

Betriebserfahrungen mit der Abluftbehandlung nach 30. BImSchV

Rainer Wallmann und Jürgen Hake

IGW Fricke & Turk GmbH, Witzenhausen

Operational Experiences with the Treatment of Exhaust Air according to the Federal Immission Control Regulation (30th BImSchV)

Abstract englisch

The first operational experiences with exhaust air treatment plants according to the 30th Federal Immission Control Regulation (30th BImSchV) show that the required exhaust air limit values can be met with sufficiently dimensioned individual components (acid washer and RTO, if necessary biofilter for partial flows of low pollution). With regard to the operational safety and to the availability of the plants closely related to it, already in the first months of the "30th BImSchV age" in part considerable problems with corrosion as well as blockages of the heat exchangers by silicon oxide in the RTO were observed. A sufficient dimensioning of the exhaust air treatment capacity as well as a redundant layout of the RTO gain considerable importance with regard to the plant availability required by the 30th BImSchV. Apart from the described technical optimization measures there are economic optimization potentials. These should be checked for the individual case when a long-term stable operation of the exhaust air treatment plants is reached, and then realized optionally.

Abstract deutsch

Die ersten Betriebserfahrungen mit Abluftbehandlungsanlagen nach der 30. BImSchV zeigen, dass die geforderten Abluftgrenzwerte durch ausreichend dimensionierte Einzelkomponenten (saure Wäsche und RTO, ggf. Biofilter für gering belastete Teilströme) eingehalten werden können. Im Hinblick auf die Betriebssicherheit und die damit verknüpfte Verfügbarkeit der Anlagen wurden bereits in den ersten Monaten des „Zeitalters der 30. BImSchV“ z.T. erhebliche Probleme mit Korrosion sowie Ablagerungen an den Wärmetauschern durch Siliziumdioxid in der RTO beobachtet. Eine ausreichende Dimensionierung der Abluftbehandlungskapazität sowie die redundante Ausführung der RTO gewinnen daher eine besondere Bedeutung in Bezug auf das Einhalten der durch die 30. BImSchV geforderten Anlagenverfügbarkeit. Über die beschriebenen technischen Optimierungen hinaus bestehen auch betriebswirtschaftliche Optimierungspotenziale, die nach Erreichen eines stabilen Dauerbetriebes der Abluftbehandlungsanlagen einzelfallspezifisch geprüft und umgesetzt werden sollten.

Keywords

Mechanisch-biologische Restabfallbehandlung (MBA), Abluftbehandlung, 30. BImSchV, thermisch-regenerative Oxidation (RTO), saure Wäsche, Anlagenverfügbarkeit.

1 Einleitung/Problemstellung

Nach langjährigen Diskussionen um die Technische Anleitung (TA) Siedlungsabfall vom 1. Juni 1993 sowie die Frage nach der politischen und fachlichen Akzeptanz der mechanisch-biologischen Restabfallbehandlung (MBA) als Alternative zur thermischen Ab-

fallbehandlung wurden die Abfallablagerungsverordnung (AbfAbIV) und die 30. Verordnung zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (30. BImSchV) zum 1. März 2001 rechtskräftig. Damit wurde der so genannte „Stand der Technik“ für die MBA definiert.

Gemäß AbfAbIV dürfen demnach ab dem 1. Juni 2005 nur noch vorbehandelte Restabfälle auf Deponien abgelagert werden, die die Zuordnungskriterien des Anhang 1 der AbfAbIV einhalten (u.a. thermisch vorbehandelte Abfälle). Für mechanisch-biologisch vorbehandelte Abfälle sind die in Anhang 2 der AbfAbIV formulierten Anforderungen als Ablagerungsvoraussetzung einzuhalten. In diesem Zusammenhang sind neben verschiedenen physikalischen Parametern und zahlreichen Schadstoffgrenzwerten im Eluat insbesondere die Parameter zur Bewertung der biologischen Stabilität (Atmungsaktivität AT_4 , Gasbildung GB_{21} und TOC im Eluat) sowie der TOC im Feststoff als Kriterium für die Effektivität der Abscheidung heizwertreicher Abfallkomponenten von Bedeutung.

Bisher sind in Deutschland ca. 50 MBA-Anlagen in Betrieb gegangen, während einzelne MBA noch in der Bauphase sind (ASA, 2005).

