

Erhöhung der Energieeffizienz bei Abfallverbrennungsanlagen durch Prozessführung und Anlagenschaltung



Dipl.-Ing. Reinhard Schu,
EcoEnergy Gesellschaft für
Energie- und Umwelttechnik mbH
Walkenried

Veröffentlicht: März 2006
Optimierung der Abfallverbrennung 3
Prof. Dr.-Ing. habil. Karl J. Thomé-Kozmiensky
Prof. Dr.-Ing. Michael Beckmann

Inhalt

KAP. 0 EINLEITUNG	5
KAP. 1 REDUZIERUNG DES LUFTÜBERSCHUSSES	6
Kap. 1.1 Unterstöchiometrische Verbrennung auf dem Rost	9
Kap. 1.2 Rauchgashomogenisierung und Stufenlufteinmischung	13
Kap. 1.3 Feuerungsleistungsregelung	18
Kap. 1.4 Vorschlag für ein optimiertes Feuerungskonzept	18
KAP. 2 RESTWÄRMENUTZUNG	18
KAP. 3 ERHÖHUNG DER DAMPFPARAMETER	18
Kap. 3.1 Stand der Technik	18
Kap. 3.2 BiFuelCycle ®	18
KAP. 4 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	18

Tabellen

Tabelle 1: Endtemperaturen Rauchgas bei Restwärmenutzung, nach [3]	18
--	----

Abbildungen

Bild 1: Sauerstoffgehalt im Rauchgas (tr.) in Abhängigkeit von der Luftzahl (Lambda)	6
Bild 2: Adiabate Verbrennungstemperaturen in Abhängigkeit von der Luftzahl (Lambda).....	8
Bild 3: Gezielte Trennung der Luftströme bei der unterstöchiometrischen Verbrennung auf dem Rost	9
Bild 4: Feuerleistungsdiagramm im Fernheizwerk Igelsta, Södertälje, Schweden.....	11
Bild 5: Kessel mit unterstöchiometrischer Verbrennung auf dem Rost, Fernheizwerk Igelsta, Södertälje, Schweden.....	12
Bild 6: Rauchgashomogenisierung über Eindüsungssysteme, erweitert nach [18].....	14
Bild 7: Rauchgashomogenisierung über Einbauten, erweitert nach [18].....	15
Bild 8: Keppel-Seghers-Prisma, verändert nach [19]	16
Bild 9: Einsatz von Tetratubes, verändert nach [23].....	18
Bild 10: Tetratubes nach ca. 4.000 Betriebsstunden.....	18
Bild 11:Tetratubes, eingebaut	18
Bild 12: System EcoTubes, verändert nach [14]	18
Bild 13: Prinzip der Feuerungsleistungsregelung nach ICCS, [58]	18
Bild 14: Prinzip System agam, verändert nach [12]	18
Bild 15: Optimiertes Feuerungskonzept, Luftstufung	18
Bild 16: Prinzipieller, idealisierter Temperaturverlauf bei unterstöchiometrischer Verbrennung auf dem Rost und mehrfacher Luftstufung	18
Bild 17: Einbau bei der unterstöchiometrischen Verbrennung auf dem Rost mit Nachbrennkammer im 1. Zug, ausgeführt beispielhaft als KS-Prisma und Tetratubes	18
Bild 18: Restwärmenutzung mit LUVO.....	18
Bild 19: Rauchgasreinigungskonzept.....	18
Bild 20: Restwärmenutzung mit Rauchgaskondensationsanlage	18
Bild 21: Thermisches Konzept der AVI Amsterdam [67].	18

Bild 22: Externer Überhitzer für feste Brennstoffe.....	18
Bild 23: BiFuelCycle im TS-Diagramm	18
Bild 24: Aufteilung Verdampfung, Überhitzung und ZÜ.....	18
Bild 25: Verteilung der Brennstoffe.....	18
Bild 26: Verfahrensschema BiFuelCycle mit Keppel-Seghers-Prisma und Tetratubes (NEM), alternativ für die letzte Stufenluftzugabe ECOTUBE	18
Bild 27: KPRO Schaltung Standardanlage.....	18
Bild 28: KPRO Schaltung BiFuelCycle-Anlage.....	18
Bild 29: Energieverteilung	18

Kap. 0 Einleitung

Den Verfahren der thermischen Abfallbehandlung wird bisher die Aufgabe der Abfallbeseitigung, d.h. der sicheren und umweltverträglichen Entsorgung zugeschrieben. Die Nutzung der Energie aus den Abfällen erfolgt weitgehend als Stromerzeugung, wobei die Auskopplung von Wärme nur stattfindet, wenn entsprechende Abnehmer vorhanden sind oder eine Fernwärmeversorgung saisonal möglich ist. Im Hinblick auf die Energienutzung sind die Anlagen im Allgemeinen nicht optimiert. Die Verknappung der Ressourcen an Primärenergieträgern und die Belange des Klimaschutzes erfordern es, auch die Energiereserven aus den ständig anfallenden Abfallmengen maximal zu nutzen.

Bei der direkten Verbrennung unvorbehandelter Siedlungsabfälle wird der Heizwert der Abfälle im Allgemeinen nur zu ca. 20 bis 25 % in Strom umgewandelt. Ursache dafür sind die ständig schwankenden Eigenschaften der Abfälle, die eine stetige Prozessführung enorm erschweren. Insbesondere werden die Anlagen durch die Wirkung korrosiver Verbindungen in ihrer Verfügbarkeit beeinträchtigt. Um Störungen und Ausfälle zu minimieren werden in den Dampferzeugern moderate Druck- und Temperaturparameter vorgesehen, die neben Schutzmaßnahmen die Korrosionsgeschwindigkeiten in vertretbaren Grenzen halten.

Aus der Sicht der Verfahrenstechnik und des Klimaschutzes ist es zwingend erforderlich, die Möglichkeiten der Energienutzung bei der Abfallverbrennung zu optimieren. Einerseits wurde nachgewiesen, dass die Verbrennung von Siedlungsabfall und Ersatzbrennstoff in Verbrennungsanlagen und bei der Mitverbrennung durch Anteile an CO₂-neutralen Stoffen bis 2020 ein Minderungspotential an CO₂-Äquivalenten von ca. 4,5 Mio. Mg besitzt [32]. Zum Anderen haben moderne Regelsysteme für Feuerungsanlagen die Potentiale, die Änderungen der Verbrennungseigenschaften der Abfälle aufzufangen.

Aufgabe des Beitrages ist es, die folgenden Wege zur Erhöhung der Energieeffizienz der thermischen Abfallbehandlung für die Rostfeuerungsstechnologie aufzuzeigen und noch zu lösende Aufgaben abzuleiten:

1. Reduzierung der Abgasverluste durch Senkung der Luftzahl auf $< 1,25$ durch unterstöchiometrische Prozessführung auf dem Rost und mehrstufige Verbrennung des Brenngases in der Nachbrennkammer. Dies kann nur durch eine Optimierung der Feuerungsleistungsregelung auf dem Rost und einer separaten Steuerung der Nachverbrennung in der Nachbrennkammer erfolgen. Wesentlich bei der Nachverbrennung ist eine gut gesteuerte Einmischung der gestuften Verbrennungsluft in der Nachverbrennung z.B. durch Einbauten. Zur Optimierung der Durchmischung ist die Sicherung einer ausreichenden Eindringtiefe in den Verbrennungsgasstrom erforderlich.
2. Reduzierung der Wärmeverluste durch Restwärmenutzung nach der Rauchgasreinigung z. B. durch Frischluftvorwärmung, Kondensatvorwärmung oder Fernwärmeauskopplung mit Rauchgaskondensation
3. Wirkungsgradsteigerung der Energieumwandlung durch Erhöhung der Dampfparameter z.B. durch externe Dampfüberhitzung

Kap. 1 Reduzierung des Luftüberschusses

Der Kesselwirkungsgrad von Kohleverbrennungsanlagen liegt bei über 93% während Abfallverbrennungsanlagen lediglich einen Kesselwirkungsgrad von ca. 83% aufweisen. Das ist begründet durch den üblicherweise hohen Luftüberschuss sowie hohe Rauchgastemperaturen am Kesselende. Zur Vermeidung der Überhitzung der Roststäbe wird eine Luftvorwärmung über einen Rauchgasluftvorwärmer häufig nicht genutzt. Zum Erreichen eines Wirkungsgrads wie bei Kraftwerken ist ein Luftüberschuss $< 1,25$ notwendig. Eine Senkung der Luftzahl (λ) unter 1,4 ist durch die Novellierung der 17. BImSchV vom 14.08.2003 möglich. Ein Mindestsauerstoffgehalt im Rauchgas wird nicht mehr gefordert. In **Bild 1** ist der Zusammenhang zwischen der Luftzahl, dem Restsauerstoffgehalt im trockenen Rauchgas und dem spezifischen Rauchgasvolumen dargestellt.

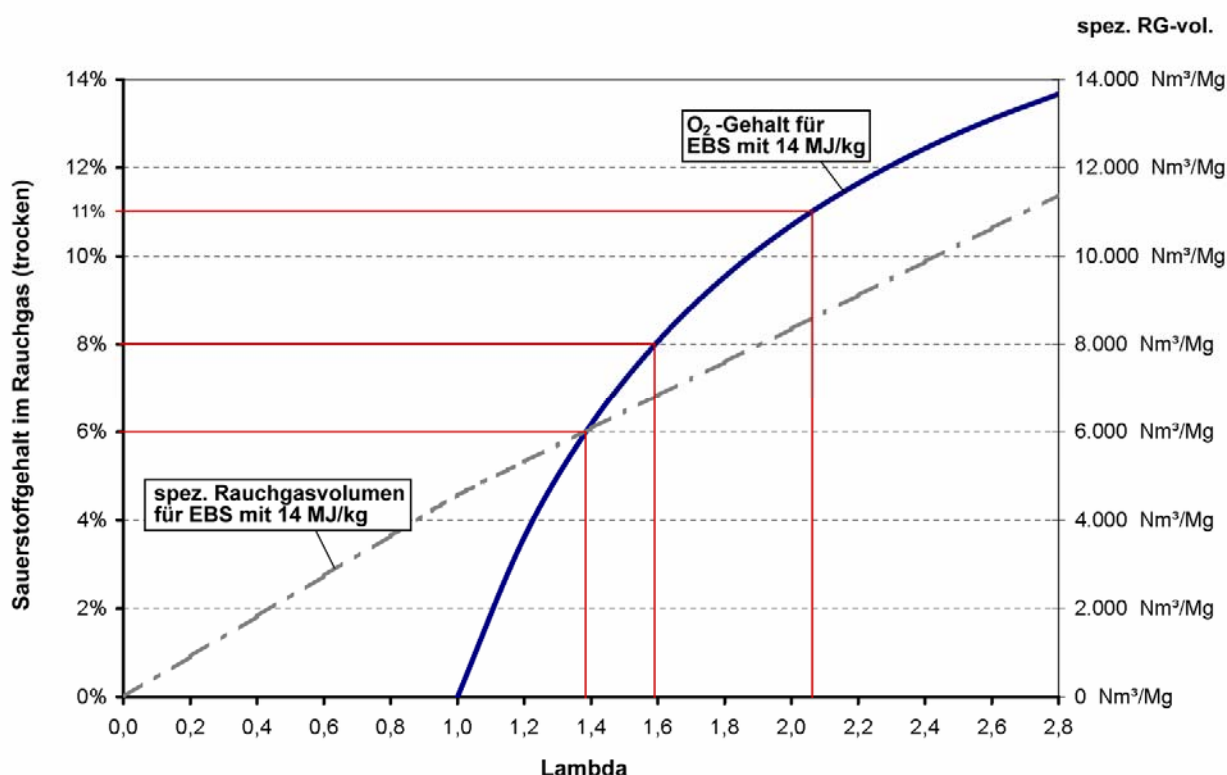


Bild 1: Sauerstoffgehalt im Rauchgas (tr.) in Abhängigkeit von der Luftzahl (Lambda)

Die Minimierung der Luftzahl ist verfahrenstechnisch begrenzt. Generell gilt: Je inhomogener ein Brennstoff ist, desto höher ist die erforderliche Luftzahl und desto größer sind die Abgasverluste und Anlagengrößen.

Abfallverbrennungsanlagen werden auch dann mit extrem inhomogenem Brennstoff beschickt, wenn Behandlungsanlagen vorgeschaltet sind. Die Rauchgasmenge bei einer Rostverbrennung ist bis zu doppelt so hoch wie bei Erdgasfeuerungen. Studien [37], Versuchsanlagen ([4][5][7][46][54]) und auch großtechnische Anlagen ([19][20][30][60]) haben bereits bewiesen, dass durch Optimierung des Verbrennungsprozesses eine Reduzierung des Luftüberschusses bei Rostfeuerungsanlagen auf eine Luftzahl möglich ist, die der einer Gasfeuerung nahe kommt.

Betrachtet wird für die Reduzierung des Luftüberschusses ausschließlich die Rostfeuerung. Den Verfassern sind keine Erkenntnisse über wesentliche Reduzierungen der Luftzahl bei der Verbrennung von Abfällen mit anderen Verbrennungstechnologien, z.B. Wirbelschicht- oder Drehrohröfen, bekannt. Auch bei diesen Technologien ist ein hohes Optimierungspotential zu vermuten.

Zirkulierende Wirbelschichtverbrennungsanlagen können unter der Voraussetzung eines homogenisierten Brennstoffes eine Luftzahl von $< 1,25$ erreichen. Selbst bei aufbereiteten Ersatzbrennstoffen aus Abfällen werden ZWS-Verbrennungsanlagen in der Praxis mit einem $\lambda \approx 1,4$ betrieben.

Wird in einer Rostfeuerung die Primärverbrennung unterstöchiometrisch durchgeführt (teilweise Vergasung) und der Gasausbrand in die Nachbrennkammer verlagert, so ergeben sich für die Gesamtanlage Luftzahlen zwischen 1,1 bis 1,2 [4]. Historisch bedingt wurden Müllverbrennungsanlagen für Abfälle mit geringen Heizwerten ausgelegt. Die 17. BImSchV forderte die Einhaltung von 850°C über 2 Sekunden. Dadurch musste von einer Luftzahl von $\lambda = 1,8$ bis 2,2 auf $\lambda = 1,6$ bis 1,8 zurückgegangen werden. Jedoch musste bei niedrigen Heizwerten des Hausmülls aufgrund des hohen Luftüberschusses Öl zugefeuert werden. Ein niedrigerer Luftüberschuss hätte aufgrund des inhomogenen Brennstoffes nicht zu einem hinreichenden Ausbrand der Rauchgase geführt, ohne weitere homogenisierende Maßnahmen vorzusehen, die in den folgenden Abschnitten erläutert werden wie:

- Angepasste Feuerungsleistungsregelung
- Rauchgashomogenisierung durch Eindüsung von Stufenluft, Rezigas oder Dampf oder durch Einbauten wie statische Mischer mit zusätzlicher Eindüsung.

Die Motivation für die Senkung der Luftzahl liegt beim Umbau vorhandener Anlagen nicht in der energetischen Optimierung sondern es stehen im Vordergrund:

- Die Erhöhung der Durchsatzleistung, da häufig die Kapazität der Rauchgasreinigung limitierend ist und durch die Reduzierung der Luftzahl mit einer Reduzierung des spezifischen Abgasvolumenstroms einhergeht.
- Die Einhaltung der 17. BImSchV bezogen auf Emissionsparameter, Verweilzeit und Temperatur.
- Die Reduzierung der Korrosionserscheinungen durch Primärmaßnahmen wie Feuerungsleistungsregelung und Rauchgashomogenisierung zur Vermeidung von Temperaturspitzen und Reduzierung der Rauchgasgeschwindigkeit im Kessel.

So werden gerade bei hohen Dampfdrücken und daher hohen Verdampfungstemperaturen Maßnahmen zur Vereinheitlichung oder Absenkung der Rauchgastemperatur durch Rauchgasrezirkulation eingeführt ([44][15][1][54][68][72]). Diese Maßnahmen dienen nicht vorrangig der Senkung der Luftzahl zum Zweck der energetischen Optimierung des Kesselwirkungsgrades.

Die Motivation zur Wirkungsgradsteigerung liegt entweder in der Subventionierung der Energievergütung, wie in den Projekten Acerra, Neapel, Italien ([26][59]) und AVI Amsterdam ([48][66][68]) oder bei den Rahmenbedingungen moderner Ersatzbrennstoffverwertungsanlagen, die ca. 50% des Umsatzes aus dem Energieerlös erwirtschaften.

Die AVI Amsterdam wird in der neuen optimierten Anlage [68] vorrangig unvorbehandelten Siedlungs- und Gewebeabfall mit gemäßigten Heizwerten verbrennen, während es sich bei der Abfallverbrennungsanlage Acerra und bei den modernen Ersatzbrennstoffverwertungsanlagen um heizwertreiche Abfälle mit Heizwerten bis zu 18.500 kJ/kg , im Mittel 12.500 kJ/kg bis 15.000 kJ/kg , handelt.

In der AVI Amsterdam ist bei gemäßigten Heizwerten der Abfälle von ca. 10.000 kJ/kg eine Luftzahl von ca. 1,4 ohne Frischluftvorwärmung nur erreichbar, wenn 30% der Rauchgase zur Kühlung des Feuerraums zurückgeführt werden. Beim Einsatz von Ersatzbrennstoff ist eine Reduzierung der Luftzahl auf ca. 1,4 nicht mehr nur durch die Erhöhung der Rezigasmenge möglich. Eine energetisch sinnvolle Frischluftvorwärmung wird zusätzlich erschwert.

Bei heizwertreichen Abfällen ist noch größeres Augenmerk auf eine gleichmäßige, niedrige Temperaturverteilung im Feuerraum und Kessel zu legen. Die Aschen der Ersatzbrennstoffe sind noch niedriger schmelzend und haben einen höheren Alkaliengehalt als Hausmüll. Dies führt zu einer stärkeren Belagbildung und einer Reduzierung der Standzeiten der Ausmauerung, wenn nicht entsprechend angepasste Temperaturen eingestellt werden.

Besonders in Monoverbrennungsanlagen für schadstoffbeladene Ersatzbrennstoffe ist die Chlorproblematik nicht zu vernachlässigen. HCl-Rohgaskonzentrationen von 2.000 mg/Nm³ im Tagesmittel und Spitzen von über 5.000 mg/Nm³ sind in heutigen Ersatzbrennstoffanlagen nicht unüblich. Diese Werte liegen weit über den Mittelwerten von reinen Hausmüllverbrennungsanlagen. Eine Erhöhung der Verbrennungstemperatur führt zur Steigerung des Korrosionspotentials.

In **Bild 2** ist der Zusammenhang zwischen der Luftzahl und der adiabaten Verbrennungstemperatur beispielhaft für Hausmüll bei 8,5 MJ/kg und für Ersatzbrennstoff bei 14 MJ/kg mit und ohne Vorwärmung dargestellt.

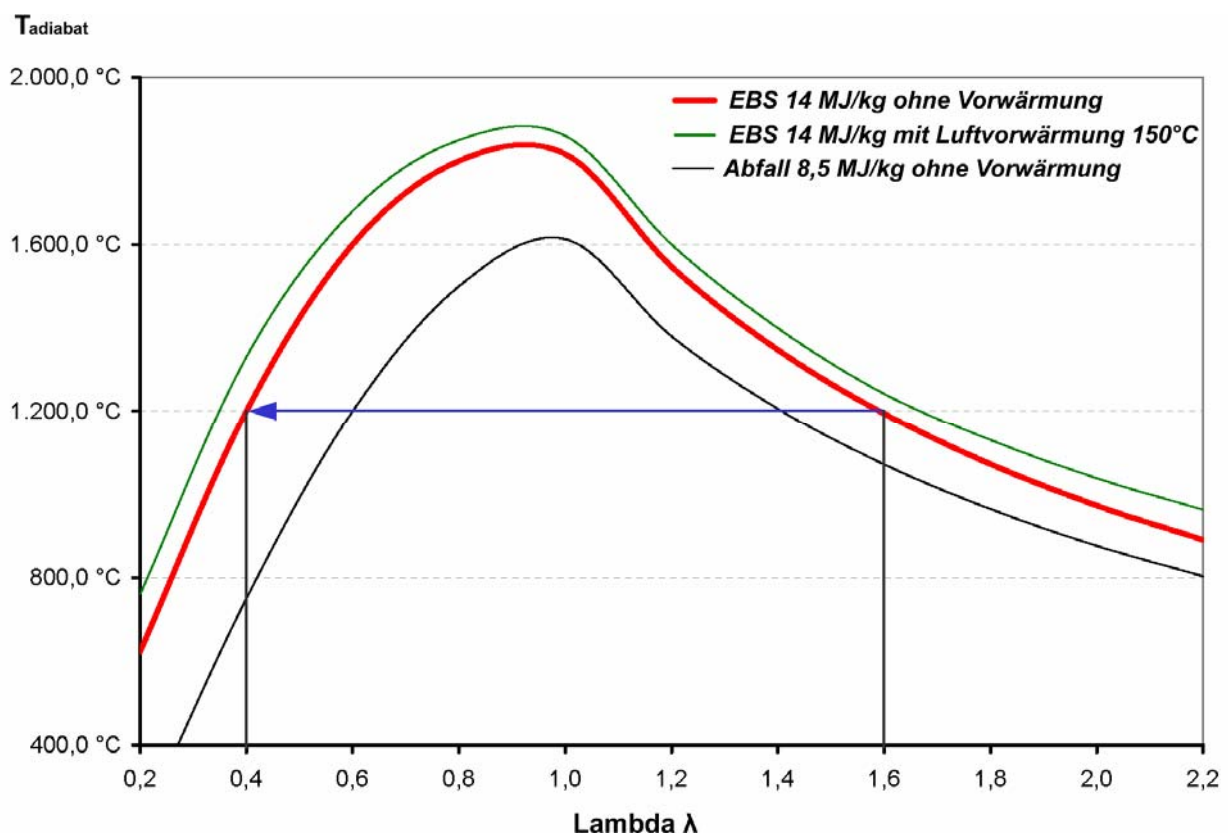


Bild 2: Adiabate Verbrennungstemperaturen in Abhängigkeit von der Luftzahl (Lambda)

Die unterstöchiometrische Verbrennung auf dem Rost ermöglicht bei hohen Heizwerten die Reduzierung der Luftzahl.

