

# VERGASUNG VON RESTABFALL AUF ROSTEN

Scholz, R.<sup>1)</sup>; Beckmann, M.<sup>2)</sup>; Davidovic, M.<sup>2)</sup>; Busch, M.<sup>3)</sup>; Schmidt, W.<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup> Institut für Energieverfahrenstechnik und Brennstofftechnik, TU Clausthal

<sup>2)</sup> Clausthaler Umwelttechnik-Institut GmbH (CUTEC-Institut GmbH)

<sup>3)</sup> MARTIN GmbH für Umwelt- und Energietechnik, München

## INHALTSVERZEICHNIS

---

1 EINLEITUNG .....	2
2 PROZESSFÜHRUNG IN ROSTSYSTEMEN .....	3
3 VERGASUNGS-NACHVERBRENNUNGSKONZEPT .....	4
3.1 ALLGEMEINES .....	4
3.2 PILOTANLAGEN .....	5
3.3 VERGASUNG AUF DEM ROST .....	6
3.4 EIGENSTÄNDIGE, GETRENNTE NACHVERBRENNUNG DER BRENNGASE .....	8
4 DEMONSTRATIONSANLAGE .....	9
4.1 BASISDATEN .....	10
4.2 ANLAGENTECHNIK .....	10
4.3 STANDORT .....	12
4.4 FORSCHUNGSVORHABEN .....	12
5 ZUSAMMENFASSUNG .....	13
6 SYMBOLVERZEICHNIS .....	14
7 SCHRIFTTUM .....	15
8 BILDER UND TABELLEN .....	17

# VERGASUNG VON RESTABFALL AUF ROSTEN

Scholz, R.<sup>1)</sup>; Beckmann, M.<sup>2)</sup>; Davidovic, M.<sup>2)</sup>; Busch, M.<sup>3)</sup>; Schmidt, W.<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup> Institut für Energieverfahrenstechnik und Brennstofftechnik, TU Clausthal

<sup>2)</sup> Clausthaler Umwelttechnik-Institut GmbH (CUTECH-Institut GmbH)

<sup>3)</sup> MARTIN GmbH für Umwelt- und Energietechnik, München

## INHALTSVERZEICHNIS

<b>1 EINLEITUNG</b> .....	<b>2</b>
<b>2 PROZESSFÜHRUNG IN ROSTSYSTEMEN</b> .....	<b>3</b>
<b>3 VERGASUNGS-NACHVERBRENNUNGSKONZEPT</b> .....	<b>4</b>
3.1 ALLGEMEINES .....	4
3.2 PILOTANLAGEN .....	5
3.3 VERGASUNG AUF DEM ROST .....	6
3.4 EIGENSTÄNDIGE, GETRENNTE NACHVERBRENNUNG DER BRENNGASE .....	8
<b>4 DEMONSTRATIONSANLAGE</b> .....	<b>9</b>
4.1 BASISDATEN .....	10
4.2 ANLAGENTECHNIK .....	10
4.3 STANDORT .....	12
4.4 FORSCHUNGSVORHABEN .....	12
<b>5 ZUSAMMENFASSUNG</b> .....	<b>13</b>
<b>6 SYMBOLVERZEICHNIS</b> .....	<b>14</b>
<b>7 SCHRIFTTUM</b> .....	<b>15</b>
<b>8 BILDER UND TABELLEN</b> .....	<b>17</b>

## 1 EINLEITUNG

---

Im Bereich der thermischen Behandlung von Hausmüll und hausmüllähnlichen Gewerbeabfällen 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 Pyrolysekoks (Bild 1)

aufteilen.

Rostsysteme werden überwiegend bei den „klassischen“ Verfahren eingesetzt und stellen eine lang erprobte und bewährte Technik dar. In den letzten Jahren wurde bei den „klassischen“ Verfahren insbesondere die Abgasreinigungstechnik (sog. Sekundärmaßnahmen) weiterentwickelt und damit der Aufwand der thermischen Abfallbehandlung wesentlich erhöht. Die entsprechend dem Stand der Technik ausgerüsteten Anlagen erfüllen die gesetzlich vorgeschriebenen Grenzwerte für das Einleiten bzw. Deponieren von Schadstoffen in Luft, Wasser und Boden.

Gegenwärtig liegt der Schwerpunkt auf der Entwicklung, Modellierung und Optimierung der Prozeßführung (sog. 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) zu verkleinern,
- die Energienutzung zu verbessern und
- die Reststoffeigenschaften zu beeinflussen.

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 Feuerraumgestaltung [1,2], Abgasrückführung [3,4], Sauerstoffanreicherung der Primärluft [5], wassergekühlte Rostelemente [6], Weiterentwicklung der Regelung (z.B. IR-Kamera) [7,8] usw..

Darüber hinaus werden im Pilotmaßstab für künftige Entwicklungen auch neue, veränderte Prozeßführungen mit Rostsystemen, wie z.B.:

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

erprobt [9]. Die mit den vorstehend genannten Zielstellungen angestrebten Verbesserungen treten dabei noch deutlicher hervor.

Insbesondere bei Einsatz von überwiegend homogenen Brennstoffen – wie z.B. Biomasse, die als regenerativer Energieträger in Zukunft immer mehr an Bedeutung gewinnen wird – bietet

die Vergasung mit nachgeschalteter eigenständiger Verbrennung der dabei erzeugten Gase eine Möglichkeit, preiswerte Anlagen kleinerer Leistung mit gleichbleibender Qualität der Emissionswerte wirtschaftlich betreiben zu können. Diese Forderung des heutigen Marktes läßt sich für Anlagen mit geringen Kapazitäten in erster Linie durch Einsparungen bei der sonst aufwendigen Abgasreinigung erfüllen. Dazu müssen entsprechende Primärmaßnahmen zur Senkung der Abgasmassen- und Schadstoffströme entwickelt und umgesetzt werden. Bei Einsatz von Biomasse als Brennstoff sollten darüber hinaus aus wirtschaftlichen Erwägungen auch kontaminierte Althölzer mitverbrannt werden können.

Im folgenden werden zunächst kurz allgemeine Gesichtspunkte der Prozeßführung in Rostsystemen und davon abgeleitet der mehrstufigen Prozeßführung des Vergasungs-Nachverbrennungsverfahrens erläutert. Danach wird anhand von Versuchsergebnissen näher auf den Vergasungsprozeß auf dem Rost eingegangen. Im Vordergrund stehen dabei insbesondere die Beeinflussung der erzeugten Brenngaszusammensetzung in Abhängigkeit der Luftstufung entlang des Rostweges, der Glühverlust der verbleibenden Reststoffe, die Freisetzung von Schwermetallen und der Flugstaubastrag. Im Zusammenhang mit der getrennten Nachverbrennung der im Rostprozeß erzeugten Brenngase wird weiter auf die Möglichkeit einer Luftstufung im Hinblick auf die Minimierung von  $\text{NO}_x$ -Emissionen bei gleichzeitig niedrigen CO-Emissionen eingegangen. Abschließend erfolgt die Vorstellung eines laufenden Forschungsvorhabens zur Erprobung des Vergasungs-Nachverbrennungsverfahrens im Dauerbetrieb an einer Demonstrationsanlage im industriellen Maßstab.

## 2 PROZESSFÜHRUNG IN ROSTSYSTEMEN

Im Sinne der Aufteilung in Bild 1 kann die „klassische“ Restmüllverbrennung als ein Verbrennungs-Nachverbrennungskonzept eingeordnet werden. 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.

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

- Trocknung,
- Entgasung,
- Vergasung und
- Restausbrand

aufteilen (Bild 2). 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.  $\lambda = 1,3$ ) führt.

Bei Rostsystemen sind sehr vielfältige Möglichkeiten zur Steuerung der maßgeblichen 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.

Im Zusammenhang mit dem Nachverbrennungsprozeß wird auf folgende Anforderungen hinsichtlich der Haupteinflußgrößen und der zugehörigen Steuerungsmöglichkeiten hingewiesen (Bild 4):

- Vermischung bzw. Reaktorverhalten,
- Verweilzeit,
- Sauerstoffkonzentration und
- Temperaturniveau bei Vermeidung von Quencheffekten an „kalten“ Wandoberflächen.

Die Umsetzung dieser Aufgaben in der Praxis kann in dem hier gesteckten Rahmen nicht näher ausgeführt werden. Näheres ist dem Schrifttum [18, 20, 21, 22, 28] zu entnehmen.

