K. J. Thomé-Kozmiensky
Michael Beckmann



# Energie aus Abfall

Band 14

TK

Karl J. Thomé-Kozmiensky †
Michael Beckmann

# Energie aus Abfall

Band 14

TK

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über http://dnb.dnb.de abrufbar

Karl J. Thomé-Kozmiensky, Michael Beckmann (Hrsg.):

**Energie aus Abfall, Band 14**

ISBN 978-3-944310-32-9 TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky

Copyright: Elisabeth Thomé-Kozmiensky, M.Sc., Dr.-Ing. Stephanie Thiel
Alle Rechte vorbehalten

Verlag: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky • Neuruppin 2017
Redaktion und Lektorat: Dr.-Ing. Stephanie Thiel, Elisabeth Thomé-Kozmiensky, M.Sc.
Erfassung und Layout: Sandra Peters, Anne Kuhlo, Janin Burbott-Seidel, Claudia Naumann-Deppe, Ginette Teske, Gabi Spiegel, Cordula Müller
Druck: Universal Medien GmbH, München

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürfen.

Sollte in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien, z.B. DIN, VDI, VDE, VGB Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden sein, so kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen. Es empfiehlt sich, gegebenenfalls für die eigenen Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hinzuzuziehen.

# Vorwort

Der Druck im deutschen Abfallverbrennungsmarkt hat sich im Vergleich zum Vorjahr weiter erhöht. Offensichtliche Indikatoren dafür sind die Entwicklung von Anlagenauslastung, Preisen und Spotmarkt. Während die Anlagen durchweg mit Vollauslastung oder sogar darüber betrieben werden, können die Betreiber trotzdem bei Weitem nicht alle Entsorgungsanfragen bedienen. Die regelmäßig im Herbst von Euwid durchgeführte Marktumfrage hat ergeben, dass die Verbrennungspreise für gewerbliche Abfälle innerhalb des zurückliegenden Jahres noch einmal deutlich gestiegen sind – um etwa 15 bis 20 Euro pro Tonne. Insbesondere in Süddeutschland ist der Handel mit Abfällen auf dem Spotmarkt nahezu vollständig zum Erliegen gekommen. Inzwischen gehen vielerorts auch private Entsorger dazu über, sich mit längerfristigen Verträgen Entsorgungssicherheit für ihre Gewerbeabfälle zu verschaffen.

Für den weiteren Anstieg der Abfallmengen werden zum einen Einflussfaktoren genannt, die bereits im Vorjahr wirksam waren, unter anderem die gute Konjunktur der deutschen Wirtschaft, das anhaltend niedrige Zinsniveau und die milden Winter.

Aber es drängen auch infolge verschiedener anderer Faktoren zusätzliche Abfallmengen in die Verbrennungsanlagen.

Im Bereich der mechanisch-biologischen Abfallbehandlung sind nennenswerte Restabfall-Behandlungskapazitäten weggefallen. Einerseits haben eine Reihe von Betreibern ihre MBAs umgewidmet – statt der mechanisch-biologischen Behandlung von Restabfällen werden dort nun Bioabfälle vergärt bzw. kompostiert. Zudem wurden auch MBAs komplett stillgelegt. Die zuvor in diesen Anlagen behandelten Abfälle kommen nun zusätzlich in den Entsorgungsmarkt.

Auch die Menge an Sortierresten ist infolge des niedrigen Preisniveaus für Rohstoffe angestiegen, wie das Marktforschungsunternehmen ecoprog in seinem Branchenbarometer ausführt.

Die Sortierung von Sperrmüll wird bei den Entsorgern mancherorts komplett ausgesetzt. Angesichts der extremen Steigerungen der Entsorgungspreise auf dem Altholzmarkt sowie der regionalen Kapazitätsengpässe bringen etliche Entsorger den Sperrmüll unsortiert zu den Abfallverbrennungsanlagen. Dies führt nicht nur zum Anstieg der Mengen, sondern auch des Heizwerts und damit zu einer Verringerung des möglichen Anlagendurchsatzes.

Zusätzlich zu Haus- und Sperrmüll, Gewerbeabfällen, Ersatzbrennstoffen und Sortierresten werden auch noch andere Abfallarten in den Abfallverbrennungsanlagen und Ersatzbrennstoff-Kraftwerken mitverbrannt. Hierzu zählen zum Beispiel gefährliche Abfälle und Klärschlamm – nach Schätzungen von Prognos in der Größenordnung von 0,4 Millionen Tonnen sowie 0,3 Millionen Tonnen (2014).

Zu den gefährlichen Abfällen gehörten aufgrund der geänderten Einstufung in der Abfallverzeichnisverordnung ab Anfang Oktober 2016 auch Dämmstoffe, die das Flammschutzmittel Hexabromcyclododecan (HBCD) enthalten. Die neue Rechtslage führte zu einem massiven Entsorgungsnotstand mit der Folge, dass sogar Baustellen stillgelegt werden mussten. Die als gefährlich eingestuften HBCD-haltigen Dämmstoffe durften nur noch in solchen Abfallverbrennungsanlagen entsorgt werden, die über eine diesbezügliche Genehmigung verfügen. In Niedersachsen wurde – zumindest für Monochargen – frühzeitig ein pragmatischer Weg beschritten, Anlagen im Anzeigeverfahren nachzugenehmigen. Inzwischen hat das Bundeskabinett in der zweiten Dezemberhälfte seine Zustimmung zum Bundesratsbeschluss für ein zwölfmonatiges Moratorium bei der Entsorgung HBCD-haltiger Dämmstoffabfälle gegeben. Mit dieser Übergangslösung ist das Problem zunächst aufgeschoben, es gilt die Zeit für die Erarbeitung einer dauerhaften Lösung zu nutzen.

Vor dem Hintergrund der Neuausrichtung der Klärschlammverwertung in Deutschland soll mit der Novellierung der Klärschlammverordnung die Ausbringung auf Böden stark eingeschränkt werden. Zusätzlich zur Schaffung von Kapazitäten zur Klärschlamm-Monoverbrennung[1] und der Ausweitung anderer Entsorgungswege ist auch mit zusätzlichen Mengen für die Abfall- und Ersatzbrennstoff-Verbrennungsanlagen zu rechnen.