KAP. 1.1 UNTERSTÖCHIOMETRISCHE VERBRENNUNG AUF DEM ROST

Bei der unterstöchiometrischen Verbrennung auf dem Rost wird die Hauptluftmenge in der Nachbrennkammer zugeführt [4][5][7][46][48][50][51].

Die Verbrennung wird bewusst in die Verfahrensschritte:

1. Trocknung, Pyrolyse/Vergasung auf dem Rost
2. Ausbrand der Pyrolyse bzw. Vergasungsrückstände
3. Nachverbrennung des Brenngases

getrennt (siehe Bild 3).

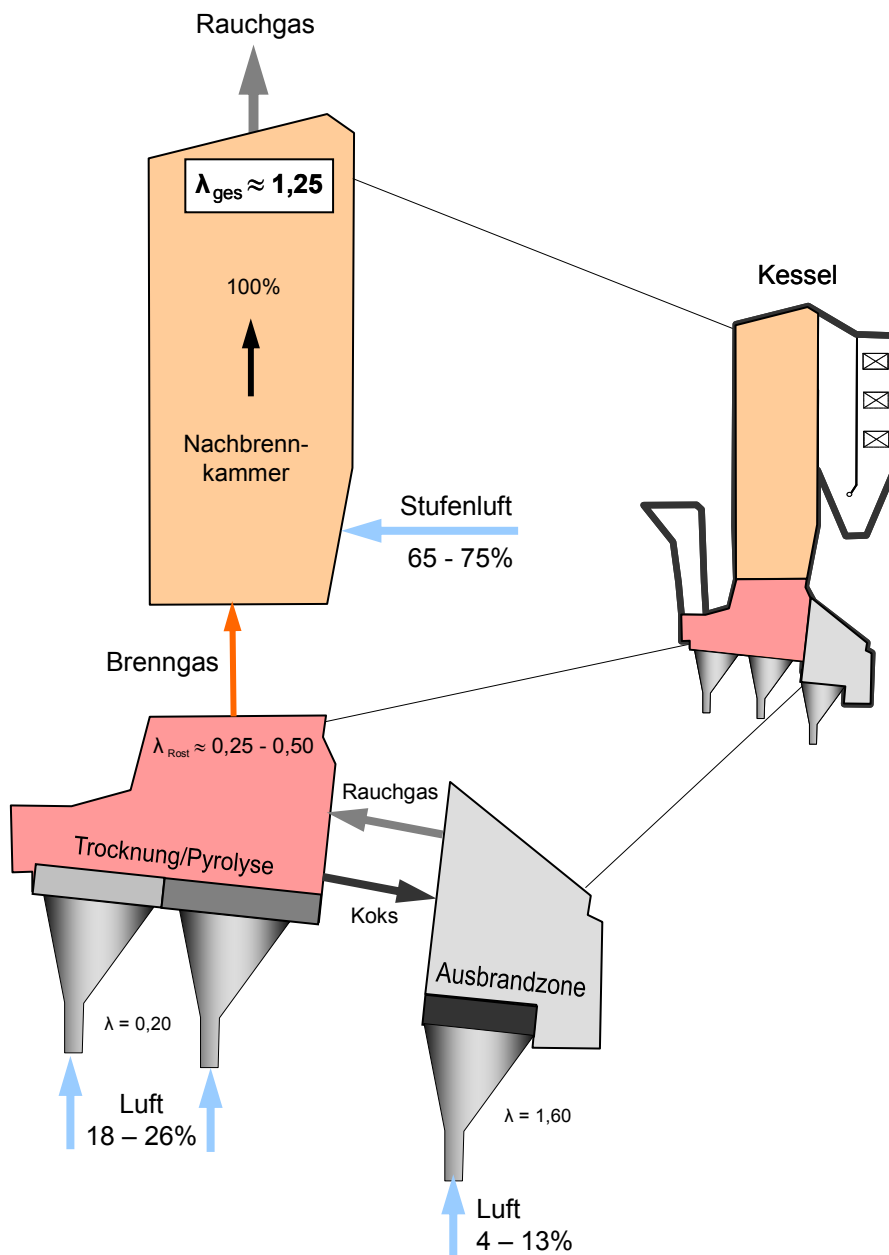


Bild 3: Gezielte Trennung der Luftströme bei der unterstöchiometrischen Verbrennung auf dem Rost

Die gesamte dem Rost zugeführte Luft (Primärluft), bezogen auf den zugeführten Abfall, entspricht einer Luftzahl von 0,25 bis 0,5, abhängig vom Wassergehalt und Heizwert der Abfälle. In der ersten Stufe laufen die Vorgänge Trocknung, Entgasung und Vergasung ab. In der Ausbrandzone werden überstöchiometrische Bedingungen geschaffen, um einen hohen Schlackeausbrand sicherzustellen. Jedoch bleibt die Luftzahl für die gesamte Primärluft unter 0,5. Durch die Pyrolyse- und Vergasungsgase wird ein erheblicher Teil des Abfallheizwertes in die Nachbrennkammer überführbar. Wird von einer Primärluftzahl von 0,4 bis 0,5 ausgegangen, erhält man beispielsweise für ein Abfallholz ein Vergasungsgas mit einem Heizwert von $H_u = 2.500$ kJ/kg entsprechend [45]. Der Heizwert der Gase, die mit einer Temperatur von 850 °C bis 950 °C in die Nachverbrennung eintreten, reicht aus, um eine eigenständige Verbrennung mit gestufter Luftführung, gegebenenfalls mit Abgasrückführung zur Reduzierung von CO , C_xH_y und NO , durchzuführen.

Die geringe Primärluftzahl senkt die Durchströmungsgeschwindigkeit im Brennstoffbett. Damit wird eine erhebliche Reduzierung der Flugstaubmenge erreicht, die in die Nachbrennkammer transportiert wird.

Wird die unterstöchiometrische Verbrennung von Abfall auf dem Rost mit über seine Länge verteilter Primärluft so durchgeführt, dass sich eine Primärluftzahl um 0,5 ergibt, so stellen sich Betttemperaturen um 850 °C bis 900 °C ein. Eine Wasserkühlung des Rostes ist dann nicht erforderlich [48].

Die Nachverbrennung sollte vollständig von der unterstöchiometrischen Verbrennung auf dem Rost getrennt sein, um beide Einheiten unabhängig voneinander optimieren zu können. Mit den genannten Bedingungen sind in der Nachbrennkammer Temperaturen erreichbar, die über denen bei klassischer Fahrweise liegen. Die Einstellung der Primärluft erfolgt bei Rostfeuerungsanlagen üblicherweise auf ca. 40% bis 70% der Gesamtluftmenge. Bei einem $\lambda = 1,6$ entspricht das einem λ von 0,65 bis 1,15 auf dem Rost, also wird teilweise unterstöchiometrisch verbrannt. Bei einer Primärluftzahl von 0,25 bis 0,5 lassen sich Gesamtluftzahlen - einschließlich Stufenluft - um $\lambda < 1,25$ erreichen [48].

Die unterstöchiometrische Verbrennung auf dem Rost wird bereits in vielen Anlagen zur Verbesserung der Verbrennungsführung, Reduzierung der Temperaturen im Rostbereich, Verbesserung der Mischungsenergie bei der Sekundärluftzugabe und zur Reduzierung der Gesamtluftzahl eingesetzt.

Erfahrungen mit unterstöchiometrischer Verbrennung auf dem Rost liegen in der MVA Schweinfurt vor. Bei einem Primärluftanteil von 42 %, das entspricht einem $\lambda_{\text{Rost}} = 0,67$, und einem $\lambda_{\text{ges}} = 1,6$, bestehen keine Probleme mit dem Ausbrand [69].

Umfangreiche Versuchsergebnisse aus einer Versuchsanlage zur unterstöchiometrischen Verbrennung auf dem Rost wurden von der TU Clausthal, Institut Energieverfahrenstechnik und vom CUTEC Institut Clausthal-Zellerfeld veröffentlicht [24].

Von Noell KCA - heute Fisia Babcock - wurde 1997 das Fernheizwerk Igelsta, Södertälje, Schweden, von Kohle und Schweröl auf EBS-Verbrennung umgebaut [60]. Bei dem Umbau wurden eine moderne Feuerungsleistungsregelung nach dem ICCS-System mit Thermoelementen und ein wassergekühlter Rost installiert [58]. Die unterstöchiometrische Verbrennung auf dem Rost wurde eingeführt.

Der Rost wird mit einer Luftzahl von 0,25 bis 0,5 bei einer Gesamtluftzahl von 1,55 bis 1,66 betrieben. Durch die unterstöchiometrische Prozessführung ist der Einsatz eines weiten Heizwertespektrums von 13 bis 31 MJ/kg möglich, wie das Feuerungsleistungsdiagramm in Bild 4 ausweist.

Trotz der unterstöchiometrischen Prozessführung konnte durch die ausgeprägte Ausbrandzone, ausgeführt mit einem Treppenrost, ein Ausbrand von < 3 Ma.-% Glühverlust gewährleistet werden. Wegen der hohen Betttemperaturen, möglich durch den wassergekühlten Rost, ist die Schlacke versintert, bei einigen Brennstoffen und Fahrweisen sogar geschmolzen.

Es konnte gezeigt werden, dass die Prozessführung mit der unterstöchiometrischen Verbrennung auf dem Rost mit dem heutigen Stand der Technik in Rostfeuerungen durchführbar ist.

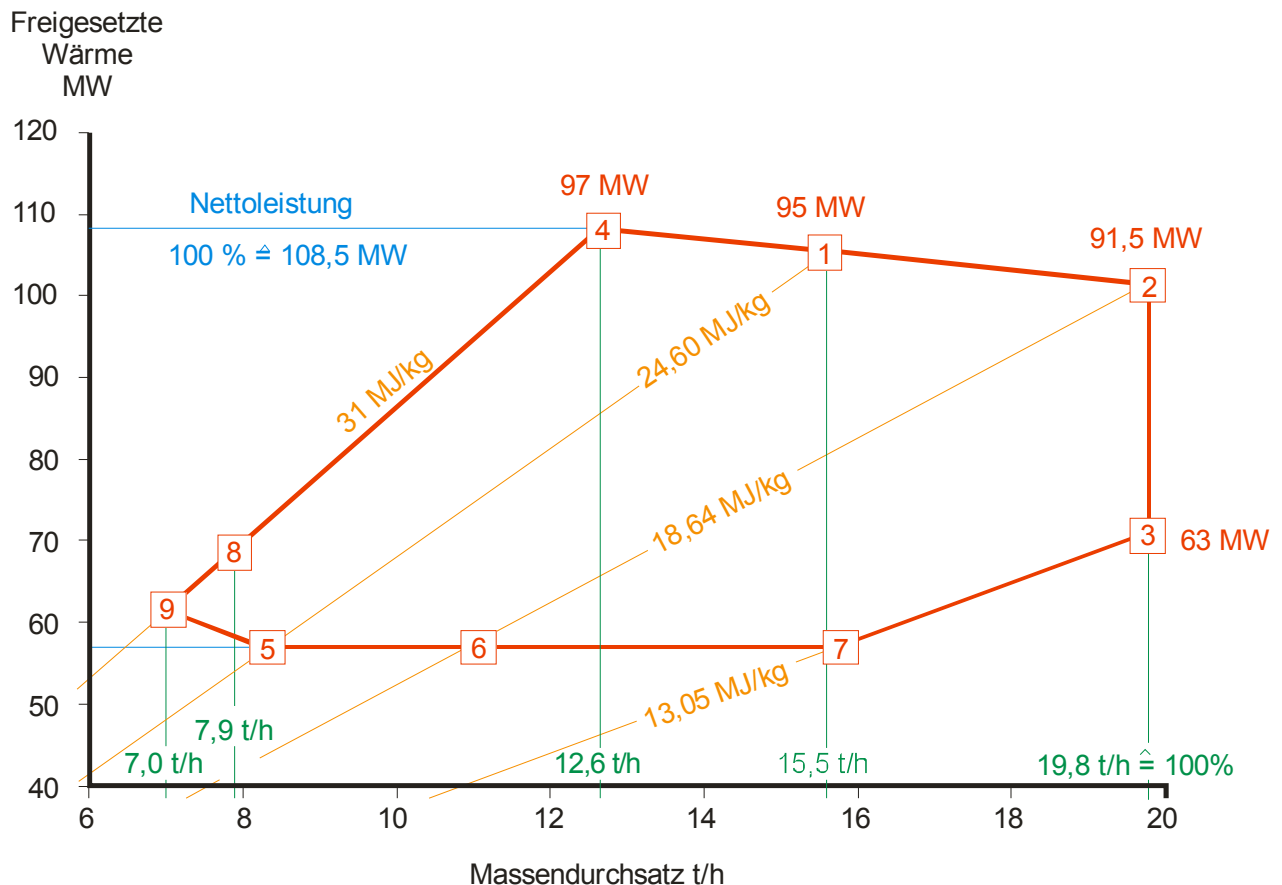


Bild 4: Feuerleistungsdiagramm im Fernheizwerk Igelsta, Södertälje, Schweden

Quelle: Thomé, E, Energetische Verwertung von Ersatzbrennstoffen in einem umgebauten Kraftwerkskessel. In Thomé-Kozmiensky (Hrsg.): Ersatzbrennstoffe 2, Neuruppin: TK-Verlag, 2002, S 209-218

Der Aufbau des Kessels ist aus Bild 5 ersichtlich.

Die unterstöchiometrische Prozessführung auf dem Rost und eine deutliche Reduzierung des Gesamtluftüberschusses auf eine Luftzahl < 1,25 konnte allerdings bisher erst in Versuchen nachgewiesen werden ([4][5][7][46][48]).

Für die Prozessführung ist auf folgende Punkte zu achten [55]:

- Einwirkung der höheren Schwermetall- und Chloridwerte der Schlacke auf das Eluatverhalten und entsprechend auf die Verwertung der Schlacken. Vor allem ist der für Langzeitstabilität wichtige Carbonatpufferspeicher zu beachten, dies gilt allgemein für Rostfeuerungsanlagen.
- Einfluss einer eventuell abnehmenden Flugstaubmenge auf das Korrosionspotential, das sich mit einem Anstieg des Salz-Asche-Verhältnisses ergibt.

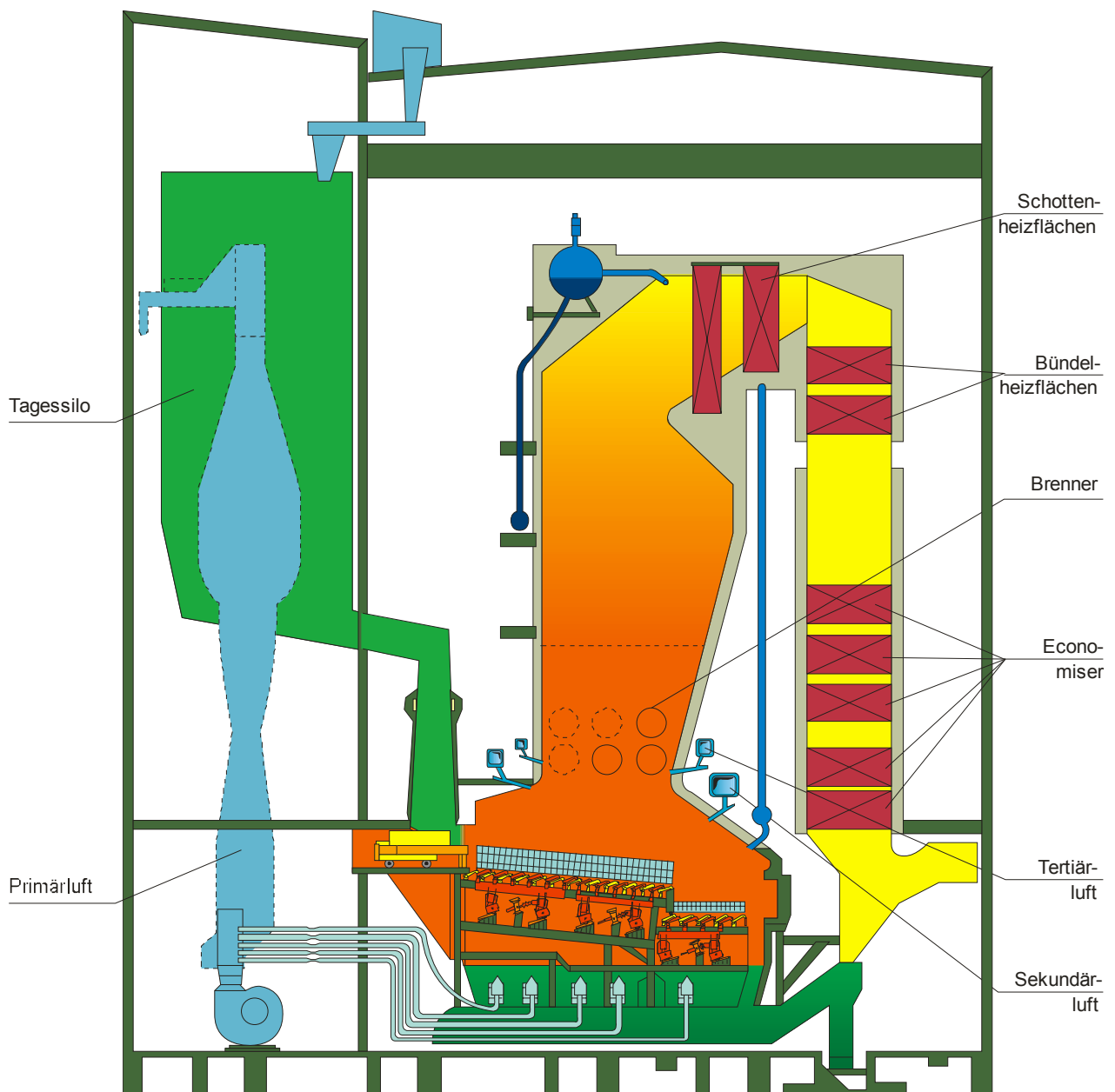


Bild 5: Kessel mit unterstöchiometrischer Verbrennung auf dem Rost, Fernheizwerk Igelsta, Södertälje, Schweden

Quelle: Thomé, E, Energetische Verwertung von Ersatzbrennstoffen in einem umgebauten Kraftwerkskessel. In Thomé-Kozmiensky (Hrsg.): Ersatzbrennstoffe 2, Neuruppin: TK-Verlag, 2002, S 209-218

KAP. 1.2 RAUCHGASHOMOGENISIERUNG UND STUFENLUFTEINMISCHUNG

Durch die Heterogenität der Abfälle entsteht bei der Umsetzung des Feststoffes in ein Rauchgas oder ein Brenngas ein ebenfalls heterogenes Gasmisch. Für eine optimale Verbrennung mit niedrigen Luftzahlen sind daher eine Homogenisierung des Gases und eine effektive Stufenluftzugabe unerlässlich. Mittels der im Folgenden aufgeführten Rauchgashomogenisierungsmaßnahmen über Eindüsen oder Einbauten mit Eindüsen konnten Altanlagen bereits erfolgreich umgerüstet bzw. Neuanlagen gebaut werden. Damit gelang es, die hohen Luftzahlen von 1,8 bis 2,2 auf Werte von 1,4 bis 1,6 zu reduzieren.

Die Pyrolyse- und Vergasungsgase, die aus dem Brennstoff in der 1. bis 2. Rostzone entweichen, enthalten permanente unverbrannte Gase (H_2 , CO , CH_4) und besonders bei höheren Kunststoffanteilen höhere Kohlenwasserstoffe [31]. Um die erforderliche Ausbrandqualität zu erreichen, ist die bekannte 3-T-Regel entscheidend. Die Temperatur, die Turbulenz und die Verweilzeit (Time) müssen ausreichend sein. Dabei dürfen die Feuerfestausmauerung oder die Wände im 1. Zug nicht zu hoch thermisch beansprucht werden. Von entscheidender Bedeutung ist, wie der Impulsstrom der Sekundärluft für eine maximale Vermischungsqualität nutzbar gemacht wird [16].

Durch zahlreiche Messungen und Erfahrungen konnte nachgewiesen werden, dass sowohl die Vorgaben für die Verbrennungstemperatur als auch für die Verweilzeit in der 17. BImSchV willkürliche Festlegungen sind, die in einer realen Feuerung nicht zwingend erforderlich sind, um die notwendige Verbrennungsqualität zu erreichen [22].

Es ist darauf zu achten, dass nach der Vermischung (Rührkesselreaktor) noch eine ausreichende Ausbrandzeit (Kolbenströmungsreaktor) zur Verfügung steht.

CO und C_{org} werden in modernen Abfallfeuerungen auf Werte weit unterhalb der Emissionsgrenzwerte reduziert. Nach einer Verweilzeit von ca. 0,5 s nach der letzten Sekundärluftzugabe erfolgt bei einer Temperatur von 850 °C praktisch keine Reduzierung der Konzentration des CO oder von Dioxinen (PCDD/F) mehr. Die Verbrennung der Dioxine erreicht nicht den Emissionsgrenzwert. Da über die Denovo-Synthese eine Neubildung im Kessel erfolgen kann, werden die Emissionsgrenzwerte durch die Rauchgasreinigung gesichert. Eine Reduzierung der PCDD/F-Konzentration im Rauchgas durch höhere Verbrennungstemperaturen oder längere Verweilzeit ist daher nicht erforderlich.

Daher ist die Vermischung der Pyrolyse- und Vergasungsgase in der Nachbrennzone die wichtigste Bedingung für einen sicheren Ausbrand und die Freisetzung der Reaktionswärme im unteren Teil des 1. Zuges. Ein weiterer nicht zu vernachlässigender Vorteil der Homogenisierung ist die Reduzierung der Korrosionsraten durch Abbau von Temperaturspitzen, CO -Spitzen und lokal erhöhten Schadstoffkonzentrationen. Durch die Senkung der Rauchgasmenge werden zusätzlich die Rauchgasgeschwindigkeiten im Kessel und damit auch ein Einflussfaktor auf die Korrosion gesenkt.

Raughashomogenisierung über Eindüsungen

Wesentlich bei der Nachverbrennung ist eine gut gesteuerte Einmischung der Sekundär- und Tertiärluft in der Nachverbrennung durch z.B. Einbauten und Eindüsung zur Erhöhung der Eindringtiefe und zur Optimierung der Durchmischung. Die Optimierung der Turbulenz in der Nachbrennkammer wird durch unterschiedliche Eindüsungssysteme oder durch Einbauten gewährleistet (siehe Bild 6 und Bild 7).

