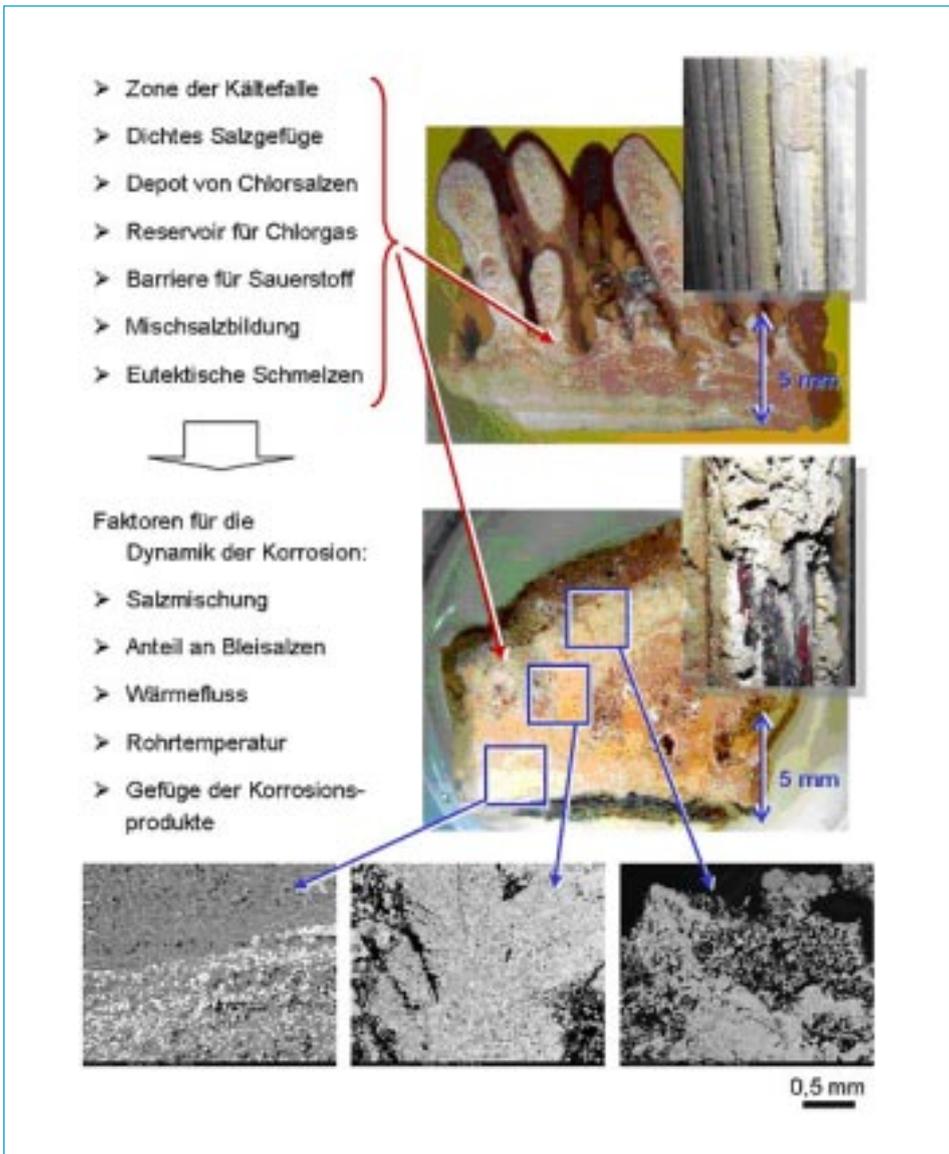


Bild 24: Zusammenhang zwischen Belagsentwicklung und Korrosion

**Bild 24: Zusammenhang zwischen Belagsentwicklung und Korrosion**

Die beiden Fotos zeigen anhand von eingebetteten und polierten Schnittflächen typische Gefügestände von Belägen (hier: Berührungsheizflächen einer Abfallverbrennungsanlage, Maßstabsbalken 5 mm). In der rechten oberen Ecke des jeweiligen Bildes ist die Vor-Ort-Situation im Kessel gezeigt. Am unteren Bildrand befindet sich die Kontaktfläche zum Kesselrohr, am oberen Bildrand die Kontaktfläche zum Rohgas (Belagsoberfläche). Ausgehend von den ersten Ablagerungen auf dem Kesselrohr bilden sich signifikante Gefügestrukturen aus, die mit zunehmender Belagsdicke in typischer Weise variieren – zuerst schichtweise, dann zapfenförmig. Dabei entstehen zunächst sehr salzreiche, dichte Gefüge (Wirkung der Kältefalle). Später werden zwischen die Zapfen lockere *Schüttungen* aus aschereichen, größeren Partikeln eingebunden. Die drei REM-Bilder am unteren Rand der Abbildung sollen diese Gefügeunterschiede verdeutlichen (rohrnah sehr geringe Porosität; rohrfern hohe Porosität). Je heißer die Mediumstemperaturen sind (Rohgas und/oder Wasser bzw. Dampf), desto heftiger werden diese primären Gefügestrukturen durch daran anschließende Prozesse der Belagsentwicklung überprägt, bis hin zu einer völligen Umorganisation der beteiligten Phasen und Gefügestände. Im Zuge dieser Belagsentwicklung kann es auch zur Ausbildung von kleinen *Magmenkammern* aus erschmolzenen Salzen kommen oder zu monomineralischen Horizonten durch Stoffmigration. Durch diese Prozesse können sich im Zusammenwirken der Temperaturmilieus und der stofflichen Milieus – Salzanteil, Salzarten – im Belag die Voraussetzungen für dynamische Korrosionsprozesse entwickeln. Die Abbildung listet die diesbezüglich relevanten Stichworte auf.

**Bild 25: Zusammenhang zwischen Korrosion und Verfügbarkeit**

In jüngster Vergangenheit sind die lokal invasiven – mulden- und wannenförmigen –, besonders dynamisch verlaufenden Korrosionsprozesse an Kesselrohren gehäuft zu beobachten [65]. Für die Betreiber von Abfallverbrennungsanlagen und auch von mit Altholz gefeuerten Biomasseanlagen ergeben sich überfallartig Betroffenheiten, die meist unmittelbar die Verfügbarkeit der Anlage eingrenzen (ungeplante Stillstände, verlängerte Revisionszeiten). Die beiden Fotos rechts oben sollen die lokal begrenzte, aber sehr tief greifende Ausprägung der Korrosion veranschaulichen. Die darunter angeordneten REM- und Mikrosondenbilder belegen am Beispiel eines Verdampferrohres einer mit Altholz gefeuerten Biomasseanlage die extreme Destillationswirkung von spezifischen Gefügeständen in Belägen bzw. in Korrosionsprodukten. Das Zusammenwirken von Gefügeeffekten des Belags, von Temperaturmilieus (Kältefällen, Temperaturgradienten in Abhängigkeit vom Wärmefluss) im Belag und Stoffspezies im vorbeiströmenden Gas kann dazu führen, dass – im hier gezeigten Beispiel – monomineralisches Kalium-Blei-Chlorid die Hohlräume im schichtweise aufgebauten Korrosionsprodukt füllt und als Quelle eines Chlorpartialdruckes wirkt, der das Kesselrohr in dampfförmiges Eisenchlorid auflöst – mit Abzehrraten in der Größenordnung von bis zu 1 mm pro 1.000 Betriebsstunden; in einem Fall konnten sogar 1,9 mm pro 1.000 Betriebsstunden nachgewiesen werden.