Zusätzlich zu den in Deutschland selbst angefallenen Mengen werden auch Abfälle aus dem benachbarten Ausland importiert. Ein besonderes Augenmerk wurde in den vergangenen Jahren auf die stark ansteigenden Einfuhren aus Großbritannien gelegt. Im Jahr 2015 belief sich die Importmenge an Ersatzbrennstoffen aus Großbritannien nach Zahlen des Umweltbundesamts auf etwa 749.000 Tonnen. Angaben der britischen Umweltbehörde Environment Agency für die ersten zehn Monate des Jahres 2016 lassen darauf schließen, dass die Mengen nunmehr etwa auf dem Niveau des Vorjahres stagnieren.[2] Für den Monat November gaben bei der Marktumfrage von Euwid mehrere Anlagenbetreiber rückläufige Mengen an – ob es sich dabei nur um eine kurzzeitige Schwankung handelt oder nunmehr eine Trendwende eingesetzt hat, wird die Entwicklung in den kommenden Monaten zeigen. Auf jeden Fall hat die Abwertung des britischen Pfund seit dem Brexit-Votum im Juni vergangenen Jahres die Entsorgung in Deutschland für die Briten verteuert.

Die zweitgrößte Menge an gemischten Siedlungsabfällen und Ersatzbrennstoffen zur energetischen Verwertung oder thermischen Behandlung wurde mit etwa 651.000 Tonnen aus den Niederlanden importiert. Auf den weiteren Plätzen folgen Irland, Frankreich und Belgien. Insgesamt importierte Deutschland 2015 etwa 1,71 Millionen Tonnen, damit stieg der Import im Vergleich zum Vorjahr um drei Prozent.

Seltener wird darüber gesprochen, dass auch Deutschland seinerseits Abfälle exportiert. Die Gesamtausfuhr an Ersatzbrennstoffen und gemischten Siedlungsabfällen zur energetischen Verwertung oder thermischen Behandlung betrug 2015 nach Auswertung der UBA-Daten etwa 431.000 Tonnen – also etwa ein Viertel des Imports. Die mit Abstand größte Menge ging in die Schweiz (254.000 Tonnen), gefolgt von den Niederlanden (55.000), Schweden, Tschechien, Dänemark und Luxemburg. Deutschland exportierte damit beachtliche 18,5 Prozent mehr als noch ein Jahr zuvor. Und diese Entwicklung dürfte sich 2016 angesichts der knappen Verbrennungskapazitäten im Land weiter verstärkt haben. Dies bestätigen auch Angaben einiger von Euwid befragter Marktteilnehmer, die sich zunehmend um Entsorgungskapazitäten im benachbarten Ausland bemühen, zum Teil für eine beträchtliche Tonnage.

Während also die Betreiber der deutschen Verbrennungsanlagen Abfälle importieren, verstärken die Entsorger ihre Anstrengungen, durch Export ausländische Entsorgungskapazitäten für sich zu erschließen. Der Entsorgungsmarkt für Siedlungsabfälle macht nicht an den Landesgrenzen halt, sondern weitet sich zunehmend auf den europäischen Raum aus. Demgemäß sprach sich vor einigen Monaten ein Vertreter der Generaldirektion Umwelt der EU-Kommission dafür aus, dass die Verbrennungskapazitäten nicht auf nationaler, sondern auf europäischer Ebene geplant werden müssen.

---

[1] Im Fall der Monoverbrennung ist die Phosporrückgewinnung, die ein zentrales Element der Novelle ist, auch aus den Klärschlammaschen möglich.

[2] Insgesamt zeichnet sich für 2016 ein deutlicher Anstieg der Ersatzbrennstoff-Ausfuhren aus Großbritannien ab, die Lieferungen in andere Abnehmerländer haben im gleichen Zeitraum deutlich zugenommen.

[3] geplante Kapazität: 140.000 Tonnen pro Jahr

Obwohl die Anlagen in Deutschland an ihrer Belastungsgrenze betrieben und auch Kapazitäten im Ausland genutzt werden, kommen nicht alle Abfallmengen unter. Als Übergangslösung werden Abfälle zwischengelagert, teils balliert und teils offen.

Angesichts der geschilderten Entwicklungen gibt es in Deutschland nach jahrelanger Stagnation wieder erste Projekte zur Errichtung neuer Verbrennungskapazitäten.

Die Stadtreinigung Hamburg plant auf dem Gelände der ehemaligen MVA Stellinger Moor ein Ersatzbrennstoff-Heizkraftwerk. Dieses wird Teil des neuen *Zentrums für Ressourcen und Energie* sein, das unter anderem auch eine mechanisch-biologische Abfallbehandlungsanlage[3] mit Vergärungsstufe, eine Bioabfallvergärungsanlage und ein Biomasse-Heizkraftwerk umfassen soll. Das Ersatzbrennstoff-Heizkraftwerk ist als einlinige Anlage mit einer Kapazität von etwa 100.000 Tonnen pro Jahr und einer Feuerungswärmeleistung von 48 MW geplant. Die Generalplanung wurde bereits ausgeschrieben und soll im Februar 2017 vergeben werden. Die Anlage soll 2022 in Betrieb genommen werden.

EEW Energy from Waste erwägt eine Erweiterung seiner Verbrennungskapazitäten in Premnitz/Brandenburg. Diese umfassen derzeit einen Wirbelschichtfeuerungskessel und eine Rostfeuerungslinie. Bereits 2008 wurde die Genehmigung für eine zweite Rostfeuerungslinie mit einer Kapazität von 150.000 Tonnen pro Jahr erteilt, die aber aufgrund der damaligen Marktlage nicht errichtet wurde. Nun hat das Unternehmen einen Antrag zur Erneuerung der inzwischen verfallenen Genehmigung eingereicht. Die Entscheidung zum Bau hat EEW jedoch noch nicht endgültig getroffen, wie Euwid berichtet.