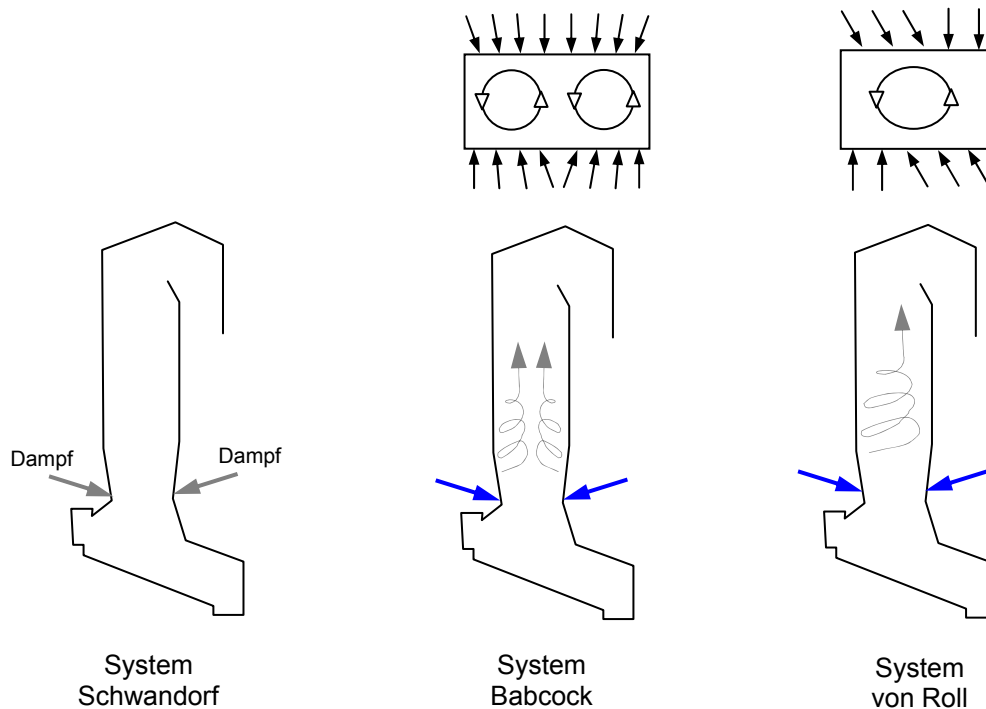


Bild 6: Rauchgashomogenisierung über Eindüsungssysteme, erweitert nach [18]

System Schwandorf

Bei dem von Krüger entwickelten Verfahren (eingesetzt in der MVA Schwandorf) wird durch „heiße“ Dampfstrahlen, die mit hoher Geschwindigkeit in die Rauchgase eingeblasen werden, eine „hydraulische“ Rührwirkung im Rauchgasstrom erzeugt, ohne durch großvolumige „kalte“ Sekundärluftstrahlen die CO-Nachverbrennung zu unterdrücken ([29][30]). Somit wird ohne großen messtechnischen Aufwand sichergestellt, dass der Ausbrand auch bei stark schwankendem Heizwert eingehalten werden kann. Mit die Maßnahme konnte die Durchsatzleistung des Kessels durch Senkung des Restsauerstoffgehaltes im Rauchgas gesteigert werden. Der Dampfverbrauch wird bei diesem Verfahren als Nachteil diskutiert. Der Energieverlust durch die Dampfeindüsung kann aber energetisch dem reduzierten Eigenbedarf der Gebläse durch die Rauchgasmengenreduzierung entgegen gerechnet werden.

Systeme Babcock und von Roll (tangentele Eindüsung von Sekundärluft)

Abhängig vom eingesetzten Feuerraumkonzept (Gleich-, Mittel-, Gegenstromfeuerung) haben sich eine Reihe verschiedener Varianten zur Sekundärlufteindüsung etabliert, die im Wesentlichen herstellerspezifischen Charakter haben ([18][19][20]).

Eindüsung von Sekundärluft mit Überschallgeschwindigkeit

Die vorgewärmte Sekundärluft wird bei diesem Verfahren mittels Lavaldüsen in die Nachbrennkammer eingedüst. Durch die hohe Austrittsgeschwindigkeit der Druckluft von 670

m/s und eine Vorheizung auf 250 °C treten die Strahlen sehr tief in den zu durchmischenden Bereich ein und sichern eine gute Durchmischung der Feuerungsgase auch über größere Tiefen von 4 bis 6 m.

Bezogen auf die Primärluft, beträgt der Anteil unter 2 %, so dass der zugeführte Sauerstoffanteil vernachlässigt werden kann und aus der Eindüsung keine zusätzliche Bildung von NO_x resultiert [37].

Rezirkulationsgaseindüsung

Durch die Rezirkulation von Rauchgas kann die Mischungsenergie ohne gleichzeitige Erhöhung der Sekundärluftmenge und damit des Restsauerstoffgehaltes erhöht und eine bessere Homogenisierung in der Feuerung erzielt werden. Vorteil der Rauchgasrezirkulation ist die zusätzliche Reduzierung der Verbrennungstemperaturen. Nachteilig sind jedoch der erhöhte apparative Aufwand, der höhere elektrische Eigenbedarf durch die Gebläseleistung und eine Verschiebung der Wärmeauskopplung auf den Überhitzerbereich sowie die erhöhten Rauchgasgeschwindigkeiten im Kessel, die das Korrosionsrisiko erhöhen.

Rauchgashomogenisierung über Einbauten

Zur Homogenisierung des durch die hohen Temperaturen sehr viskosen Rauch- bzw. Brenngases ist der Einsatz einer Mischungsenergie unerlässlich. Die Mischungsenergie kann, wie im vorherigen Kapitel beschrieben, durch eine Strömung induziert werden oder über Einbauten erfolgen, die wie statische Mischer wirken.

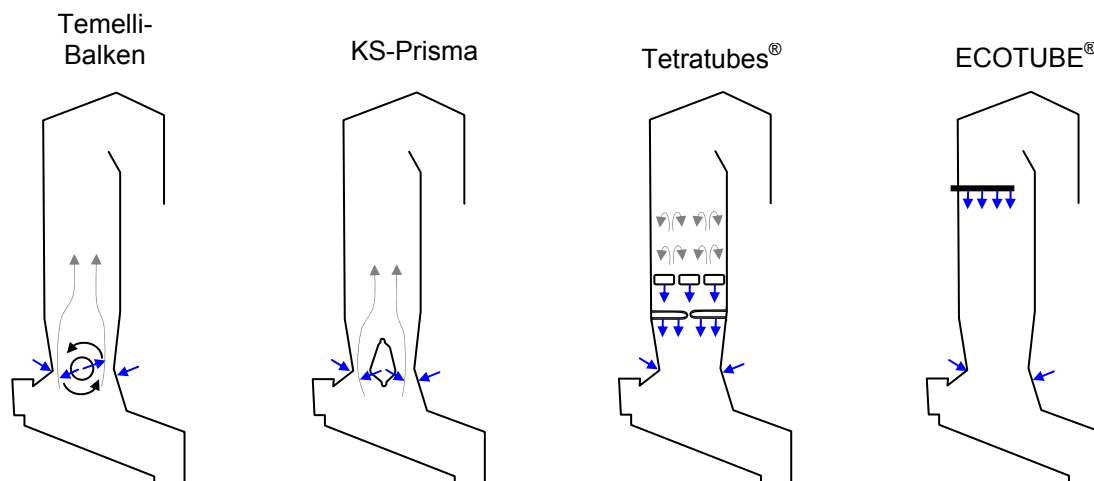


Bild 7: Rauchgashomogenisierung über Einbauten, erweitert nach [18]

Bei dem **Temelli-Verfahren** (eingesetzt in der MVA Wuppertal) wird der Rauchgasstrom vor Einleitung in die Nachbrennkammer in Teilströme aufgeteilt. Die Sekundärluftzuführung erfolgt über luftgekühlte, rotierende Sekundärluft-Düsenbalken, angeordnet im Ausbrandbereich des Rauchgasstromes. Mit diesem Verfahren werden niedrige Korrosionsraten und lange Reisezeiten erreicht. Nachteilig ist eine größere Verschleiß- und Reparaturanfälligkeit der rotierenden Luftbalken [18].

Bei dem **Keppel-Seghers-Prisma** (KS-Prisma) wird der Rauchgasstrom vor Einleitung in die Nachbrennkammer in zwei Teilströme aufgeteilt. Diese Aufteilung wird erreicht durch ein in das Kessel-Umlaufsystem eingebundenes, keramisch abgekleidetes, wassergekühltes Membranwand-Prisma [19] siehe **Bild 8**.

Die Sekundärluftzuführung erfolgt von der Kesselstirnwand, der Kesselrückwand und vom Sekundärluft-Düsenprisma in den geteilten Rauchgasstrom. Die Sekundärluftdüsen sind versetzt eingebaut.

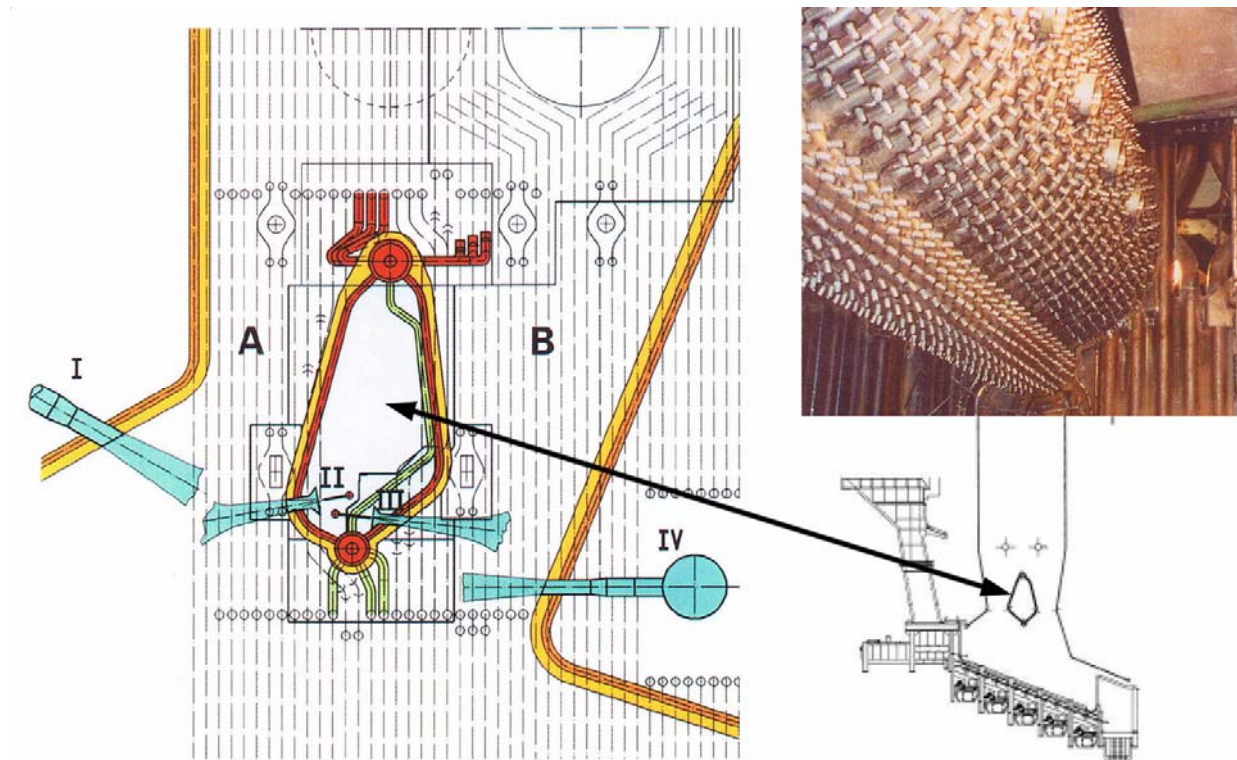


Bild 8: Keppel-Seghers-Prisma, verändert nach [19]

Der Vorteil einer derartigen Anordnung ist, dass der erforderliche Impuls und die erforderlichen Eindringtiefen der Sekundärluft für eine gute Verwirbelung der Rauchgase kleiner sind. Dadurch wird die Bildung von Strähnen weiter reduziert. Die Eindüsung wird wassergekühlt (als Teil des Dampferzeugers) ausgeführt, um den thermischen Verschleiß gering zu halten [19].

Für den Einsatz des Keppel-Seghers-Prismas sind vielfache Referenzen verfügbar:

- MVA Bonn; 1997/1998/1999; 3 Linien [19][27]
- AZN Moerdijk; 2001-2003; 3 Linien [2]
- MHKW Mannheim 2003, MKE [2]

Kumuliert ergibt sich eine Betriebszeit von über 25 Jahren. Zurzeit wird ein Keppel-Seghers-Prisma in einer 78 MW_{th} Ersatzbrennstoffverbrennungsanlagen in Modena, Italien installiert. Die Anlage wird 2006 in Betrieb genommen ([1][2]).

Langzeituntersuchungen an der Anlage AZN Moerdijk, in denen über den Zeitraum eines Jahres eine Linie mit installiertem KS-Prisma mit einer Linie ohne KS-Prisma verglichen wurde (Kessel-druck 100 bar), haben folgende Ergebnisse gezeigt [1]:

- Eine deutliche Vergleichmäßigung der T- und O₂- Profile in einer horizontalen Ebene in bis zu 5 m Höhe über dem Keppel-Seghers-Prisma war zu beobachten. Um unter anderem diesen Effekt zu erzielen, wurde ein fest installiertes agam-System zur akustischen Temperaturmessung eingesetzt.
- Die Korrosionsrate an der Kesseldecke (der kritische Punkt der Anlage vor einem Retrofit) reduzierte sich um mehr als das Zehnfache von 0,5 mm/1.000 h (ermittelt über einen Zeitraum von 7.500 h) auf weniger als 0,05 mm/1.000 h (ermittelt über einen Zeitraum von 10.000 h).
- Der Einsatz des Keppel-Seghers-Prismas wirkte sich darüber hinaus positiv auf die Art der Beläge und die Effektivität der Klopfvorrichtung aus. Eine Verlängerung der Reisezeit um über 50% wurde berichtet.
- Die erhöhte Stabilität der Verbrennung und die bessere Regelung der Verbrennungsluftzufuhr ermöglichte die Steigerung des Durchsatzes um 8%.
- Die Verfügbarkeit der Anlage erhöhte sich um durchschnittlich 6 %, was zu einer Senkung der Wartungskosten um 14% führte.
- Der Erdgasverbrauch reduzierte sich um über die Hälfte (häufige An- und Abfahrvorgänge konnten vermieden werden) und der Verbrauch an Ammoniakwasser für die SNCR verringerte sich um fast 30% aufgrund der verbesserten Temperaturverteilung (erhöhte Stabilität und Homogenität) im ersten Kesselzug.

Tetratubes der Firma NEM Energy Services sind wassergekühlte Balken, die quer durch den Feuerraum des Kessels führen. Die Kühlung ist abgezweigt von der Wasserkühlung der Kesselwände. Die Balken an sich formen Hohlräume, die von der Außenseite des Kessels zu erreichen sind. So kann von außen Luft in den Balken geführt werden, die dann ohne Behinderung bis Kesselmitte kommen kann. Die Balken sind in zwei Ebenen gekreuzt und übereinander gestellt, um Luft und auszubrennende Gase intensiv zu mischen [39], siehe **Bild 9**.

Tetratubes wurden seit Juli 2005 erstmals als Nachrüstung in der seit 1992 betriebenen Abfallverbrennungsanlage AVR-AVIRA in Duiven bei Arnheim (NL), Kessel 2 eingebaut. Die Betriebszeit nach Einbau beträgt bis heute 5.000 Stunden. Durch den Einbau der Tetratubes konnten die CO-Emissionen um 50% gesenkt und der Durchsatz aufgrund der geringeren Luftzahl um 8% gesteigert werden [23]

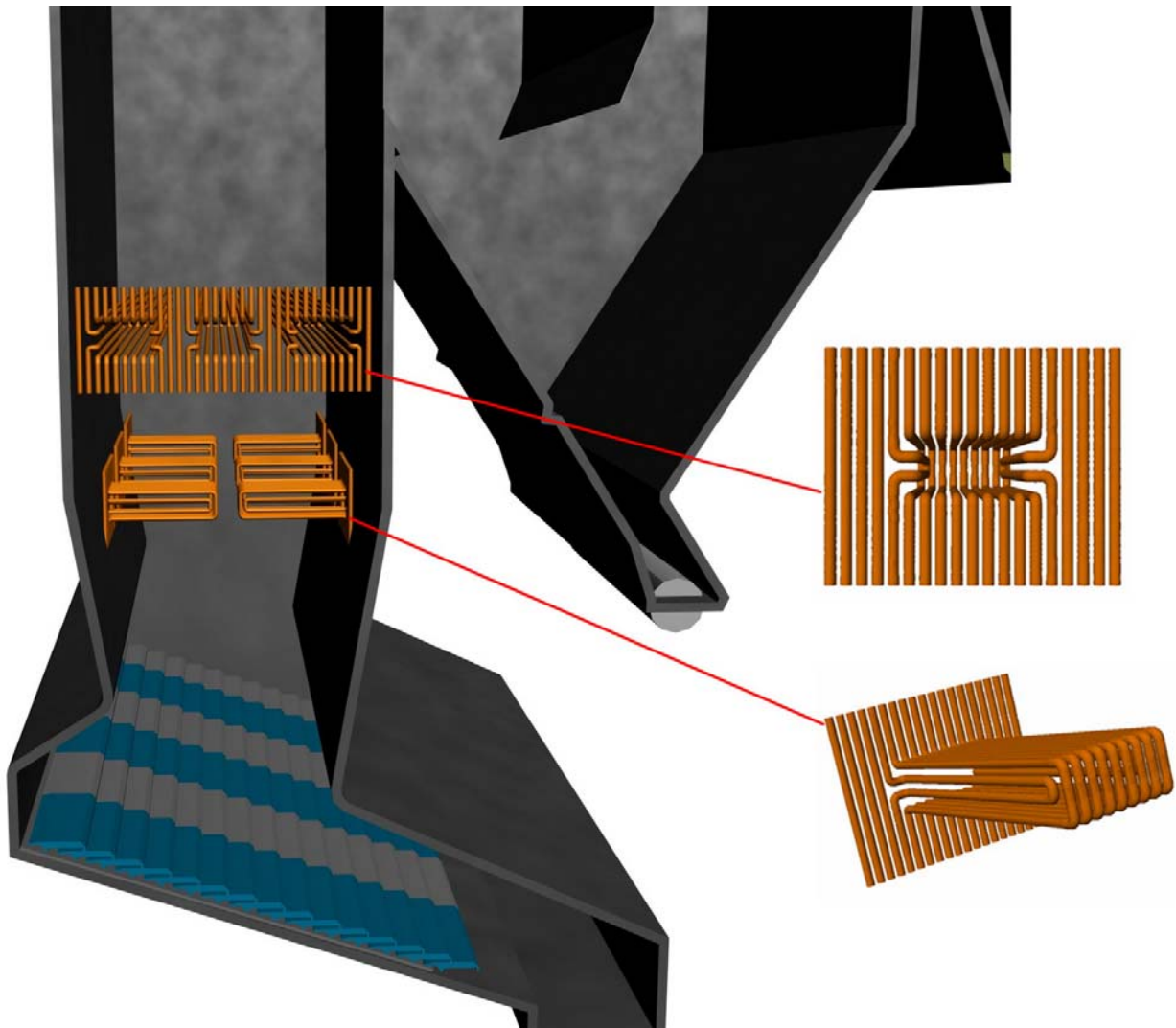


Bild 9: Einsatz von Tetratubes, verändert nach [23]

Die Tetratubes sind prinzipiell aus der Kesselrohrwand "gezogene" Verdrängungskörper. Es erfolgt eine optimale Mischung mittels mehrerer Verdrängungskörper oberhalb des Feuers. Die Lufteindüsung befindet sich an der Unterseite der Verdrängungskörper.

Tetratubes bringen die Luft vertikal nach unten in das Rauchgas, statt nur seitlich. Danach müssen Luft und auszubrennende Gase gemeinsam durch die engen unteren Gassen zwischen den Balken und dann nochmals durch die quer darauf stehenden oberen Gassen. In diesen Gassen werden Geschwindigkeiten bis zu 30 m pro Sekunde erreicht. Dadurch werden Gase und Luft vollständig vermischt. Durch diese stabile und vollständige Vermischung entfallen Spitzen unverbrannter Rauchgase. Für die Dampferzeugerkorrosion werden die Gefahren vermindert. Da die Spitzenwerte den Durchsatz beschränken, bietet die vollständige Nachverbrennung eine Möglichkeit, die Leistung der Anlage zu erhöhen. Nach Herstellerangaben ergibt sich für die Tetratubes eine geringe Verschlackungsneigung bzw. es ergibt sich nach dem Aufbau von Belägen eine Art Selbstreinigung. In Bild 10 ist der Zustand der Tetratubes ohne Reinigung nach 4.000 Betriebsstunden dargestellt.



Bild 10: Tetratubes nach ca. 4.000 Betriebsstunden
Quelle: Jacobs, Jens: Tetratubes; NEM Energy Services, 2005



Bild 11: Tetratubes, eingebaut
Quelle: Jacobs, Jens: Tetratubes; NEM Energy Services, 2005

Das **ECOTUBE System** der Firma ECOMB AB, Södertälje, Schweden, besteht im Wesentlichen aus ein- und ausfahrbaren Lanzen (ECOTUBES), die mit Einblasdüsen ausgerüstet sind. Luft und andere Materialien werden mit hohem Druck und hoher Geschwindigkeit in das Innere des Kessels eingeblasen. Die ECOTUBES werden innerhalb des Kessels so positioniert, dass die injizierten Stoffe eine verbesserte Mischung der Verbrennungsprodukte ermöglichen, indem die laminaren Gasstrahlen zerstört werden und sich vollständig gemischte, turbulente Ablaufmuster einstellen.

EcoTubes können auch in bestehenden MVA nachgerüstet werden **Bild 12**. Sie ermöglichen bei besserer Durchmischung der Rauchgase einen geringeren Luftüberschuss.