Im Folgenden Beitrag wird dem Leser ein Überblick über die wesentlichen Inhalte der 30. BImSchV, der von der Ingenieurgemeinschaft Witzenhausen Fricke & Turk GmbH durchgeführten Voruntersuchungen zur Ermittlung der Leistungsfähigkeit der RTO mit vorgeschaltetem Wäscher sowie großtechnischen Betriebserfahrungen aus zahlreichen Abluftbehandlungsanlagen der MBA in Deutschland dargestellt.

2 30. Verordnung zum Bundes-Immissionsschutz-Gesetz (30. BImSchV)

Die 30. BImSchV vom 1. März 2001 regelt Errichtung, Beschaffenheit und Betrieb von Anlagen, in denen Abfälle mit biologischen oder einer Kombination von biologischen mit physikalischen Verfahren behandelt werden. Betroffen sind neben Anlagen zur Erzeugung biologisch stabilisierter Abfälle vor der Deponierung oder thermischen Behandlung auch Anlagen zur Gewinnung heizwertreicher Ersatzbrennstoffe sowie Biogas zur energetischen Verwertung. Die Verordnung gilt nicht für Anlagen, die verwertbaren Kompost oder Biogas ausschließlich aus Bioabfällen oder Erzeugnissen aus der Land-, Forst- oder Fischwirtschaft sowie aus Klärschlämmen erzeugen.

Ausschließlich mit physikalischen Verfahren arbeitende Sekundärbrennstoff-Aufbereitungsanlagen sind von der 30. BImSchV nicht betroffen, unterliegen jedoch gemäß Novellierung der TA Luft vom 24. Juli 2002 ähnlich strengen Vorgaben (Nr. 5.4.8.10.1 und Nr. 5.4.8.11.1).

In den Paragraphen 4 und 5 wird eine vollständige Kapselung der Anlagen mit Abluffassung und -behandlung gefordert. Paragraph 16 ermöglicht jedoch der zuständigen

Behörde, bei einer mehrstufigen biologischen Behandlung eine offene Nachrotte ohne Abluffassung und -behandlung zuzulassen, wenn

- a) der zur Nachrotte vorgesehene Abfall den AT_4 -Wert von 20 mg O_2 /g TS unterschreitet und
- b) „...durch sonstige betriebliche Maßnahmen sichergestellt wird, dass der Vorsorge gegen schädliche Umwelteinwirkungen auf andere Weise Genüge getan ist.“.

Dieser Wert für den Kapselungsgrad kann nach derzeitigem Kenntnisstand aus vorangegangenen Versuchen und dem praktischen Betrieb großtechnischer Anlagen nach 3 bis 4 Wochen Intensivrotte erreicht werden (Wallmann et al., 2005). Die folgende Nachrotte offen und ohne Abluftbehandlung zu gestalten - wie auch von den Wissenschaftlern des BMBF-Verbundvorhabens „Biologische Behandlung von zu deponierenden Abfällen“ (BMBF, 2000) gefordert wurde - ist aus Sicht des Autors als Ausnahmeregelung gemäß § 16 der 30. BImSchV grundsätzlich gerechtfertigt.

Die in § 6 genannten Emissionsgrenzwerte sind in Tabelle 1 aufgeführt.

Tabelle 1 Emissionsgrenzwerte für MBA in Deutschland (30. BImSchV)

Parameter	Einheit	30. BImSchV (20.02.2001)
Gesamtkohlenstoff (TOC)	mg/Nm ³ ¹⁾	20/40
Gesamtkohlenstoff (TOC)	g/Mg	55
Lachgas (N ₂ O)	g/Mg	100
Staub	mg/Nm ³ ¹⁾	30/10
Dioxine/Furane	mg/Nm ³ (TEQ)	0,1
Geruch	GE/Nm ³	500

¹⁾ Tagesmittelwert/Halbstundenmittelwert

Über die genannten Abluftgrenzwerte hinaus fordert die 30. BImSchV in § 13, dass Ausfälle der Abluftbehandlungsanlage 8 aufeinanderfolgende Stunden und innerhalb eines Kalenderjahres 96 Stunden nicht überschreiten dürfen. Dies entspricht einer Mindestverfügbarkeit der Abluftbehandlungsanlage von ca. 99 Prozent.