## 3 VERGASUNGS-NACHVERBRENNUNGSKONZEPT

### 3.1 ALLGEMEINES

Die bei Rostsystemen vorhandenen Möglichkeiten zur Steuerung der Einflußgrößen (Bild 3) können insbesondere dann wirkungsvoll im Sinne von Primärmaßnahmen eingesetzt werden, wenn man im Vergleich zu der derzeit üblichen klassischen Prozeßführung die Verfahrensschritte

- Feststoffumsatz auf dem Rost,
- Nachverbrennung der im Rostprozeß erzeugten Gase und
- Wärmeauskopplung

deutlicher voneinander trennt (Bild 5). Mit dieser getrennten Prozeßführung kann man in einem nächsten Schritt dazu übergehen, den Feststoffumsatz auf dem Rost stark understöchiometrisch im Bereich von  $\lambda_R \approx 0,4$  bis  $\lambda_R \approx 0,8$  zu betreiben. Dieses gegenwärtig zunächst im Pilotmaßstab untersuchte Vergasungs-Nachverbrennungskonzept mit Rostsystemen erscheint deshalb sehr aussichtsreich, weil über die Vorteile einer getrennten Prozeßführung hinaus zusätzlich u.a.

- Abgasmassenströme deutlich reduziert werden,
- Brenngase erzeugt werden, die einen eigenständigen Nachverbrennungsprozeß ermöglichen,
- der Nachverbrennungsprozeß selbst mit bekannten Primärmaßnahmen im Hinblick auf  $\text{NO}_x$ -Minderung bei gleichzeitig hohen Ausbrand, unabhängig vom Rostprozeß, optimiert werden kann,
- Emissionsfrachten erheblich herabgesetzt werden
- usw. [9, 16].

Auf diese Gesichtspunkte wird im Zusammenhang mit Versuchsergebnissen an einer Pilotanlage, die im Rahmen eines zweijährigen, von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt geförderten Forschungsvorhabens gewonnen wurden, im folgenden noch näher eingegangen.

### 3.2 PILOTANLAGEN

Das verfahrenstechnische Fließbild der Pilotanlage einschließlich des zugehörigen MSR-Schemas ist in Bild 6 dargestellt. Die Anlage setzt sich aus den Hauptkomponenten

- 5-Zonen Rückschubrost,
- Brennkammersystem,
- Wärmetauscher und
- Abgasreinigung

zusammen [16]. Die Bilder 7 a und b zeigen Detailansichten des Rückschubrostes und des Brennkammersystems.

In dem hier gesteckten Rahmen seien nur die wesentlichen Gesichtspunkte stichpunktartig erwähnt, weitere Angaben zur Anlagentechnik, zur Meßwerterfassung und Analytik sind in [16] beschrieben.

- Der feste Modellbrennstoff/Abfall wird diskontinuierlich durch einen Stößel am unteren Ende des Füllschachtes der ersten Rostzone zugeführt.
- Die Geschwindigkeit der Rostelemente kann in den fünf Rostzonen unabhängig eingestellt werden.
- Das Reaktionsgas (in der Regel Luft; Rückführung eines Abgasteilstromes oder Sauerstoffanreicherung möglich) wird unterhalb des Rostes zugeführt und kann ebenfalls in den fünf Rostzonen hinsichtlich Massenstrom und Sauerstoffkonzentration variiert werden.
- Das bei unterstöchiometrischer Betriebsweise des Rostprozesses (Vergasung) erzeugte Brenngas wird dem Brennkammersystem zur eigenständigen, mehrstufigen Verbrennung zugeführt.
- Abhängig von den zu untersuchenden Primärmaßnahmen im Bereich der Brennkammeranlage kann man zur Einstellung gewünschter Temperatur-, Konzentrations- und Verweilzeitverhältnisse entlang des Reaktionsweges eine Luftstufung und, falls erforderlich, eine Brennstoffstufung sowie eine Abgasrückführung vorsehen.
- Die Zuführung der Verbrennungsluft bzw. des rückgeführten Abgases erfolgt radial und/oder tangential. Einer besseren Übersichtlichkeit wegen sind im Anlagenschema (Bild 6) nur drei Zugabestellen für die Verbrennungsluft und drei für rückgeführtes Abgas (bzw. Stickstoff oder Sauerstoff) eingezeichnet.
- Einen Überblick über die während des Versuchsbetriebes erfaßten Meßgrößen gibt zunächst das MSR-Schema in dem verfahrenstechnischen Fließbild in Bild 6.

### 3.3 VERGASUNG AUF DEM ROST

In der ersten Prozeßstufe, der Vergasung auf dem Rost, werden zunächst insbesondere zwei wesentliche Teilaufgaben angestrebt:

- möglichst niedriger Restkohlenstoffgehalt der verbleibenden Reststoffe und
- Einstellung einer geeigneten Brenngaszusammensetzung mit möglichst hohem Anteil brennbarer Komponenten.

Zur Steuerung dieser Aufgaben kann man dabei z.B. auf die Maßnahmen:

- Einstellung des absoluten (integralen) Stöchiometrieverhältnisses  $\lambda_R$  über den insgesamt zugeführten Luftmassenstrom bzw. in Verbindung mit entsprechend veränderten Sauerstoffkonzentrationen über den Reaktionsgasmassenstrom,
- Einstellung der lokalen Stöchiometrieverhältnisse durch entsprechende Luft- bzw. Reaktionsgasstufung entlang des Rostweges,
- Beeinflussung der Verweilzeit und des Verweilzeitverhaltens durch die Bewegung der Rostelemente

zurückgreifen.

Bei Vergasungsverhältnissen lassen sich ebenso wie bei einer Verbrennung Restkohlenstoffgehalte um 1 Ma.-% und niedriger erreichen; koksartige Rückstände werden damit vermieden. Das [Bild 8](#) zeigt beispielhaft für den Einsatz von mit Steinkohlenteerpech behandelten Eisenbahnschwellen (kontaminiertes und damit nicht weiter verwendbares Abfallholz) hierzu 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.

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. Reaktionsgasmassenströme 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 8](#) bestätigt.

Der Einfluß von Luftstufung und Bewegung der Rostelemente auf die Brenngaszusammensetzung, d.h. auf die o.g. zweite Teilaufgabe, sei im Zusammenhang mit den Ergebnissen aus Untersuchungen mit Holz als Modellbrennstoff in [Bild 9](#) diskutiert. Zur Erläuterung des Einflusses der Luftstufung sind drei deutlich verschiedene Luftverteilungen bei jeweils gleichem Brennstoffmassenstrom und Gesamtluftmassenstrom gewählt worden. Bei der ersten Einstellung wird die Hauptluft in Zone 1, bei der zweiten Einstellung in Zone 4 zugeführt. Bei der dritten Einstellung liegt eine annähernd gleichmäßige Verteilung über die Rostzonen 1 bis 4 vor. Aus [Bild 9](#) ist zu erkennen, daß sich die Wasserstoff- und die Methankonzentrationen weitgehend unabhängig von der gewählten Luftstufung einstellen. Dabei liegen die Wasser-

stoffkonzentrationen mit  $\psi_{\text{H}_2} \approx 2$  Vol.-% weit unterhalb der sich aus Gleichgewichtsberechnungen ergebenden Werte. Wie bereits an anderer Stelle diskutiert [16], ist dies insbesondere darauf zurückzuführen, daß der Wasseranteil des Brennstoffes bereits am Rostanfang in die Gasphase übergeht und damit eine Zersetzung des Wasserdampfes an einem heißen Koksbett, entsprechend der heterogenen Reaktion von Kohlenstoff mit Wasserdampf, in Rostsystemen wenig wahrscheinlich ist. Den höchsten Anteil der brennbaren Komponenten nimmt Kohlenmonoxid ein. 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 sogenannte Boudouard-Reaktion abläuft, so sollte nach erfolgter Zündung des Brennstoffes zunächst ein entsprechend heißes Koksbett 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 9 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 9). Bei diesem Beispiel ist jedoch zu beachten, daß in den Zonen 2 bis 4 annähernd gleiche Luftmassenströme zugeführt werden.

Eine weitere wichtige Fragestellung bei der Optimierung der Prozeßbedingungen in der Roststufe ist die Mobilisierung oder die Einbindung insbesondere von Schwermetallspezies. Hierzu liegen zunächst Hinweise vor, die sich aus Untersuchungen mit Mischungen aus Shredderleichtfraktionen (Abfälle aus Shredderanlagen mit Mischschrott) und Holz ergeben. Das Bild 10 zeigt die Ergebnisse der Schwermetallkonzentrationen im Abgas gegenüberstellend für die Vergasungs-Nachverbrennungsfahrweise mit  $\lambda_{\text{R}} \approx 0,6$  und  $\lambda_{\text{ges}} \approx 1,2$  und für die Verbrennungsfahrweise mit  $\lambda_{\text{ges}} \approx 1,8$ . Die Gesamtkonzentrationen für die Vergasungsfahrweise betragen ca. 40 % der Konzentrationen der Verbrennungsfahrweise. Hauptsächlich ist diese Reduzierung auf die Verminderung des Flugstaubaustrages zurückzuführen. Interessant erscheint die Frage, wie sich die Vergasungsbedingungen auf die Mobilisierung von Schwermetallen auswirkt. Die Mobilisierung wird wesentlich durch die Temperaturverhältnisse, die Verweilzeit und die Chlorgehalte im Gutbett beeinflusst. Die Temperatur und die Verweilzeit lassen sich durch die Prozeßführung steuern, der Chlorinput ist durch die Abfallzusammensetzung bestimmt. Bei einem Vergleich der Vergasungs- und Verbrennungsfahrweise ist hinsichtlich des Einflusses von Chlor zu beachten, daß wegen der geringeren Gasmassenströme bei der unterstöchiometrischen Fahrweise sowohl höhere Chlorkonzentrationen als auch längere Verweilzeiten der Gase im Bett vorliegen. Daraus könnte man schließen, daß bei der Vergasungsfahrweise mit einer zunehmenden Verflüchtigung aufgrund der höheren Chlorkonzentrationen und der längeren Verweilzeiten im Brennbett vergleichsweise höhere, nicht an die Partikeln gebundene Anteile auftreten. Hierzu ergeben sich aus den bisherigen Untersuchungen zunächst erste Hinweise, die in weiteren Versuchsfahrten näher untersucht wer-



den. In diesem Zusammenhang müssen zur Klärung der Eluatverfügbarkeit noch eine Reihe von Untersuchungen durchgeführt werden.