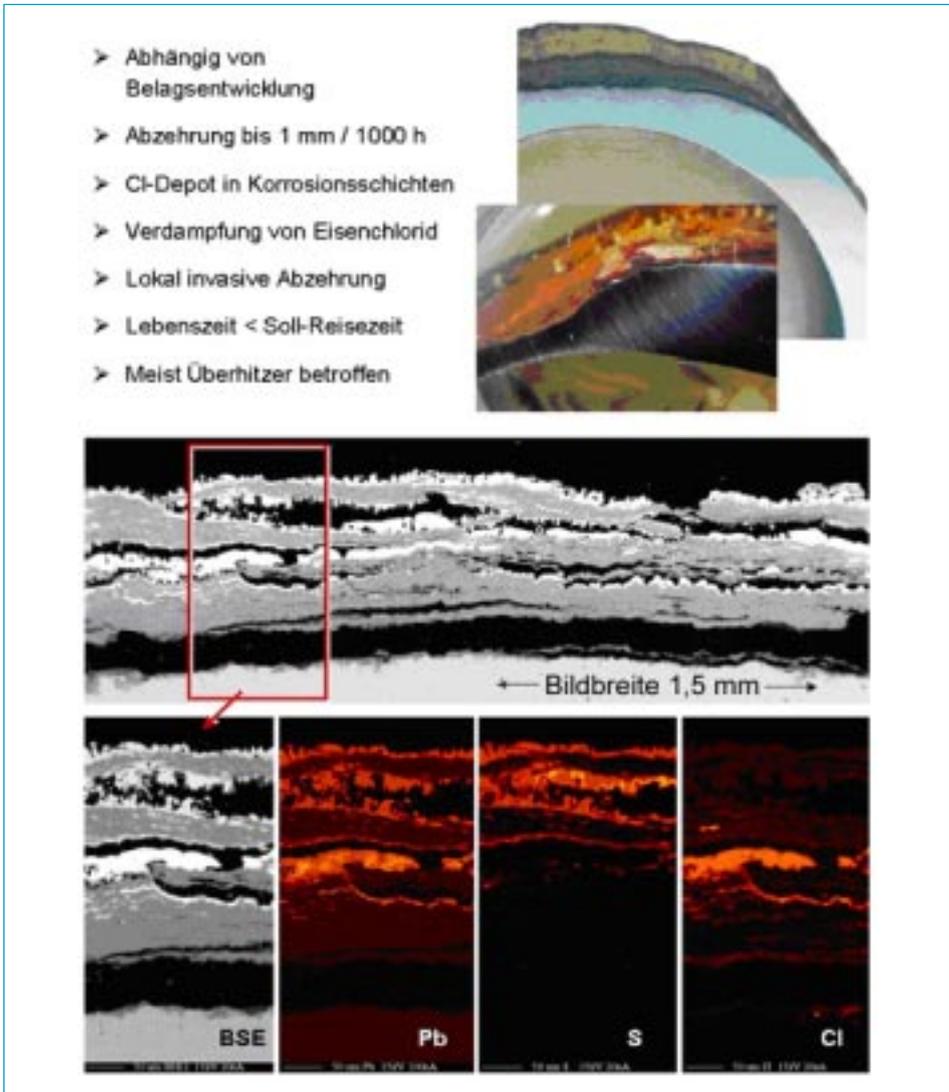


Bild 25: Zusammenhang zwischen Korrosion und Verfügbarkeit

In analoger Weise lässt sich auch eine Kausalkette bezüglich der Verschmutzung von Dampferzeugern von Abfallverbrennungsanlagen aufbauen. Hierfür werden zurzeit an mehreren Abfallverbrennungsanlagen in Deutschland und Österreich im Auftrag der jeweiligen Betreiber – die von einer die Verfügbarkeit beeinträchtigenden Verschmutzung betroffen sind – Untersuchungen mittels ASP, Belagsonde und Stillstandsbeprobung durchgeführt.

Die aktuelle Tendenz der Konditionierung von Abfällen zu Brennstoffen bzw. von Abfallbehandlungsanlagen zu Kraftwerken bestärkt die Bedeutung dieser Optimierungsansätze durch die Prozessführung. Aus den aufgezeigten Beispielen sollte bezüglich Korrosion zudem deutlich werden, dass die selektierend

wirkenden stofflichen Prozesse im Zusammenspiel von Feuerung, Nachverbrennung und Wärmeabbau aufgrund des Potentials einer lokal begrenzten korrosiven Einwirkung – wenn Gefüge, Wärmefluss und Chemie im Belag *passen* – weitgehend von den Frachten im Brennstoff entkoppelt sind, d.h. die Festlegung von Grenzwerten im Brennstoff muss hier nicht zielführend sein. Dieser Fall trifft auch für das gezeigte Beispiel der mit Altholz gefeuerten Biomasseanlage und deren Brennstoff-Bleifrachten zu.

Im Zusammenhang mit dem voranstehend erwähnten Wärmefluss sei an dieser Stelle kurz auf aktuelle Entwicklungen zur nicht invasiven Messung von Wärmestromdichten an Dampferzeugern eingegangen. Experimentelle Untersuchungen an Membranwänden industrieller Anlagen und an einem Versuchsstand sowie zugehörige Berechnungen mit Hilfe eines mathematischen Modells zeigen den Zusammenhang zwischen der Steg- und der Scheiteltemperatur an der Außenseite einer Membranwand und der Wärmestromdichte.

Bild 26 zeigt beispielhaft die numerische Simulation des stationären Temperaturfeldes für eine JuSys SL-Platte. In dem numerischen Modell können verschiedene Wärmestromdichten aufgeprägt werden. An der Außenseite der Membranwand ergibt sich dann – wie bereits erwähnt – eine im Vergleich zum äußeren Rohrscheitel erhöhte Stegtemperatur.

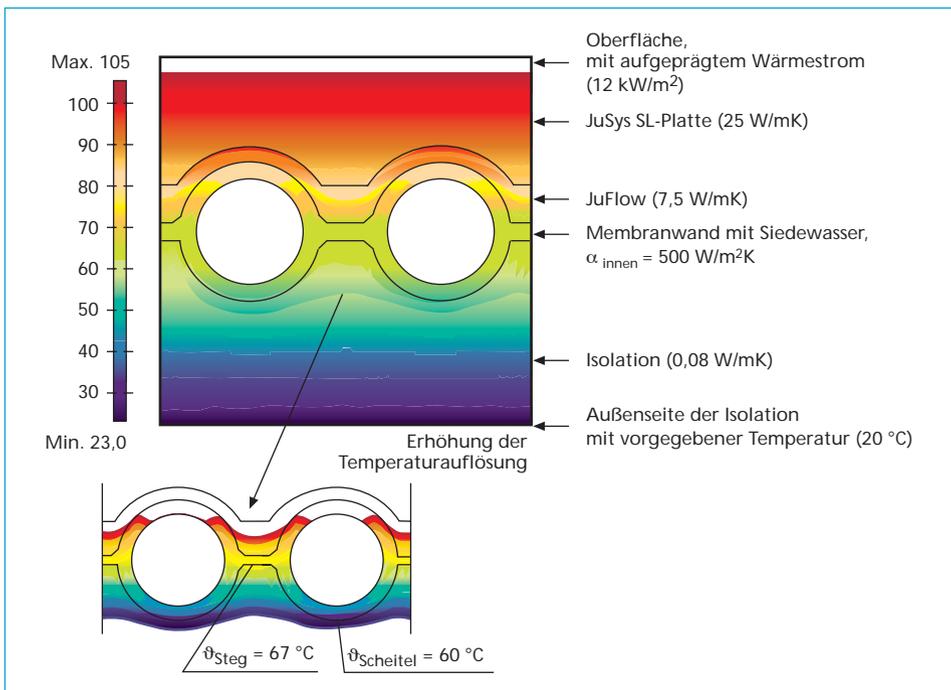


Bild 26: Temperaturverteilung in einem Wandaufbau – Membranwandsegment mit JuSysSL-Platte – Ergebnisse der Simulation

Quelle: Beckmann, M.; Krüger, S.; Spiegel, W.: Charakterisierung und messtechnische Erfassung von betriebsspezifischen Wärmewiderständen an Membranverdampferwänden in Abfall- und Biomasseverbrennungsanlagen. In: Born, M. (Hrsg.): Dampferzeugerkorrosion. Verlag: SAXONIA Standortentwicklungs- und -verwaltungsgesellschaft mbH. SIDAF-Tagung Freiberg, 27.-28.10.2005, S. 273-288

Beim Auftragen der aufgeprägten Wärmestromdichte über den berechneten Temperaturdifferenzen zwischen Steg- und Scheiteltemperatur (Bild 27) zeigt sich erwartungsgemäß ein linearer Zusammenhang. Die Steigung der Gerade ist spezifisch für das betrachtete System, d.h. für bestimmte Membranwandaufbauten – unterschiedliche Teilung, Platten, Massen, Beschichtungen usw. – und für bestimmte Wärmeübergänge<sup>3</sup> auf der Innenseite der Siederohre. Somit können die mit dem mathematischen Modell berechneten Geraden als Systemkenngeraden bezeichnet werden. Dabei ist entscheidend, dass bei einem belegten System mit Feuerfestplatten oder Feuerfestmassen die Systemkenngeraden weiterhin verwendet werden können [8].