3 Voruntersuchungen zur Abluftbehandlung nach 30. BImSchV

Vom Bundesumweltministerium und dem Umweltbundesamt wurden die in Tabelle 1 aufgeführten Abluftgrenzwerte für MBA durch die Existenz des Verfahrens der thermisch-regenerativen Oxidation (RTO) begründet. Nach Aussage von BMU und UBA

stellte diese Technologie bereits im Jahr 2000 den Stand der Technik in der Abluftbehandlung dar (Fachgespräch zur MBA-Abluftreinigung am 17.04.2000 im Umweltbundesamt Berlin) und ermöglichte das Einhalten der Abluftgrenzwerte der 30. BImSchV.

In diesem Zusammenhang wurden von der Ingenieurgesellschaft Witzenhausen Fricke & Turk GmbH im Jahr 2001 umfangreiche Untersuchungen zur Leistungsfähigkeit der RTO durchgeführt. In der Versuchsanordnung wurde die Abluft aus der Nachrotte von Vergärungsrückständen in zwei unterschiedlichen RTO-Versuchsanlagen - einer 3-Kammer-RTO und einer 2-Kammer-RTO - sowie einer Biofilter-Versuchsanlage behandelt. Dabei konnten folgende Ergebnisse ermittelt werden (WALLMANN ET AL., 2001):

- ⇒ Eine TOC-Reduktion $< 5 \text{ mg/Nm}^3$ ist durch Einsatz der thermisch-regenerativen Oxidation (RTO) möglich.
- ⇒ Durch den im 2-Kammer-Verfahren auftretenden Rohgasschlupf beim Umschalten der Durchströmungsrichtung der RTO können Grenzwertüberschreitungen auftreten. Zum sicheren Einhalten der Grenzwerte der 30. BImSchV sind daher Anlagen nach dem sogenannten 3-Kammer-Verfahren (oder vergleichbare Verfahren) erforderlich, bei denen die Spülluft ebenfalls behandelt wird.
- ⇒ Insbesondere der TOC-Frachtgrenzwert kann durch die Biofiltertechnologie nicht eingehalten werden.
- ⇒ Primär während der Rotte gebildetes N_2O kann nicht in nennenswertem Umfang durch die RTO reduziert werden.
- ⇒ Die weitestgehende Abscheidung von Ammoniak durch eine saure Wäsche vor der RTO ist erforderlich, um der Sekundärbildung von N_2O sowie NO_x in der RTO vorzubeugen. Ohne vorgelagerte Ammoniakabscheidung sind Überschreitungen des Lachgas-Frachtgrenzwertes sowie des Geruchs-Grenzwertes (durch Ammoniak und bei der Verbrennung entstehendes, ebenfalls sehr geruchsintensives NO_2) zu erwarten.
- ⇒ Der in der 30. BImSchV geforderte Grenzwert für Dioxine/Furane (PCDD/F) wird bereits im Rohgas eingehalten. Durch die RTO kommt es dabei zu keiner signifikanten Veränderung der PCDD/F-Konzentration.
- ⇒ Zusammenfassend konnte festgestellt werden, dass die Grenzwerte der 30. BImSchV durch die Kombination aus sauer betriebener Wäsche mit weitestgehender Ammoniakabscheidung und 3-Kammer-RTO eingehalten werden können.
- ⇒ Im Rahmen der Versuche konnten keine Aussagen zur mittel- bis langfristigen Betriebssicherheit und der damit zusammenhängenden, in der 30. BImSchV geforderten Verfügbarkeit der Abluftbehandlungsanlagen entwickelt werden.

Diese Ergebnisse wurden durch das BMBF-Verbundvorhaben „Erprobung einer nichtkatalytischen Oxidation zur Behandlung von Abluft aus der mechanisch-biologischen Abfallbehandlung“ (BMBF, 2002) grundsätzlich bestätigt.

4 Abluftbehandlung nach 30. BImSchV

Unter anderem auf Basis der in Kapitel 3 vorgestellten Versuchsergebnisse wurden die Abluftbehandlungsanlagen der in Deutschland errichteten MBA-Anlagen i.d.R. als Kombination aus sauer betriebener Wäsche mit nachfolgender thermisch-regenerativer Oxidation ausgeführt bzw. bei bereits bestehenden Anlagen nachgerüstet. In einzelnen Anlagen wurden zusätzlich Biofiltersysteme zur Behandlung geringer belasteter Abluftströme eingesetzt. Überwiegend wurden die RTO-Anlagen redundant, also aus mehreren Behandlungslinien bestehend, ausgeführt, um die Anlagenverfügbarkeit nach 30. BImSchV einhalten zu können.