### 3.4 EIGENSTÄNDIGE, GETRENNTE NACHVERBRENNUNG DER BRENNGASE

Die Nachverbrennung der im Rostprozeß erzeugten Brenngase erfolgt in einer eigenständigen Feuerung. Die Brenngase weisen einen Heizwert von  $h_{u,G,R} \approx 2000$  kJ/kg auf und werden dem Nachverbrennungsprozeß mit Temperaturen von  $\vartheta_{G,R} \approx 750$  °C bis  $\vartheta_{G,R} \approx 850$  °C zugeführt. Die getrennte Prozeßführung (Bilder 5 und 6) gestattet eine unabhängige Optimierung des Nachverbrennungsprozesses im Hinblick auf die Reduzierung von Schadstoffen, wie z.B. Kohlenmonoxid, organische Verbindungen und Stickoxide. Die dabei in Frage kommenden Primärmaßnahmen sind im Zusammenhang mit Untersuchungen zur Prozeßführung von gasförmigen, flüssigen und staubförmigen Brennstoffen bereits sehr umfangreich untersucht worden, daher sei hier auf das entsprechende Schrifttum [23 bis 27] verwiesen.

Im Zusammenhang mit der Vergasungs-Nachverbrennungsfahrweise wird in dem hier gesteckten Rahmen zunächst auf die Möglichkeit zur Minimierung von Stickstoffoxiden bei gleichzeitig hohem Ausbrand (CO) eingegangen. Dabei stammen die vorgestellten Ergebnisse wiederum aus Untersuchungen mit kontaminierten Abfallhölzern.

Das Bild 11 zeigt NO-Konzentrationen im Rohgas (Ende Nachbrennkammer, angegeben als NO<sub>2</sub>) in Abhängigkeit von der Luftzahl in der ersten Stufe der Nachbrennkammer  $\lambda_{NBKI}$  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  $\lambda_{NBKI}$  in der ersten Stufe der Brennkammer und der NO-Konzentration  $\psi_{NO_2}$  im Rohgas bei der Reduzierung von Brennstoff-NO. Darüber hinaus ist zu erkennen, daß die NO-Werte bei einer Primärluftzahl von  $\lambda_R \approx 0,6$  deutlich niedriger sind als bei  $\lambda_R \approx 0,4$ . Das höhere Primärluftverhältnis in der Rostanlage bedeutet neben der Erhöhung des Sauerstoffangebotes im vorliegenden Fall einen Anstieg im Temperaturniveau von  $\vartheta_R \approx 700$  °C auf  $\vartheta_R \approx 1000$  °C. Damit ist bereits in der Roststufe eine höhere Abbaurrate von flüchtigen Brennstoff-N-Komponenten wie HCN und NH<sub>3</sub> über NO und eine Reduktion von NO zu N<sub>2</sub> verbunden.

Im vorliegenden Fall (Bild 11) ergibt sich, ausgehend von  $\psi_{NO_2} \approx 450$  mg/m<sup>3</sup> (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  $\psi_{NO_2} \approx 100$  mg/m<sup>3</sup>. Wie die zugehörigen CO-Konzentrationen in Bild 11 zeigen, wird dabei ein gleichbleibend niedriges Niveau von  $\psi_{CO} < 10$  mg/m<sup>3</sup> erreicht.

Ein weiterer Einfluß auf die NO-Konzentration ist mit dem Ort der Luftstufung in der Nachbrennkammer verbunden. Durch die Zugabe der Luft an den Stellen NBKI und NBKIII (Bild 12) wird eine weitere NO-Minderung auf  $\psi_{NO_2} < 100$  mg/m<sup>3</sup> erreicht. Die Verschiebung der Restausbrandluft in den unteren Bereich des Brennkammersystems (Zugabeort NBK III) führt zu einer Verlängerung der Verweilzeit im unterstöchiometrischen Bereich.

Darüber hinaus ergeben sich veränderte Bedingungen in Bezug auf das Verweilzeitverhalten in der unterstöchiometrischen Zone. Im Fall Stufung NBKI und NBKII ist die unterstöchiometrische Zone nur im oberen Teil der Brennkammer in der aufgrund der intensiven Durchmischung näherungsweise eine Rührkessel-Charakteristik vorliegt. In der folgenden Anschlußgeometrie (Zugabestelle NBKII) geht die Strömung in eine Kolbenströmer-Charakteristik über [21]. Wie aus anderen Untersuchungen bekannt ist [27], ist eine hohe Verweilzeit im unterstöchiometrischen Bereich in Verbindung mit einer Kolbenströmer-Charakteristik für niedrige NO-Emissionen anzustreben.

Als letztes Beispiel im Zusammenhang mit der NO-Minderung sei an dieser Stelle auf den Einfluß des Lastverhältnisses eingegangen. Das **Bild 13** zeigt die Ergebnisse für drei Lastfälle bei  $\lambda_R \approx 0,4$  in Abhängigkeit von  $\lambda_{NBKI}$  und bei nahezu gleichen Gesamtluftzahlen  $\lambda_{ges} \approx 1,3$ . Erwartungsgemäß ergeben sich bei höherer Last und ungestufter Fahrweise höhere NO-Konzentrationen. Durch eine Luftstufung (hier bei NBKI und NBKII) lassen sich aber auch in diesen Fällen die NO-Konzentrationen auf das Niveau der Normallast zurückführen wobei auch hier gleichbleibend niedrige CO-Konzentrationen mit  $\psi_{CO} < 10 \text{ mg/m}^3$  erreicht werden.

Im Hinblick auf die Senkung der Abgasströme sei darauf hingewiesen, daß sich bei einer Primärluftzahl von  $\lambda_R = 0,4$  bis  $\lambda_R = 0,8$  Gesamtluftzahlen (einschließlich Sekundär- und ggf. Tertiärluft in dem Nachbrennkammersystem) von  $\lambda_{ges} < 1,2$  erreichen lassen, was im Vergleich zu den Verhältnissen konventioneller Anlagen eine erhebliche Reduzierung der Abgasströme und damit auch eine Reduzierung von Schadstofffrachten bedeutet. In Verbindung mit der Verminderung von Emissionen durch Primärmaßnahmen läßt sich damit u.a. der Aufwand in der Abgasreinigung senken, was dann wiederum zu einer Verbesserung des Gesamtwirkungsgrades führt.

## 4 DEMONSTRATIONSANLAGE

---

Die an den Pilotanlagen gewonnenen Erkenntnisse sollen in einem nächsten Schritt an einer Anlage im Dauerbetrieb unter industriellen Bedingungen umgesetzt werden. Die Notwendigkeit des Aufbaues einer in der Leistung größeren Anlage führte dazu, daß die MARTIN GmbH und die CUTEC-Institut GmbH zusammen bei der Deutschen Bundesstiftung Umwelt einen Folgeantrag zu dem o.g. Forschungsvorhaben zum Aufbau einer Anlage im industriellen Maßstab eingereicht haben, über den im März 1998 positiv entschieden wurde. Hierdurch sind die Voraussetzungen für MARTIN und CUTEC geschaffen, im Rahmen des dreijährigen Forschungsvorhabens eine Anlage zu planen, zu konstruieren und zu errichten sowie die Funktionsfähigkeit und Wirtschaftlichkeit im kontinuierlichen Betrieb nachzuweisen.

Im folgenden werden die geplante Anlage, der Standort und der vorgesehene Zeitplan vorgestellt.

