

Prozessoptimierung von Intensivrotteverfahren

Birte Mähl

gewitra mbH, Hannover

Optimisation of Intensive Rotting Processes

Abstract

The optimisation of intensive rotting processes is carried out by specific active aeration and watering, interacting with each other, as well as by waste turning and moving respectively. The present lecture will introduce basic approaches of calculation for the control of intensive rotting processes which were acquired by the consulting engineers of gewitra mbH. These computing procedures are applied for different dimensioned intensive rotting processes, tunnel and container systems in particular. Likewise, they will be continuously developed based upon further operational experiences.

Zusammenfassung

Die Prozessoptimierung von Intensivrotteverfahren erfolgt durch gezielte aktive Belüftung und Bewässerung, die miteinander in Wechselwirkung stehen, sowie durch Umsetzung bzw. Bewegung des Abfallmaterials. In dem vorliegenden Beitrag werden grundlegende Berechnungsansätze für die Steuerung von Intensivrotteverfahren vorgestellt, die von dem Ingenieurbüro gewitra mbH erarbeitet wurden und für unterschiedlich dimensionierte Intensivrottesysteme, insbesondere Container- und Tunnel-Systeme, angewendet und auf der Basis von Betriebserfahrungen kontinuierlich weiterentwickelt werden.

Keywords

Intensive rotting process; aeration; watering; waste turning and moving respectively; kinetics, stoichiometry and thermodynamics of aerobic degradation; heat removal and water removal with exhaust air.

Intensivrotte; Belüftung; Bewässerung; Umsetzung bzw. Bewegung des Abfall; Kinetik, Stöchiometrie und Thermodynamik des aeroben Abbaus; Wärmeaustrag und Wasseraustrag über die Abluft.

1 Einleitung

Die mechanisch-biologische Abfallbehandlung (MBA) gliedert sich in die mechanische Aufbereitungsstufe und die anschließende biologische Behandlungsstufe in Form aerober Verfahren (Intensivrotte, Nachrotte) oder anaerober Verfahren (Vergärung). Der Schwerpunkt des vorliegenden Beitrages bildet das Intensivrotteverfahren von MBA-Anlagen, das insbesondere durch eine aktive Belüftung gekennzeichnet ist. Die Belüftung hat die Funktion, einerseits Sauerstoff in das System einzutragen und andererseits überschüssige Wärme aus dem System auszutragen. Mit der Wärme wird über die Abluft auch Wasser aus dem System ausgetragen, so dass eine nicht beabsichtigte biolo-

gische Trocknung des Abfallmaterials bewirkt wird und eine in Abhängigkeit der Belüftung stehende Bewässerung erforderlich ist.

Die für die Prozessoptimierung von Intensivrotteverfahren erforderliche Belüftungs- und Bewässerungsintensität ist an die jeweiligen Randbedingungen, dazu zählen biologisch abbaubarer organischer Anteil und Struktur des Abfallmaterials, Prozess- bzw. Behandlungszeit sowie Feuchte und Temperatur der Luftströme, anzupassen.

Die Ermittlung der optimierten Prozesssteuerung von Intensivrotteverfahren basiert auf folgenden Berechnungsansätzen:

- Kinetik biologischer Abbau- und Umbauprozesse
- Stöchiometrie und Thermodynamik aerober Abbau- und Umbauprozesse
- Thermodynamik der Luftströme

2 Prozessrandbedingungen

2.1 Intensivrottesysteme

Aufgrund der Dimension im Hinblick auf die behandelbare Abfall-Feuchtmasse (FM) lassen sich zwei wesentliche Intensivrottesysteme unterscheiden: In der Container-Intensivrotte sind je Container durchschnittlich 18 Mg FM behandelbar, in der Tunnel-Intensivrotte hingegen durchschnittlich 240 Mg FM (siehe Tabelle 1).

Tabelle 1 Dimensionen von Intensivrottesystemen

	Container-System	Tunnel-System
System-Volumen	ca. 35 m ³	ca. 430 m ³
Abfall-Feuchtmasse	ca. 18 Mg FM	ca. 240 Mg FM
Abfall-Füllhöhe	ca. 1,8 m	ca. 3,7 m

Das thermodynamische System von Intensivrottesystemen mit den Luftströmen, die in der Regel über die Frischluft- und Umluft-Klappe steuerbar sind, und den Online-Messparametern zeigt Abbildung 1. Die Steuerparameter bilden die Abfall- oder Ablufttemperatur und der Sauerstoffgehalt in der Abluft.