Der Vollzug der 30. BImSchV erfolgt in den einzelnen Bundesländern z.T. sehr unterschiedlich. U.a. ist bei den in Betrieb befindlichen MBA-Anlagen zu unterscheiden zwischen Anlagen, die die Vorgaben der 30. BImSchV bereits ab dem 01.06.2005, dem Stichtag gemäß AbfAbIV im Hinblick auf die Abfallablagerung, einhalten müssen und Anlagen, deren Genehmigungsbescheid die Einhaltung der 30. BImSchV erst ab dem 01.03.2006 fordert.

Aus wirtschaftlichen Gründen ergibt sich für die Abluftbehandlung nach 30. BImSchV die Forderung nach Minimierung der zu behandelnden Abluftmengen und daher nach einem differenzierten Abluftmanagement. Dabei sind die verschiedenen Abluftströme der MBA entsprechend ihrer prozessbedingten Schadstoffgehalte stoffstromspezifisch zu behandeln.

Ziele des Abluftmanagements sind,

1. die Abluftmengen möglichst gering zu halten, z.B. durch Nutzung der Abluft aus den Bereichen Anlieferung und mechanischer Aufbereitung als Rottezuluft sowie Kreislaufführung der Abluft in der Intensiv- und Nachrotte und
2. die Schadstoffkonzentrationen der einzelnen Abluftströme effektiv zu reduzieren, um am Abluftkamin mit der Summe aller Abluftströme die Grenzwerte der 30. BImSchV einzuhalten.