Auch im grenznahen Gebiet gibt es vereinzelte Projekte. In Delfzijl/Niederlande plant EEW Energy from Waste die Erweiterung seiner Anlage um eine dritte Linie mit einer zusätzlichen Kapazität von 192.000 Tonnen pro Jahr, die bis 2019 in Betrieb gehen soll. Der Input soll vor allem aus aufbereiteten Haushalts- und Gewerbeabfällen sowie Industrieabfälle bestehen – vornehmlich aus Großbritannien. In Straßburg/Frankreich soll ein Ersatzbrennstoff-Heizwerk zur Reststoffentsorgung und Energieversorgung einer Papierfabrik errichtet werden. Die geplante Kapazität in Höhe von etwa 40.000 Tonnen pro Jahr ist fast ausschließlich für Abfälle aus der Papierherstellung vorgesehen, nur ein geringer Teil soll für andere Ersatzbrennstoffe zur Verfügung stehen. Mitte vergangenen Jahres wurde der Genehmigungsantrag eingereicht. Zuletzt wurde die Planung einer kleinen Abfallverbrennungsanlage in Varnsdorf/Tschechische Republik für 20.000 Tonnen Hausmüll pro Jahr bekannt. Soweit der Stand zu Anlagenneubau und Erweiterung in Deutschland und angrenzenden Regionen.

Derzeit ist noch nicht erkennbar, wann sich die Kapazitätsengpässe auf dem deutschen Abfallverbrennungsmarkt entspannen werden. Und auch der tatsächliche Umfang der in den kommenden Jahren zusätzlich errichteten Verbrennungskapazitäten in Deutschland und Grenznähe lässt sich noch nicht abschätzen. Es bleibt spannend.

Januar 2017

*Dr.-Ing. Stephanie Thiel*

# Inhaltsverzeichnis

## Anlagen – Konzepte, Herausforderungen und Ertüchtigung

**Gesamt-Konzept zur Abfallverwertung mit hoher Energieeffizienz und integrierter Wertstoffrückgewinnung**
Axel Hanenkamp, Robert von Raven, Max Schönsteiner und Martin Murer ..... 3

**Energie und Biogas aus Abfall für eine klimaneutrale Wirtschaft**
Andres Kronenberg..... 25

**Neue problematische Einsatzstoffe in der Abfallverbrennung**
Peter Quicker und Jan Stockschläder ..... 41

**Vorgehensweise bei der modellbasierten Prozessanalyse und Ergebnisse der umgesetzten Handlungsempfehlungen am Beispiel einer Abfallverbrennungsanlage**
Martin Pohl und Tao Wen..... 61

## Energie-Management und Vermarktung

**Kehrichtverwertungsanlage Basel – kontinuierliche Optimierung des Netto-Energienutzungsgrads –**
Roman Maletz und Jörg Stolz ..... 77

**Steigerung des Anlagenwirkungsgrades von Abfallverbrennungsanlagen durch verbesserte Nutzung der Verlustwärme**
Gerhard Heinz ..... 97

**Wärme aus der Region – Ersatz eines Steinkohlekraftwerkes durch die Einbindung eines Müllheizkraftwerkes in ein Fernwärmeverbundsystem –**
Conrad Tschersich..... 111

**Erfahrungen mit Stromnetz und -vermarktung aus Betreibersicht**
Klaus Libuda ..... 123

**Feasability Study of Capturing $CO_2$ from the Klemetsrud CHP Waste-to-Energy Plant in Oslo – Carbon Capture and Storage in Norway and Europe –**
Johnny Stuen ..... 133

**$CO_2$-Abscheidung als Wertstoff-Rückgewinnung – eine Symbiose für die Umwelt?**
Rudi H. Karpf ..... 147

## Digitalisierung und IT-Sicherheit

**Digitalisierung dezentraler Strom- und Wärmeerzeugung – Potenziale und Herausforderungen für Abfallverbrennungsanlagen –**
Dirk Briese und Jens Gatena ..... 169

**Steigerung der Prozesssicherheit durch aktuelles Daten- und Informationsmanagement in Abfallverbrennungsanlagen**
Hans Karl Preuss und Erich Böhm ..... 183

**IT-Sicherheit für Abfallentsorgungs- und Energieanlagen**
Karl-Ulrich Martin ..... 199

## Korrosion und Werkstoffe

**Erfahrungen aus zwanzig Jahren Revisionsbegleitung**
Wolfgang Spiegel und Dominik Molitor ..... 215

**Maintenance 4.0 – Integrierte Wartungskonzepte der Zukunft –**
Rudolf Mallweger ..... 227

**Optimierung der Online-Reinigung durch erweiterte Sensorik und Monitoring**
Sebastian Grahl, Franziska Graube, Matthias Reiche, Torsten Stärk, Christopher Thiel und Michael Beckmann ..... 235

**Neues nitridisch gebundenes Siliciumcarbid-Plattensystem für Dampferzeuger – Realisierte Optimierungen in Montage, Prozess und Standzeit –**
Jos van der Hoeff, Karl-Ulrich Martin, Karel Hoeksma und John Koenders ..... 271

**Technischer Stand beim Schweißplattieren – Verfügbarkeitssteigerung – das Ziel der Korrosionsschutzmethodik –**
Arne Manzke ..... 301

**Anwendung modifizierter NiCrMo-Legierungssysteme zum Schutz der Rauchrohroberfläche in Abfallverbrennungsanlagen**
Iain Hall, Kwang Han, Triratna Shrestha und Daniel Spálenka ..... 331

## Abgasbehandlung

**Monitoring und Steuerung von SNCR-Technologien zur Optimierung von Entstickungsleistung und Ammoniakschlupf**
Bernd von der Heide ..... 347

**SNCR mit Dual Injection und Opti-Link für herausfordernde Entstickungsaufgaben**
Philip Reynolds und Wolfgang Schüttenhelm ..... 365

**Desaktivierung und Regeneration von DeNOx-Katalysatoren**
Ruedi Frey ..... 381

**Rauchgasentschwefelung – Abgasentschwefelung – Seewasser als wirtschaftliches Sorptionsmittel –**
Christian Fuchs ..... 391

**Auslegung und Gestaltung von Sprühtrockner/Sprühabsorber und Verdampfungskühler**
Armin Möck ..... 407

## Ersatzbrennstoffe

**Energetische Nutzung von heizwertreichen Rückständen aus dem Landfill Mining**
Renato Sarc, Roland Pomberger, Tanja Wolfsberger und Josef Adam ..... 431

**Aufbereitung von Siedlungsabfällen zu Ersatzbrennstoffen in Erwitte und Mitverbrennung im Zementwerk Wittekind**
Thomas Bals ..... 449