Die berechnete Systemgerade (Bild 27) stimmt sehr gut mit der experimentell ermittelten Systemgeraden (Bild 28) überein, wie erste Untersuchungen an einem Versuchsstand für zunächst niedrige Wärmestromdichten zeigen.

Die Wärmestromdichte-Messung ist hilfreich bei der Verfolgung des Aufbaus von Belägen und kann darüber hinaus auch als Messsignal für die Online-Kesselreinigung, die Qualitätskontrolle der Feuerfestzustellung usw. eingesetzt werden bzw. Informationen liefern. Damit ist die Online-Wärmestromdichtemessung nicht zuletzt ein wichtiges Instrument zur Verbesserung der Anlagenverfügbarkeit, d.h. auch zur Verbesserung der Energieeffizienz.

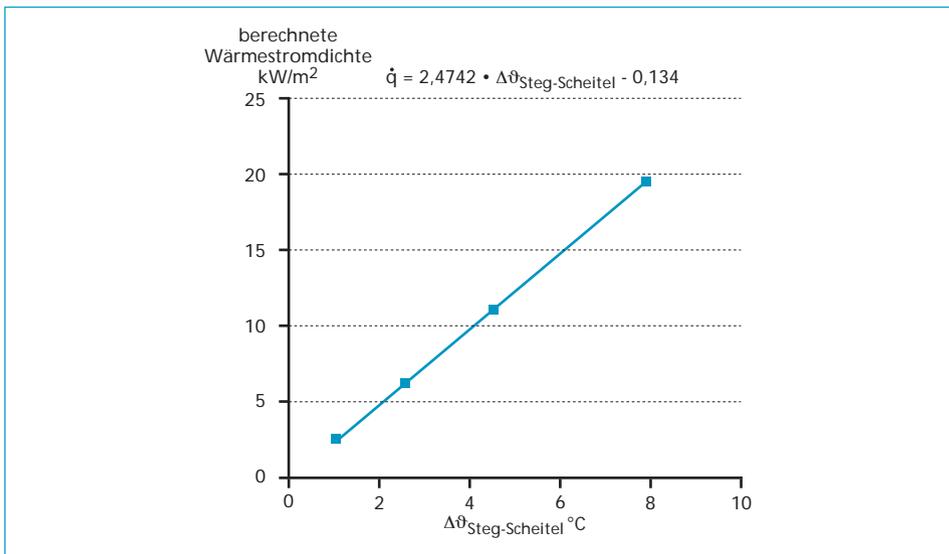


Bild 27: Systemkenngerade für eine JuSyS SL-Platte auf einer Membranwand mit 75 mm Teilung als Ergebnis der numerischen Simulation

Quelle: Beckmann, M.; Krüger, S.; Spiegel, W.: Charakterisierung und messtechnische Erfassung von betriebsspezifischen Wärmewiderständen an Membranverdampferwänden in Abfall- und Biomasseverbrennungsanlagen. In: Born, M. (Hrsg.) Dampferzeugerkorrosion. Verlag: SAXONIA Standortentwicklungs- und -verwaltungsgesellschaft mbH. SIDAF-Tagung Freiberg, 27.-28.10.2005, S. 273-288

<sup>3</sup> In den Membranrohren der Versuchsanlage herrscht eine Überlagerung von freier und erzwungener Konvektion. Im Verdampfer eines Dampferzeugers wird die Konvektion maßgeblich durch das turbulente Blasensieden in den Rohren beeinflusst.

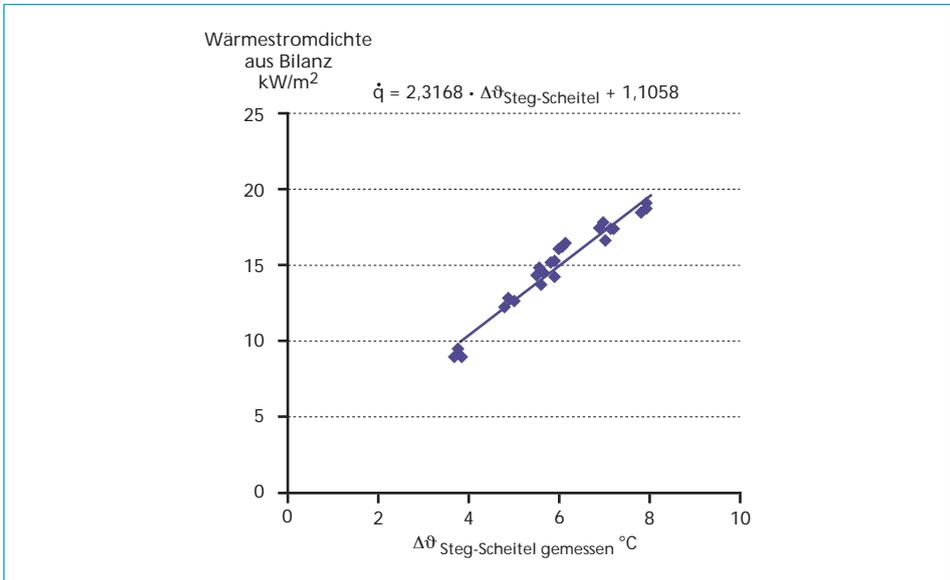


Bild 28: Systemkenngerade für eine JuSyS SL-Platte auf einer Membranwand mit 75 mm Teilung als Ergebnis der Bilanzierung

Quelle: Beckmann, M.; Krüger, S.; Spiegel, W.: Charakterisierung und messtechnische Erfassung von betriebsspezifischen Wärmewiderständen an Membranverdampferwänden in Abfall- und Biomasseverbrennungsanlagen. In: Born, M. (Hrsg.) Dampferzeugerkorrosion. Verlag: SAXONIA Standortentwicklungs- und -verwaltungsgesellschaft mbH. SIDAF-Tagung Freiberg, 27.-28.10.2005, S. 273-288

### *Kap. 3.5.*

## Optimierung des Wirkungsgrades von Abfallverbrennungsanlagen

Ein Wirkungsgrad beschreibt das Verhältnis zwischen Nutzen und Aufwand. Je nachdem was als Nutzen und Aufwand betrachtet wird, ergeben sich ganz unterschiedliche Wirkungsgrade. Bei der Beurteilung von Verfahren und Verfahrensketten ist es daher sehr wichtig, bestimmte Wirkungsgrade je nach den zugehörigen Bilanzgrenzen zu unterscheiden (z.B. [2, 10, 23, 55, 56, 63]).

Im Schrifttum findet sich eine große Anzahl von Beispielen, die Verbesserungen der Energieeffizienz von Abfallverbrennungsanlagen beschreiben. Eine Bewertung der Maßnahmen fällt jedoch oftmals schwer, da Angaben zu Bilanzkreisen, Bezugszuständen, Referenzsituationen usw. fehlen. Vor diesem Hintergrund sei an dieser Stelle auf die im Entwurf vorliegende VDI-Richtlinie VDI 3460 [23] verwiesen, die u.a. die Methode zur Bilanzierung von Abfallverbrennungsanlagen beschreibt. Es ist eine noch anstehende Arbeit, die verschiedenen, nachfolgend nur beispielhaft erwähnten Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz auf der Basis z.B. des Netto-Primärwirkungsgrades [58] zu bewerten.

Im Folgenden sei wie erwähnt beispielhaft auf verschiedene Möglichkeiten, die schematisch in Bild 29 aufgeführt sind, eingegangen.

Wirkungsvoll für Abfallverbrennungsanlagen ist zunächst die *Erhöhung der Abgabe der thermischen Energie*. Abfallverbrennungsanlagen haben in erster Linie eine Entsorgungsaufgabe, hinsichtlich der Abgabe insbesondere der thermischen Energie sind sie vom Nutzerverhalten abhängig [56].