In den letzten 10 Jahren wurden 24 Anlagen mit ECOTUBE ausgestattet, unter anderem das Fernheizwerk Igelsta, Södertälje, Schweden. Dort werden die ECOTUBE zur Eindüsung von Quartärluft eingesetzt [14].

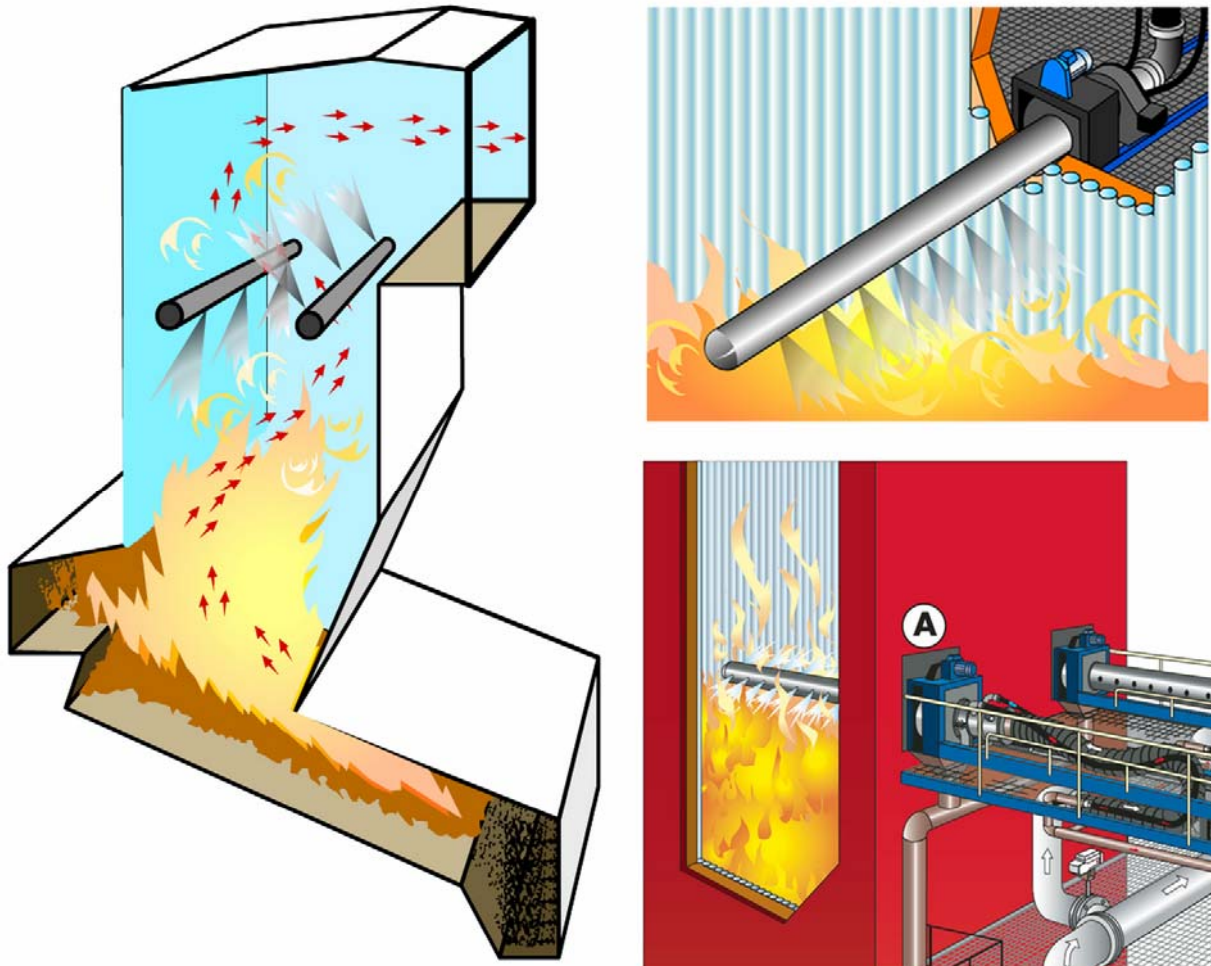


Bild 12: System EcoTubes, verändert nach [14]

KAP. 1.3 FEUERUNGSLEISTUNGSREGELUNG

Eine Optimierung des Verbrennungsablaufes, insbesondere die gezielte Trennung des Prozesses in die unterstöchiometrische Verbrennung auf dem Rost und den Ausbrand der Gase und des Restkokes ohne Einbuße an Ausbrandqualität, erfordert die Integration von Informationen über den Verbrennungsablauf in die Feuerungsleistungsregelung.

Die Temperatur im Feuerraum bzw. im Brennbett gibt Auskunft über die Verbrennungsgeschwindigkeit und den Luftbedarf. Dabei ist es wesentlich, eine Überschüttung des Rostes mit Abfall zu erkennen. Die Messung einer für den Verbrennungsvorgang repräsentativen Temperatur ist problematisch, da sich verschiedene Temperaturwerte definieren lassen:

- Reaktionstemperatur (an der eigentlichen Reaktionsfront bzw. mit den aus dem Brennstoff entweichenden Pyrolysegasen) 1.100 bis über 2.000 °C, je nach Heizwert,

- Partikeltemperatur, in Rostfeuerungen Gutbetttemperatur (durch Wärmeübertragung aus der Flamme an den Feststoff reduzierte Reaktionstemperatur),
- Roststabtemperatur (bei Rostfeuerungen bedingt durch das Gutbett und die Kühlung mit Luft oder Wasser), 300 bis 400 bzw. unter 150 °C,
- adiabate Feuerraumtemperatur (aus dem Heizwert und ggf. der Luftvorwärmung berechnete Temperatur der entstehenden Verbrennungsgase), 1.300 bis 1.500 °C, je nach Heizwert,
- mittlere Feuerraumtemperatur (nach Abgabe der Strahlungswärme im Feuerraum herrschende durchschnittliche Temperatur), 1.100 bis 1.300 °C, in Wirbelschichtfeuerungen 850 bis 950 °C,
- reale Temperaturprofile in einer Feuerung (bedingt durch Strahlenbildung und differenzierte Wärmeabgabe der Flamme).

Die Bestimmung einer repräsentativen Temperatur im bewegten Gutbett ist außerordentlich schwierig und wird wesentlich durch Wärmestrahlung im Feuerraum beeinflusst. Messergebnisse nach ([33][71]) zeigen, dass die Temperaturen zwischen 1.000 und 1.100 °C schwanken.

Um geeignete Messwerte für die Regelung der Verbrennung nach der Temperatur bzw. nach der Lage der Hauptverbrennungszone auf dem Rost zu finden, wurden unterschiedliche Messverfahren entwickelt [40].

Üblicherweise werden zur Temperaturmessung im ersten Kesselzug und über dem Rost **Thermoelemente** genutzt. Sie erfassen allerdings nur eine lokale Temperatur und erlauben keine Aussage über die Homogenität des Rauchgases im Querschnitt des Zuges, so dass Gasstrahlen und andere Inhomogenitäten nicht erfasst werden.

Die **Temperaturmessung mit Schall** (akustische Gastemperaturmeßtechnik) nutzt die physikalische Eigenschaft eines Gases, dass die Schallgeschwindigkeit sich mit der Temperatur ändert. Das Messergebnis ist deshalb die "fühlbare" Gastemperatur ohne Strahlungseinfluss. Der Messwert ist ein eindeutiger integraler Mittelwert zwischen festen Anfangs- und Endkoordinaten [12].

Bei der **Temperaturmessung mittels Infrarot** wird ein (IR-)Kamerasystem in der Decke des 1. Kesselzuges eingebaut, das echtzeitnah die Verteilung der Oberflächentemperaturen des Brenngutes auf dem Verbrennungsrost ermittelt (MARTIN-Feuerungsregelung) [34][35]. In einem Bildbearbeitungsprogramm werden daraus Regelungssignale ermittelt. Die störende Gas- und Partikelstrahlung wird über Algorithmen wirkungsvoll eliminiert. Die über das IR-Kamerasystem ermittelten Oberflächentemperaturen des Brennbettes sind sowohl zeitlich wie auch örtlich aufgelöst und damit bedeutend repräsentativer für den aktuell stattfindenden Verbrennungsprozess als die Messung von Temperaturen oder anderen relevanten Größen im Abgas [21].

Das aufbereitete Infrarotbild gibt darüber hinaus auch eine visuelle Information über den Prozessablauf für das Betriebspersonal in der Warte.

Die Erfassung des Verbrennungsverhaltens vertikal im 1. Zug ist auf Feuerungskonzepte (Mittelstromfeuerung) ohne Einbauten begrenzt. Der Einbau einer Videokamera am Feuerraumende lässt ebenfalls die Einbeziehung von Informationen über den Verbrennungsablauf in die Feuerungsregelung zu.

Die **Online-Wärmeflussmessung** an den Verdampferwänden erlaubt es, integral Temperaturverschiebungen im 1. Zug des Kessels zu erkennen. Das System ist derzeit noch im Entwicklungsstadium. Es reagiert auf den Belagaufbau innerhalb der Reisezeit und charakterisiert den Zustand der Feuerfestzustellung (Gefügeveränderung, Defekte usw.) im laufenden Betrieb. Hierdurch können z.B. geeignete Abreinigungszeitpunkte durch das Betriebspersonal ermittelt werden. Es besteht die Möglichkeit, Einfluss auf Korrosionsprobleme im Überhitzerbereich nehmen.

Zur Homogenisierung der Verbrennungsbedingungen gehört vorrangig eine konstante thermische Last. Die Feuerungsleistungsregelung soll die Wärmefreisetzung konstant auf einer vorgegebenen Last halten und konstante Verbrennungs- und Strömungsverhältnisse gewährleisten. Sie erfordert eine praxisgerechte und empirische Vereinfachung der Prozesszusammenhänge [43].

Für eine unterstöchiometrische Prozessführung hat sich die Steuerung nach dem **ICCS-System** in der Ersatzbrennstoffverbrennungsanlage, Fernheizwerk Igelsta, Södertälje, Schweden bewährt. Das **Bild 13** zeigt die Komponenten des ICCS mit den wesentlichen Modulen [58].

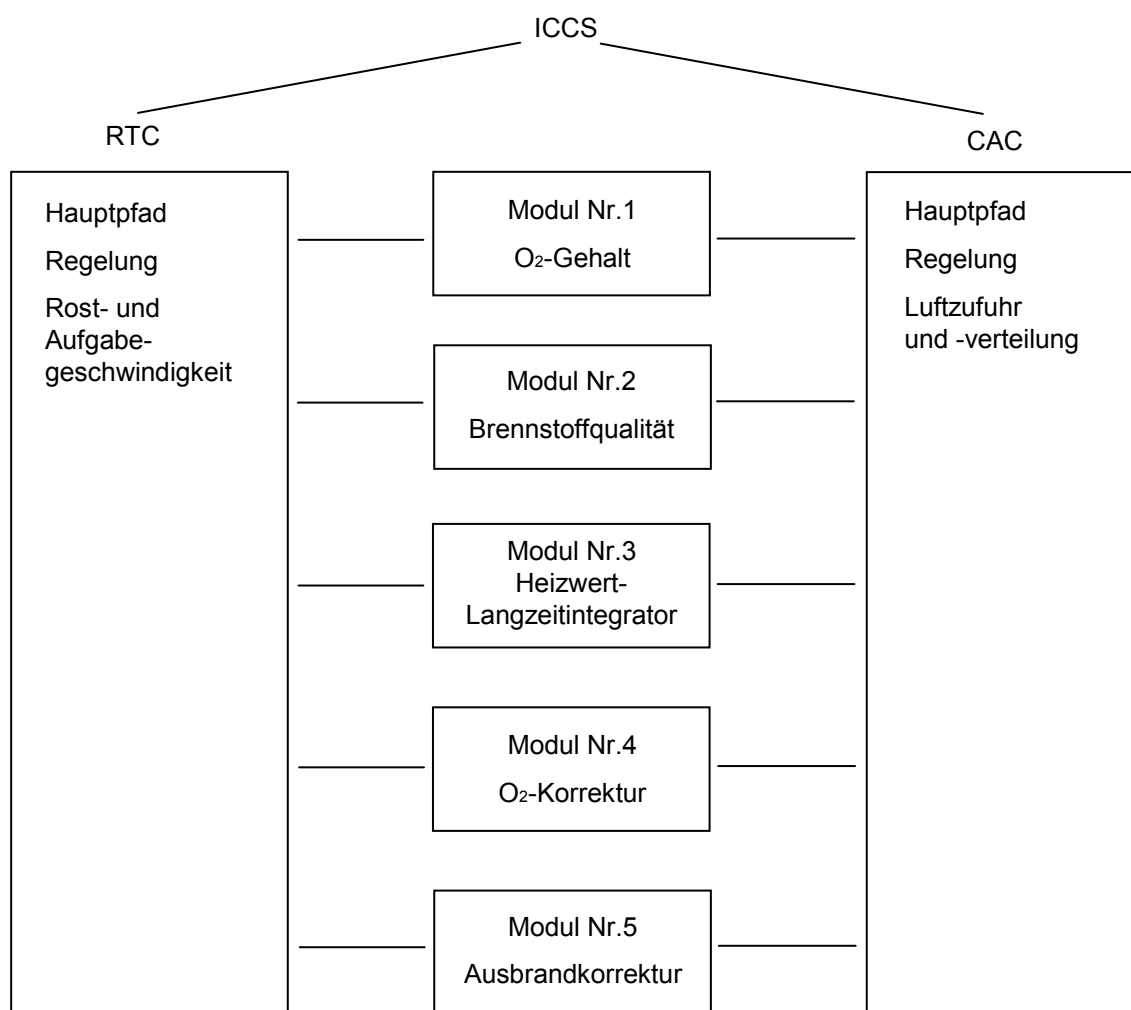


Bild 13: Prinzip der Feuerungsleistungsregelung nach ICCS, [58]

Die Module 1 bis 5 sind über 2 Hauptpfade der Regelung verknüpft.

Hauptpfad RTC (Refuse Transport Control)

Die Führungsgröße für die Regelung der Dampfproduktion ist wie üblich die Vorschubgeschwindigkeit der Aufgabevorrichtung und des Rostantriebs. Da nur die auf reiner Müllverbrennung basierende Dampferzeugung geregelt werden darf, wird die durch den Einsatz der Stützbrenner erzeugte Dampfmenge subtrahiert. Die Regelung der Geschwindigkeiten von Aufgabevorrichtung und Verbrennungsrostzonen wird durch das Ausgangssignal des Moduls 1: O₂-Gehalt über-

lagert. Diese Basiswerte werden durch die in **Bild 13** angegebenen Module der jeweiligen Feuerungssituation angepasst.

Hauptpfad CAC (Combustion Air Control)

Basis für die Regelung der Luftverteilung ist zunächst die Ermittlung des Gesamtluftbedarfs auf der Grundlage des Sollwertes der Dampferzeugung. Ziel ist eine konstante Wärmeentbindung bei annähernd konstantem Luftüberschuss. Die Gesamtluftmenge wird auf die Primärluftzonen und auf die Sekundärluft verteilt. Als Führungsgröße für die Verteilung der Primärluft über die Rostlänge dient der vorgegebene Brennstoffdurchsatz. Sie wird korrigiert durch die Feuerraumtemperatur am Rostanfang. Der Heizwert des Abfalls wird durch eine brennstoffspezifische Luftmenge berücksichtigt.

Um eine ausreichende Feuerlänge zu gewährleisten, wird die Primärluftmenge der hinteren Rostzonen durch die Temperaturmessung in der Ausbrandzone moduliert.

Diese Modulation hat folgende Effekte:

- Eine niedrige Feuerraumtemperatur in der Ausbrandzone führt zur Verringerung der Primärluftmenge in den hinteren Rostzonen, um das Feuer zu verlängern.
- Eine hohe Feuerraumtemperatur in der Ausbrandzone führt zur Erhöhung der Primärluftmenge in den hinteren Rostzonen, um das Feuer zu verkürzen und damit einen guten Ausbrand zu erzielen.

Die Sekundärluft ist ebenfalls von dem vorgegebenen Dampfsollwert abhängig. Besteht ein verringertes Primärluftbedarf, so wird entsprechend auch die Sekundärluft reduziert. Eine Verringerung der Sekundärluft unter einen bestimmten minimalen Wert wird aber nicht zugelassen.

Eine intensive Verknüpfung von Temperaturmessung und Feuerungsleistungsregelung bietet das akustische **Gastemperaturmeß- und Regelsystem agam** [12]. Es ermittelt eine integrale mittlere "fühlbare" Temperatur der Rauchgase im Feuerraum. Aus mehreren Pfadtemperaturen wird mit mathematischen Verfahren (Tomographie) in einer Ebene die zweidimensionale Temperaturverteilung im Feuerraumquerschnitt ermittelt, siehe **Bild 14**.

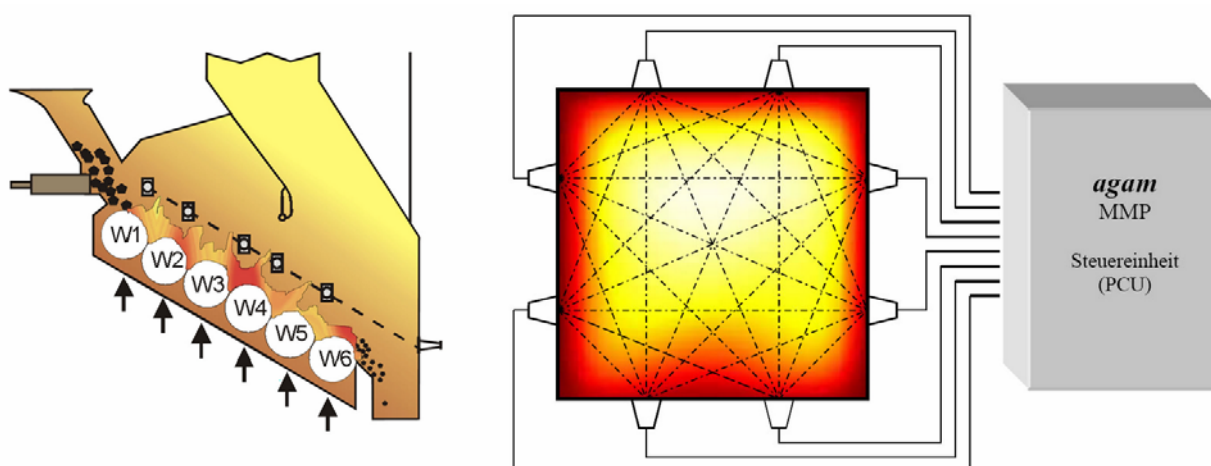


Bild 14: Prinzip System agam, verändert nach [12]

Spezifische Belange der Feuerungsleistungsregelung sind mit Hilfe der Fuzzy Logic realisierbar. Neben direkt messbaren Werten, wie z. B. die Dampfleistung, können „unscharfe“ Parameter für

die Feuerlage und die Feuerlänge einbezogen werden, die z.B. aus den Daten der IR-Thermografie abgeleitet werden.

Die Fuzzy-Regelung kann sowohl die Erfahrungen des Bedienpersonals in die verfahrenstechnisch erarbeiteten „Regeln“ implementieren, als auch „eigene Erfahrungen“ mit der Regelung durch Nutzung neuronaler Netze auswerten und für die Optimierung der Prozesssteuerung nutzbar machen.

Für Abfallverbrennungsanlagen, auch für extrem heterogene Verbrennungsbedingungen aber auch für nachfolgende durch die Brennstoffeigenschaften bedingten Prozesse, wie Betriebsmittelzugabe in der Rauchgasreinigung, hat sich die anlagenspezifische **Fuzzy Control** als Regelsystem bewährt [17].

Zur weiteren Optimierung von thermischen Abfallbehandlungsanlagen wurde ein **Online-Bilanzierungsprogramm** im Rahmen des EU-Projektes EU 24 [6] entwickelt. Mit dem Online-Bilanzierungsprogramm ist es möglich, für die einzelnen Anlagenteile sowie für die Gesamtanlage eine Vielzahl von Werten zu berechnen und aktuell anzeigen zu lassen. Damit können Auswirkungen bei Änderungen der Prozessführung (z. B. bei Optimierungsmaßnahmen) gezielt untersucht werden:

Es hat sich gezeigt, dass das Online-Bilanzierungsprogramm sehr gut geeignet ist, Abweichungen und Widersprüche in der Messdatenerfassung zu ermitteln. Dies ist in thermischen Abfallbehandlungsanlagen bisher nicht ohne weiteres möglich, da die verwendeten Betriebsdatenerfassungssysteme i.d.R. nicht über eine Plausibilitätsprüfung verfügen.

Für das Betriebspersonal besteht damit ein Werkzeug, mit dem der Anlagenbetrieb auf Grundlage der umfassenden Kenntnis des aktuellen Betriebszustandes im Hinblick auf Energieeffizienz, Erhöhung der Durchsatzleistung, Korrosion, Betriebskosten usw. verbessert werden kann. Über die Plausibilitätsprüfung hinausgehende Daten des Online-Bilanzierungsprogramms können in die Feuerungsleistungsregelung übernommen werden.

Für die Optimierung des Verbrennungsablaufes, wie sie in diesem Kapitel beschrieben wurde, ist die Entwicklung einer effektiven und auf die Besonderheiten der gestuften Verbrennung eingehenden Feuerungsleistungsregelung unbedingt erforderlich.