**Prozessintegriertes Verfahren zur Entlastung des Quecksilberkreislaufes und zur Reduktion von Quecksilberemissionen bei der Herstellung von Zementklinker**
Holger Reinhold und Dominik Steiner ..... 463

## Klärschlamm

**Auswirkungen der Absenkung der Mindestverbrennungstemperatur auf die Emissionen einer Klärschlammverbrennungsanlage**
Margit Löschau ..... 477

**Klärschlammverwertung mit einem innovativen Pyrolysereaktor – eine techno-ökonomische Betrachtung –**
Marco Tomasi Morgano, Hans Leibold, Dieter Stapf und Helmut Seifert ..... 499

## Gefährliche Abfälle

**Rolle der Sonderabfallverbrennung in der Kreislaufwirtschaft – Schadstoffsenke und energetische Verwertung –**
Andreas Neuss und Horst Suchomel ..... 521

**Neuartige Kenngrößen zur Online-Beschreibung des Sonderabfall-Verbrennungsprozesses im Drehrohr einer Industrieanlage auf Basis von Infrarotaufnahmen**
Patrick Waibel, Markus Vogelbacher, Jörg Matthes, Sina Keller und Hubert B. Keller ..... 541

**Modernisierung einer industriellen Rückstandsverbrennungsanlage für eine zukunftssichere Entsorgung und wirtschaftliche Energieversorgung eines Industriestandortes**
Peter Unger, Michael Nolte, Urs Keller und Kai Keldenich ..... 555

**Probleme bei der Entsorgung von gefährlichen Abfällen in der Russischen Föderation und Perspektiven für die Einführung thermischer Behandlungsverfahren**
Yaroslav Uhlava Sardenovich und Natalia Koletvinova ..... 565

**Autorenverzeichnis** ..... 585

**Inserentenverzeichnis** ..... 601

**Schlagwortverzeichnis** ..... 613

# Gesamt-Konzept zur Abfallverwertung mit hoher Energieeffizienz und integrierter Wertstoffrückgewinnung

Axel Hanenkamp, Robert von Raven, Max Schönsteiner und Martin Murer


1. Anlagen und Systeme zur Abfallbehandlung mit Betrachtung von Effizienzpotenzialen ..... 4

1.1. Thermische Abfallbehandlung ..... 4

1.2. Effizienzpotenziale der thermischen Abfallbehandlungsanlage ..... 5

2. Systeme und Anlagen zur Schlacken- und Wertstoffaufbereitung ..... 10

2.1. Nassaustragssysteme ..... 13

2.2. Trockenaustragssysteme ..... 14

2.3. Wertstoffaufbereitung trockener Rostschlacken ..... 16

3. Zusammenfassung ..... 20

4. Literatur ..... 21


Die thermische Verwertung von Restabfällen aus Haushalten und Industrie erfolgt in der Regel durch thermische Abfallverwertungsanlagen. Dabei steht die umweltschonende und effiziente Nutzung der in den Restabfällen enthaltenen Energie im Vordergrund. Neben der Steigerung der Energieeffizienz von Anlagen zur energetischen Umsetzung von Abfällen steht auch die Ressourcenschonung und damit die Aufbereitung von Reststoffen im langfristigen Fokus der europäischen Union. Mit dem Gesetz zur Kreislaufwirtschaft ist das langfristige Ziel verbunden, eine Recyclingquote von 65 Prozent für Siedlungs- und 75 Prozent für Verpackungsabfall bei maximaler Deponierung von 10 Prozent der Abfälle im Jahr 2030 für fast alle EU-Länder zu erreichen. Dieser vorgegebene Zeithorizont ergibt die Notwendigkeit, tragfähige technische Konzepte zu Erfüllung der Ziele zu entwickeln. Im Rahmen dieser politischen Zielsetzung werden thermische Abfallbehandlungsanlagen mit rostfeuerungsbasierten Systemen zur aktiven Ressourcenschonung noch attraktiver, weil neben der hohen Energieeffizienz auch der verbesserten Rückgewinnung von Wertstoffen zur Substitution von Rohstoffen größere Bedeutung zukommt. Dabei ist vor allem die Rostschlacke von Interesse, da sie die größte Rückstandsfraktion des Verbrennungsprozesses darstellt und ein hohes Verwertungspotenzial bietet. Einen signifikanten technischen und ökonomischen Optimierungsschritt stellt in diesem Zusammenhang der trockene Austrag und Aufbereitung von trockener Rostschlacke dar. Neben der verbesserten Rückgewinnung hochwertiger, sortenreiner Metallfraktionen sind die Eigenschaften der nicht mit Wasser abgekühlten Mineralikfraktion für eine Verwertung von Interesse.

# 1. Anlagen und Systeme zur Abfallbehandlung mit Betrachtung von Effizienzpotenzialen

## 1.1. Thermische Abfallbehandlung

Bei der Realisierung von thermischen Abfallbehandlungsanlagen kommen je nach Anwendungsfall die unterschiedlichsten Rosttypen zum Einsatz. Der Rückschub-Rost ist dabei das von Martin bevorzugte Rostsystem. Bild 1 zeigt das Prinzipschema einer thermischen Abfallbehandlungsanlage.