Weiter ist häufig durch die *Einsparung von Primärenergie* ein hohes Potential zur Verbesserung gegeben. Hier lassen sich Maßnahmen wie die Substitution von Primärenergie in der Abgasreinigung durch selbst erzeugten Dampf [2, 47] oder auch die Rückgewinnung von Energie aus dem Abgas [2, 31, 33, 72] einordnen.

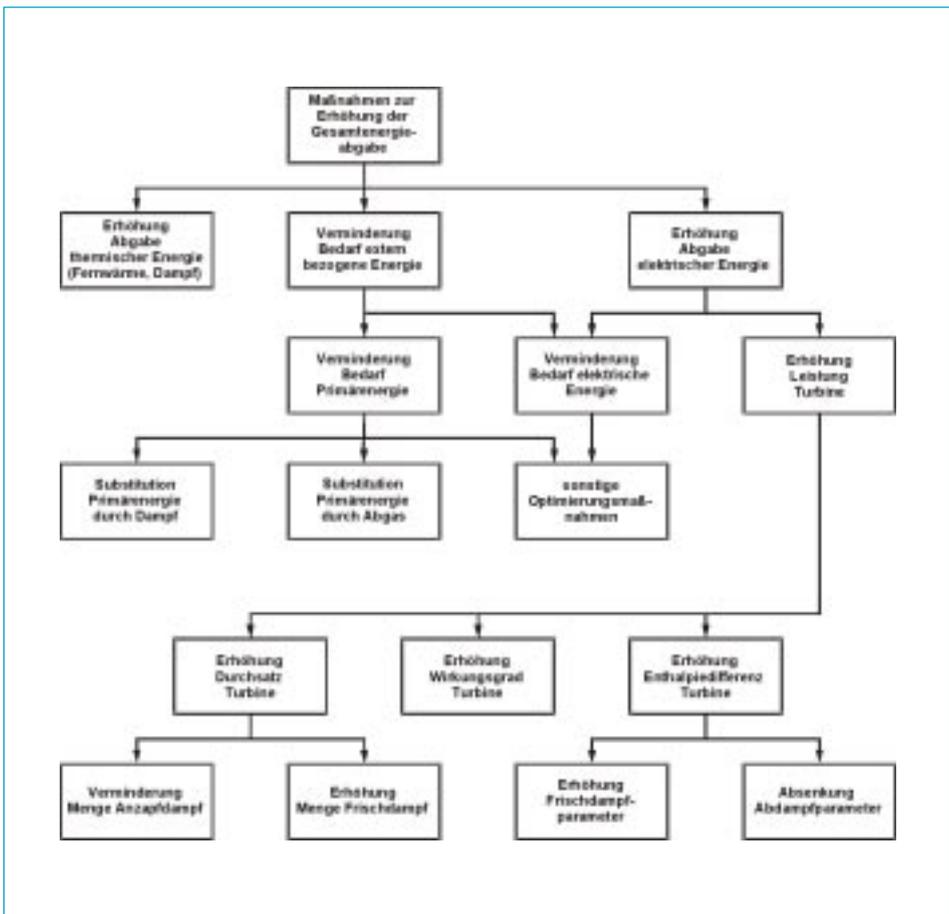


Bild 29: Möglichkeiten zur Erhöhung der Energieeffizienz

Quelle: Horeni, M.; Beckmann, M.: Investigation of Process Optimization Measures in MSWI Plants with an Online-Balancing Program. In: Wandrasz, J. W.; Piloni, K.: Paliwa z Odpadów – Tom V. Wydawnictwo HELION 2005, S. 55-59

# Inserat von Fernwärme

Maßnahmen zur Erhöhung der *Abgabe der elektrischen Energie* lassen sich grundsätzlich in die Verminderung des Eigenverbrauchs und die Erhöhung der Leistungsparameter der Anlage unterteilen. Den jeweils nachgeordneten Kategorien, wie Erhöhung der Frischdampfparameter [14], Erhöhung der Frischdampfmenge infolge einer höheren Verfügbarkeit [47], Verminderung der Menge Anzapfdampf [7, 52] usw. können jeweils aktuelle Beispiele zugeordnet werden. Auch die verschiedenen Maßnahmen zur Optimierung der Prozessführung, wie sie voranstehend z.T. beschrieben wurden – z.B. Absenken des Abgasmassenstromes und damit des Abgasverlustes bei dem Vergasungs-Nachverbrennungsverfahren –, tragen zur Erhöhung der Energieeffizienz bei. Allerdings muss hierzu eine quantitative Beurteilung noch erfolgen.

Eine wesentliche Grundlage für die Optimierung von Abfallverbrennungsanlagen sind Bilanzierungsrechnungen. Eine Unterstützung in dieser Hinsicht bietet u.a. die *Online-Bilanzierung* [7]. Das zugehörige Bilanzierungsprogramm ist modular aufgebaut, wodurch eine einfache Übertragung auf einzelne Abfallverbrennungsanlagen sowie auch auf sonstige Anlagen der Energieumwandlung und Stoffbehandlung möglich ist. Grundlage dafür sind vordefinierte Berechnungsmodule, z.B. für Feuerung, Luftvorwärmung, Gebläse, die laufend ergänzt werden. Die Module sind in einer zugehörigen Bibliothek<sup>4</sup> zusammengefasst. Die Anbindung des Programms unmittelbar an die Leittechnik einer Anlage ist mittels eines OPC-Servers<sup>5</sup> möglich. Mit diesem können die aktuell in der Anlage vorliegenden Messwerte ohne Umwege über eine Datenbank für die Bilanzierung verfügbar gemacht werden.

Durch die *Online-Bilanzierung* lassen sich für den Betrieb der Anlage wichtige Werte, z.B. Heizwert<sup>6</sup> des momentan verbrannten Abfalls, Energie- und Betriebsmitteleinsatz in einzelnen Abschnitten der Anlage, Wirkungsgrade, Dampfparameter usw. ermitteln. Darüber hinaus kann auf der Basis der Bilanzierung eine Validierung der Messstellen erfolgen. Im Zusammenhang mit der Untersuchung von Optimierungsmaßnahmen ergibt sich durch die *Online-Bilanzierung* der Vorteil einer unmittelbaren Kontrolle der Auswirkung und der Überwachung der Betriebssicherheit, wie das folgende Beispiel der Verringerung von Druck und Temperatur des Abdampfes an der Turbine – Absenkung Abdampfparameter in Bild 30 – deutlich machen soll.

Die Verringerung der Abdampfparameter an der Turbine (Druck, Temperatur) dient der Erhöhung der Enthalpiedifferenz zwischen eintretendem Frischdampf und austretendem Abdampf, wodurch spezifisch mehr technische Arbeit erzeugt werden kann. Dies wurde im Rahmen der hier beschriebenen Untersuchung dadurch erreicht, dass die Kühlleistung des Luftkondensators in Folge einer

<sup>4</sup> Auch in herkömmlichen Modellierungsprogrammen, z.B. für Großkraftwerke, werden einzelne Apparate vordefiniert und aus entsprechenden *Bibliotheken*, z.B. für den Wasserdampfkreislauf, wieder abgerufen.

<sup>5</sup> OPC...OLE (Object Linking and Embedding) for Process Control. Ein OPC-Server ist ein Hardware-Treiber, der es OPC-fähiger Standard-Software (OPC-Clients) ermöglicht, externe Geräte ohne zusätzlichen Programmieraufwand anzusprechen.

<sup>6</sup> Z.B. kann der Heizwert des momentan auf dem Rost verbrennenden Abfalls in die Feuerungsleistungsregelung eingebunden oder dem Führer der Krananlage als Hinweis für die Güte der Mischung des Abfalls im Bunker zur Verfügung gestellt werden.

Erhöhung der elektrischen Leistung des Kondensatorgebläses vergrößert wurde. Anlagenseitig ist die Optimierungsmaßnahme in erster Linie durch den zunehmenden Feuchtegehalt im Abdampf begrenzt, der durch den Turbinenhersteller als maximal zulässig vorgeschrieben wird (Verhinderung von Korrosion an der Turbinenbeschaukelung). Eine weitere Begrenzung stellt die Auslegung des Luftkondensators dar.