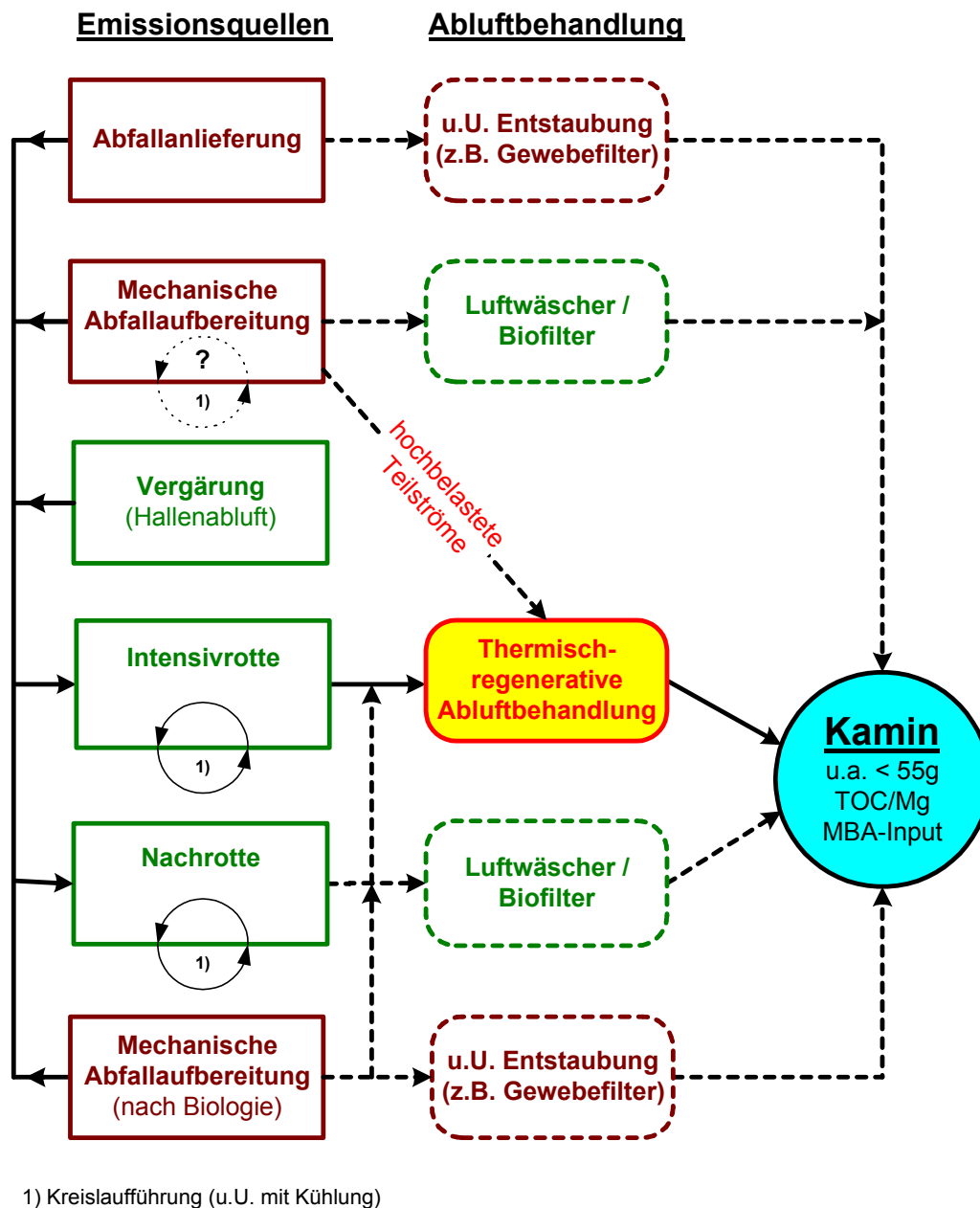


Abbildung 1 Abluftmanagement MBA - Schematische Darstellung

Wie in Abbildung 1 dargestellt, sind Abluftströme aus folgenden Anlagenbereichen der MBA zu betrachten:

- Abfallanlieferung,
- Mechanische Aufbereitung,
- ggf. Abfallvergärung,
- Intensivrotte und
- Nachrotte.

Die in den Bereichen Abfallanlieferung und Mechanische Aufbereitung entstehende Abluft (durch Absaugung der Hallen und einzelner Aufbereitungsaggregate) kann als Zuluft

für die Rotte eingesetzt werden. Eventuell können Teilströme, z.B. aus der Abfallanlieferung, auch direkt dem Abluftkamin zugeführt werden, wobei u.U. eine Entstaubung erforderlich sein könnte. Durch Kreislaufführung von Teilströmen der Abluft während der Rotte kann die Gesamtabluftmenge ebenfalls verringert werden. Dabei wird jedoch eine Kühlung der Umluft erforderlich, um den biologischen Abbauprozess im optimalen Temperaturbereich zwischen 50 und 65 °C betreiben zu können. Bis zu einem Restsauerstoffgehalt von 5 % sind nach BMBF (2002) keine Abbauhemmungen zu befürchten.

In Kombination mit der Behandlung höher belasteter Abluftströme aus der mechanischen Aufbereitung (Quellenabluft) und der Intensivrotte in thermisch-regenerativen Abluftreinigungsanlagen besteht die Möglichkeit, Teilströme mit geringeren Kohlenstoffgehalten - z.B. Hallenabluft - mittels kostengünstigerer Biofiltersysteme zu reinigen. Am Kamin werden die unterschiedlich behandelten Abluftströme zusammengeführt und müssen die Grenzwerte der 30. BImSchV unterschreiten, wobei die Grenzwerte für Konzentration und Fracht an Kohlenstoff als wesentliche Rahmenbedingungen anzusehen sind (Abbildung 1).

Neben der Bereitstellung von Biogas als regenerativen Energieträger stellt die Integration einer Vergärungsstufe einen wesentlichen Vorteil auch im Hinblick auf die Minimierung der spezifischen Abluftmengen dar, da ein wesentlicher Teil des biologischen Abbaus nahezu abluftfrei erfolgt.

5 Erste Betriebserfahrungen

Nachdem nunmehr zahlreiche MBA's den Betrieb aufgenommen haben, liegen die ersten Betriebserfahrungen aus großtechnischen Anlagen zur Abluftbehandlung nach 30. BImSchV vor, die in den folgenden Kapiteln zusammenfassend beschrieben werden.