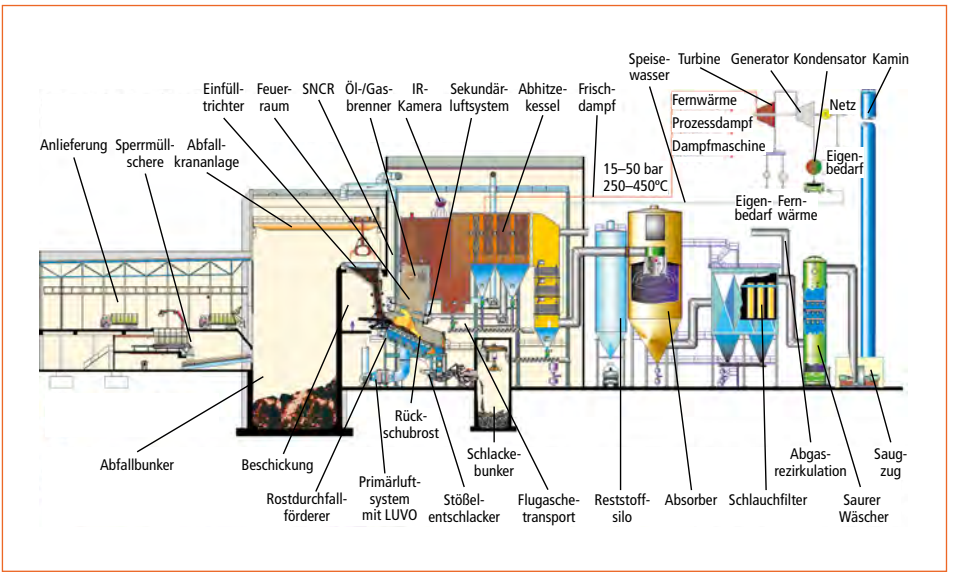



Bild 1: Prinzipschema einer thermischen Abfallbehandlungsanlage

In Kombination mit dem ausgewählten Rosttyp wird das Kessel- und Verbrennungsverfahren optimal auf den Einsatzzweck abgestimmt. Dazu werden verschiedene energieeffiziente Verbrennungskonzepte angeboten [15]. Haupttreiber für die Errichtung von hocheffizienten Abfallverwertungsanlagen sind in Europa die European Waste Framework Directive (Abfallrahmenrichtlinie) [6, 8] und die European Industrial Emissions Directive [7], die im europäischen Raum die wesentlichen Vorgaben für thermische Abfallbehandlungsanlagen beinhalten. Dabei weisen bestehende Anlagen, die nur zur Stromproduktion eingesetzt werden, elektrische Wirkungsgrade von 18 bis zu 26 Prozent auf [10]. Neuere Anlagen erreichen Wirkungsgrade im rein stromgeführten Betrieb von über 30 Prozent. Bei wärmegeführten Anlagen sind Wirkungsgrade von bis zu 90 Prozent bereits der Stand der Technik [18]. Diese Anlagen können allerdings nur wirtschaftlich betrieben werden in Regionen mit signifikantem Fernwärmebedarf oder industrieller Abnahme der Abwärmen und des Prozessdampfs. Das Konzept der kombinierten Erzeugung von Strom und Wärme ist weitverbreitet und das Geschäftsmodell basiert auf den Erlösen der Energieformen Strom und Wärme.

Für einzelne Märkte zeigt es sich, dass für Neuanlagen die reine Stromproduktion das dominante Geschäftsmodell ist, weshalb die folgenden Betrachtungen auf die reine Stromproduktion auslegt sind.

## 1.2. Effizienzpotenziale der thermischen Abfallbehandlungsanlage

Die Steigerung der Energieeffizienz ist der wesentliche Treiber für Investitionen in Neu- und Bestandsanlagen, da sich eine Verbesserung des Geschäftsmodells für den Betreiber der Anlage realisieren lässt. Im Rahmen einer Neuinvestition in eine Gesamtanlage fallen die technischen Maßnahmen zur Effizienzsteigerung und deren Einfluss auf die Gesamtinvestition nicht so stark ins Gewicht, bei der Modernisierung von bestehenden Anlagen ist die mögliche Effizienzsteigerung das entscheidende Investitionskriterium. Die Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz lassen sich durch folgende Wirkungsgradformel beschreiben:

$$\eta = \frac{\dot{Q}_{B\text{ - }Verluste}}{\dot{Q}_B} \qquad (1)$$

Die Größe Wärmestrom $Q_B$ ist durch die Grundauslegung der Anlage vorgegeben. Der Wirkungsgrad kann durch eine Reduzierung der auftretenden Verluste in den typischen Komponenten einer Dampfkesselanlage gesteigert werden [20, 22]. Eine, dem Stand der Technik entsprechende, verfahrenstechnische Verschaltung und Auslegungsdaten einer Dampfkesselanlage für eine thermische Abfallbehandlungsanlage sind Bild 2 und Tabelle 1 zu entnehmen.

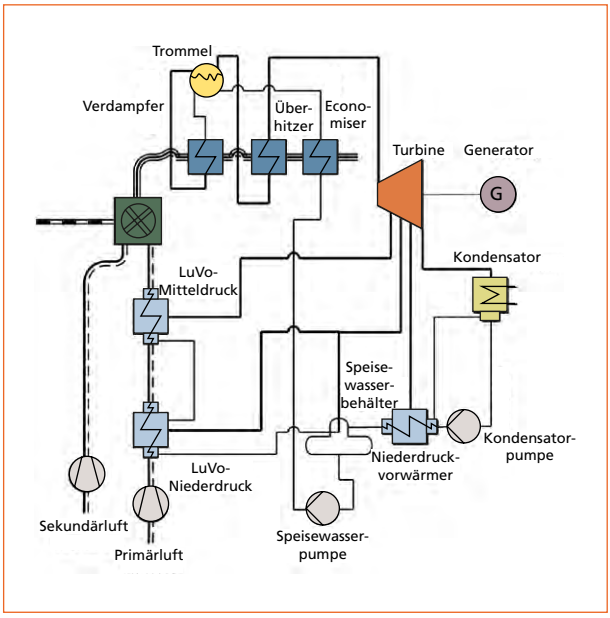



Bild 2:

Wasser-Dampf-Kreislauf der TVA Bozen

| Parameter | Größe | Einheit | Wert |
|---|---|---|---|
| Frischdampftemperatur | T | °C | 400 |
| Frischdampfdruck | p | bar | 40 |
| Speisewassertemperatur | T | °C | 130 |
| Kondensationsdruck | p | bar | 0,10 |
| Luftüberschuss | λ | [-] | 1,75-1,9 |
| Primärlufttemperatur | T | °C | 100-160 |
| Abgastemperatur Kesselende | T | °C | 200 |
| Mittlere Temperatur der Wärmeübertragung | T | °C | 245 |
| **Wirkungsgrad elektrisch (netto)** | η | [-] | **22 %** |

Tabelle 1:

Auslegungsparameter des Wasser-Dampf- und Verbrennungssystems der TVA Bozen

Die wesentlichen Verluste in einer solchen, mit einer Kondensationsturbine betriebenen Anlage sind die abzugebende Wärme im Kondensator nach der Kondensationsturbine, die Abstrahl- und Reststoffverluste, sowie die Abgaswärmeverluste am Kamin. Daher gibt es für die Optimierung der Gesamtanlage zwei wesentliche Optimierungsfelder. Zum einen die Optimierung des Wasser-Dampf-Kreislaufes in dem der Prozess abläuft und zum anderen die Verbesserung der Wärmerzeugung und damit die Verbrennungsführung. Die Optimierung des Wasser-Dampf-Kreislaufes lässt sich durch die folgenden Möglichkeiten beschreiben:

- Erhöhung der mittleren Temperatur im Wasser-Dampf-Kreislauf
- Dampfentnahmen in der Turbine mit möglichst geringen Anzapfdrücken
- Wahl eines minimalen Kondensationsdruckes
- Verbesserung der inneren Effizienz der eingesetzten Turbomaschine.