Wegen der komplexen Zusammenhänge zwischen einer erhöhten Zufuhr von elektrischer Energie zum Kondensatorgebläse und einer erhöhten Erzeugung von elektrischer Energie in der Turbine bei gleichzeitig höherem Aufwand für die Kondensatvorwärmung, und der Verbesserung des thermischen Wirkungsgrades des Speisewasser-Dampfkreislaufes insgesamt, lässt sich der Vorteil dieser Optimierungsmaßnahme nicht ohne weiteres abschätzen.

In Bild 30 sind die für den Untersuchungszeitraum berechneten Anlagenwirkungsgrade elektrisch und gesamt sowie die elektrische Leistung des Turbinengenerators dargestellt. Es zeigt sich, dass die Erhöhung der Leistung von 19,5 MW auf 23,5 MW eine deutliche Steigerung des elektrischen Wirkungsgrades von 13,5 % auf 16 % zur Folge hat. Diese Wirkungsgradsteigerung äußert sich unmittelbar in einer Erhöhung des Gesamtwirkungsgrades um ebenfalls etwa 3 %.<sup>7</sup>

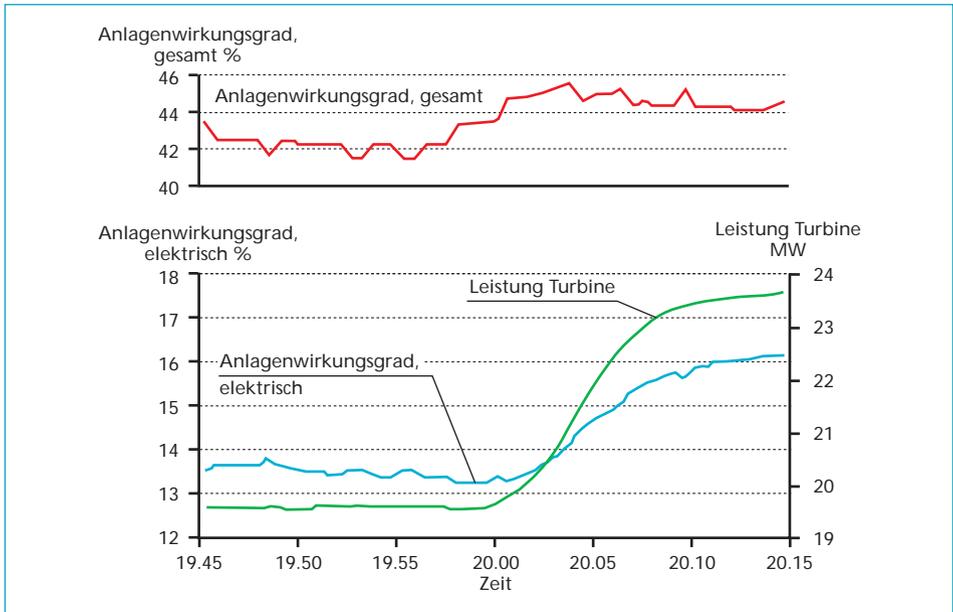


Bild 30: Berechnete Anlagenwirkungsgrade und elektrische Leistung des Turbinengenerators, Optimierungsmaßnahme *Absenkung Abdampfparameter*

Quelle: Beckmann, M.; Horeni, H.: Möglichkeiten zur Optimierung von Müllverbrennungsanlagen durch Einsatz eines Online-Bilanzierungsprogramms. In: VDI Wissensforum IWB GmbH (Hrsg.): 22. Deutscher Flammentag – Verbrennung und Feuerungen. Tagung Braunschweig, 21. und 22. September 2005. VDI-Berichte Nr. 1888, VDI Verlag GmbH Düsseldorf 2005, S. 643-652

<sup>7</sup> Der sprunghafte Verlauf des Gesamtwirkungsgrades resultiert aus dem periodischen Ausfall der Messwerte für die Auskopplung der Fernwärme in diesem Zeitraum.

Bild 31 zeigt, dass durch die Wirkungsgradsteigerung gleichzeitig die spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen um etwa 30 kg CO<sub>2</sub> pro MWh elektrische Energie, d.h. um 17 % bezogen auf den Ausgangszustand vermindert werden. Die absoluten CO<sub>2</sub>-Emissionen sind mit etwa 51 bis 52 t/h annähernd konstant, da der Aufwand, d.h. die verbrannte Menge Abfall annähernd konstant geblieben ist. Dabei ist zu beachten, dass für diese Betrachtung der Gesamtmassestrom des emittierten CO<sub>2</sub> (alle Ofenlinien, neben der Erzeugung von elektrischer Energie auch Abgabe von thermischer Energie) herangezogen wurde.

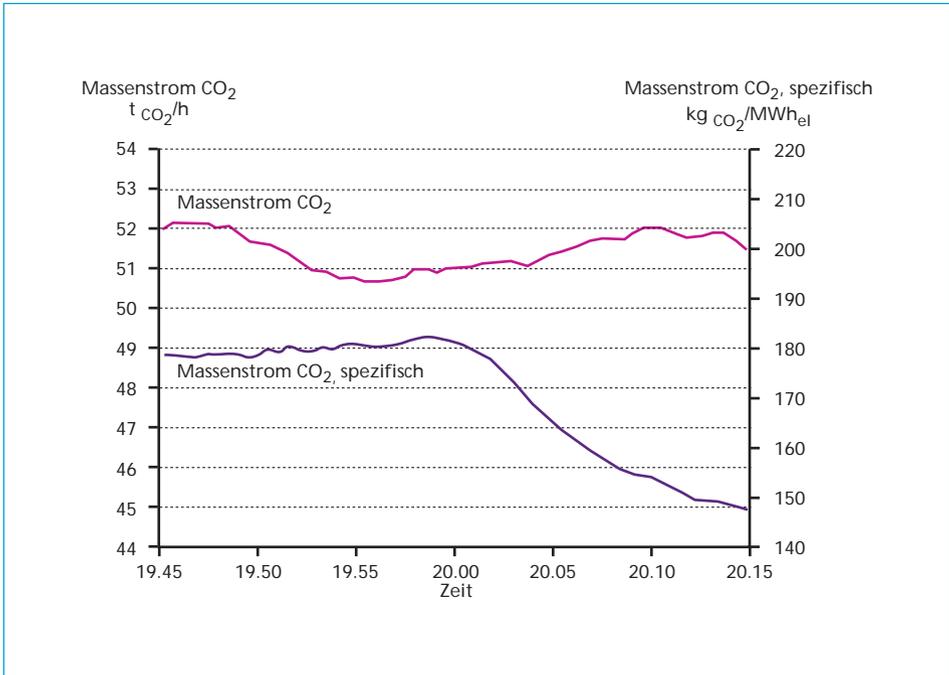


Bild 31: Berechneter Massenstrom CO<sub>2</sub>, absolut und spezifisch, Optimierungsmaßnahme *Absenkung Abdampfparameter*

Quelle: Beckmann, M.; Horeni, H.: Möglichkeiten zur Optimierung von Müllverbrennungsanlagen durch Einsatz eines Online-Bilanzierungsprogramms. In: VDI Wissensforum IWB GmbH (Hrsg.): 22. Deutscher Flammentag – Verbrennung und Feuerungen. Tagung Braunschweig, 21. und 22. September 2005. VDI-Berichte Nr. 1888, VDI Verlag GmbH Düsseldorf 2005, S. 643-652

Allerdings verdoppelt sich der Feuchtegehalt im Abdampf in diesem Zeitraum von etwa 6 auf 12 Ma.-%. Die zugelassenen Feuchtegehalte im Abdampf bewegen sich i.d.R. im Bereich von 5 bis 10 %. Hier sollte geprüft werden, welche finanziellen Auswirkungen durch einen erhöhten Feuchtegehalt im Hinblick auf die höhere Korrosion der Beschaufelung der Turbinenendstufe entstehen, und inwieweit diese durch die höheren Erlöse für die erzeugte elektrische Energie kompensiert werden.