KAP. 1.4 VORSCHLAG FÜR EIN OPTIMIERTES FEUERUNGSKONZEPT

Unter Berücksichtigung der dargestellten Optimierungsmöglichkeiten, die mit einer unterstöchiometrischen Prozessführung erreichbar sind, wurde ein Gesamtkonzept mit den folgenden Zielen erarbeitet:

- a) Reduzierung des Gesamtluftüberschusses auf $\lambda < 1,25$ und damit geringere Rauchgasmenge
- b) Reduzierung von Korrosion und Verschlackung bei erhöhten Dampfdrücken und damit erhöhten Verdampfungstemperaturen durch Vergleichmäßigung des Temperaturverlaufs im 1. Zug
- c) Verbesserung des Gesamtwirkungsgrades durch die Maßnahmen a) und b)
- d) Flexibles Heizwertband bis zu einem Heizwert von 32.000 kJ/kg, analog ZWS-Verbrennungsanlagen
- e) Reduzierung der Flugstaubmenge

- f) Verbesserung der Schlackequalität (Ausbrand, Versinterung)
- g) Reduzierung der Rohgasemissionen
- h) Reduzierung der Betriebsmittel durch NO_x-arme Verbrennung

Die Konzeption ist aufgebaut aus den bekannten Verfahrenstechniken bzw. Komponenten:

- Kessel mit unterstöchiometrischer Verbrennung auf dem Rost entsprechend Fernheizwerk Igelsta, Södertälje, Schweden
- Keppel-Seghers-Prisma für die erste Stufenluftzugabe in der 1. Stufe der Nachverbrennung der Brenngase aus der unterstöchiometrischen Verbrennung auf dem Rost
- Tetratubes für die weitergehende Stufenluftzugabe
- Tetratubes oder ECOTUBE für die letzte Stufenluftzugabe mit gleichzeitiger Zugabe der Betriebsmittel für die Entstickung nach dem SNCR-Verfahren im Temperaturbereich 850°C bis 950°C
- Optimierte Feuerungsleistungsregelung mit getrennter Regelung der Bereiche Rost und Nachverbrennung des Brenngases
- Optionale Dampfzugabe über die Einbauten oder Kesselwände zur Rauchgashomogenisierung

In **Bild 15** ist das optimierte Feuerungskonzept schematisch dargestellt.

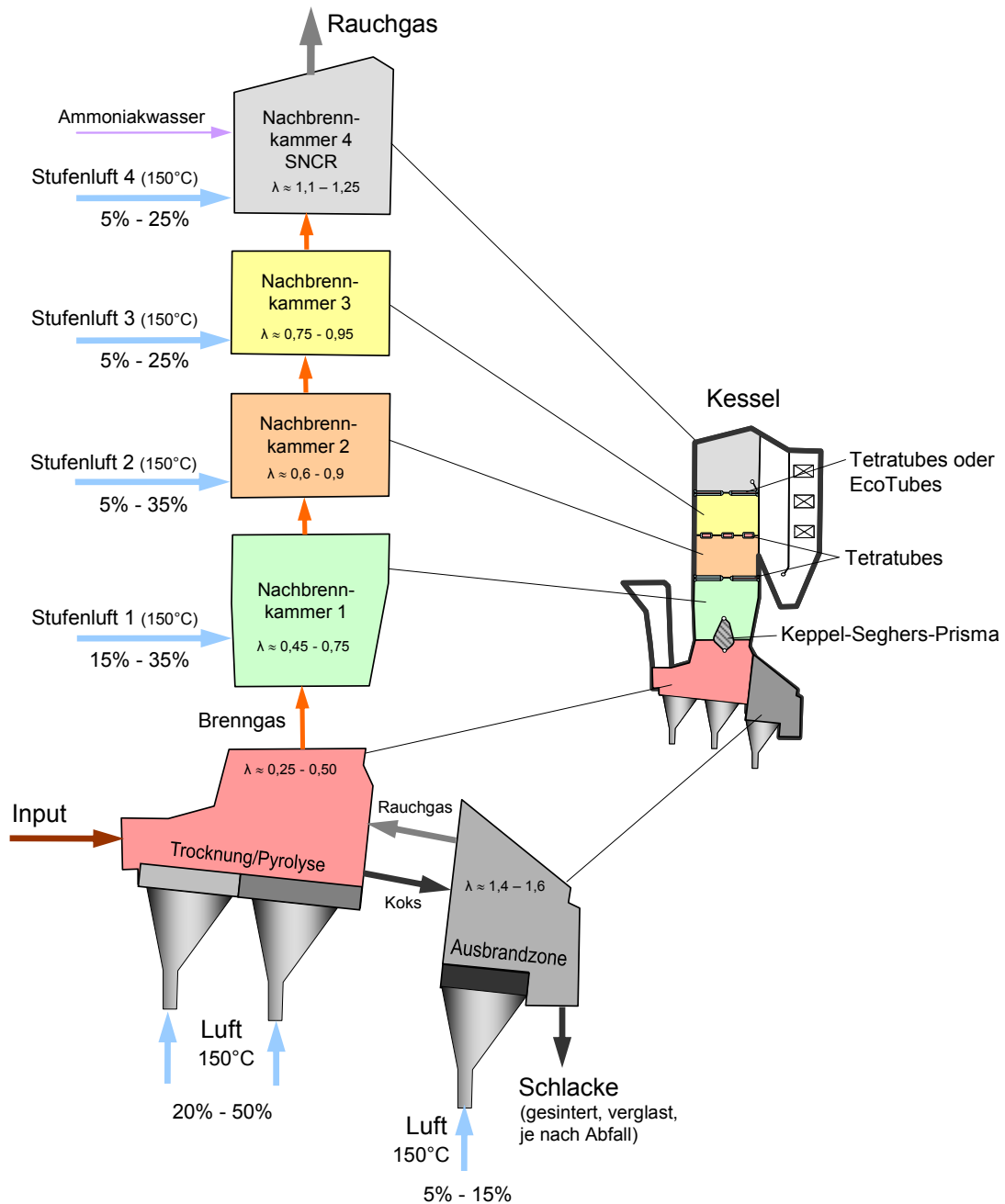


Bild 15: Optimiertes Feuerungskonzept, Luftstufung

Auf den ersten Blick erscheint die vielstufige Verbrennungsluftzugabe kompliziert. Grund für die vielstufige Luftzugabe ist die Einhaltung eines engen Temperaturfensters im ersten Zug auch bei hohen Abfallheizwerten. Bei einer Erhöhung der Dampfparameter auf z.B. 150 bar zur Optimierung des Wasser-Dampfkreislaufes bei externer Überhitzung entsprechend Kapitel 3 erhöht sich gleichfalls die Verdampfungstemperatur von ca. 250 °C um 100 K auf ca. 350 °C. Mit der erhöhten Verdampfungstemperatur muss bei gleichem Korrosionspotential entsprechend die mittlere Rauchgastemperatur auf < 900 °C bis 950 °C gesenkt werden. Gleichzeitig muss für eine sichere Nachverbrennung eine Mindesttemperatur von 850 °C eingehalten werden. Idealerweise müsste eine Temperatur mit unendlicher Luftstufung wenig über 850 °C eingestellt werden. Dies ist anlagentechnisch nicht möglich. Die Anzahl der Luftstufungen ergibt sich daher aus dem Abfallheizwert, dem Dampfdruck, der Anlagengröße und dem Korrosionsschutzkonzept bzw. der

geforderten Reisezeit und Verfügbarkeit der Anlage. Jede Luftzugabe in ein reduzierendes Gas führt zu einer Temperaturerhöhung, durch die Verdampferwände und Einbauten wird dem Brenngas bzw. Rauchgas Wärme entzogen und dies führt somit wieder zu einer Temperatursenkung. Je höher die Anzahl der Luftstufen, desto geringer sind die Temperaturabweichungen über die Kesselhöhe und desto geringer die Korrosion und Verschlackung.

Zum Verständnis des Erfordernisses der Luftstufung ist in **Bild 16** idealisiert der prinzipielle Temperaturverlauf über die Kesselhöhe in Abhängigkeit der Luftstufen dargestellt.

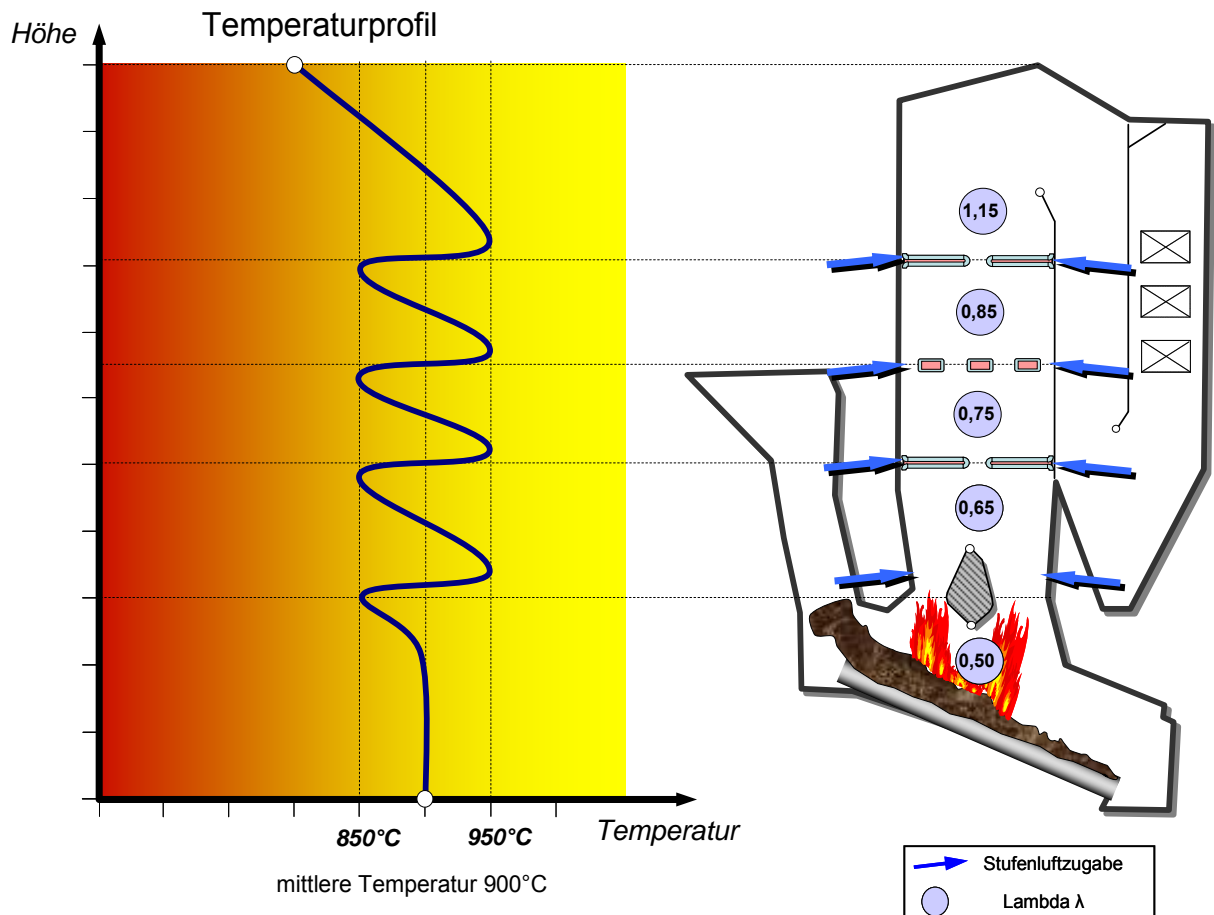


Bild 16: Prinzipieller, idealisierter Temperaturverlauf bei unterstöchiometrischer Verbrennung auf dem Rost und mehrfacher Luftstufung

Genehmigungsfähigkeit des Konzeptes

Die 17. BImSchV, § 4 Feuerung, Absatz 2, schreibt die Einhaltung einer Verweilzeit nach der letzten Luftzugabe von mindestens 2 Sekunden bei 850°C vor. Alternativ kann die Genehmigungsbehörde aber nach Absatz 3 die Einholung eines von der zuständigen Behörde anerkannten Gutachtens über die Gleichwertigkeit der Emissionen entsprechend den Verbrennungsbedingungen nach Absatz 2 oder eine messtechnische Überprüfung bei der Inbetriebnahme fordern. In Deutschland sind bereits mehrere thermische Abfallbehandlungsanlagen nach 17. BImSchV, § 4 Feuerung, Absatz 3, genehmigt. Alle Anlagen die mit dem System ECOTUBE ausgerüstet wurden, können konstruktionsbedingt die in der Richtlinie 2000/76/EG, Artikel 6 Absatz 1, genannten 2 Sekunden bei 850°C nicht einhalten sondern werden entsprechend derselben Richtlinie nach Artikel 6 Absatz 4 genehmigt. Diese Verfahrensführung wurde entsprechend der Referenzliste von ECOMB, dem Hersteller der ECOTUBE, in den Ländern Schweden, England, Holland, Frankreich und USA genehmigt.

Aufgrund der optimierten Verfahrensführung mit einer ausreichenden Verweilzeit im reduzierenden Milieu bei Luftzahlen $< 0,75$ können sowohl das Brennstoff-NO_x als auch die Precursoren bzw. Dioxin-Vorstufen, wie polychlorierte Biphenyle sicher zerstört werden. Die Genehmigungsfähigkeit der Verfahrensführung nach dem vorgestellten optimierten Feuerungskonzept ist somit gegeben.

Zur Veranschaulichung sind in **Bild 17** die vorgesehenen Einbauten dargestellt.

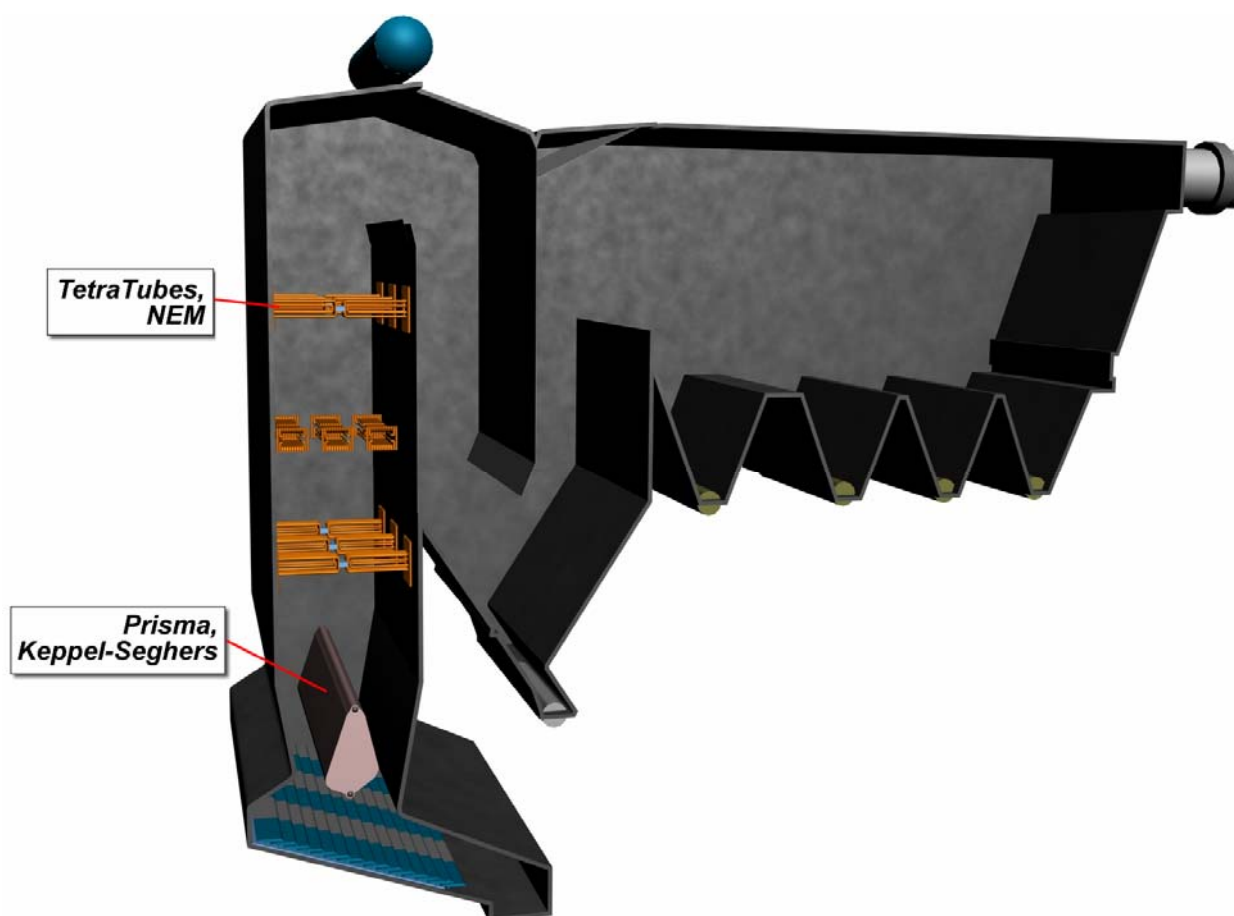


Bild 17: Einbau bei der unterstöchiometrischen Verbrennung auf dem Rost mit Nachbrennkammer im 1. Zug, ausgeführt beispielhaft als KS-Prisma und Tetratubes

Kap. 2 Restwärmenutzung

In der Regel wird in thermischen Abfallbehandlungsanlagen die Energie der Rauchgase nach Kesselende nicht mehr energetisch verwertet. Die Temperaturen nach Kesselende betragen bei den thermischen Abfallbehandlungsanlagen noch vor dem Jahr 2000 ca. 190 °C bis 230 °C, je nach Reisezeit bzw. Verschmutzungsgrad. Heute kann über die Auslegung der Wärmetauscher und eine Regelung von Eco und Speisewassertemperatur eine Rauchgastemperatur von < 180 °C über die Reisezeit gewährleistet werden.

Neben der fühlbaren Wärme der Rauchgase steckt noch ein großes Potential in der Kondensationsenthalpie des enthaltenen Wasserdampfes. Durch Nutzung dieses Wärmeanteils kann der Kesselwirkungsgrad deutlich erhöht werden. Bei der Abkühlung der Rauchgase unter den Wasserdampftaupunkt wird der Brennwert der Brennstoffe nutzbar. Berechnet man einen Wirkungsgrad aus der Nutzung des Brennwertes und bezieht ihn auf die mit dem Heizwert eingebrachte Energie, so ergeben sich Werte über 100 %. Die Kondensationsenthalpie kann mit Hilfe eines Wärmetauschers zur Verbrennungsluftvorwärmung, für Wärmepumpen und Absorptionskälte- und -wärmemaschinen zur Speisewasservorwärmung oder zur Fernwärme- bzw. Nahwärmeauskopplung genutzt werden. Durch den geringen Schwefelanteil in Abfällen und eine entsprechenden Schaltung der Rauchgasreinigung werden die Säurekorrosionsprobleme begrenzt. Für die Wärmetauscher sind entsprechende korrosionsbeständige Materialien zu verwenden.

Bei Kohlekraftwerken wird die Restwärme der Rauchgase vor der REA schon seit 1994 genutzt, wobei aus **Tabelle 1** zu erkennen ist, das die Endtemperaturen vor dem Wäscher von 138 °C gegenüber den neusten Installationen auf 90 °C reduziert wurden. Zu erkennen ist aus **Bild 18** auch der Vorzug der Frischluftvorwärmung, da die rückgewonnene Energie direkt der Feuerung zugeführt wird und damit der maximale Exergieanteil freigesetzt werden kann, während die Kondensat- bzw. Speisewasservorwärmung oder Fernwärmeerzeugung nur einen geringen Exergieanteil besitzt.

Tabelle 1: Endtemperaturen Rauchgas bei Restwärmenutzung, nach [3]

Anlage	Jahr IBN	Brennstoff	Wärmetauscher	T _{Rauchgas} Aus- tritt
Voitsberg, Österreich	1994	Braunkohle	Fernwärmeverwärmung	114 °C
Schwarze Pumpe Block A und B	1997	Braunkohle	Speisewasservorwärmung	138 °C
Lippendorf, Block R und S	1999	Braunkohle	Speisewasservorwärmung	130 °C
Niederaussem, Block K	2002	Braunkohle	Luftvorwärmung	100 °C
Mehrum, Block 3	2003	Steinkohle	Luftvorwärmung	90 °C

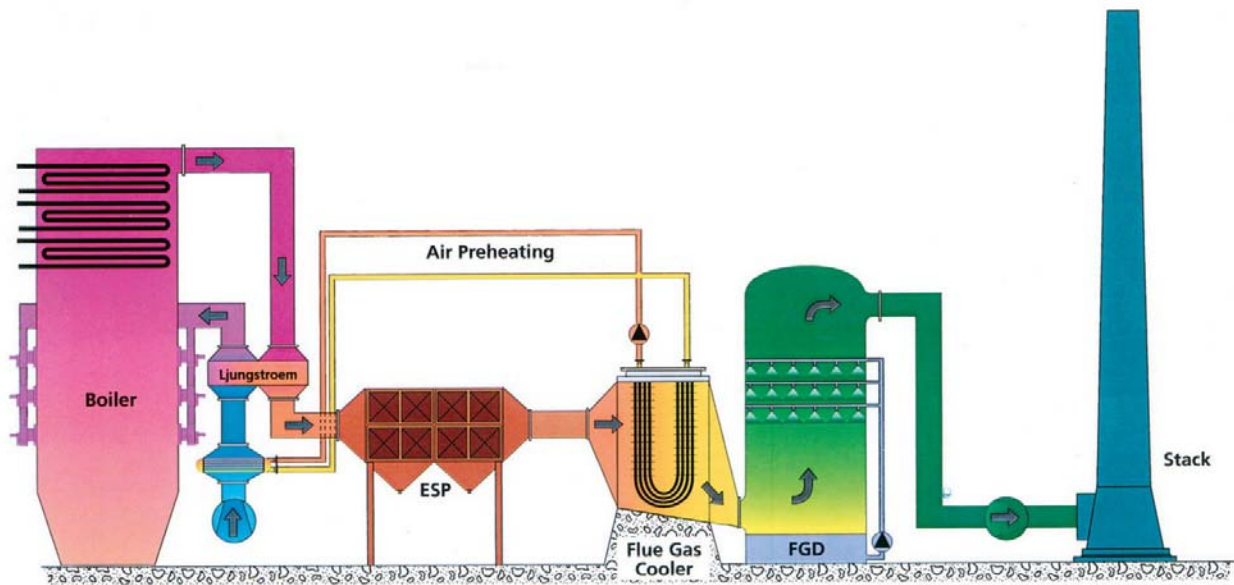


Bild 18: Restwärmenutzung mit LUVO

Quelle: Babcock Borsig Service Produktinformationen - Powerise® Mehrum Power Plant Unit 3. Download: http://www.babcock-borsig-service.de/fileadmin/user_upload/pdf/deutsch/Waermenutzung/POWERISE_MEHRUM_UNIT_3.PDF

Thermische Abfallbehandlungsanlagen mit Rostfeuerung werden nicht mit einer Rauchgas/Verbrennungsluftvorwärmung betrieben, daher wurde bisher keine Rauchgaskondensation durch Verbrennungsluftvorwärmung durchgeführt.