Die Abstrahlverluste lassen sich durch wärmetechnische Isolationskonzepte im Feuerraum minimieren, die Reduzierung der Reststoffverluste werden durch Verbesserungen in der Feuerungs- und Austragstechnik reduziert. Der wesentliche Treiber zur Verminderung der Abgaswärmeverluste am Kamin ist die Absenkung des Sauerstoffs bzw. des Luftüberschusses durch eine fortschrittliche Verbrennungsführung [9, 14].

Bei der in 2007 realisierten Anlage HRC Amsterdam konnte durch den Einsatz einer Zwischenüberhitzung im Wasser-Dampf-Kreislauf, der Möglichkeit der Absenkung des Kondensationsdruckes durch eine Seewasserkühlung und der Absenkung des Luftüberschusses bereits eine elektrische Wirkungsgradsteigerung (netto) auf über 30 Prozent erreicht werden. Bild 3 zeigt die Schaltung der Zwischenüberhitzung, Bild 4 das zugehörige T-S-Diagramm.

Die in Amsterdam realisierte Zwischenüberhitzung beim Übergang zwischen Hochdruck- und Niederdruckturbine liegt bei p=14 bar und T=195 °C. Der Entnahmedampf aus der Hochdruckturbine strömt durch einen Wärmetauscher, der mit Hilfe eines zweiten Kreislaufs mit Dampf aus der Kesseltrommel (TS=339 °C; ps=145 bar) auf T=320 °C überhitzt und der Niederdruckturbinenstufe zugeführt wird. Der Kondensationsdruck wurde durch eine vorhandene Seewasserkühlung auf bis zu p=0,03 bar abgesenkt.

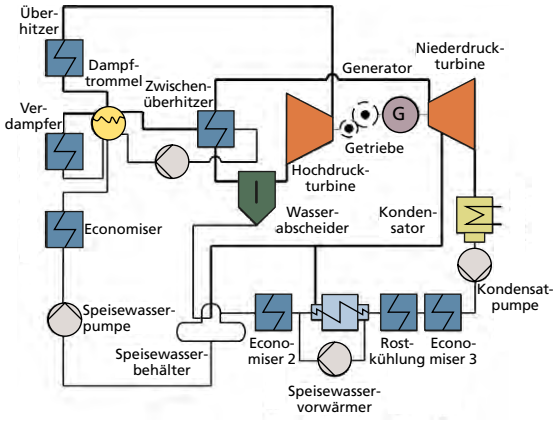



Bild 3:

Wasser-Dampf-Kreislauf der WtE HRC Amsterdam, 2007

Quelle:

Van Berlo, M.A.; Wandschneider, J.: Value from waste: Waste fired powerplant the new standard for recovery of sustainable energy, metals and building materials from urban waste. Amsterdam and The Netherlands: Afvalenergiebedrijf, the city of Amsterdam, 2006

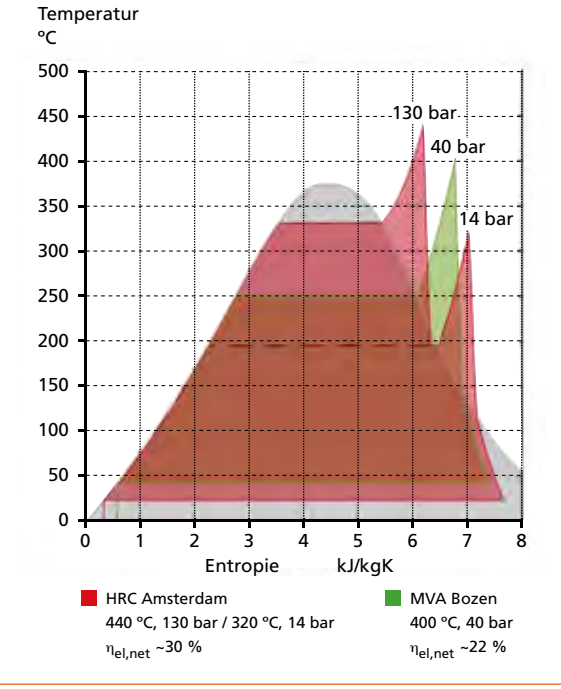



Bild 4:

T-S-Diagramm; Wasser-Dampf-Kreislauf der TVA Bozen und der HRC Amsterdam

Die mittlere Temperatur der Wärmeübertragung (WÜ) kann somit im gesamten Kreislauf um 52 °C gegenüber einer konventionellen WtE-Anlage angehoben werden. Die Verbrennungsführung mit einer Abgasrezirkulation ermöglicht das Absenken des Luftüberschusses auf 1,4.