*Kap. 4.*

## Zusammenfassung

Das Wissen über den Verbrennungsprozess von Abfällen in Rostsystemen ist sehr umfangreich. Jahrzehntelange Erfahrungen aus dem Betrieb, Untersuchungen an Praxisanlagen, Pilotanlagen und zugehörige Untersuchungen unter definierten Randbedingungen an Technikums- und Laboranlagen, die Weiterentwicklung von Messtechnik und Untersuchungsmethoden sowie von mathematischen Berechnungsmethoden und Modellen haben dazu geführt, dass Schadstoffbildungs- und -abbaumechanismen z.B. zur Stickoxidminderung, Dioxinabbau, Schwermetallfreisetzung oder -einbindung in die Asche, Maßnahmen zur Effizienzsteigerung (Wirkungsgrad und Verfügbarkeit), Korrosionsmechanismen usw. heute in Einzelheiten bereits sehr fundiert untersucht vorliegen.

Die Abfallverbrennungsanlagen verfügen über hoch entwickelte Anlagentechnik, sie stellen ein wichtiges Instrument der Abfallwirtschaft, mit dem anerkanntem Effekt der Ressourcenschonung dar.

Dennoch gibt es, ähnlich wie in anderen Bereichen der Technik, die bereits auf eine sehr lange Entwicklungszeit zurück blicken – z.B. Verbrennungsmotoren – bei Rostsystemen noch ein erhebliches Entwicklungspotential. Dieses ist insbesondere im Zusammenspiel der verschiedenen Maßnahmen zu sehen.

Was ist die optimale Anlage? Diese Frage ist nicht einfach zu beantworten, denn bisher sind unter den Aspekten Schadstoffminderung, Energieeffizienz und Verfügbarkeit die Untersuchungen weitgehend getrennt voneinander durchgeführt worden. So zeigen sich auch bei der Darstellung der Maßnahmen zur Optimierung teilweise ganz offensichtliche Widersprüche.

Verbesserungen der Aschequalität scheinen zu Lasten der Korrosion und damit der Verfügbarkeit zu gehen.

Die Absenkung von Schadstoffemissionen durch Primärmaßnahmen und die Steigerung der Energieeffizienz durch die Vergasungs-Nachverbrennungsfahrweise stellt einerseits einen deutlichen Vorteil gegenüber der konventionellen Prozessführung dar. Fragen zur Korrosion und Verfügbarkeit sind jedoch noch zu beantworten.

Wenig ist bislang zum Zusammenspiel zwischen Energieeffizienz und Verfügbarkeit bekannt.

Weiterer Untersuchungsbedarf besteht auch hinsichtlich der Frage, welcher Netto-Nutzen mit den einzelnen Maßnahmen zur Erhöhung der Energieabgabe tatsächlich verbunden ist.

Eine wichtige, vor uns liegende Aufgabe besteht somit darin, neben der weiteren Untersuchung von Einzelmaßnahmen, Mechanismen usw., das Zusammenwirken der Maßnahmen zu verstehen und im Hinblick auf die optimale Anlage umzusetzen. Dabei können mathematische Modelle, Betriebsführungsprogramme

usw. eine wertvolle Unterstützung leisten, d.h. auch auf dem Gebiet der mathematischen Modellierung besteht nach wie vor Interesse. Die Anwendung der Modelle ist dabei nicht nur vordergründig z.B. für die Regelung der Prozesse, sondern auch im Hinblick auf das Verständnis von Vorgängen zu sehen.

Auch die weitere Entwicklung von Mess- und Analysenverfahren, so z.B. Korrosions- und Belagssonden, Online-Analytik von Spurenkomponenten, Wärmestromdichte-Sensoren usw., wird wichtige Impulse zur Optimierung der Anlagentechnik beisteuern und damit in den Entwicklungsprozess eingebunden sein.

Nicht zuletzt gilt es jedoch, diese Erkenntnisse nicht nur im eigenen Kreis zu diskutieren, sondern nach außen zu tragen, mit dem Ziel, durch die ingenieurtechnischen Verbesserungen und die sich daraus ergebenden ökologischen und ökonomischen Effekte in der Öffentlichkeit eine weitere Akzeptanzerhöhung zu erlangen.

## *Kap. 5.*

### **Literatur**

- [1] Albrecht, J.; Loeffler, J.; Reimert, R.: Restabfallvergasung mit integrierter Aschever schlackung. GVC-Symposium Abfallwirtschaft Herausforderung und Chance, Würzburg, 17.-19. Oktober 1994
- [2] Barth, E.: Optimierung in der Abfallverbrennung – Beispiel Abfallheizkraftwerk Augsburg. In: Thomé-Kozmiensky, K. J. (Hrsg.): Optimierung der Abfallverbrennung 1. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2004, S. 257-276
- [3] Beckmann, M.: Mathematische Modellierung und Versuche zur Prozessführung bei der Verbrennung und Vergasung in Rostsystemen zur thermischen Rückstandsbehandlung. CUTEC-Schriftenreihe, 1995
- [4] Beckmann, M.; Davidovic, M.; Gehrmann, H.-J.; Scholz, R.: Prozeßoptimierung der Verbrennung und Vergasung von Abfällen in Rostsystemen. VDI Berichte 1492 (1999), S. 361-368
- [5] Beckmann, M.; Davidovic, M.; Wiese, C.; Busch, M.; Peppler, E.; Schmidt, W.: Mehrstufige Vergasung von Restmüll auf einem Rost. Abschlußbericht über ein von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) unter dem Aktenzeichen 01746 gefördertes Forschungsprojekt, 1999
- [6] Beckmann, M.; Griebel, H.; Scholz, R.: Einfluß von Temperatur, Durchmischung und Verweilzeit auf den Abbau organischer Spurenstoffe bei der thermischen Behandlung von Abfallholz. DGMK Tagungsbericht 9802, 1998, ISBN 3-931850-40-4
- [7] Beckmann, M.; Horeni, H.: Möglichkeiten zur Optimierung von Müllverbrennungsanlagen durch Einsatz eines Online-Bilanzierungsprogramms. erschienen in: VDI Wissensforum IWB GmbH (Hrsg.): 22. Deutscher Flammentag – Verbrennung und Feuerungen. Tagung Braunschweig, 21. und 22. September 2005. VDI-Berichte Nr. 1888, VDI Verlag GmbH Düsseldorf 2005. ISBN: 3-18-091888-8, S. 643-652
- [8] Beckmann, M.; Krüger, S.; Spiegel, W.: Charakterisierung und messtechnische Erfassung von betriebsspezifischen Wärmewiderständen an Membranverdampferwänden in Abfall- und Biomasseverbrennungsanlagen. erschienen in: Born, M. (Hrsg.) Dampferzeugerkorrosion. Verlag: SAXONIA Standortentwicklungs- und -verwaltungsgesellschaft mbH. SIDAF-Tagung Freiberg, 27.-28.10.2005. ISBN: 3-934409-27-X, S. 273-288