5.1 Abluftgrenzwerte

Die ersten Betriebserfahrungen zeigen, dass die geforderten Abluftgrenzwerte, wie bereits auf Basis der durchgeführten Voruntersuchungen in Kapitel 3 festgestellt, durch ausreichend dimensionierte Einzelkomponenten (saure Wäsche und RTO, ggf. Biofilter für geringbelastete Teilströme) eingehalten werden können. Dies bezieht sich sowohl auf die gemäß 30. BImSchV kontinuierlich zu überwachenden Emissionsparameter Gesamtkohlenstoff (TOC; Konzentration und Fracht), Lachgas (N₂O) und Staub sowie auf die diskontinuierlich zu messenden Parameter Geruch und Dioxine/Furane.

Abweichungen von den für den Regelbetrieb der Abluftbehandlungsanlagen definierten Rahmenbedingungen wie z.B. der Brennkammertemperatur der RTO oder dem pH-Wert im Wäscherwasser können relativ spontan zu erhöhten Abluftkonzentrationen bis hin zu Grenzwertüberschreitungen führen.

5.2 Anlagenverfügbarkeit

Im Hinblick auf die Betriebssicherheit und die damit zusammenhängende Anlagenverfügbarkeit wurden in den ersten Betriebsmonaten verschiedene Problembereiche erkannt. Die Symptome werden im Folgenden kurz beschrieben.

a) Korrosion und Ablagerungen

An verschiedenen Roh- und Reingas führenden Abluftleitungen, Ventilen und Klappen sowie an Ventilatoren, die mit unbehandelter oder behandelter Abluft in Kontakt kommen, wurden Korrosion und z.T. Ablagerungen beobachtet. Als Ursache sind vermutlich die vielfältigen schwefel-, fluor- und chlorhaltigen Schadstoffverbindungen in Kombination mit der weitestgehend gesättigten Luftfeuchtigkeit der MBA-Abluft zu betrachten.

In verschiedenen Anlagen wurden bereits Einzelteile durch Ausführungen in höherwertigeren Materialklassen ersetzt bzw. Spezialbeschichtungen vorgenommen, wodurch die Korrosionsproblematik voraussichtlich zumindest entschärft wurde. Als weitere Möglichkeit zur Vorbeuge gegen Korrosion kann das Auftreten von Kondensaten in den sensiblen Anlagenbereichen durch gezielte Temperatursteuerung mit entsprechendem Einfluss auf die relative Luftfeuchte minimiert werden.

Zur abschließenden Bewertung der auftretenden Ablagerungen (z.B. in Ventilatorengehäusen) und insbesondere der Entwicklung von betrieblichen Maßnahmen sind weitere Betriebserfahrungen zu sammeln.

b) Siloxane

Die im Abfall enthaltenen organischen Siliziumverbindungen (Siloxane) gelangen z.T. über die Abluft in die Brennkammer der RTO und werden bei Temperaturen um 850 °C weitestgehend zu Siliziumdioxid (SiO_2) oxidiert. An der Oberfläche der RTO-Wärmetauscher lagert sich das SiO_2 flächig an und führt mit zunehmender Betriebsdauer zu Verstopfungen der Eingangskanäle in die Wärmetauscher, die i.d.R. als Wabenkörper ausgeführt sind. Dies hat ansteigende Druckverluste der RTO zur Folge und kann letztendlich zum Hochschleudern einzelner Elemente der obersten Wabenkörperschicht führen.

Derzeit werden verschiedene Möglichkeiten zur Reduktion der Siloxane in der Abluft bzw. zur Verhinderung der Anlagerung von SiO_2 an der Wärmetauscheroberfläche untersucht. Nach derzeitigem Kenntnisstand ist jedoch davon auszugehen, dass die beschriebene Problematik regelmäßige Reinigungen der Wärmetauscher in Intervallen zwischen 3 und 9 Monaten erfordern wird. Der gesamte Reinigungsvorgang inkl. Abkühlen und erneutem Anfahren der RTO auf Betriebstemperatur führt nach derzeitigen Erfahrungswerten zu Anlagenausfällen zwischen 2 und 3 Tagen. Bei redundant ausgeführten RTO-Anlagen erfolgt die Reinigung der einzelnen Linien nacheinander, wodurch zumindest die Behandlung eines reduzierten Abluftstromes weiterhin gewährleistet ist

und daher durch die Reinigung kein für die Verfügbarkeit der Abluftbehandlung gemäß §13 der 30. BImSchV relevanter Anlagenausfall auftritt.