In Schweden wurden in den letzten Jahren mehrere thermische Abfallbehandlungsanlagen mit Rauchgaskondensation in Betrieb genommen, jedoch ohne Verbrennungsluftvorwärmung durch Rauchgas. Beispielhaft seien hier zwei Referenzen der Firma Von Roll INOVA in Schweden genannt, die als Rostfeuerung mit Hausmüll und Biomasse betrieben werden:

- Block 5, Heizwerk Uppsala/Schweden, eine Rostfeuerung zur Produktion von Fernwärme und Kälte wurde mit einer Feuerungswärmeleistung von 73 MW 2005 in Betrieb genommen. Der thermische Wirkungsgrad beträgt 102,3 %. Bei der Rauchgaskondensation mit Absorptionswärmepumpen werden die Rauchgase von 160 °C auf 35 °C abgekühlt und zur Entstickung und Entschwadung in der nassen Rauchgasreinigung auf 180°C wiederaufgeheizt und nach dem Katalysator wieder auf 70 °C abgekühlt. Es wird keine Frischluftvorwärmung mit Rauchgasen durchgeführt [63].
- Das Dåva Wärmekraftwerk Umeå/Schweden wurde mit einer Feuerungswärmeleistung von 66 MW im Jahr 2000 in Betrieb genommen. Der thermische Wirkungsgrad beträgt 99,5 %. Bei der Rauchgaskondensation mit zwei Wärmepumpen mit je 5,7 MW werden die Rauchgase auf < 45°C abgekühlt [64].

In der AVI Amsterdam wird bei einer Feuerungswärmeleistung von 93 MW die Restwärmenutzung durch die Eco 2 und 3 realisiert. Sie soll einen wesentlichen Anteil zur Wirkungsgradsteigerung beitragen [67]. Das thermische Konzept ist in **Bild 21** dargestellt.

Beispielhaft werden für das folgende quasitrockene Rauchgasreinigungskonzept nach **Bild 19** die Restwärmenutzungsmöglichkeiten aufgezeigt.

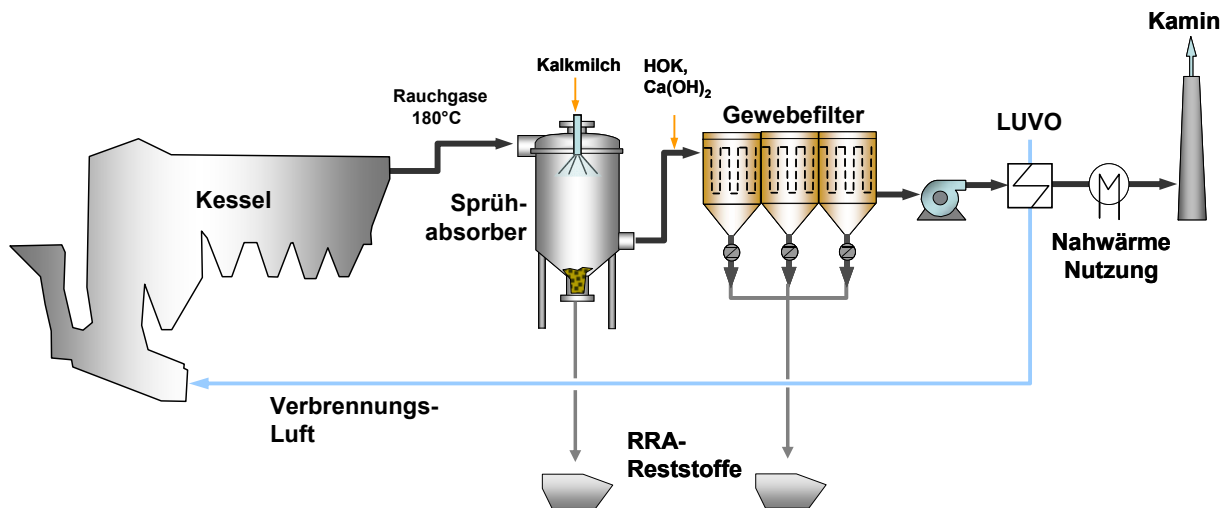


Bild 19: Rauchgasreinigungskonzept

Die Nutzung des Brennwertes in Abfallverbrennungsanlagen setzt den Einsatz einer Entstaubung vor den Wärmetauschern voraus.

Durch die bereits niedrigen Kesselendtemperaturen kann das Zusatzwasser zur Rauchgaskühlung im Sprühabsorber minimiert werden, so dass lediglich die erforderliche Verdünnung der Kalkmilchsuspension die Wassermenge zur Kühlung bestimmt. Die Rauchgastemperatur wird durch den Sprühabsorber um ca. 10 Kelvin reduziert, jedoch durch das Saugzuggebläse auch wieder um ca. 3 bis 5 Kelvin erhöht. Somit kann die Frischluft bei der entsprechenden Wärmetaucherauslegung bis 150 °C erwärmt werden. Dies setzt jedoch ein Feuerungssystem voraus, das eine derartige Frischluftvorwärmung toleriert, wie zum Beispiel die unterstöchiometrische Verbrennung auf dem Rost oder eine ZWS-Verbrennung.

Unter Berücksichtigung der vorliegenden Erfahrungen mit der Brennwertnutzung kann eine Erhöhung des Wirkungsgrades in Abfallverbrennungsanlagen durch die in **Bild 20** angeführten Maßnahmen erreicht werden.

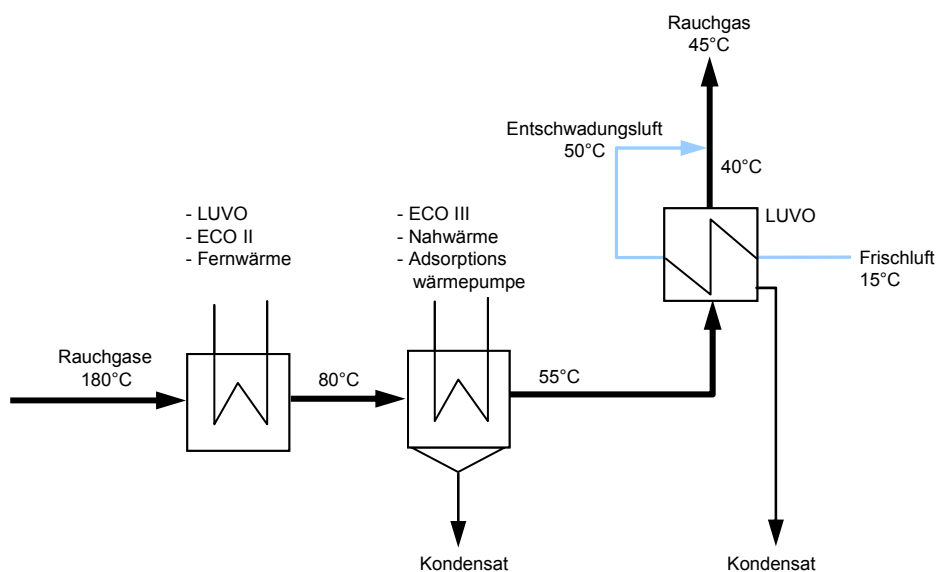


Bild 20: Restwärmenutzung mit Rauchgaskondensationsanlage

Allein durch eine Luftvorwärmung bei einer Optimierung der Luftzahl auf 1,15 bis 1,25 kann ein Kesselwirkungsgrad von 93 % bis 94 % erreicht werden.

Kap. 3 Erhöhung der Dampfparameter

Nach der Brennwertnutzung soll bereits eine moderate Erhöhung der Dampftemperatur, z.B. von 415 °C auf 430 °C [67] die höchsten Effekte für den Anlagenwirkungsgrad bringen. Diese Maßnahme kann nur in Verbindung mit den Korrosionsrisiken und der Anlagenverfügbarkeit betrachtet werden.

Wie bereits in [67] ausgeführt, ist es erforderlich, für jede Anlage mit einem bestimmten Brennstoff und einem spezifischen Reparaturmanagement die Aufwendungen für die Sicherung des Anlagenbetriebes durch Vorsorgemaßnahmen mit den Einnahmen für die verbrannten Abfälle und den Erlösen für den Strom abzugleichen.

KAP. 3.1 STAND DER TECHNIK

Heute gibt es nur wenige MVA, bei denen höhere Dampfparameter, sei es durch interne oder externe Überhitzung, gefahren werden. Dies sind z.B.:

- MHKW Mannheim, MK4, mit 120 bar, 360°C, externe Überhitzung auf 520°C [44]
- MHKW Mainz 40 bar, 400°C externe Überhitzung über GuD Abhitzekeessel auf 40 bar / 540°C[15]
- AVI Moerdijk, 100 bar, 400°C, externe Überhitzung über GuD Abhitzekeessel[65]
- AVI Amsterdam, 130°C, 440°C, mit interner Zwischenüberhitzung mit Frischdampf von 14 bar/ 195 °C auf 14bar/320 °C [68]

Im MHKW Mannheim, MK4, werden 100 t/h Dampf mit 120 bar und ca. 360 °C erzeugt und mit einem separaten Erdgasüberhitzer auf 520 °C überhitzt. Der Hochdruckdampf wird mehrstufig in Dampfturbinen entspannt, wodurch eine effektive Kraft-Wärmekopplung möglich ist.

Für den Erdgasüberhitzer werden 25 % der gesamten Feuerungswärmeleistung benötigt. Er wird mit einer Luftzahl von ca. 1,3 bis 1,4 betrieben. Die Rauchgase werden nach der Abkühlung auf ca. 550 °C mit dem Rauchgasstrom aus der Abfallverbrennung vermischt. Die externe Überhitzung erlaubt es, einen hohen Wirkungsgrad bei der Stromerzeugung zu erreichen, und gleichzeitig die Korrosion im Müllkessel zu beherrschen [44].

Im MHKW Mainz wird der erzeugte Dampf mit 40 bar in die kalte Leitung der Zwischenüberhitzung des Abhitzekeessel eines benachbarten GuD-Kraftwerkes eingespeist und hier mit dem Abgas der Gasturbine auf 555 °C überhitzt [15]. Der überhitzte Dampf wird in einer Dampfturbine entspannt, wobei auch Fernwärme ausgekoppelt werden kann. Bei hohem Fernwärmebedarf oder falls die GuD-Anlage nicht betrieben wird, kann der im MHKW erzeugte Dampf direkt an das Fernwärmenetz abgegeben werden.

In der AVI Moerdijk wird schwach überhitzter Dampf bei 100 bar erzeugt [41] und an ein benachbartes GuD-Kraftwerk gegeben, wo er extern überhitzt und in einer Turbine verstromt wird. Dabei wird der Dampf nicht vollständig entspannt, sondern als Niederdruckdampf an eine benachbarte Raffinerie gegeben. Damit wird eine sehr gute Energieausnutzung erreicht.

In der AVI Amsterdam wird neben der Restwärmenutzung eine Erhöhung der in der Turbine nutzbaren Enthalpiedifferenz durch Zwischenüberhitzung vorgesehen. Zunächst wird Dampf mit 130 bar und 440°C erzeugt, der in einer Turbine bis auf 14 bar und 195°C entspannt wird. Der entspannte Dampf wird dann mit Frischdampf auf 320 °C zwischenüberhitzt und im Niederdruckteil der Turbine bis auf 0,03 bar entspannt. **Bild 21** zeigt das gesamte thermische Konzept für die Anlage [67].

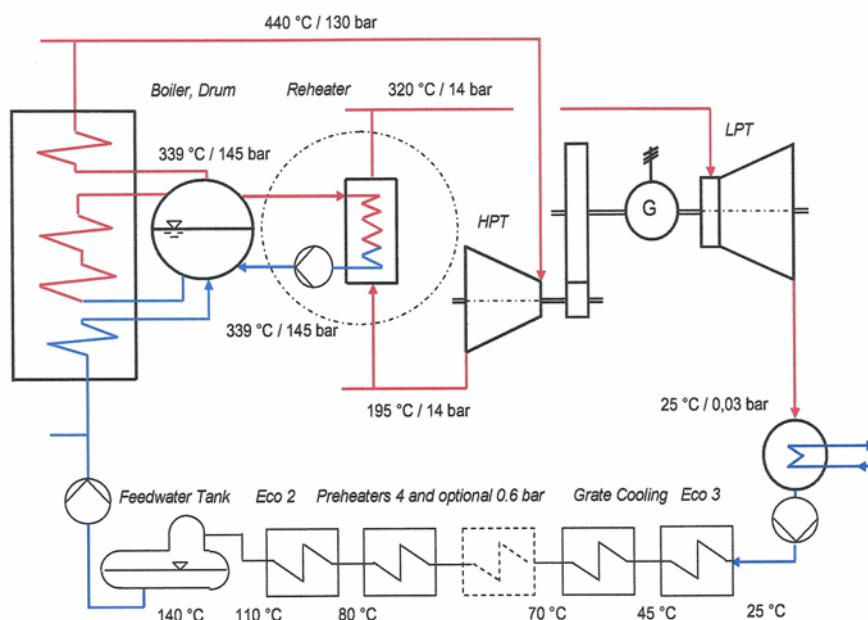


Bild 21: Thermisches Konzept der AVI Amsterdam [67].

Schematischer Aufbau der Zwischenüberhitzung durch Sattedampf

Die Beispiele weisen nach, dass die durch die Dampferzeugerkorrosion begrenzte Erhöhung der Dampfparameter durch Optimierung der Gesamtkonzepte, insbesondere durch Nutzung von Synergieeffekten mit anderen Anlagen erreicht werden kann. Dabei können in der MVA ggf. Dampfparameter eingestellt werden, die unterhalb der Korrosionsgefahr liegen. Das setzt voraus, dass diese Effekte bei der Planung von Neuanlagen oder bei der Modernisierung konsequent erarbeitet und umgesetzt werden [66].

KAP. 3.2 BiFuelCycle

®

Wie in den Kap. 1 bis 3.1 dargestellt, können bei der Planung und Erneuerung von Anlagen eine Reihe von Optimierungsmöglichkeiten berücksichtigt werden, die zu einer Verbesserung der Energienutzung bei der Abfallverbrennung beitragen. Im BiFuelCycle-Konzept werden sowohl die optimierten Verbrennungsbedingungen als auch die Möglichkeiten der verbesserten Wärmenutzung berücksichtigt.

Brennstoffauswahl für die externe Überhitzung

Wesentlich bei der Entwicklung von BiFuelCycle ist die externe Überhitzung mit einem Edelbrennstoff analog dem Konzept Mannheim, jedoch ist die Wahl des Brennstoffes bezogen auf den dem Brennstoff inhärenten energetischen Wirkungsgrad in Vergleichsanlagen und bezogen auf den Brennstoffpreis bzw. der Preisentwicklung zu berücksichtigen. Erdgas und Öl haben von allen Brennstoffen den höchsten Wirkungsgrad, die höchsten Brennstoffpreise und die höchsten erwarteten Preissteigerungen im Vergleich zu Steinkohle oder Braunkohle.

Vorteilhaft bei Erdgas und Öl sich jedoch die geringen Installationskosten der Anlagentechnik und der Infrastruktur sowie der geringe Strahlungsanteil bei der Verbrennung und die homogene Verbrennung, die zu einer gleichmäßigen Temperaturverteilung führt. Dies wirkt sich auf die Überhitzerwärmetauscher auch bei hohen Überhitzungstemperaturen positiv aus. Gegen eine Überhitzung mit Erdgas oder Öl sprechen jedoch die hohen adiabaten Verbrennungstemperaturen. Rauchgastemperaturen sollten für eine Überhitzung von über 520 °C bei über 120 bar möglichst 1100 °C bei gering strahlenden Rauchgasen aus Materialgründen nicht überschreiten. Bei Erdgasfeuerungen als reiner Überhitzer muss konsequenterweise entweder eine Rauchgasrezirkulation oder eine Verdampfungskühlung durchgeführt werden, um die Luftzahl für Erdgas von 1,05 einzustellen. Eine Rauchgasrezirkulation ist aufwendig und reduziert durch den zusätzlichen elektrischen Eigenbedarf für die Gebläse den elektrischen Wirkungsgrad. Sie erhöht gleichzeitig die Kosten für den Überhitzer und die nachfolgenden Aggregate durch den erhöhten Rauchgasvolumenstrom. Die Ausführung des Feuerraums als Verdampfer ist kontraproduktiv, da der erzeugte Dampf ebenfalls überhitzt werden muss und damit der Erdgasverbrauch steigt. Eine erhöhte Luftzahl von 1,4 bis 1,8 bei der Erdgasverbrennung reduziert zwar die adiabaten Verbrennungstemperaturen soweit, dass eine Überhitzung möglich ist, jedoch verringert sich der Kesselwirkungsgrad durch die hohen Abwärmeverluste über das Rauchgas. Eine Abfallverbrennungsanlage produziert zudem Grundlaststrom, während mit Öl und Erdgas vorrangig Spitzenlaststrom produziert wird.

Zusammenfassend können die Brennstoffe Erdgas und Öl für die Überhitzung von Dampf aus Abfallverbrennungsanlagen als ungeeignet angesehen werden:

- hohe brennstoffinhärente elektrische Wirkungsgrade von über 60 % netto
- hohe adiabate Verbrennungstemperaturen und geringe brennstoffinhärente Luftzahlen
- Brennstoff für Spitzenlaststrom aufgrund der geringen Installationskosten und Infrastrukturaufwendungen
- Hohe Brennstoffkosten und erwartete Brennstoffpreissteigerungen

Die externe Überhitzung in einem vorhandenen Kraftwerk wurde in den o.g. Beispielen mit dem Brennstoff Erdgas durchgeführt. Die Verbindung einer neuen Abfallbehandlungsanlage mit einem bestehenden Kraftwerk gestaltet sich meist sehr schwierig, da die wärmetechnische Vertrimmung des Kraftwerks nicht immer die Flexibilität für eine zusätzliche Frischdampfüberhitzung zulässt, es bestehen daher nur die Möglichkeit zu einer kalten Zwischenüberhitzung, die jedoch nicht die thermodynamischen Möglichkeiten der Wirkungsgradsteigerung zulässt, die bei einer Frischdampfüberhitzung mit Zwischenüberhitzung möglich wären.

Betrachtet werden sollten daher für die Überhitzung feste Brennstoffe, die einen geringen brennstoffinhärenten elektrischen Netto-Wirkungsgrad aufweisen und für Grundlaststrom eingesetzt werden.

Bei Feststofffeuerungen sollten aufgrund der hohen Strahlungsanteile des Rauchgases bei z.B. Kohlefeuerungen die Rauchgastemperaturen vor den Überhitzerwärmetauschern möglichst kleiner 950°C, abhängig von den Dampfparametern, sein.

Entwicklung eines geeigneten Überhitzers

Die Entwicklungsaufgabe, die sich die Firma EcoEnergy GmbH selbst gestellt hatte und zu 100% selbst finanzierte, bestand darin, eine geeignete Technologie für einen auf die Abfallverbrennungsanlage angepassten reinen Überhitzer für feste Brennstoffe zu entwickeln, der trotz einer hohen adiabaten Temperatur bei geringen Luftzahlen von ca. 1,15 keinen Verdampfer benötigt [52].

Gelöst werden kann diese Aufgabe mit einer ZWS-Verbrennung mit ausgemauertem Reaktor. Die Wärmeauskopplung erfolgt über den Fließbettkühler (FBK), ausgeführt als Frischdampfüber-

hitzer und Teilweise Zwischenüberhitzer. Durch eine Luftvorwärmung auf 350°C – 400°C über einen LUVU wird die Adiabatterperatur weiter erhöht und der Energieanteil, der über den FBK ausgekoppelt werden muss, auf 75% der gesamten auskoppelbaren Wärme maximiert. Der Wärmeübergang Feststoff zu Dampf ist im FBK über 4mal so hoch wie Rauchgas zu Dampf im Abhitzeüberhitzer, die Verteilung der Wärmeauskopplung und der Wärmetauscherfläche und der generelle Aufbau des ZWS-Überhitzers ist aus **Bild 22** zu entnehmen.

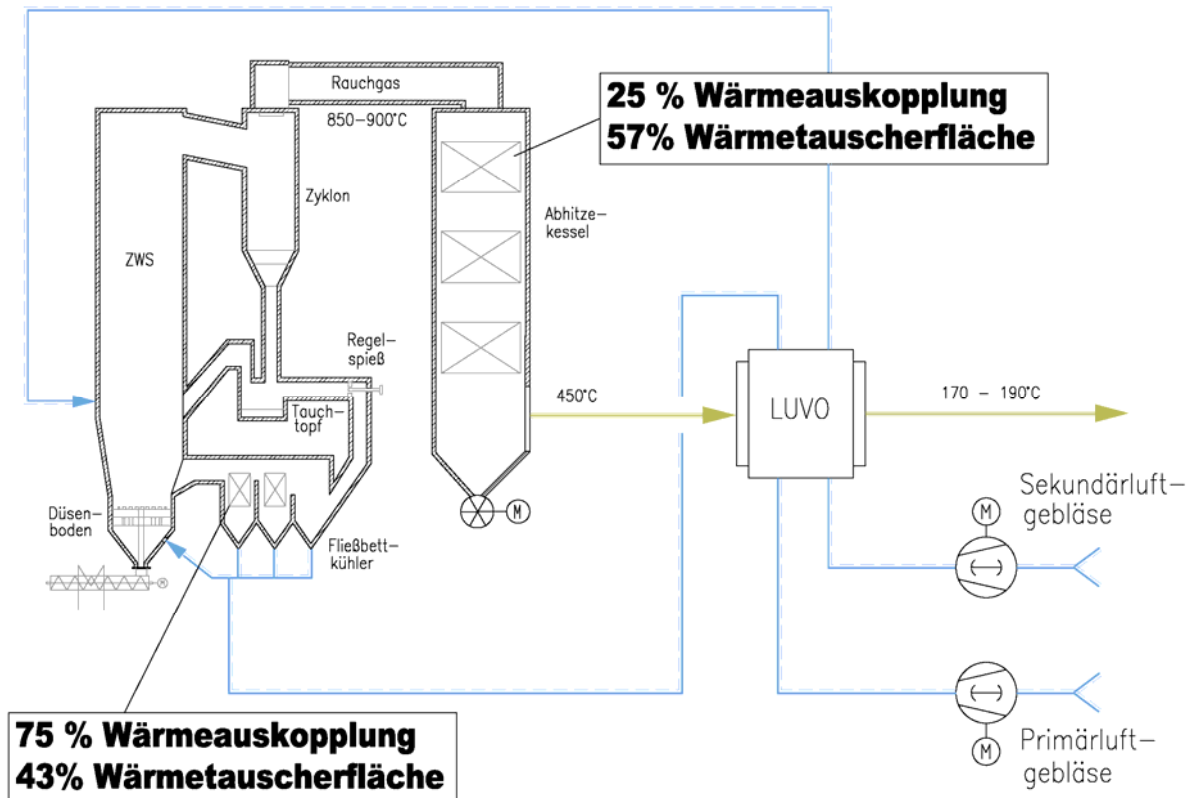


Bild 22: Externer Überhitzer für feste Brennstoffe

Auslegung Wasser-Dampf-Kreislauf BiFuelCycle

Durch die externe Überhitzung sind die Grenzen für die wählbaren Dampfparameter Druck und Temperatur neu zu definieren. Die im Kapitel 3.1 genannten Beispiele hatten bereits durch den Standort vorgegebenen Dampfparameter. Für das BiFuelCycle-Verfahren (BFC-Verfahren) ergeben sich die wählbaren Dampfparameter aus:

- dem maximal zulässigen Dampfdruck in der thermischen Abfallverbrennungsanlage, hier genannt Ersatzbrennstoff-Verwertungs-Anlage (EVA), begrenzt durch:
 - o Korrosionspotential des Ersatzbrennstoffes,
 - o Art der Prozessführung der Feuerung
 - o korrosionsmindernde Sekundärmaßnahmen
- den am Markt verfügbaren Dampfturbinen, abhängig von der Anlagengröße

Ausgehend von einer Prozessführung entsprechend Kapitel 1.4 mit einer unterstöchiometrischen Verbrennung auf einem Rost mit mehrfacher Luftstufung und korrosionsmindernden Maßnahmen nach dem Stand der Technik, wie Cladding, hinterlüftete Platten, thermisches Spritzen etc.