## 4.1 BASISDATEN

Als Basisdaten für die Vergasungsanlage mit anschließender Hochtemperaturverbrennung sind die nachfolgenden Werte zugrunde gelegt worden:

- Bruttowärmeleistung  $Q_{\text{brutto}}$  5 MW<sub>th</sub>,
- Brennstoffdurchsatz 1200 bis 1600 kg/h,
- Brennstoff naturbelassenes Holz, kontaminierte Althölzer, Biomasse (z.B. Stroh), vorbehandelter Müll (zeitweise),
- Heizwert  $h_u$  11.000 bis 15.000 kJ/kg,
- $\Psi_{\text{O}_2}$  Abgas tr.  $\leq 5$  Vol.-%,
- Gesamtluftzahl  $\lambda_{\text{ges}}$   $\leq 1,3$ ,
- Abgasvolumenstrom 6.500 bis 7.500 Nm<sup>3</sup>/h.

Die Anlage ist so dimensioniert, daß durch die Prozeßführung und durch eine nachgeschaltete Abgasreinigung die Grenzwerte der 17. BImSchV eingehalten bzw. unterschritten werden.

## 4.2 ANLAGENTECHNIK

Der Aufbau der Anlage ist schematisch in **Bild 14** dargestellt. Sie wird in einer Modulbauweise ausgeführt, d.h. alle Komponenten, wie Rost, Nachbrennkammer, etc. sind eigenständige Bauteile. Durch diese Bauweise können langfristige und teure Montagezeiten reduziert werden und die Anlage kann relativ einfach an räumliche Gegebenheiten angepaßt werden. Dies wirkt sich positiv auf die Investitionskosten aus.

### 4.2.1 BRENNSTOFFAUFBEREITUNG- UND -ZUFÜHRUNG

Der unaufbereitete Brennstoff wird am Standort mittels eines Shredders auf Kantenlängen zwischen 30 und 100 mm gehäckselt, oder er wird bereits aufbereitet angeliefert. Die verschiedenen Brennstoffe werden in dafür vorgesehenen Boxen zwischengelagert.

Je nachdem, welcher Brennstoffmix der Anlage zugeführt werden soll, werden die entsprechenden Mengenanteile jeder Charge aus den Boxen entnommen und einem mit einem Metallabscheider ausgerüsteten Förderbandsystem zugeführt. Über dieses Fördersystem wird der Brennstoffmix in eine Doppelklappenschleuse, die auf die Schurre montiert ist, transportiert. Der Brennstoff wird anschließend durch eine Rundkolbenbeschickung aus der Schurre dem Rost zugeführt.

Die bei Vergasungsanlagen unbedingt notwendige Vermeidung von Falschlufteinbruch kann durch die Kombination Doppelklappenschleuse – hoher Schurrenfüllstand – Rundkolbenbeschickung garantiert werden.

### 4.2.2 ROSTMODUL

Basierend auf den Erkenntnissen der Pilotanlage kommt ein unter  $26^\circ$  zur Horizontale geneigter Rückschubrost mit 6 Zonen und 15 Stufen, der in seinen Abmessungen der größeren Leistung angepaßt ist, zum Einsatz. Die beweglichen Roststufen der 6 Zonen werden separat voneinander mit Einzelantrieben angetrieben, wobei es aber auch möglich ist, bewegliche Roststufen mit geringem Aufwand mechanisch zu koppeln und dann über einen gemeinsamen Antrieb zu bewegen.

Die in konventionellen Anlagen eingesetzte Schlackenwalze wird durch ein in der Höhe variables Schlackewehr ersetzt. Die Schlacke wird trocken über eine Doppelklappenschleuse ausgetragen.

In der Rostkonstruktion ist berücksichtigt, daß sowohl luft- als auch wassergekühlte Roststäbe zum Einsatz kommen können, wobei betont werden muß, daß die luftgekühlten Roststäbe bevorzugt verwendet werden.

### 4.2.3 NACHBRENNKAMMER

Die Nachbrennkammer der Demonstrationsanlage ist ähnlich aufgebaut wie die in der Pilotanlage eingesetzte. Den strömungstechnischen Anforderungen und der Leistungserhöhung entsprechend wird die Nachbrennkammer in ihren Abmessungen an die größeren Gasmassenströme angepaßt. Zusätzlich sind noch Möglichkeiten der Zuführung von rezirkuliertem Abgas zur genauen Temperaturregelung über den Reaktionsweg berücksichtigt.

Wie unter 3.4 bereits beschrieben, können durch die gezielte Luftstufung in der Brennkammer die Stickoxidemissionen minimiert werden, so daß hierfür keine Sekundärmaßnahmen wie SNCR oder SCR notwendig sind. Die nahstöchiometrische Fahrweise und die Geometrie der Brennkammer lassen einen Betrieb bei hohen Temperaturen und entsprechend langen Verweilzeiten zu, was sich in sehr geringen CO-Werten von  $\psi_{\text{CO}} < 10 \text{ mg/Nm}^3$  auswirkt.

### 4.2.4 ABHITZKESEL

Das in der Nachbrennkammer vollständig ausgebrannte Abgas wird mit einer Temperatur je nach Einstellung zwischen  $\vartheta_{\text{G,NBK}} = 850 \text{ }^\circ\text{C}$  und  $\vartheta_{\text{G,NBK}} = 1050 \text{ }^\circ\text{C}$  einem konventionellen Wasserrohrkessel zugeführt. Durch den geringen Flugstaubgehalt, ein wesentliches Merkmal der Vergasungstechnik, kommt es zu geringeren Ablagerungen an den Wärmetauscherflächen, was einen höheren Kesselwirkungsgrad zur Folge hat. Der Einsatz solcher marktgängiger Kessel wirkt sich positiv auf die Investitionskosten aus.

Bei der hier geplanten Anlage wird alternativ Prozeßdampf für direkt in der Nachbarschaft befindliche Produktionsbetriebe erzeugt oder über eine Turbine verstromt.

### 4.2.5 ABGASREINIGUNG

Aufgrund des Einsatzes von kontaminierten Althölzern als Brennstoff sind im Abgas Emissionen wie z.B. HCl, leichtflüchtige Schwermetalle, etc. enthalten. Diese Emissionen können

nicht durch die Verfahrensführung beeinflusst werden, so daß eine Abgasreinigungsanlage eingesetzt werden muß, die diese Schadstoffe sicher abscheidet.

Das aus dem Kessel austretende Abgas mit einer Temperatur von ca. 180 °C bis 200 °C wird dieser Abgasreinigung zugeführt. Um eine kostenintensive Abwasserbehandlung zu vermeiden, kommt ein sogenanntes trockenes Verfahren zum Einsatz.

Bedingt durch die o.g. Vorteile des Vergasungs-Nachverbrennungsverfahrens werden die Abgasmassenströme gegenüber der klassischen Rostbetriebsweise um bis zu 40 % reduziert und dadurch auch die Investitionskosten gesenkt.

### 4.3 STANDORT

Am Standort stehen für die Errichtung der Vergasungsanlage die Flächen und Gebäude eines 1991 stillgelegten Braunkohleheizwerkes zur Verfügung. Das ehemalige Heizwerkgebäude wurde 1983 fertiggestellt und verfügt über eine sanierbare Bausubstanz. Es handelt sich um einen Versorgungs- und Garagentrakt mit Heizhaus, Umformstation, sowie Ver- und Entsorgungsanlagen. Die räumlichen Verhältnisse gehen aus den folgenden Größenangaben hervor:

- Grundstückgröße Heizwerk gesamt: 8.288 m<sup>2</sup>,
- Heizhaus (L x B x H): 31,8 m x 15,4 m x 9,0 m,
- Anbau (L x B x H): 6,0 m x 30,0 m x 5,0 m.

Entsprechend einer agrarstrukturellen Vorplanung sind im ländlichen Umfeld der Region ausreichend geeignete Biomassen, wie z.B. naturbelassene Holzabfälle aus der Forstwirtschaft und Stroh aus der Landwirtschaft, vorhanden. Eine auf die Aufbereitung von Althölzern spezialisierte Firma ist ebenfalls am Standort ansässig.

### 4.4 FORSCHUNGSVORHABEN

Das Forschungsvorhaben ist auf einen Zeitraum von drei Jahren ausgelegt, in dem die Teilschritte Planung, Konstruktion, Aufbau, Inbetriebnahme und Versuchsbetrieb enthalten sind. Ein detaillierter Zeitplan ist in Bild 15 dargestellt.

Im Rahmen des einjährigen Versuchsbetriebes wird die Anlage mit verschiedenen Brennstoffen und Brennstoffgemischen gefahren. Es sind auch mehrwöchige Vergasungsversuche mit vorbehandeltem Müll als Brennstoff eingeplant.

Das Vergasungsverhalten der verschiedenen Brennstoffe und Brennstoffgemische bei unterschiedlichen Lasteinstellungen, die Reststoffeigenschaften und Emissionen sind ein Schwerpunkt des umfangreichen Versuchsprogramms. Ein weiteres Hauptthema ist die Ermittlung von Standzeiten und die Eignung der teilweise neu konstruierten Anlagenkomponenten zum Dauerbetrieb.