- [9] Beckmann, M.; Scholz, R.: Residence Time Behaviour of Solid Material at Grate Systems. Proc. INFUB 2000, 5th European Conference on Industrial Furnaces and Boilers, Porto, Portugal, 11.-14.04.2000
- [10] Beckmann, M.; Scholz, R.: Energetische Bewertung der Substitution von Brennstoffen durch Ersatzbrennstoffe aus Abfällen bei Hochtemperaturprozessen zur Stoffbehandlung, Teil 1 und Teil 2, ZKG International, 52 (1999) Nr. 6, S. 287-303 und Nr. 8, S. 411-419
- [11] Beckmann, M.; Scholz, R.: Simplified Mathematical Model of Combustion in Stoker Systems. Proceedings 3rd European Conference on Industrial Furnaces and Boilers, Lisbon, Portugal, 18.-21. 04. 1995, ISBN 972-8034-02-4, Vol. II, pp. 61-70
- [12] Beckmann, M.; Scholz, R.; Wiese, C.; Davidovic, M.: Optimization of Gasification of Waste Materials in Grate Systems. 1997 International Conference on Incineration & Thermal Treatment Technologies, San Fransisco-Oakland Bay, California, 12.-16. May, 1997
- [13] Beckmann, M.; Zimmermann, R.: Gasification – Post-Combustion of Waste Materials; Influencing Parameters and On-line Monitoring of Organic Substances. AICHe-PTF Topical Meeting Advanced Technologies for Particle Processing, Miami Beach, Florida, USA, 15.-20. November 1998, ISBN 0-8169-9859-0, Vol. II, S. 661-671
- [14] Berlo, van M.; Wandschneider, J.: High Efficiency Waste-to-Energy Concept. published in Ludwig, Ch.; Hellweg, S.; Stucki, S.: Municipal Solid Waste Management – Strategies and Technologies for Sustainable Solutions, p. 196-204. Springer-Verlag, 2002. ISBN 3-540-44100-X, p. 184-196
- [15] Berwein, H.-J.: Siemens Schwel-Brenn-Verfahren – Thermische Reaktionsabläufe. In: Abfallwirtschaft Stoffkreisläufe, Terra Tec '95, B.G. Teubner Verlagsgesellschaft, Leipzig, 1995
- [16] Biollaz, S.; Ludwig, C.; Beckmann, M.; Davidovic, M.; Jentsch, T.: Volatility of Zn and Cu in Waste Incineration: Radio-Tracer Experiments on a Pilot Incinerator. IT3 Conference, May 2000, USA
- [17] Born, M. (Hrsg.): Dampferzeugerkorrosion. Freiburg: Verlag SAXONIA Standortentwicklungs- und -verwaltungsgesellschaft mbH 2005, ISBN 3-934409-27-X
- [18] Carlowitz, O.; Jeschar, R.: Entwicklung eines variablen Drallbrennkammersystems zur Erzeugung hoher Energieumsetzungsdichten. Brennstoff-Wärme-Kraft (BWK) 32 (1980)
- [19] Christmann, A.; Quitteck, G.: Die DBA-Gleichstromfeuerung mit Walzenrost. VDI-Berichte 1192, VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf, 1995
- [20] Dritte Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz; Technische Anleitung zur Verwertung, Behandlung und sonstiger Entsorgung von Siedlungsabfällen (TA Siedlungsabfall), vom 14.05.1993
- [21] Dryer, F.L.; Glasman, I.: 14th International Symposion On Combustion. Combustion Institute Pittsburgh, 1973
- [22] Emissionsminderung bei Müllverbrennungsanlagen. Endbericht eines Verbundvorhabens zwischen Firma MARTIN GmbH, München, NOELL GmbH, Würzburg, L.&C. Steinmüller GmbH, Gummersbach, Projektträger UBA-Berlin, 1994
- [23] Emissionsminderung. Energieumwandlung bei der thermischen Abfallbehandlung. VDI-Richtlinien. VDI 3460, Blatt 2. Entwurf (2005-11-09)
- [24] Energos Deutschland: Dezentrale Heizkraftwerke für den Einsatz von Sekundär-brennstoffen. Werbebroschüre 2002 und [www.energos-deutschland.de](http://www.energos-deutschland.de)
- [25] Englmaier, L.: Primäre und sekundäre Korrosionsschutzmaßnahmen im MHKW Burgkirchen. Automatische Feuerleistungsregelung und Recladding. In: Born, M. (Hrsg.): Dampferzeugerkorrosion. Saxonia Standortentwicklungs- und -verwaltungsgesellschaft mbH. Freiburg 2005. ISBN 3-934409-27-X, S. 359-383

- [26] Göhler, P.; Schingnitz, M.: Stoff- und Wärmebilanzen bei der Abfallverwertung nach dem NOELL-Konversionsverfahren. In: Energie und Umwelt '95 mit Energieverbrauchs-minderung bei Gebäuden, TU Bergakademie Freiberg, 22.-23. März 1995
- [27] Gohlke, O.; Busch, M.; Horn, J.; Martin, J.: Nachhaltige Abfallbehandlung mit dem SyncomPlus-Verfahren. In: Thomé-Kozmiensky, K. J. (Hrsg.): Optimierungspotential der Abfallverbrennung. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2003, S. 211-223
- [28] Horeni, M.; Beckmann, M.: Investigation of Process Optimization Measures in MSWI Plants with an Online-Balancing Program. In: Wandrasz, J. W.; Piloni, K.: Paliwa z Odpadów – Tom V. Wydawnictwo HELION 2005, ISBN 83-246-0417-0, p. 55-59
- [29] Hunsinger, H.; Merz, A.; Vogg, H.: Beeinflussung der Schlackequalität bei der Rostverbrennung von Hausmüll. GVC-Symposium Abfallwirtschaft Herausforderung und Chance, Würzburg, 17.-19. Oktober 1994
- [30] Hunsinger, H.; Seifert, H.: Einfluss der Verbrennungsluftführung auf den Feststoffabbrand und auf das Schadstoffverhalten bei der Hausmüllverbrennung auf dem Rost. In: Thomé-Kozmiensky, K. J. (Hrsg.): Optimierungspotential der Abfallverbrennung. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2003, S. 135-158
- [31] Kailbauer, F.; Krämer, S.; Priesmeier, U.: Schritte zur Wirkungsgradsteigerung bei MVA-Neuanlagen. In: Thomé-Kozmiensky, K. J. (Hrsg.): Optimierung der Abfallverbrennung 1. Neuruppin: TK Verlag Thomé-Kozmiensky, 2004, S. 237-246
- [32] Keller, R.: Primärseitige  $\text{NO}_x$ -Minderung mittels Luftstufung bei der Holzverbrennung. Brennstoff-Wärme-Kraft (BWK) 46(1994) 11/12
- [33] Kins, M.; Zwahr, H.: Perspektiven für die Verbesserung des Nutzungsgrades von Müllverbrennungsanlagen. In: Thomé-Kozmiensky, K. J. (Hrsg.): Optimierungspotential der Abfallverbrennung. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2003. S. 181-197
- [34] Klöppner, G.: Zur Kinetik der  $\text{NO}$ -Bildungsmechanismen in verschiedenen Reaktortypen am Beispiel der technischen Feuerung. Dissertation, TU Clausthal, 1991
- [35] Knörr, A.: Thermische Abfallbehandlung mit dem SYNCOM-Verfahren. VDI-Berichte 1192, VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf, 1995
- [36] Kolb, T.; Leuckel, W.:  $\text{NO}_x$ -Minderung durch 3-stufige Verbrennung – Einfluß von Stöchiometrie und Mischung in der Reaktionszone. 2. TECFLAM- Seminar, Stuttgart, 1988
- [37] Kolb, T.; Sybon, G.; Leuckel, W.: Reduzierung der  $\text{NO}_x$ -Bildung aus brennstoffgebundenem Stickstoff durch gestufte Verbrennungsführung. 4. TECFLAM- Seminar, Oktober 1990, Heidelberg, 1990
- [38] Kremer, H.; Schulz, W.: Reduzierung der  $\text{NO}_x$ -Emissionen von Kohlenstaubflammen durch Stufenverbrennung. VDI-Berichte Nr. 574, VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf, 1985
- [39] Lautenschlager, G.: Moderne Rostfeuerung für die thermische Abfallbehandlung. GVC-Symposium Abfallwirtschaft Herausforderung und Chance, Würzburg, 17.-19. Oktober 1994
- [40] Leuckel, W.: Swirl Intensities, Swirl Types and Energy Losses of Different Swirl Generating Devices. IFRF Ijmuiden, November 1967, G 02/a/16
- [41] Levenspiel, O.: Chemical Reaction Engineering. John Wiley and Sons. New York, 1972
- [42] Malek, C.; Scholz, R.; Jeschar, R.: Vereinfachte Modellierung der Stickstoffoxidbildung unter gleichzeitiger Berücksichtigung des Ausbrandes bei einer Staubfeuerung. VDI-Berichte Nr. 1090, VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf, 1993
- [43] Martin, J.; Busch, M.; Horn, J.; Rampp, F.: Entwicklung einer kamerageführten Feuerungsregelung zur primärseitigen Schadstoffreduzierung. VDI-Berichte 1033, VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf, 1993