[10][11] und den Erfahrungen entsprechend Kapitel 3.1 können Dampfdrücke bis 180 bar und einer Verdampfungstemperatur von 357 °C gewählt werden. Die Drücke sollten jedoch so gewählt werden, dass noch ein Naturumlauf möglich ist, dies ist bei Dampfdrücken an der Turbine von 150 bar gesichert. Berücksichtigt man die Druckverluste von Kessel und externem Überhitzer von ca. 10% des Turbinendrucks, ergeben sich ca. 165 bar Dampftrummeldruck, ein Naturumlauf kann unter diesen Bedingungen beibehalten werden.

Turbinen sind jedoch für kleinere Anlagen bis 50 MW el. zurzeit nur bis zu den Frischdampfparametern 120 bar/540 °C mit Zwischenüberhitzung erhältlich. Darüber hinaus sind auch Turbinen mit den Frischdampfparametern 150 bar/580 °C und darüber verfügbar. Die Dampfparameter werden bei BiFuelCycle nicht mehr durch die Anlagentechnik der Dampferzeugung, sondern durch die Turbinentechnik und die Größe der Turbine begrenzt. In **Bild 23** ist das TS-Diagramm für das BFC-Verfahren mit den Dampfparametern 150 bar/540 °C mit Zwischenüberhitzung aufgetragen.

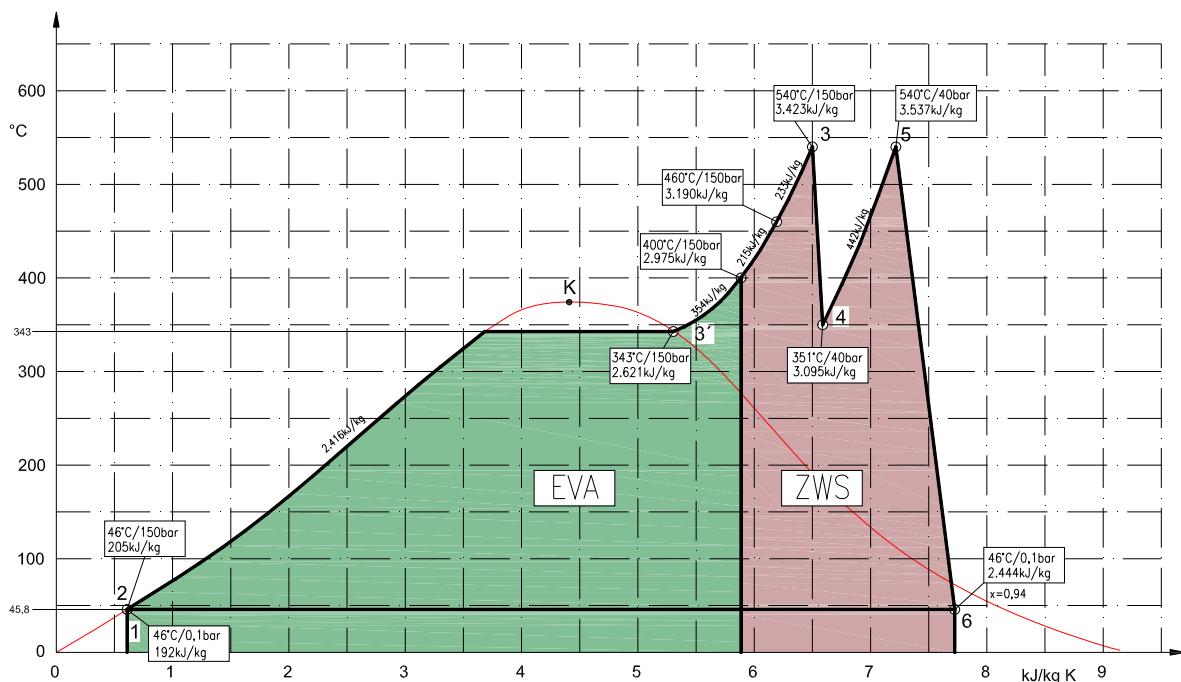


Bild 23: BiFuelCycle im TS-Diagramm

Da eine reine Verdampfung in der EVA technisch nicht möglich ist, geht man beim BFC-Verfahren davon aus, dass 10% der Gesamtenergie zur Teilüberhitzung verwandt werden, wobei jedoch eine maximale Überhitzungstemperatur von 380 °C bis 400 °C aus korrosionstechnischen Gründen nicht überschritten wird.. Die Energieverteilung ist dem

Bild 24 zu entnehmen.

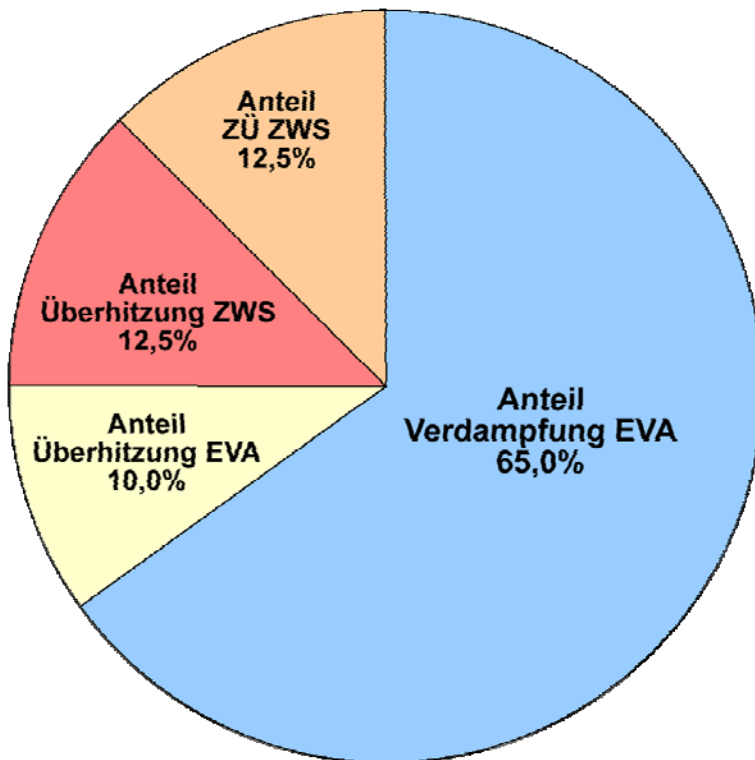


Bild 24: Aufteilung Verdampfung, Überhitzung und ZÜ

Bei der gewählten Anlagenschaltung ergibt sich die in **Bild 25** dargestellte Verteilung der Brennstoffe Ersatzbrennstoff für die EVA und Wirbelschichtbraunkohle für den ZWS-Überhitzer.

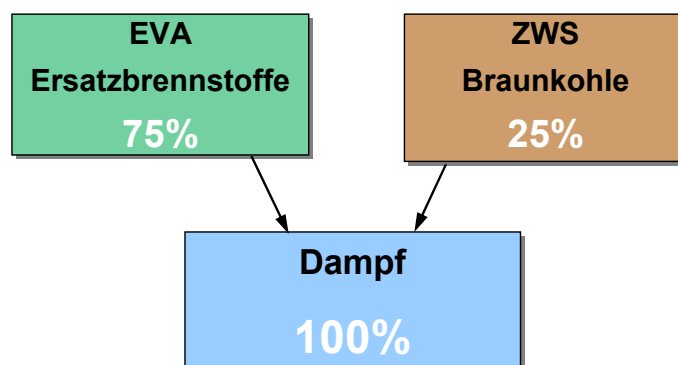


Bild 25: Verteilung der Brennstoffe

Die BiFuelCycle-Anlage setzt sich aus einer Haupt- und einer Nebenanlage zusammen, welche über eine wärmetechnische Verschaltung miteinander gekoppelt sind. Das Ziel der Hauptanlage ist es, einen leicht überhitzten Satttdampf bei einem hohen Dampfdruck (120 bar bis 150 bar) zu erzeugen, der zur Überhitzung an die Nebenanlage übergeben wird. In **Bild 26** ist die BiFuelCycle-Anlage mit dem bereits in Kapitel 1.4 erläuterten optimierten Feuerungskonzept einer unterstöchiometrischen Verbrennung auf dem Rost mit mehrfacher Luftstufung und einer optimierten Luftvorwärmung mit Rauchgaskondensation über eine Nahwärmeauskopplung dargestellt.

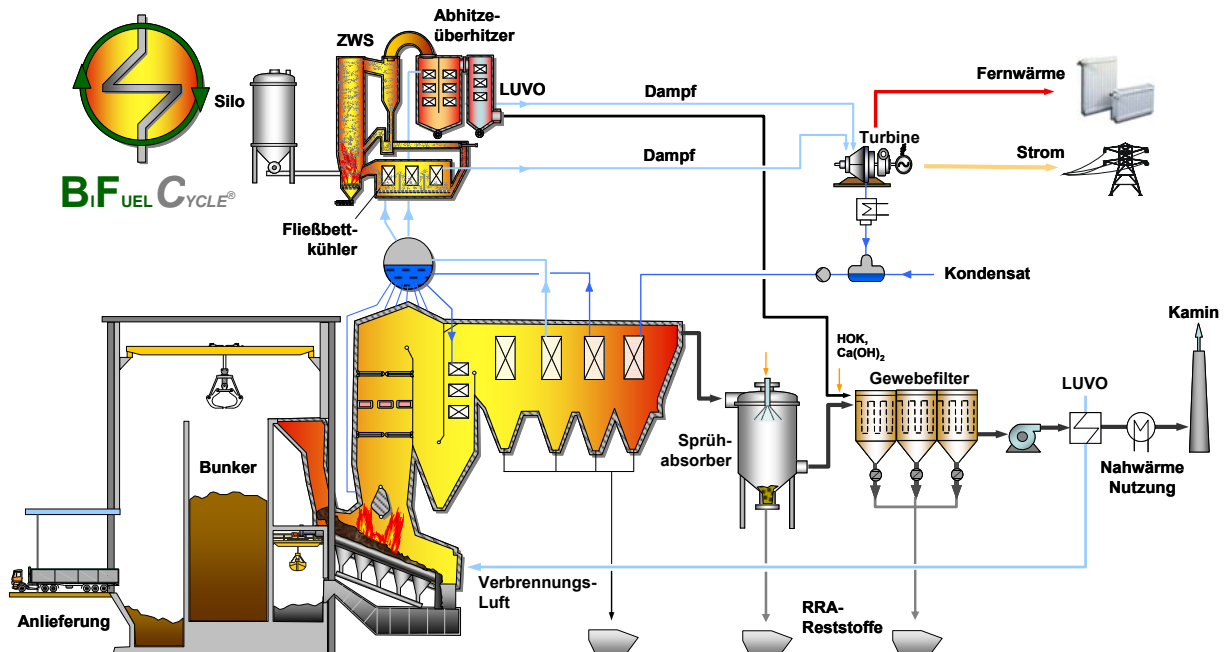


Bild 26: Verfahrensschema BiFuelCycle mit Keppel-Seghers-Prisma und Tetratubes (NEM), alternativ für die letzte Stufenluftzugabe ECOTUBE

In der Nebenanlage, ausgeführt als ZWS-Überhitzer, kann Steinkohle oder Braunkohle, je nach Standortgegebenheiten, eingesetzt werden. Die Kombination von Haupt- und Nebenanlage mit unterschiedlichen Brennstoffen (BiFuelCycle) erfolgt über die Dampferzeuger-Trommel. Bei dem BiFuelCycle-Verfahren ist mindestens eine Zwischenüberhitzung, zur Wirkungsgradverbesserung sinnvoll.

Vorgehen bei Berechnung der Wirkungsgrade

Zur Beurteilung der Wirkungsgradverbesserung durch das BFC-Verfahren wurde der Standardanlage mit 40 bar, 400 °C und einem Kesselwirkungsgrad von 83 % die BiFuelCycle-Anlage mit einem Kesselwirkungsgrad von 93,5 % entsprechend Kapitel 2 Restwärmenutzung und den Dampfparametern 150 bar/540 °C, einer einfachen Zwischenüberhitzung sowie zwei Kondensatvorwärmern und einer Speisewasservorwärmung gegenübergestellt. Die Berechnung der Varianten erfolgte mit der Software KPRO® (Kreislaufberechnungsprogramm) der Fa. Fichtner, mit dem auch die Prozessoptimierung der AVI Amsterdam durchgeführt wurde [54]. KPRO ist ein Programmsystem zur Simulation thermodynamischer Vorgänge im Kraftwerk und enthält alle notwendigen Werkzeuge zur Entscheidungsfindung bei der Anlagenoptimierung.

In **Bild 27** ist der Wirkungsgrad einer Standardanlage als Vergleichsanlage und in **Bild 28** die BiFuelCycle-Anlage berechnet. Für die Standardanlage berechnet sich ein elektrischer Bruttowirkungsgrad von 26%. Abzüglich des Eigenbedarfs ergibt sich ein elektrischer Nettowirkungsgrad von 23% bis 24%. Für die BiFuelCycle-Anlage ergibt sich ein elektrischer Bruttowirkungsgrad von 39,2% abzüglich des Eigenbedarfs ein elektrischer Nettowirkungsgrad von 37%. Zum Vergleich wurde bei der heute modernsten thermischen Abfallbehandlungsanlage AVI-Amsterdam ein elektrischer Nettowirkungsgrad von 30% berechnet [66][67][68] wobei von einem Kondensationsdruck von 0,03 bar ausgegangen wurde, während der hier vorliegenden Berechnung für BiFuelCycle ein Kondensationsdruck von 0,05 bar zugrunde liegt.

Bei einem Kondensationsdruck von 0,03 bar würde sich der Wirkungsgrad von BiFuelCycle noch um ca. 1 %-Punkte erhöhen [66][67][68]. Die geringere Kondensattemperatur würde dann die Möglichkeit zur Restwärmenutzung mit Rauchgaskondensation nach dem LUVO ermöglichen, wodurch sich der Wirkungsgrad um 0,5 bis 0,7 %-Punkte erhöhen würde. Für einen Idealstandort wie AVI Amsterdam könnte mit der BiFuelCycle-Anlage ein elektrischer Nettowirkungsgrad von 39% erreicht werden.

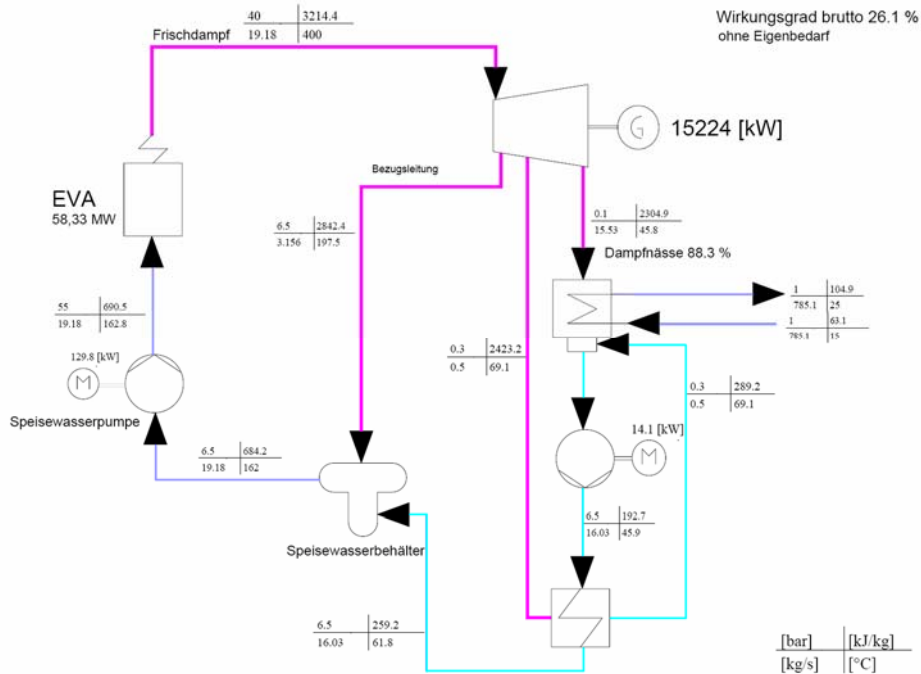


Bild 27: KPRO Schaltung Standardanlage

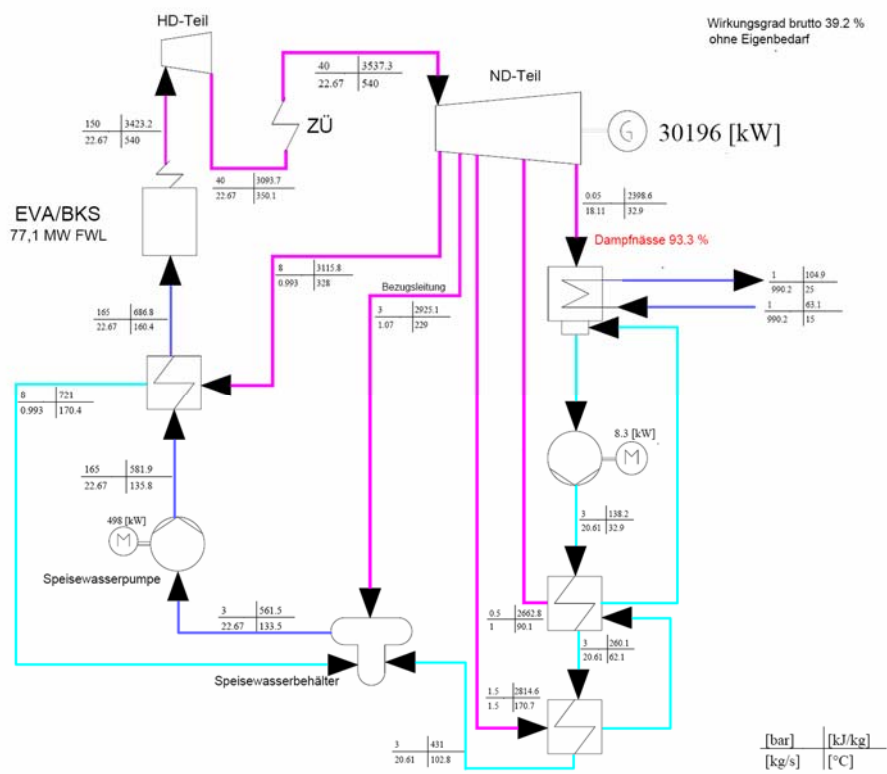


Bild 28: KPRO Schaltung BiFuelCycle-Anlage

Der elektrische Nettowirkungsgrad der BiFuelCycle-Anlage bezieht sich auf den gesamten Brennstoffinput. Für einen Vergleich des Wirkungsgrades bezogen auf den Abfall muss der brennstoffinhärente Wirkungsgrad von Braunkohle in einem modernen Braunkohlekraftwerk berücksichtigt werden. In **Bild 29** ist daher ein elektrischer Nettowirkungsgrad von 43% angenommen worden, es ergibt sich somit ein auf die Abfallverbrennung bezogener Nettowirkungsgrad elektrisch von 35%. Für einen Idealstandort wie bei der AVI Amsterdam würde sich sogar ein Nettowirkungsgrad elektrisch, bezogen auf die Abfallverbrennung von 37% ergeben. Für den Brennstoff Erdgas zur Überhitzung würde sich bei einem brennstoffinhärenten elektrischen Nettowirkungsgrad von 63% für ein modernes erdgasbetriebenes GuD-Kraftwerk, ein auf den Abfall bezogener elektrischer Nettowirkungsgrad von 28% bis 30% ergeben. Die Wahl des Brennstoffs zur Überhitzung ist maßgeblich für die Energieeffizienz der Abfallverbrennung.