Da die Anlage vollautomatisch, d.h. ohne Anwesenheit von Betriebspersonal, betrieben werden soll, muß als weiterer Hauptbestandteil des Versuchsprogrammes das geplante Regeleingriffskonzept dieser hohen Anforderung entsprechend überprüft und angepaßt werden.

Der Nachweis des wirtschaftlichen Betriebes der Anlage, der durch die genannten Schwerpunkte wesentlich beeinflusst wird, muß innerhalb des Forschungsvorhabens erbracht werden. Dies ist mit einer Voraussetzung dafür, die Anlage nach Abschluß des dreijährigen Forschungsvorhabens dem späteren Betreiber zu übergeben, der diese dann kommerziell weiternutzen wird.

## 5 ZUSAMMENFASSUNG

---

Die thermische Behandlung von Restmüll erfolgt überwiegend durch Verbrennung in Rostsystemen (klassische MVA). Um über die durch die Entwicklung von Sekundärmaßnahmen (z.B. Abgasreinigung) in den vergangenen 10 Jahren erzielten Schadstoffminderungen hinaus Ziele wie

- die Senkung der Abgasmassenströme und damit die Reduzierung der Emissionsfrachten,
- die Beeinflussung der Reststoffeigenschaften und
- die Verbesserung des Gesamtwirkungsgrades

zu erreichen, muß das zur Optimierung der Prozeßführung im thermischen Hauptverfahren (Primärmaßnahmen) vorhandene Potential weiter ausgeschöpft werden. Eine aussichtsreiche Entwicklung stellt die Vergasung auf dem Rost mit getrennter Nachverbrennung dar.

Im Gegensatz zur konventionellen Prozeßführung mit überlappenden Reaktionszonen ergibt sich durch die deutliche Trennung der Teilschritte:

- Feststoffumsatz auf dem Rost,
- Nachverbrennung der Gase und
- Wärmeübertragung

die Möglichkeit einer unabhängigen Optimierung der zugehörigen Teilaufgaben. Wird der Feststoff auf dem Rost stark unterstöchiometrisch (Vergasung) umgesetzt, so kann die Nachverbrennung der erzeugten Gase wie in einer eigenständigen Feuerung optimiert werden. An einer diesem Konzept entsprechenden Pilotanlage wurden für verschiedene Modellstoffe (Holz, Braunkohle) sowie für Restabfälle u.a. die Auswirkungen der Luftzahl und -stufung, Roststabschwindigkeit, usw. in der Vergasung sowie der Luftstufung und Abgasrückführung in der Nachverbrennung untersucht.

Durch die insbesondere bei Rostsystemen zahlreich vorhandenen Möglichkeiten zur Steuerung der Sauerstoffzufuhr, Temperatur und Verweilzeit entlang des Reaktionsweges lassen sich bei der Vergasung ebenso wie bei der Verbrennung sehr niedrige Glühverluste der Reststoffe erreichen. Über die Vorteile einer getrennten Prozeßführung hinaus werden bei der Vergasungs-Nachverbrennungsfahrweise zusätzlich u.a. Flugstaubkonzentrationen erheblich gesenkt.

Die Übertragung von bekannten Primärmaßnahmen auf den Nachverbrennungsprozeß führt zu deutlichen Reduzierungen von Stickoxiden bei gleichzeitig hohem Ausbrand. Die Gesamt-

luftzahlen sind mit  $\lambda_{ges} \approx 1,2$  gegenüber der konventionellen Fahrweise mit  $\lambda_{ges} \approx 1,8$  erheblich niedriger. Die Senkung der Luftzahlen wirkt sich entsprechend auf die Reduzierung der Abgasströme, der Emissionsfrachten und letztlich auch auf die Verbesserung des Gesamtwirkungsgrades aus.

Derzeit wird im Rahmen eines dreijährigen Forschungsvorhabens an einem ländlich strukturierten Standort eine Demonstrationsanlage zur thermischen Behandlung von Biomasse und Altholz errichtet, die den Nachweis der im Pilotmaßstab bereits erzielten Ergebnisse und der damit zusammenhängenden technischen und ökonomischen Vorteile des Vergasungs-Nachverbrennungsverfahrens unter industriellen Bedingungen im Dauerbetrieb erbringen soll.

## 6 SYMBOLVERZEICHNIS

### SYMBOLS

B	Breite [m]
H	Höhe [m]
L	Länge [m]
$h$	Spezifische Enthalpie (Heizwert)
$\dot{m}$	Massenstrom
$\vartheta$	Temperatur [°C]
$\lambda$	Stöchiometrieverhältnis, Luftzahl
$\xi$	Konzentration (massenbezogen)
$\psi$	Konzentration (volumenbezogen)
$\omega$	Frequenz
$\tau$	Verweilzeit

### INDICES

<i>B</i>	Brennstoff
<i>C</i>	Kohlenstoff
<i>F</i>	Flugstaub
<i>G</i>	Brenngas/Abgas
<i>HD</i>	Hydraulikzylinder
<i>i.N.tr.</i>	im Normzustand, trocken
<i>NBK</i>	Nachbrennkammer
<i>R</i>	Rost
<i>Re</i>	Reststoffe
<i>RG</i>	Reaktionsgas
<i>ges</i>	gesamt
<i>u</i>	unterer (Heizwert)

## 7 SCHRIFTTUM

- [1] Emissionsminderung bei Müllverbrennungsanlagen. Endbericht eines Verbundvorhabens zwischen Firma MARTIN GmbH, München, NOELL GmbH, Würzburg, L. & C. Steinmüller GmbH, Gummersbach, Projektträger UBA-Berlin, 1994.
- [2] Christmann, A.; Quitteck, G.: Die DBA-Gleichstromfeuerung mit Walzenrost. VDI-Berichte 1192, VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf, 1995.
- [3] Scholz, R.; Beckmann, M.: Möglichkeiten der Verbrennungsführung bei Restmüll in Rostfeuerungen. VDI-Berichte Nr. 895, VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf, 1991.
- [4] Scholz, R.; Beckmann, M.; Horn, J.; Busch, M.: Thermische Behandlung von stückigen Rückständen - Möglichkeiten der Prozeßführung im Hinblick auf Entsorgung oder Wertstoffrückgewinnung. BWK/ TÜ/ Umwelt-Special 44 (1992) Nr. 10.
- [5] Knörr, A.: Thermische Abfallbehandlung mit dem SYNCOM-Verfahren. VDI-Berichte 1192, VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf, 1995.
- [6] Lautenschlager, G.: Moderne Rostfeuerung für die thermische Abfallbehandlung. GVC-Symposium Abfallwirtschaft Herausforderung und Chance, Würzburg, 17.-19. Oktober 1994.
- [7] Martin, J.; Busch, M.; Horn, J.; Rampp, F.: Entwicklung einer kamerageführten Feuerungsregelung zur primärseitigen Schadstoffreduzierung. VDI-Berichte 1033, VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf, 1993.
- [8] 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.
- [9] 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 Francisco-Oakland Bay, California, 12.-16. Mai, 1997.
- [10] Berwein, H.-J.: Siemens Schwel-Brenn-Verfahren - Thermische Reaktionsabläufe. In: Abfallwirtschaft Stoffkreisläufe, Terra Tec '95, B.G. Teubner Verlagsgesellschaft, Leipzig, 1995.
- [11] 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.
- [12] Göhler, P.; Schingnitz, M.: Stoff- und Wärmebilanzen bei der Abfallverwertung nach dem NOELL-Konversionsverfahren. In: Energie und Umwelt' 95 mit Energieverbrauchsreduzierung bei Gebäuden, TU Bergakademie Freiberg, 22.- 23. März 1995.
- [13] Stahlberg, R.; Feuerrigel, U.: Thermoselect - Energie und Rohstoffgewinnung. In: Abfallwirtschaft Stoffkreisläufe, Terra Tec '95, B.G. Teubner Verlagsgesellschaft, Leipzig, 1995.