# Schlagwortverzeichnis

## A

Abfälle
  gefährliche 521, 565
  POP-haltige 51
Abfallverbrennung
  Beitrag zum Ressourcenschutz 111
  neue problematische Einsatzstoffe 41
Abgasentschwefelung 391
Abgasgeschwindigkeiten 355
Abgaskondensation 98
  Systemvergleich 100
Abgaskühlung
  adaptive 357
  selektive 356, 358
Abgasreinigung 579
  wärmetechnische Optimierung 561
Abgastemperaturen
  Messverfahren 354
Abgaswärme
  Rückgewinnung 94
Abgaswäscher 392
  Ersatz 80
  für Schiffe 396
  mögliche Additive 392
Ablagerungen
  Bildung und Verhalten 236
Ablagerungscharakterisierungs-
    diagramm 263
Absorptionswärmepumpe 100, 105
Ammoniakschlupf 347, 353, 366
Ammoniakwasser 356
Ammoniumbisulfatbildung 387
Anlagenwirkungsgrad
  Steigerung 97
Auftragsschweißen 215
Ausbrandbedingungen 215
Auskleidung
  feuerfeste 576

## B

Belagsfestigkeit 260
Belagsschichtdickenmessung 249
Belagssensorsystem 249
Belagssituation
  lokale Online-Diagnose 249
Bilanzmodell
  prozessbasiertes 66
Bildverarbeitung 543
Biogas 25
Biomasse-Anlagen 172
Brandschutz 458
Brenner 560
Brennerlanze 453
Brennstoffaufbereitung 237
Brennstoffausnutzung
  Erhöhung 97
Bypass 458

## C

Carbon Capture and Storage (CCS) 133, 148
Carbon Capture and Utilization (CCU) 148
Carbonfasern 44
CFK-Materialien 43
Chlorausschleusung
  via Bypassanlage 457
Chlorkorrosion 534
Cladding 2.0 301
CMT-Schweißtechnik 311
$CO_2$
  Abscheidung 133, 147
  Abscheideverfahren
    Energie- und Massenbilanzen 153
  Speicherung 138
  Transport 137
Cold Metal Transfer 304

## D

Dämmstoffe
  HBCD-haltige 52
Dampferzeuger 578
Daten- und Informationsmanagement 183
DeNOx-Katalysatoren
  Desaktivierung 381
    Mechanismen 385
    nicht reversible 387
  Regeneration 381, 388
Deponierückbau 431
  erzeugte Ersatzbrennstoffe 53
Digitalisierung
  der dezentralen Strom- und
      Wärmeerzeugung 169
  der Wartungsverfahren 230
  Chancen für Betreiber 177
  Risiken für Betreiber 178
Dioxin-Neubildung 534
Dokumentationshandbuch 191
Draht-Spritzen-Technologie 336
Drehrohröfen 541, 575
  kamerabasierte Analyse 551
Dual Injection 371
Düsen 409

## E

Elektrofilter 560
Emissionsdaten-Fernüberwachung 460
Energieeffizienz 3
  Steigerung 79, 536
Energieversorgung
  eines Industriestandortes 555
  vollständig erneuerbare 36
Energiewende 169
engineered nanomaterials 45
Entstickung 365
  katalytische 381
  nicht katalytische 347, 365, 377
Entstickungsleistung
  Optimierung 347
erneuerbare Energien
  bei der Stromerzeugung 171
  Speicherung 36
Erosion 225, 303
Ersatzbrennstoffe
  aus dem Deponierückbau 53
  aus Siedlungsabfällen 449
  Mitverbrennung 453

## F

Farbeindringverfahren 319
Fernkältenetze 117
Fernwärme-Erzeugungsmix 99
Fernwärmenetz 85, 117
  in Wuppertal 118
  Temperaturabsenkung 93
Fernwärmeproduktion 98
Fernwärmeverbundsystem
  Einbindung eines Müllheizkraftwerkes 111
Fernwärmeversorgung
  von Basel 77
Feuerfest 215, 577
Flammspritzen 313
Frequenzumrichter 91
Füllkörperwäscher 100

## G

Gesamtkohlenstoff 489
Gewerbeabfälle
  Aufbereitung zu Ersatzbrennstoffen 452
GFK-Bauteile 43

## H

Harnstofflösung 356
Hausmüll
  Aufbereitung zu Ersatzbrennstoffen 450
Hexabromcyclododecan (HBCD) 51
High-Efficiency-Konzept 8
High $SO_x$ Schaltung 382
High Velocity Arc Spray 335
High Velocity Oxy-Fuel 335
Hochtemperatur-Chlorkorrosion 225
Hochtemperatur-Korrosion 237
Horizontalkessel 578
HVAS-Drahtförderungssysteme 341
HVOF-Prozess 335

## I

Industrie 4.0 227
Industriekraftwerk
  Modernisierung 556
Informationsmanagement 183
Infrarot-Kamera 542
Infrarot-Spektroskopie 457
Instandhaltung 4.0 228
Internet der Dinge 227
Inventarisierung
  einer Anlage 196
IT
  Netzwerk 202
  Sicherheit 199
  Sicherheitsaudit 208
  Sicherheitspolicy
    Anwendung 207
    Erstellung 206

## K

Kältenetze 117
Katalysatoren
  Desaktivierung 381
  Regeneration 388
Katalysatorgifte 387
Klärschlamm 499
Klärschlammpyrolyse 501
  techno-ökonomische Bewertung 508
Klärschlammverbrennungsanlage 477
  Emissionen 481

Klimaabkommen von Paris 26
Klimakorrekturfaktor 529
Klimaneutralität 25
Klinkerproduktion
  Reduktion von Hg-Emissionen 463
Kohlenstoffmonoxid 492
Kompostierung 31
Kompressions-Wärmepumpe 105
Kondensationswärme 98
Kopftemperatur 478
Korrosion 219, 235, 303
Korrosionsangriff 333
Korrosionsdiagnose
  in-situ 254
Korrosionsgeschwindigkeit 338
Korrosionsmechanismen
  in Salz/Asche-Ablagerungen 334
Korrosionspotential 237
Korrosionsschutz 232
  intelligent ausgeführter 61
Korrosionsstromdichte 337
Kunststoffe
  carbonfaserverstärkte 42
  faserverstärkte 42
  glasfaserverstärkte 43
KWK-Anlagen 172

## L

Landfill Mining
  heizwertreiche Rückstände 431
Lichtbogen-Drahtspritzen 335
Low Velocity Arc Spray 335