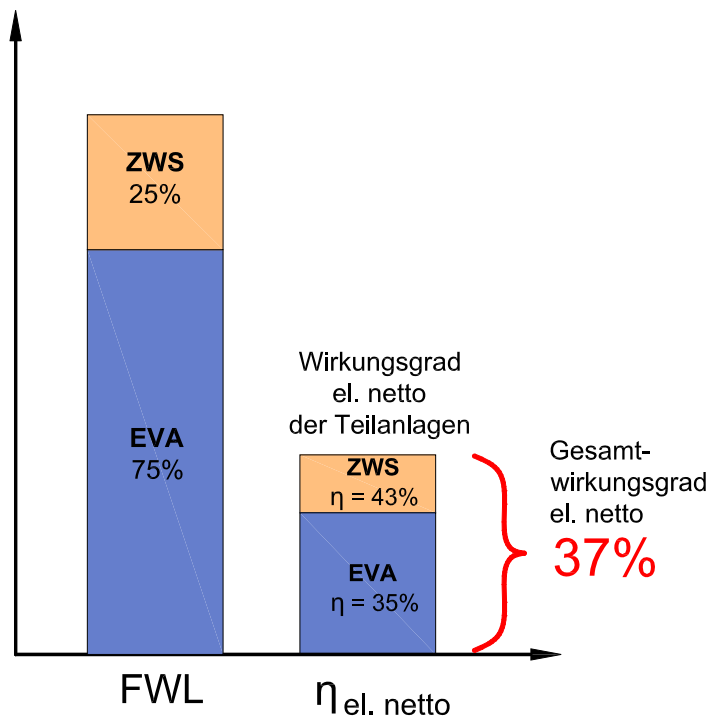


Bild 29: Energieverteilung

Der für die BiFuelCycle-Anlage berechnete Wirkungsgrad liegt ca. 25% über dem für AVI-Amsterdam berechneten Wirkungsgrad und 35% bis 60% über dem Wirkungsgrad bereits in Betrieb befindlicher moderner Abfallbehandlungsanlagen.

Kap. 4 Zusammenfassung und Ausblick

Der Beitrag konnte nachweisen, dass durch angepasste Prozessführung und Anlagenschaltung der am Markt verfügbaren Technologien eine wesentliche Erhöhung der Energieeffizienz von Abfallverbrennungsanlagen möglich ist.

Eine Prozessführung mit unterstöchiometrischer Verbrennung auf dem Rost mit Nachverbrennung des Brenngases in einer mehrfachen Luftstufung kann nicht nur die Luftzahl auf $< 1,25$ senken, sondern auch die Emissionen erheblich reduzieren und den elektrischen Eigenbedarf minimieren, wie in Kapitel 1.4 verdeutlicht wurde. Zudem wird durch die Prozessführung eine Restwärmenutzung der Rauchgase durch Verbrennungsluftvorwärmung und die Erweiterung des Brennstoffbandes von zur Zeit max. 18.000 kJ/kg für konventionelle Rostfeuerungsanlagen auf 32.000 kJ/kg erst ermöglicht.

Die Ergebnisse zeigen deutlich, dass durch eine optimale Anlagenschaltung mit externer Überhitzung nach dem BiFuelCycle-Verfahren in Verbindung mit der optimierten Prozessführung die Energieeffizienz von Abfallbehandlungsanlagen um 30% bis 60% erhöht werden kann.

Diese Möglichkeiten sind jedoch in starkem Maß von der Bereitschaft der Betreiber, Technologielieferanten und Politiker abhängig, den mit der AVI Amsterdam und anderen Anlagen begonnen Weg hin zu einem energieeffizienteren Umgang mit den „Urban Resources“ weiter zu beschreiten. Bei den genannten Möglichkeiten zur externen Überhitzung sind nicht nur die Technologielieferanten für die Dampferzeugung, sondern vor allem die Turbinenhersteller gefordert, auch im unteren Leistungsbereich < 50 MWel hocheffiziente Turbinen mit hohen Dampfparametern und mehrfacher Kondensat- und Speisewasservorwärmung zu entwickeln.

Dieser Beitrag spiegelt nicht das Ergebnis einer beauftragten Studie oder bezahlten Anlagenplanung wider, sondern wurde eigens für diese Veröffentlichung erstellt und von der Firma EcoEnergy selbst finanziert.

Literaturverzeichnis

- [1] Adams, B., Keppel-Seghers: Persönliche Mitteilung, 2006
- [2] Adams, B.; Perilleux, M.: Design Features to Avoid High-Temperature Corrosion in MSW Boilers In: Born (Hrsg.): Dampferzeugerkorrosion Teil 2 Vorträge zum 2. Diskussionsforum, SAXONIA Standortentwicklungs- und -verwaltungsgesellschaft mbH, Freiberg, 2005, S. 247-260
- [3] Babcock Borsig Service GmbH: Produktinformation Powerise, 2006; URL: <http://www.babcock-borsig-service.de/Powerise.173.0.html>; Stand: 06.02.2006
- [4] Beckmann, M.: Mathematische Modellierung und Versuche zur Prozessführung bei der Verbrennung und Vergasung in Rostsystemen zur thermischen Rückstandsbehandlung, Dissertation, CUTEC-Schriftenreihe 21, Clausthal-Zellerfeld, 1995
- [5] Beckmann, M. u.a.: Optimization of Gasification of Waste Materials in Grate Systems. International Conference on Incineration & Thermal Treatment Technologies, San Francisco, 1997

- [6] Beckmann, M.; u.a.: Optimierung von Müllheizkraftwerken durch Einsatz eines Online-Bilanzierungsprogramms. In: Thomé-Kozmiensky, Beckmann (Hrsg.): Optimierung der Abfallverbrennung 2. Neuruppin: TK Verlag, 2005, S. 219-240
- [7] Beckmann, M; Zimmermann, R.: Gasification-Post Combustion of Waste Materials; Influencing Parameters and On-line Monitoring of Organic Substances. In: Roco, M.C. American Institute of Chemical Engineers (Hrsg.): *Advanced Technologies for Particle Processing, Volume 2* (Proceedings of the Particle Technology Forum, held with The Annual Meeting of the American Institute of Chemical Engineers, Miami Beach, FL, USA, November 1998, S. 661-671
- [8] Beckmann, M.; Krüger, S.; Spiegel, W.: Charakterisierung und messtechnische Erfassung von betriebsspezifischen Wärmewiderständen an Membranverdampferwänden in Abfall- und Biomasseverbrennungsanlagen. In: Born (Hrsg.): Dampferzeugerkorrosion Teil 2, Vorträge zum 2. Diskussionsforum; SAXONIA Standortentwicklungs- und -verwaltungsgesellschaft mbH, Freiberg, 2005, S. 273-288
- [9] Bleckwehl, S. u.a.: Kennzahlen zur quantitativen Beschreibung des Abbrandes von Ersatzbrennstoffen. In: Thomé-Kozmiensky, Beckmann (Hrsg.): Ersatzbrennstoffe 5. Neuruppin: TK-Verlag, 2005, S. 127-142
- [10] Born, M.; Bachhiesl, M.: Thermodynamische Grundlagen und Mechanismen der Hochtemperatur-Chlorkorrosion an Dampferzeugern bei der Verbrennung und Mitverbrennung von Abfällen. In: Born, M. (Hrsg.): Rauchgasseitige Dampferzeugerkorrosion; SAXONIA Standortentwicklungs- und -verwaltungsgesellschaft mbH, Freiberg, 2003, S. 9-30
- [11] Born, M.: Dampferzeugerkorrosion – Wissensstand und Aufgaben. In: Born, M. (Hrsg.): Dampferzeugerkorrosion Teil 1; SAXONIA Standortentwicklungs- und -verwaltungsgesellschaft mbH, Freiberg, 2005
- [12] Deuster, M.; Bonnenberg + Drescher Projektentwicklung GmbH: Betriebserfahrungen mit dem Temperaturmeßsystem agam. VDI Wissensforum – Messtechnik bei Verbrennungsanlagen; Seminar 434324, München.
- [13] Dolezal, R.: Dampferzeugung - Verbrennung, Feuerung, Dampferzeuger. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag 1954
- [14] ECOMB AB: Das Ecotube® System. Produktinformation; Box 2017 – S-151 02, Södertälje, Schweden. 2005
- [15] Fischer, B.: Energieeffizienz des Müllheizkraftwerkes Mainz. In: Thomé-Kozmiensky, Beckmann (Hrsg.): Optimierung der Abfallverbrennung 2. Neuruppin: TK Verlag, 2005, S. 565-578.
- [16] Gaderer, M.: Rauchgaskondensationsanlagen - Stand der Technik, Schaltungsvarianten, Entwicklungen. Bayerisches Zentrum für angewandte Energieforschung e.V., München, 2000, Download: www.zae-bayern.de
- [17] Gierend; Ch.; Born, M. u.a.: Fuzzy Control, die multivariable Kennfeldregelung. VGB Kraftwerkstechnik 3, 2001, S. 45-50
- [18] Görner, K.: Optimierung von Rostverbrennungssystemen für Restabfälle unter sich verändernden Anforderungsprofilen. VDI Wissensforum – Energetische Nutzung von Abfällen, Seminar 430720, Oberhausen, 2001.

- [19] Görner, K.; Klasen, Th.; Kümmel, J.: Optimierung der Sekundärlufteindüsung in den Feuerraum einer Müllverbrennungsanlage bei Verwendung eines Sekundärluft-Düsenprismas. Ergänzter und erweiterter Beitrag zum 19. Deutschen Flammentag Dresden am 14. und 15. September 1999.
- [20] Görner, K.; Klasen, Th.: Sekundärluftprisma zur Optimierung der Sekundärlufteindüsung. VDI Bildungswerk; BAT- und preisorientierte Dioxin-/Gesamtemissionminderungstechnik, Seminar 435912, München, 14.-15.09.2000
- [21] Gohlke, O.; Martin, J. u.a.: Nachhaltige Abfallbehandlung mit dem SyncomPlus-Verfahren. In: Thomé-Kozmiensky (Hrsg.): Optimierung der Abfallverbrennung. Neuruppin: TK-Verlag, 2003, S. 211-224
- [22] Hunsinger, H.; Seifert, H.: Einfluss der Verbrennungsluftführung auf Feststoffausbrand und Schadstoffverhalten. In: Thomé-Kozmiensky (Hrsg.): Optimierung der Abfallverbrennung. Neuruppin: TK-Verlag, 2003, S. 135-160
- [23] Jacobs, J., NEM Energy Services: Persönliche Mitteilung, 2006
- [24] Jeschar, R.; Scholz, R.; Schopf, N.: Mehrstufige Prozessführung bei der Verbrennung von BRAM. In: Thomé-Kozmiensky (Hrsg.): Müllverbrennung und Umwelt 2, Berlin: EF-Verlag für Energie- und Umwelttechnik, 1987, S. 418-440
- [25] Junker, E.; Büttendörfer, B.: Rost- und Dampferzeugertechnologie der ALSTOM Power Conversion GmbH – Auslegungsgrundlagen und Betriebserfahrungen an der Thermischen Abfallbehandlungsanlage Salzbergen (TAS) In: Thomé-Kozmiensky, Beckmann (Hrsg.): Optimierung der Abfallverbrennung 2. Neuruppin: TK Verlag, 2005, S. 579-603
- [26] Kailbauer, F.; Krämer, S.; Priesmeier, U.: Schritte zur Wirkungsgradsteigerung bei MVA-Neuanlagen. Thomé-Kozmiensky (Hrsg.): Optimierung der Abfallverbrennung 1. Neuruppin: TK Verlag, 2004, S. 237-246
- [27] Keppel Seghers Belgium nv: Produktinformation Keppel-Seghers-Prisma, 2006
- [28] Klasen, Th.; Görner, K.: Einfluss von Feuerraumgeometrie und –wandmaterial auf den Verbrennungsprozess sowie Vorhersage von gefährdeten Gebieten innerhalb einer MVA. VGB Konferenz: Thermische Abfallverwertung 2000, Essen, 20.-21.11.2000
- [29] Krüger, J.: Verfahren zur Verbrennung von Feststoffen. Patentschrift EP 0 607 210 B1, Veröffentlichungstag 27.07.1994
- [30] Krüger, J.: Reduktion der Schadstoffemission einer Müllverbrennungsanlage durch Einsatz von Dampf im Überschallbereich in der Feuerung In: VGB Technische Vereinigung der Großkraftwerksbetreiber e.V.: VGB Kraftwerkstechnik, Heft 2, Februar 1996 S. 134-138
- [31] Kuchling, P.; Born, M.: Pyrolyse und Copyrolyse von Kunststoffabfällen und Braunkohle. Vortrag DGMK-Fachtagung, Velen, 1994
- [32] Lahl, U.: Emissionen aus der Abfallwirtschaft – Vergangenheit, Gegenwart, Zukunft. In: Abfallkolloquium Freiberg, SIDAF, 2005, S. 7-16
- [33] Lindh, J.; Zethraeus, B.: Development of a contact free technique to measure temperature of fuel beds. 5th European Conference on Industrial Furnaces and Boilers, Porto 11.-14.4. 2000

- [34] Martin GmbH für Umwelt- und Energietechnik: Martin® Infrarot Kamerasystem zur Ergänzung der Feuerungsregelung. München, 2004, Download: <http://www.martingmbh.de/deutsch/pdf/ir-kamera.pdf> Stand: 06.02.2006
- [35] Martin GmbH für Umwelt- und Energietechnik: Martin Syncom® Verfahren. München, 2004, Download: <http://www.martingmbh.de/deutsch/pdf/syncom.pdf> Stand: 06.02.2006
- [36] Martin GmbH für Umwelt- und Energietechnik: Martin Rückschub®-Rost. München, 2004, Download: http://www.martingmbh.de/deutsch/pdf/rueckschub_rost.pdf Stand: 06.02.2006
- [37] Metschke, J.; Krüger, J.: Verfahren und Vorrichtung zur Verbrennung von Feststoffen. Patentschrift DE 195 11 609 C2, Veröffentlichungstag 12.11.1998
- [38] Napp, M.: Flexible Konzepte zur dezentralen Abfallbehandlung – mit der Von Roll 16-MW-Standardanlage-. In: Thomé-Kozmiensky (Hrsg.): Ersatzbrennstoffe 2. Neuruppin: TK-Verlag, 2002, S. 161-170
- [39] NEM Energy Services: Produktinformation Tetratubes®, 2005
- [40] Nüßlein, F. u.a.: Influence of combustion bed temperature on concentration and leachability of Metals in slags from an incinerating plant. Chemosphere (1994) 2, S. 349-356
- [41] NV Afvalverbranding Zuid-Nederland (AZN): Müllverwertung von A bis ZN. AVI Moerdijk. URL: http://www.nvazn.nl/publicaties_brochures.htm Stand: 06.02.2006
- [42] Pfrang-Stotz, G. u.a.: Qualität von Rostaschen aus verschiedenen Müllverbrennungsanlagen In: Thomé-Kozmiensky, Beckmann (Hrsg.): Optimierung der Abfallverbrennung 2. Neuruppin: TK Verlag, 2005, S. 517-533
- [43] Piechura, H., Lurgi Energie und Entsorgung GmbH: Möglichkeiten und Grenzen der Wirkungsgradsteigerung bei der MVA. Fachtagung „Optimierungspotential der Abfallverbrennung“, Berlin, 9.-10.03.2004
- [44] Reith, M.; Geider, A.; Arnold, G.: Effizientes Energiemanagement mit optimierter Infrastruktur am Beispiel des MHKW Mannheim . In: Thomé-Kozmiensky (Hrsg.): Optimierung der Abfallverbrennung 1. Neuruppin: TK Verlag, 2004, S.367-380
- [45] Scholz, R. u.a.: Abfallbehandlung in thermischen Verfahren. Teubner-Verlag, 2001
- [46] Scholz, R.; Beckmann, M.; Schulenburg, F.: Modellierung und Vergleich verschiedener Feuerungsführung in Rostsystemen. In: Verein Deutscher Ingenieure VDI (Hrsg.): VDI-Berichte 1313, 1997
- [47] Scholz, R.; Beckmann, M.: Ersatzbrennstoffverwertung bei unterschiedlicher Prozessführung. In: Thomé-Kozmiensky (Hrsg.): Ersatzbrennstoffe 2, Neuruppin: TK-Verlag, 2002, S. 73-90
- [48] Scholz, R.; Beckmann, M.: Verfahrenstechnische Möglichkeiten der Optimierung bei Rostfeuerungen zur Abfallbehandlung. In: Thomé-Kozmiensky (Hrsg.): Optimierung der Abfallverbrennung. Neuruppin: TK-Verlag, 2003, S. 87-134
- [49] Scholz, R. u. a.: Zur systematischen Bewertung der Energieumwandlungen bei der thermischen Abfallbehandlung – Was ist Energieeffizienz ?- In: Thomé-Kozmiensky (Hrsg.): Optimierung der Abfallverbrennung 1. Neuruppin: TK Verlag, 2004, S. 203-235

- [50] Scholz, R.; Schopf, N.: General Design Concept for Combustion Processes for Waste Fuels and some Test Results of Pilot Plants. In: 8th International Conference on Thermal Destruction of Hazardous, Radioactive, Infectious and Mixed Wastes, 1.-5. Mai 1989, Knoxville, Tennessee
- [51] Schopf, N.; Scholz, R.: Verbrennungskonzepte und Verfahren in technischen Feuerungen Teil II: Stückige Brennstoffe. Vortrag auf dem Clausthaler Kursus zur Umwelttechnik „Mindern von Emissionen“ der CUTEC vom 24.-26. April 1989
- [52] Schu, R.; EcoEnergy GmbH: Verfahren und Vorrichtung zur Erzeugung von überhitztem Dampf. Patentanmeldung, unveröffentlicht; Anmeldetag vom 2. August 2005
- [53] Seifert, H.: Potentiale der energetischen Nutzung von Abfällen. In: Thomé-Kozmiensky (Hrsg.): Optimierung der Abfallverbrennung 1. Neuruppin: TK Verlag, 2004, S. 185--201
- [54] Seiler, U.: Energetisches Optimierungspotential bei Abfallverbrennungsanlagen. In: Thomé-Kozmiensky, Beckmann (Hrsg.): Optimierung der Abfallverbrennung 2. Neuruppin: TK Verlag, 2005, S. 241-254
- [55] Spiegel, W.: Belagseigenschaften und Korrosionsreaktionen. In: Born, M. (Hrsg.): Dampferzeugerkorrosion Teil 1; SAXONIA Standortentwicklungs- und -verwaltungsgesellschaft mbH, Freiberg, 2005
- [56] Spiegel, W.; Müller, W.; Herzog, T.: Beeinträchtigung der Wirtschaftlichkeit von Abfallverbrennungsanlagen durch Korrosion – Nutzen aus korrosionsmindernder Betriebsweise- In: Thomé-Kozmiensky, Beckmann (Hrsg.): Optimierung der Abfallverbrennung 2. Neuruppin: TK Verlag, 2005, S. 271-283
- [57] Vehlow, J. u.a.: Dioxinzerstörung im UPSWING-Prozess. In: Thomé-Kozmiensky, Beckmann (Hrsg.): Optimierung der Abfallverbrennung 2. Neuruppin: TK Verlag, 2005, S. 651-664
- [58] Thomé, E.; Dittrich, R.; Gazinski, A.; Gehr, D.: Optimierung einer Müllfeuerung durch modulare Feuerungsleistungsregelung. In: Thomé-Kozmiensky (Hrsg.): Optimierung der Abfallverbrennung. Neuruppin: TK-Verlag, 2003, S. 199-210
- [59] Thomé, E.; Schäfers, W.: Energetische Verwertung von Ersatzbrennstoffen in Rostfeuerungen mit hohen Dampfparametern. In: Thomé-Kozmiensky (Hrsg.): Ersatzbrennstoffe 2, Neuruppin: TK-Verlag, 2002, S. 149-160
- [60] Thomé, E.: Energetische Verwertung von Ersatzbrennstoffen in einem umgebauten Kessel. In: Thomé-Kozmiensky (Hrsg.): Ersatzbrennstoffe 2, Neuruppin: TK-Verlag, 2002, S. 209-218
- [61] Verein Deutscher Ingenieure VDI (Hrsg.): VDI 3460, Blatt 2 – Emissionsminderung – Energieumwandlung bei der thermischen Abfallbehandlung Berlin: Beuth Verlag, März 2002
- [62] Verein Deutscher Ingenieure VDI (Hrsg.): VDI 3784, Blatt 2 – Ausbreitungsberechnung bei Ableitung von Rauchgasen über Kühltürme. Berlin: Beuth Verlag, März 1990
- [63] vonRoll INOVA: Block 5 geht vor Termin in Betrieb. flash; Kundenzeitschrift der von Roll INOVA, November 2005

- [64] vonRoll INOVA: Produktinformationen Anlage Wärmekraftwerk Umea. Download:
http://www.vonrollinova.ch/site/deutsch/dokumentation/pdf/inova_umea_d_5.pdf Stand
06.02.2006
- [65] vonRoll INOVA: Produktinformationen Anlage AVI Moerdijk. Download:
http://www.vonrollinova.ch/site/deutsch/dokumentation/pdf/moerdijk_d.pdf Stand
06.02.2006
- [66] Wandschneider, J. ; Seiler, U. u.a.: Steigerung des elektrischen Wirkungsgrades bis
30% durch eine Hochleistungskesselanlage am Beispiel der HRI-AVI Amsterdam. In:
Thomé-Kozmiensky (Hrsg.): Optimierung der Abfallverbrennung 1. Neuruppin: TK Verlag,
2004, S.247-256
- [67] Wandschneider, J.: Etamax bei MVA. In: Abfallkolloquium Freiberg, SIDAF, 2005
- [68] Wandschneider+gutjahr ingenieurgesellschaft mbH: Studie zum Energiepotential von
KVA in der Schweiz. Baudirektion Kanton Zürich, Amt für Abfall, Wasser, Energie und
Luft, Juni 2005 Download: www.ased.ch/file/Energiepotenzial_KVA.pdf Stand:06.02.2006
- [69] Warnecke, R. Gemeinschaftskraftwerk Schweinfurt GmbH: Persönliche Mitteilung, 2005
- [70] Warnecke, R. u.a.: Modell für die Beschreibung instationärer Vorgänge auf Rosten für
die Abfallverbrennung. In: Tagungsband 7. Fachtagung Abfallverbrennung, Berlin, 2002
- [71] Walter, M.; u.a.: Bestimmung und Auswertung der Temperaturverteilung von Verbren-
nungsgut auf dem Verbrennungsrost von Müllverbrennungsanlagen. In: VGB Kraftwerks-
technik 1, 1996, S. 37-45
- [72] Wiederkehr, M.; Baumann, O.: Feuerungselemente und Service-Leistungen aus Sicht
der Firma Von Roll zur Kostensenkung.
Download:
www.vonrollinova.ch/site/deutsch/dokumentation/pdf/bibliothek/feuelement_d.pdf
Stand: 06.02.2006