- [14] Albrecht, J.; Loeffler, J.; Reimert, R.: Restabfallvergasung mit integrierter Ascheverschlackung. GVC-Symposium Abfallwirtschaft Herausforderung und Chance, Würzburg, 17.-19. Oktober 1994.
- [15] Scholz, R.; Beckmann, M.; Schulenburg, F.; Brinker, W.: Thermische Rückstandsbehandlungsverfahren - Aufteilung in Bausteine und Möglichkeiten der Bilanzierung. Brennstoff-Wärme-Kraft (BWK) 46 (1994) 11/12.
- [16] Beckmann, M.: Mathematische Modellierung und Versuche zur Prozeßführung bei der Verbrennung und Vergasung in Rostsystemen zur thermischen Rückstandsbehandlung. CUTEC-Schriftenreihe, 1995.
- [17] 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.
- [18] Levenspiel, O.: Chemical Reaction Engineering. John Wiley and Sons. New York, 1972.
- [19] Dryer, F.L.; Glasman, I.: 14<sup>th</sup> International Symposium On Combustion. Combustion Institute Pittsburgh, 1973.
- [20] Leuckel, W.: Swirl Intensities, Swirl Types and Energy Losses of Different Swirl Generating Devices. IFRF Ijmuiden, November 1967, G 02/a/16.
- [21] Carlowitz, O.; Jeschar, R.: Entwicklung eines variablen Drallbrennkammersystems zur Erzeugung hoher Energieumsetzungsichten. Brennstoff-Wärme-Kraft (BWK) 32 (1980).
- [22] Scholz, R.; Jeschar, R.; Carlowitz, O.: Zur Thermodynamik von Freistrahlen. Gas-Wärme-International 33 (1984) 1.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] Kremer, H.; Schulz, W.: Reduzierung der  $\text{NO}_x$ - Emissionen von Kohlenstaubflammen durch Stufenverbrennung. VDI-Berichte Nr. 574, VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf, 1985.
- [27] Klöppner, G.: Zur Kinetik der  $\text{NO}$ -Bildungsmechanismen in verschiedenen Reaktortypen am Beispiel der technischen Feuerung. Dissertation, TU Clausthal, 1991.
- [28] Scholz, R.; Beckmann, M.; Schulenburg, F.: Entwicklungsmöglichkeiten der Prozeßführung bei Rostsystemen zur thermischen Abfallbehandlung. FDBR-Symposium, 3. Februar 1996, Rostock. Vortragsband: „Fakten! Die thermische Abfallverwertung der Zukunft“; S.144-198.

8 BILDER UND TABELLEN

	1. Stufe	2. Stufe	Verfahren
A.	Verbrennung <sup>1)</sup>	Verbrennung	Verbrennungs-Nachverbrennungs-Verfahren (z.B. klassische Müllverbrennung [1-8])
B.	Thermolyse <sup>2)</sup>	Verbrennung	Thermolyse-Nachverbrennungs-Verfahren (z.B. Schwel-Brenn-Verfahren nach Siemens KWU [10])
C.	Vergasung <sup>3)</sup>	Verbrennung	Vergasungs-Nachverbrennungs-Verfahren (weiterentwickelte klassische Müllverbrennung [9,11])
D.	Thermolyse	Vegasung	Thermolyse-Nachvergasungs-Verfahren (z.B. Konversionsverfahren nach NOELL [12], Thermoselect-Verfahren [13] usw.)
E.	Vegasung	Vegasung	Vergasungs-Nachvergasungs-Verfahren (z.B. Vergasung mit Gasspaltung nach LURGI [14])

CUTEQ / NE / 1. Aufl. 06 / 07.02.1997

- 1) hier: zusammenfassende Bezeichnung für Trocknungs-, Entgasungs-, Vergasungs- und Verbrennungsvorgänge
- 2) hier: zusammenfassende Bezeichnung für Trocknungs-, Entgasungs- und Pyrolysevorgänge
- 3) hier: zusammenfassende Bezeichnung für Trocknungs-, Entgasungs- und Vergasungsvorgänge

Bild 1. Systematische Aufteilung für thermische Hauptverfahren.

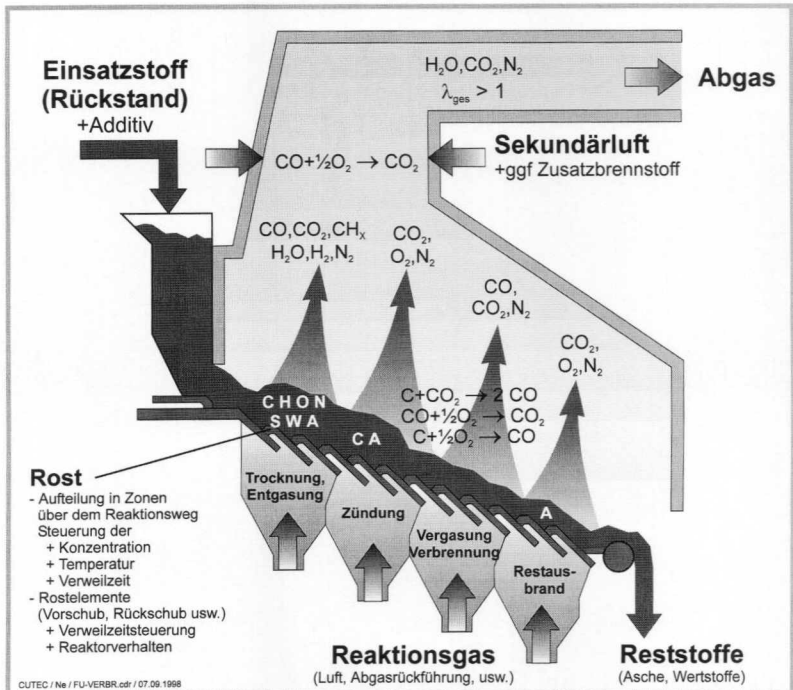


Bild 2. Schematische Darstellung des Feststoffumsatzes in Rostanlagen bei Verbrennungsbetrieb.

<b>Apparat Rostsystem</b>	
<b>Einsatzstoffe</b>	
stückig, in Verbindung mit einem Feststoff- oder Inertbett auch pastös	
<b>Sauerstoffangebot</b>	
<b>Niveau</b>	überstöchiometrisch üblich (Verbrennung); unterstöchiometrisch (Vergasung) möglich, dadurch eigenständige Nachverbrennung möglich; Sauerstoffabschluß (Pyrolyse) nicht üblich
<b>Steuerung längs des Reaktionsweges</b>	getrennt in einzelnen Zonen sehr gut einstellbar (z.B. Luft-/Sauerstoffstufung, Abgasrückführung, usw.); in Verbindung mit Temperatursteuerung sind die Teilschnitte Trocknen, Entgasen, Vergasen, Restausbrand des Feststoffes beeinflussbar
<b>Temperatur</b>	
<b>Niveau</b>	Bettoberflächentemperatur bis ca. 1000°C und höher; mittlere Betttemperaturen niedriger
<b>Steuerung längs des Reaktionsweges</b>	durch Einteilung in mehrere Zonen auch sehr gute ausreichende Möglichkeiten, wie bei der Steuerung der Sauerstoffkonzentration (Luftvorwärmung, Abgasrückführung, Wasser- /Dampfkühlung)
<b>Druck</b>	
bei Umgebungsdruck, in der Regel aus anlagentechnischen Gründen wenige Pascal Unterdruck	
<b>Reaktorverhalten</b>	
<b>Feststoff</b>	je nach Bewegung der Rostelemente können die einzelnen Zonen einer RK-Charakteristik (z.B. Rückschubrost) oder eine KS-Charakteristik (z.B. Wanderrost) angenähert werden; über der gesamten Reaktorlänge ergibt sich angenähert eine KS-Charakteristik
<b>Gas</b>	a) Oxidationsmittel usw. strömt zwangsweise durch das Bett und wird gleichmäßig über der Bettoberfläche verteilt, damit sehr guter Kontakt zwischen Gas und Feststoff b) Strömungsführung über dem Bett im Gegen- und Gleichstrom möglich, Gasbehandlung im nachfolgenden Verfahrensschritt notwendig (z.B. Nachverbrennung)
<b>Verweilzeit</b>	
<b>Niveau (mittlere Verweilzeit)</b>	im Bereich von mehreren Minuten bis Stunden; durch Rostgeschwindigkeit und Massenstrom einstellbar und bei Projektierung durch Gesamtlänge und Breite beeinflussbar
<b>Steuerung längs des Reaktionsweges</b>	durch getrennte Geschwindigkeitseinstellungen der Rostelemente in den einzelnen Zonen sehr gute Anpassung möglich; falls erforderlich für zusätzliche Verbesserung des Ausbrandes am Rostende Steuerung durch Austragwalze
<b>Zusatzstoffe</b>	
Additive zur Schadstoffeinbindung in den Feststoff und Beeinflussung der Eigenschaften der verbleibenden Reststoffe (Asche, angeschmolzene Asche, Schlacke); Inertbett z.B. Trägermatrix für event. leicht schmelzende Stoffe (z.B. Kunststoff)	
<b>Einsatzbereiche (Beispiele)</b>	
für den Feststoffumsatz in der 1. Stufe bei Hausmüllverbrennungsanlagen; Separieren von Metallen aus Verbundstoffen bei niedrigen Temperaturen und gleichzeitig unterstöchiometrischen Verhältnissen	

Bild 3. Charakterisierung von Rostsystemen [16].