c) Frostprobleme

Durch Temperaturen unter dem Gefrierpunkt traten im Winter 2005 an verschiedenen Anlagen Frostprobleme insbesondere im Bereich der Abluftklappen und -ventile auf, die z.T. zu kurzfristigen Anlagenstillständen führten. Durch zusätzliche Isolierungen und Begleitheizungen sowie in einzelnen Anlagen durch Erhöhung der Trocknungskapazitäten für die zur Klappensteuerung eingesetzten Druckluft konnten die beschriebenen Probleme behoben werden.

d) Brenngasversorgung

Der Stabilität der RTO-Gasversorgung kommt im Hinblick auf die Verfügbarkeit der Abluftbehandlungsanlage, sowie der damit zusammenhängenden Belüftung der aeroben biologischen Behandlungsstufen, ebenfalls eine sehr hohe Bedeutung zu. In diesem Zusammenhang kann das Risiko von Anlagenausfällen durch eine redundante Gasversorgung minimiert werden. Bei Einsatz von Deponie- oder Biogas wird daher empfohlen, eine alternative Brenngasversorgung für Störfälle durch Erd- oder Flüssiggas vorzusehen.

e) Brenngasqualität

Insbesondere beim Einsatz von Deponie- und Biogas als Brenngas in der RTO traten z.T. Schwierigkeiten durch schwankende Drücke, Feuchte und korrosive Verbindungen (z.B. Schwefelwasserstoff) auf. Durch technische Nachrüstungen bzw. Optimierungen konnten diese Probleme jedoch in den ersten Betriebsmonaten weitestgehend sinnvollen Lösungen zugeführt werden.

6 Zusammenfassung

Die ersten Betriebserfahrungen mit Abluftbehandlungsanlagen nach 30. BImSchV zeigen, dass die geforderten Abluftgrenzwerte durch ausreichend dimensionierte Einzelkomponenten (saure Wäsche und RTO, ggf. Biofilter für geringbelastete Teilströme) eingehalten werden können. Im Hinblick auf die Betriebssicherheit und die damit verknüpfte Verfügbarkeit der Anlagen wurden bereits in den ersten Monaten des „Zeitalters der 30. BImSchV“ erhebliche Probleme im Hinblick auf Korrosion und Ablagerungen an den Wärmetauschern durch Siliziumdioxid in der RTO beobachtet. Eine ausreichende Dimensionierung der Abluftbehandlungskapazität sowie die redundante Ausführung der RTO gewinnen daher eine besondere Bedeutung im Hinblick auf das Einhalten der durch die 30. BImSchV geforderten Anlagenverfügbarkeit.

Über die beschriebenen technischen Optimierungen hinaus bestehen auch betriebswirtschaftliche Optimierungspotenziale, die nach Erreichen eines stabilen Dauerbetrie-

bes der Abluftbehandlungsanlagen einzelfallspezifisch geprüft und umgesetzt werden sollten.

7 Literatur

- | | | |
|---|------|--|
| ASA | 2005 | MBA Steckbriefe 2005/2006 der Arbeitsgemeinschaft Stoffspezifische Abfallbehandlung (ASA) e.V., Februar 2005 |
| BMBF | 2000 | BMBF-Verbundvorhaben „Biologische Behandlung von zu deponierenden Abfällen“, Förderkennzeichen 1470960 |
| BMBF | 2002 | BMBF-Verbundvorhaben „Erprobung einer nichtkatalytischen Oxidation zur Behandlung von Abluft aus der mechanisch-biologischen Abfallbehandlung“, Förderkennzeichen 0330240 und 03361257 |
| Wallmann, C. Cuhls, J. Frenzel, J. Hake und K. Fricke | 2001 | Nachrotte von Vergärungsrückständen aus dem Valorga-Verfahren, Müll und Abfall 11, Seite 624 - 628 |

Anschrift des Verfassers

Dr.-Ing. Rainer Wallmann und Jürgen Hake
Ingenieurgesellschaft Witzenhausen Fricke & Turk GmbH (IGW)
Bischhäuser Aue 12
D-37213 Witzenhausen
Telefon +49 5542 9308-16
Email: r.wallmann@igw-witzenhausen.de
Website: www.igw-witzenhausen.de