## M

Maintenance 4.0 227
Massenabfalldeponien
  theoretisches Rohstoffpotential 438
Merit Order 131
Messwertdrift
  Onlineüberprüfung 375
Messwert-Plausibilitätsprüfung 68
Methanol-Herstellung
  herkömmliche 162
  Energie- und Massenbilanz 160
MIG/MAG-Schweißverfahren 303
Minamata-Abkommen 463
Mindestverbrennungstemperatursenkung
  Auswirkungen auf die Emissionswerte 477
Minutenreserve 125
  Präqualifikation
    beim Übertragungsnetzbetreiber 126
  Vermarktung 132
Mitverbrennung
  Schadstoffgrenzwerte
    für den Einsatz von Abfällen 440
  von Ersatzbrennstoffen 449
Modernisierung
  eines Industriekraftwerkes 557
Monitoring 232, 235, 374
Monitoring und Steuerung
  von SNCR-Technologien 347
MVA
  Basel 77
  Ferrybridge 34
  Klemetsrud 133
  Luzern 34
  Wuppertal 113
  Zorbau 123

## N

Nachbrennkammer 576
Nahinfrarotmessung 457
Nahkältenetze 117
Nanomaterialien 45
Nassaustragssysteme 13
Nassschlacke
  Wertstoffausbringung 17
Netto-Energienutzungsgrad
  Optimierung 77
Netzsicherheitsmanagement 124
$NH_3$-Schlupf 347, 353, 366
Nickelbasislegierungen 215
NiCrMo-Legierungssysteme
  modifizierte 331
Niederdruck-Dampfturbine 87
Niedertemperatur-Katalysator
  periodische thermische Regeneration 389

## O

Office-Netzwerke 202
Online-Bilanzierung 255
Online-Heizwert 375
Online-Reinigung
  Optimierung 235
Opti-Link 374
Organisationsverschulden
  Vermeidung 198
Oxyfuel-Verfahren 149

## P

P2G-Prozess 38
Partikelgitternetzsonde 238
Photovoltaik 172
Plausibilitätsprüfung
von Messwerten 68
POP-Verordnung 51
Post-Combustion-Verfahren 149
Power-to-Gas 38
Power-to-Methanol 159
Pre-Combustion-Verfahren 149
Produktions-Netzwerke 202
Prozessanalyse
anlagenspezifische modellbasierte 67
Prozesssicherheit 183
Pumpspeicherkraftwerke 37
PVC 457
Pyrolyse 500
Pyrolysekoks 512
Pyrolyseprodukte 504

## Q

Quecksilber 496
Quecksilber-Abdampfung 469
Quecksilber-Kreislauf 463
einer Zementklinkerproduktionsanlage 467

## R

R1-Formel 529
Redispatch 125
Reduktionsmittel 356
Regelenergie 126
Revisionsbegleitung 215
Revisionszeit 216
Ringspaltdüse 413
Rohrkondensator 100
Rohrschutzplattensystem
nitridisch gebundenes 272
Rostschlacken
Wertstoffinhalte 13
Rücklaufdüsen 414
Rückstandsverbrennungsanlage
industrielle 555
Russische Föderation 565

## S

Salzschmelzenkorrosion 225
Schadstoffeinbindung
in der Sonderabfallverbrennung 532
Schadstoffsenke 521
Schlackenangriff 225
Schlackenaufbereitung 10
Schneckenreaktor 505
Schwefeldioxid 487
Schwefelsäurebildung 385
Schweißplattierung 301, 332
Schweißposition 306
SCR-Konzepte 382
Seewasserwäsche 393
Sensorik 61
Sicherheitskonzept
für IT-Systeme 206
SiC-Plattensystem 215
nitridisch gebundenes 271
SNCR-Verfahren 365
Entwicklungsschritte 347
Flexibilitätsgrad 377
mit Dual Injection und Opti-Link 365
Solarenergie 35
Sonderabfallverbrennung 521
im Drehrohr 541
Verwertung 533
Speicherseekraftwerke 37
Speicherung von erneuerbarer Energie
als Biomethan 37
mit Stauseen 36
Spritzschichten
thermische 333
Sprühabsorber 407
Sprühtrockner 407
Standzeitprognosen 221
Staub 494
Stickoxide 482
Stromeigenbedarf
Reduktion 88
Strommarkt 124
Stromnetz 123
Stromspeicheranlagen 172
Stromvermarktung 123
Stromwirkungsgrad
Erhöhung 79
Stromwirtschaft
vollständig erneuerbare 37
STYX Pyrolysereaktor 501

## T

Tail-end-Schaltung
im Niedertemperaturbereich 383
mit Wiederaufheizung 383
Taupunktkorrosion 225
Temperaturmessverfahren 219
berührungsfreie 354
Temperaturschieflagen 352
Thermographie 454
Treibhausgasemissionen 26
Trockenentschlackung 15
Trockenschlacke
Aufbereitung 20
Wertstoffausbringung 17
Trockenvergärung 32
Turbine 578
Twin-$NO_x$-Verfahren 356
Twin Wire Arc Spray 335

## V

Verbrennungslinie
Lebenslaufakte 219
Verbrennungsmindesttemperatur 477
Verdampfungskühler 407
Vergärung
trockene 27
Verlustwärme
verbesserte Nutzung 97
Verpuffung 547
Verschlackungsverhalten 238
Verschleiß 225
Verschmutzungspotential 237
Verschmutzungsverhalten 238
Vertikalzugkessel 578
Verwertungsstatus 528

## W

Wanddickenabnahme eines Bauteils
zeitliche 220
Wanddickenarchiv
interaktives 220
Wandüberhitzer 9
Wärmeauskopplung 84
Wärmepumpe 100
Wärmespeicher 85
Wärmestromdichte 232, 323
Wärmestromsensor 249
Wärmeverschubsystem 562
Wartungskonzepte
integrierte 227
Waschversuche
mit heizwertreicher Fraktion
aus dem Landfill Mining 444
Wasser-Dampf-Kreislauf 5
Wasserkraft-Anlagen 172
Werkstoffe
feuerfeste 215, 577
Wertstoffausbringung
aus Nass- und Trockenschlacke 17
Wertstoffrückgewinnung
integrierte 3
Windenergie 35, 172
Windsichter 15
Wirbelschichtofen
Ausmauerung 293
Wirkungsgrad
Erhöhung 79
Schweizer KVA 78
Wirtschaft
klimaneutrale 25

## X

XMercury-Pilotanlage 470

## Z

Zementherstellung 449
Zementherstellungsprozess
Einsatz von Ersatzbrennstoffen 531
Reduktion von Quecksilberemissionen 463
Stoffkreisläufe 464
Zementwerk Wittekind 449
Zünddecke 294
Zweistoffdüse 412