<b>Apparat Brennkammer</b>	
<b>Einsatzstoffe</b>	
gasförmig, flüssig, staubförmig	
<b>Sauerstoffangebot</b>	
<b>Niveau</b>	unter- bis überstöchiometrisch; in weiten Bereichen variabel; falls am Reaktoraustritt Überstöchiometrie: Bezeichnung „Brennkammer“; falls am Ende Unterstöchiometrie: Bezeichnung „Vergasungsreaktor“
<b>Steuerung längs des Reaktionsweges</b>	durch Stufung von Oxidationsmittel und Brennstoff längs des Verbrennungsweges sehr gut möglich (einbringen über Rührkessellemente)
<b>Temperatur</b>	
<b>Niveau</b>	unterschiedliche Verbrennungstemperaturen im Bereich von 1000 °C bis 2000 °C ggf. auch höher; Bereich sehr variabel
<b>Steuerung längs des Reaktionsweges</b>	neben der Stufung von Oxidationsmittel und Brennstoff über dem Reaktionsweg, insbesondere Eingriffe durch Abgasrückführung, Wassereindüsung usw. möglich; indirekte Wärmein- bzw. -auskopplung durch entsprechende Heiz- bzw. Kühlsysteme; viele Möglichkeiten
<b>Druck</b>	
bei Umgebungsdruck, in der Regel aus anlagentechnischen Gründen wenige Pascal Unterdruck; Hochdruckverbrennung selten; Druckvergasung häufiger	
<b>Reaktorverhalten</b>	
<b>Staub/Gas</b>	strömungstechnisch können sowohl Rührkessel- als auch Kolbenströmer-Charakteristiken für Staub und Gas angenähert werden
<b>Verweilzeit</b>	
<b>Niveau (mittlere Verweilzeit)</b>	im Bereich von Sekunden (bei höherem Druck entsprechend länger); durch Lastzustand einstellbar und bei Projektierung durch geometrische Abmessungen beeinflussbar
<b>Steuerung längs des Reaktionsweges</b>	nur schwer möglich; Verweilzeitverteilung über Reaktorverhalten steuerbar
<b>Zusatzstoffe</b>	
Additive insbesondere über Rührkessellemente einbringen, sowohl zur Schadstoffeinbindung (z.B. Schwefeldioxid, Stickstoffoxide) als auch zur Beeinflussung der Schlackeeigenschaften und Schmelztemperaturen der Stäube	
<b>Einsatzbereiche (Beispiele)</b>	
Verbrennung von flüssigen Rückständen; Nachverbrennung von Gas und Stäuben in der 2. Stufe von thermischen Behandlungsverfahren; Hochtemperatur-Vergasung von Rückständen zur Erzeugung von Prozeßgas (Nieder- und Hochtemperaturen); bestimmte Verbrennungsverfahren (z.B. Rückführung von Chlor als Salzsäure in den Produktionskreislauf usw.)	

CUTEK / Ne / 3\_4-RoBr.xls / 2.9.1998

Bild 4. Charakterisierung von Brennkammersystemen [16].

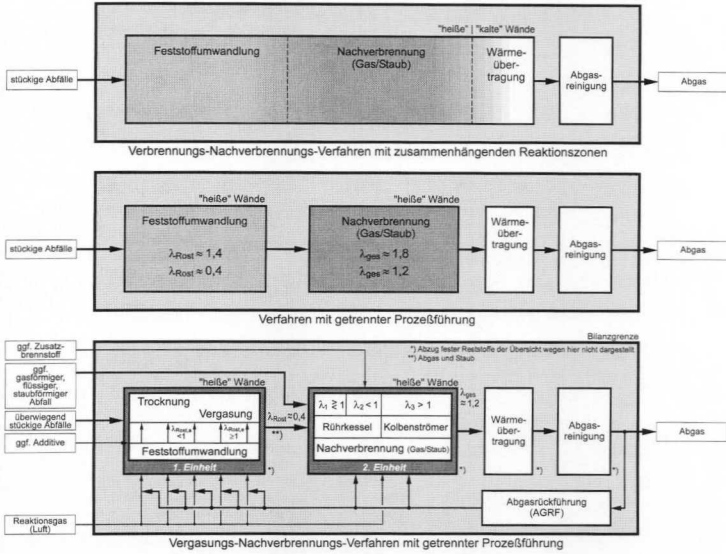


Bild 5. Schematische Darstellung unterschiedlicher Prozeßführung für die thermische Behandlung von stückigen Abfällen mit einem Rostsystem.

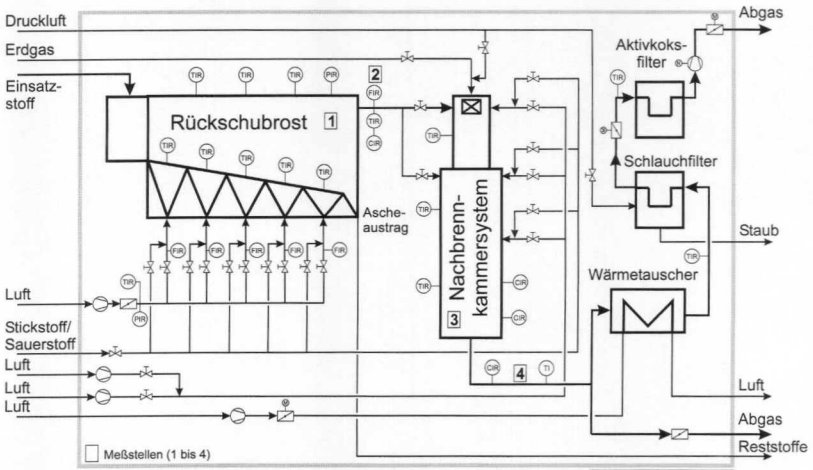


Bild 6. Verfahrenstechnisches Fließbild der Rückschubrost-Pilotanlage mit MSR-Schema.

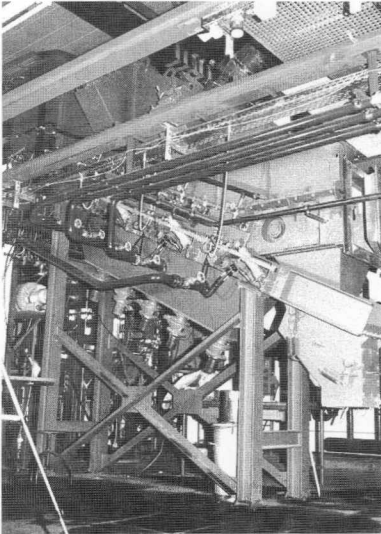


Bild 7a. Pilotanlage Rückschubrost.

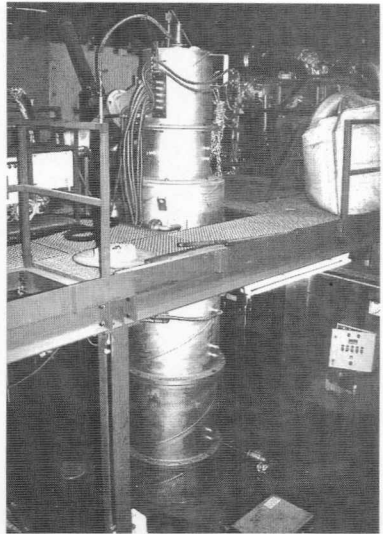


Bild 7b. Pilotanlage Nachbrennkammer

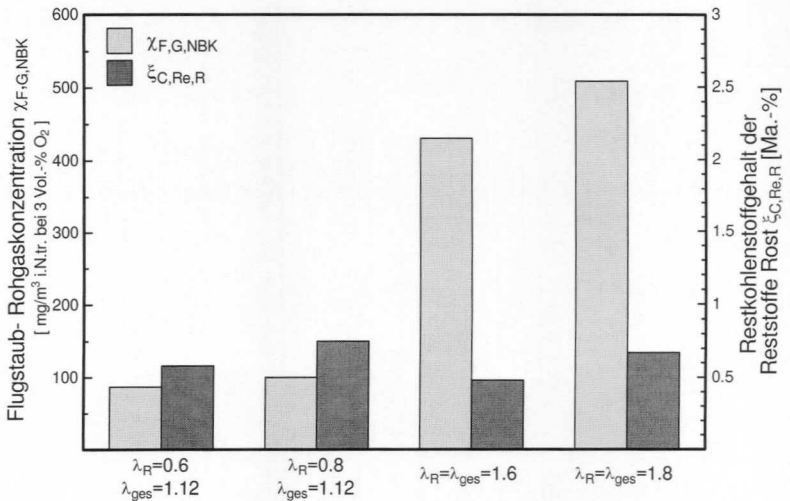


Bild 8. Staubkonzentration im Rohgas und Glühverlust der Reststoffe bei verschiedenen Stöchiometrie-Verhältnissen in der Rostanlage [16].