- [44] Martin, M.: Moderne Abfallverbrennung; Abfallwirtschafts-Journal 0/88 (1988), S. 7-11.
- [45] Merz, A.; Seifert, H.: Verweilzeit von Verbrennungsgasen. Abschlussbericht zum Forschungsprojekt VGB-Nr. 194, November 2000
- [46] Merz, A.; Seifert, H.; Prozesskontrolle bei Abfallverbrennungsanlagen. Abschlussbericht zum Forschungsprojekt VGB-Nr. 173, 1999
- [47] Metschke, J.: Kostenoptimierung bei thermischen Abfallbehandlungsanlagen. In: Thomé-Kozmiensky, K. J.; Beckmann, M. (Hrsg.): Optimierung der Abfallverbrennung 2. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2005, S. 301-322
- [48] Metschke, J.; Spiegel, W.: Systematisierung und Bewertung von verfügbaren Maßnahmen zur Korrosionsminderung in der betrieblichen Praxis von MVA mittels partikelförmiger Rauchgasbestandteile. Endbericht EU 22, 12/2004, im Auftrag des Bayerischen Staatsministeriums für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz unter Beteiligung des Europäischen Fonds für Regionale Entwicklung (EFRE), verfügbar unter [www.chemin.de](http://www.chemin.de)
- [49] Neukirchen, B.; Schirmer, U. et al.: Auswirkungen der 17. BImSchV auf die thermische Abfallbehandlung. VGB Technisch-wissenschaftliche Berichte Feuerungen 1999, S.5. VGB Kraftwerkstechnik Essen
- [50] Périlleux, M.; Creten, G.; Kümmel, J.: Improving combustion and boiler performance of new and existing EFW plants with the seghers-ibb-prism. 6th EUROPEAN CONFERENCE on INDUSTRIAL FURNACES and BOILERS INFUB Estoril - Lisbon - Portugal, 02.-05. April 2002
- [51] Primärseitige Stickoxidminderung als Beispiel für die Optimierung des Verbrennungsvorgangs in Abfallverbrennungsanlagen. Abschlussbericht Forschungszentrum Karlsruhe, HGF Projekt, 1.7.1999 bis 31.12.2002
- [52] Reil, E.; Angerer, Th.; Lorber, K.: Bestimmung von Indikatoren zur Effizienzsteigerung des Betriebes der MVA Spittelau. In: Thomé-Kozmiensky, K. J. (Hrsg.): Optimierungspotential der Abfallverbrennung. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2003, S. 161-180
- [53] Schäfers, W.; Limper, K.: Fortschrittliche Feuerungsleistungsregelung durch Einbeziehung der Fuzzy-Logik und der IR Thermografie. In: Thomé-Kozmiensky, K. J. (Hrsg.): Reaktoren zur thermischen Abfallbehandlung, EF-Verlag für Energie- und Umwelttechnik GmbH, Berlin, 1993
- [54] Scholz, R.; Beckmann, M.: Möglichkeiten der Verbrennungsführung bei Restmüll in Rostfeuerungen. VDI-Berichte Nr. 895, VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf, 1991
- [55] Scholz, R.; Beckmann, M.: Substitution von Brennstoffen und Rohstoffen durch Abfälle in Hochtemperaturprozessen; In: Stoffliche und thermische Verwertung von Abfällen in industriellen Hochtemperaturprozessen, 11. DVV-Kolloquium, Braunschweig, 1998, S. 21-46
- [56] Scholz, R.; Beckmann, M.; Harnaut, T.; Horení, M.: Zur systematischen Bewertung der Energieumwandlung bei der thermischen Abfallbehandlung. In: Thomé-Kozmiensky, K. J. (Hrsg.): Optimierung der Abfallverbrennung 1. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2004, S. 203-235
- [57] Scholz, R.; Beckmann, M.; Horn, J.; Busch, M.: Thermische Behandlung von stückigen Rückständen – Möglichkeiten der Prozeßführung im Hinblick auf Entsorgung oder Wertstoffrückgewinnung. Brennstoff-Wärme-Kraft (BWK)/TÜ/Umwelt-Special 44 (1992) Nr. 10
- [58] Scholz, R.; Beckmann, M.; Schulenburg, F.: Abfallbehandlung in thermischen Verfahren. B.G. Teubner, Stuttgart, Leipzig, Wiesbaden. 2001. ISBN 3-519-00402-X
- [59] Scholz, R.; Beckmann, M.; Schulenburg, F.: Entwicklungsmöglichkeiten der Prozessführung bei Rostsystemen zur thermischen Abfallbehandlung. Proceedings: Die thermische Abfallverwertung der Zukunft, FDBR, 23. 02. 1996, Rostock

- [60] Scholz, R.; Jeschar, R.; Carlowitz, O.: Zur Thermodynamik von Freistrahlen. *Gas-Wärme-International* 33 (1984) 1
- [61] Scholz, R.; Jeschar, R.; Schopf, N.; Klöppner, G.: Prozeßführung und Verfahrenstechnik zur schadstoffarmen Verbrennung von Abfällen; *Chemie-Ingenieur-Technik* 62 (1990), Nr. 11, S. 877-887
- [62] Scholz, R.; Schopf, N.: General Design Concept for Combustion Processes for Waste Fuels and Some Test Results of Pilot Plants. 1989 Incineration Conference, Knoxville, USA, 1989
- [63] Schulenburg, F.; Scholz, R.: Energetische Bilanzierung von Verfahrenslinien aus mechanisch-biologischer und nachgeschalteter thermischer Abfallbehandlung; In: *Stoffstromspezifische Abfallbehandlung im Hinblick auf thermische Verfahren*, 13. ZAF-Seminar, Braunschweig, 1998, S. 15-52
- [64] Spiegel, W.; Herzog, Th.; Magel, G.; Müller, W.; Schmidl, W.: Belagsgeschichten. Vortrag am 2. Diskussionsforum *Rauchgasseitige Dampferzeugerkorrosion* in Freiberg, 2005, verfügbar unter [www.chemin.de](http://www.chemin.de)
- [65] Spiegel, W.; Herzog, Th.; Magel, G.; Müller, W.; Schmidl, W.: Dynamische chlorinduzierte Hochtemperaturkorrosion von Verdampfer- und Überhitzerbauteilen aufgrund spezieller Belagsentwicklungen: Häufiger Befund in Abfall- und Biomasse-gefeuerten Dampferzeugern. *VGB PowerTech*, Heft 1/2, 2005, S. 89-97
- [66] Stahlberg, R.; Feuerrigel, U.: Thermoselect – Energie und Rohstoffgewinnung. In: *Abfallwirtschaft Stoffkreisläufe*, Terra Tec ,95, B.G. Teubner Verlagsgesellschaft, Leipzig, 1995
- [67] Starley, G. P.; Bradshaw, F. W.; Carrel, C. S.; Pershing, D. W.; Martin, G. B.: The Influence of Bed-Region Stoichiometry on Nitric Oxide Formation in Fixed-Bed Coal Combustion. *Combustion and Flame* 59: 197-211 (1985)
- [68] Thomé, E.; Dittrich, R.; Gazinski, A.; Gehr, D.: Optimierung einer Müllfeuerung durch modulare Feuerungsleistungsregelung. In: Thomé-Kozmiensky, K. J. (Hrsg.): *Optimierungspotential der Abfallverbrennung*. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2003, S. 199-210
- [69] Van Kessel, L.B.M.; Leskens, M.; Brem, G.: On-line calorific value sensor and validation of dynamic models applied to municipal solid waste combustion. 3<sup>rd</sup> Int. Symp. on Incineration and Flue Gas Treatment Technologies, Brussels, 2001
- [70] Vehlow, J.: Verwertung von Reststoffen aus der Abfallverbrennung; *Brennstoff-Wärme-Kraft (BWK)/TÜ/Umwelt* (1996), Nr. 10, S. 10-13
- [71] Vehlow, J.; Hunsinger, H.: Einfluss verschiedener Abfallmenüs auf die Metallfreisetzung bei der Verbrennung auf dem Rost. BAT- und preisorientierte Dioxin/Gesamtemissionsminimierungstechniken 2000. VDI Bildungswerk Seminar 43-59-12 am 14.09.-15.09.2000 in München
- [72] Zwahr, H.: Kontinuierliches Monitoring der Energieflüsse in einer MVA. erschienen in: *VDI-Wissensforum* (Hrsg.): BAT- und preisorientierte Dioxin-/Rauchgasreinigungstechniken 2002 für Verbrennungs- und Feuerungsanlagen. VDI-Seminar 435914, 19./20. September München