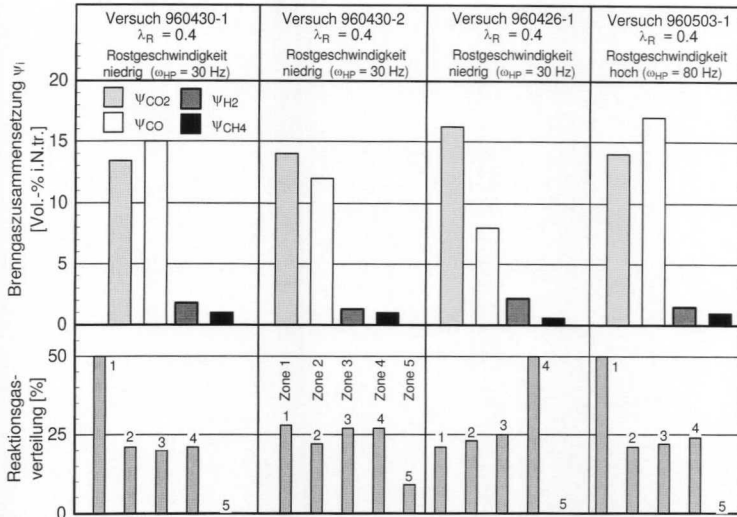


Bild 9. Vergleich der Brenngaszusammensetzung bei Variation der Luftverteilung entlang des Rostweges und der Roststabgeschwindigkeit [9].

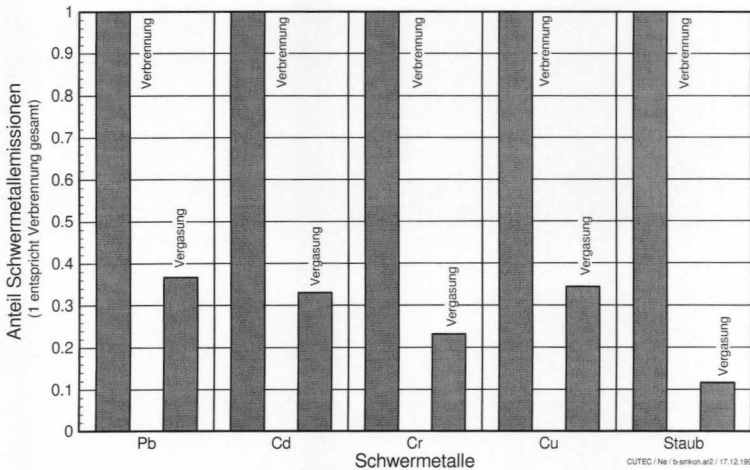


Bild 10. Schwermetallemissionen vom Rost im Vergasungs- und Verbrennungsbetrieb.

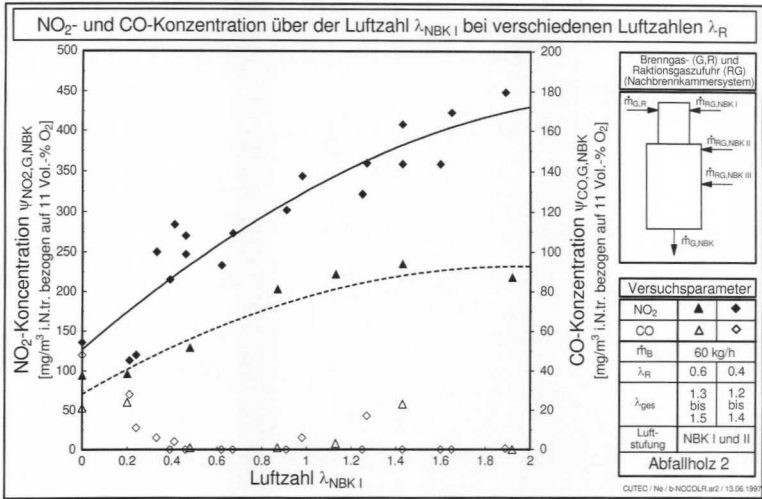


Bild 11. NO<sub>2</sub>- und CO-Konzentration über der Luftzahl  $\lambda_{NBK I}$  bei verschiedenen Luftzahlen  $\lambda_R$  [9].

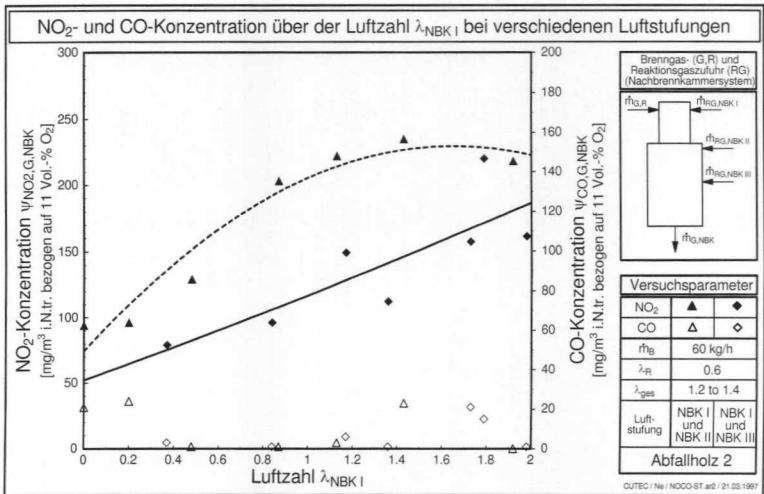


Bild 12. NO<sub>2</sub>- und CO-Konzentration über der Luftzahl  $\lambda_{NBK I}$  bei verschiedenen Luftstufungen [9].



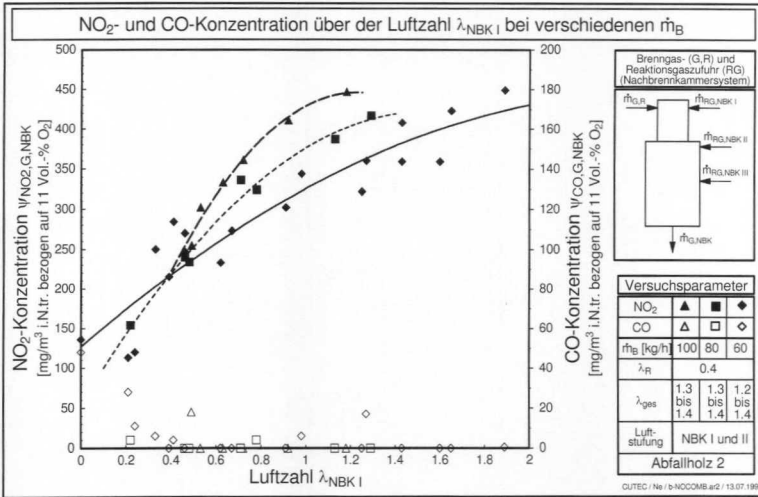


Bild 13. NO<sub>2</sub>- und CO-Konzentration über der Luftzahl  $\lambda_{NBK I}$  bei verschiedenen Brennstoffmassenströmen [9].

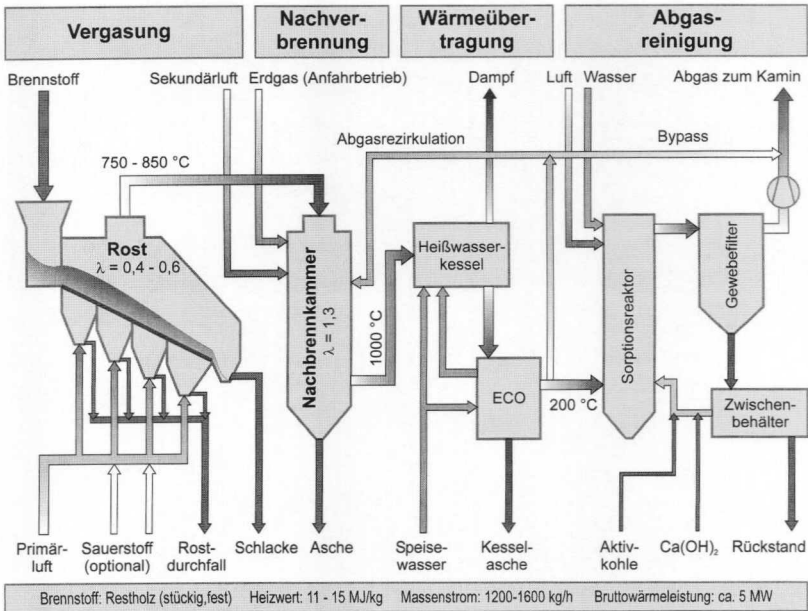


Bild 14. Vereinfachtes Verfahrensfließbild der Demonstrationsanlage.

Zeitabschnitte	Tätigkeiten	Dauer
<b>Vorbereitung</b>	Brennstoffstudie, Zusammenstellung der Unterlagen für Genehmigungsverfahren nach 17. BImSchV	6 Monate
<b>Planung der Gesamtanlage</b>	Basic Engineering / Detail Engineering	14 Monate
<b>Fertigung und Montage</b>	Fertigung und Aufbau der einzelnen Komponenten der Gesamtanlage	11 Monate
<b>Inbetriebnahme</b>	Kalt- und Warminbetriebnahme	5 Monate
<b>Versuchsbetrieb durch MARTIN / CUTEC</b>	Optimierung und Versuche mit verschiedenen Brennstoffen	12 Monate

Bild 15. Projektablaufplan für das Forschungsvorhaben „Vergasung von Biomasse“