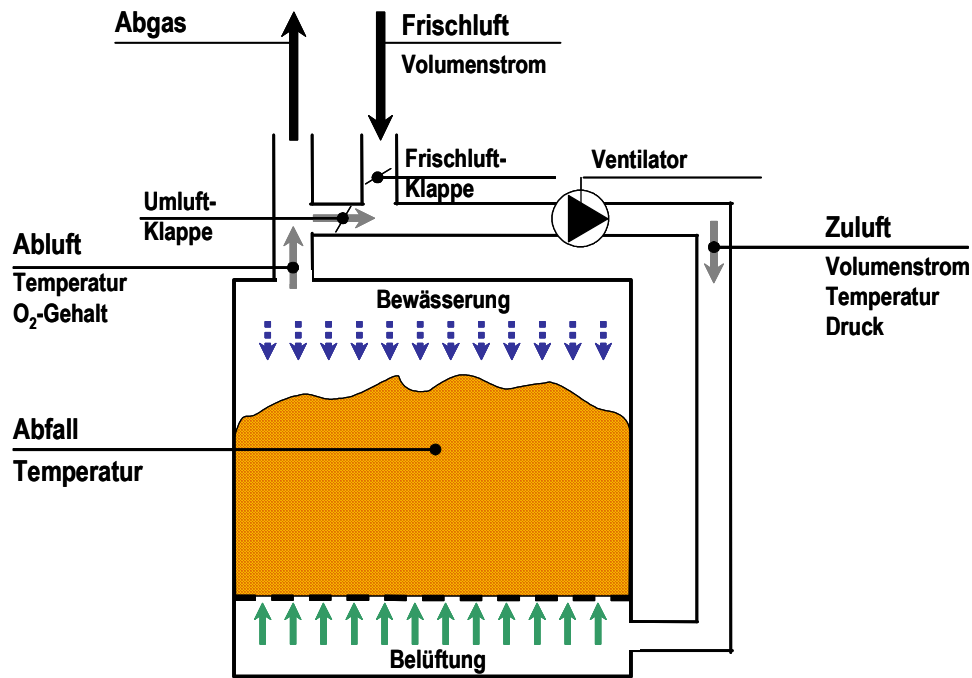


Abbildung 1 Thermodynamisches System von Intensivrotteverfahren

2.2 Prozesssteuerung

2.2.1 Optimale Prozessbedingungen

Die wesentlichen Einflussfaktoren auf aerobe Abbau- und Umbauprozesse sind der Sauerstoffgehalt, die Temperatur und der Wassergehalt im System, d. h. im Abfallmaterial. Unterschiedliche praxisbezogene Untersuchungen haben gezeigt, dass folgende Prozessbedingungen als optimal gelten:

- **Sauerstoffgehalt**

Sauerstoff geht als Reaktant in den Stoffwechsel der aeroben Atmung ein. Nach SOYEZ et al., 2000 ist von einer Mindestsauerstoffkonzentration von etwa 16 bis 18 Vol.-% auszugehen, um die Antriebskraft des biologischen Prozesses aufrecht zu erhalten und unlimitierte Reaktionen zu ermöglichen. Eine deutliche Verlangsamung der mikrobiellen Aktivität tritt nach KRANERT, 2000 bei einem Sauerstoffgehalt in der Abluft unter 10 Vol.-% ein.

- **Temperatur**

Die bei den exotherm ablaufenden aeroben Abbaureaktionen freigesetzte Energie in Form von Wärme bewirkt, dass Prozesstemperaturen von 80 °C und mehr erreicht werden. Die optimale Prozesstemperatur, d. h. die Abfalltemperatur, liegt nach SOYEZ et al., 2000 hingegen im Bereich von 50 bis 60 °C.

- **Wassergehalt**

Die Mikroorganismen können Nährstoffe nur in gelöster Form aufnehmen, so dass dem System eine ausreichende Wassermenge zur Verfügung zu stellen ist und für die biologischen Abbau- und Umbauprozesse optimale Reaktionsbedingungen einzustellen sind. Nach SOYEZ et al., 2000 sind in der Restabfallbehandlung als Orientierungsgröße 45 bis 55 % Wasser bezogen auf die Feuchtmasse (FM), d. h. Werte im Bereich der Wassersättigung, anzustreben.

2.2.2 Maßnahmen der Prozessoptimierung

Die Einstellung optimaler Prozessbedingungen erfolgt durch Steuerung der Belüftung und Bewässerung sowie durch Umsetzung und damit Bewegung des Abfallmaterials.

- **Belüftung**

Die Belüftung übernimmt insbesondere die Funktion, einerseits Sauerstoff in das System einzutragen und andererseits Wärme aus dem System auszutragen. Da die Ablufttemperatur höher als die Zulufttemperatur ist, nimmt die Abluft Feuchtigkeit auf und verringert damit die Temperatur und auch den Wassergehalt des Abfallmaterials. In Abhängigkeit der abgebauten organischen Substanz ist für die Abdeckung des stöchiometrischen Sauerstoffbedarfs ein Zuluftvolumen zwischen 2 und 15 m³ je kg abgebaute organische Trockenmasse (oTM) erforderlich. Die Einstellung einer Temperatur im System von 55 °C erfordert hingegen Zuluftvolumen zwischen 22 und 150 m³/kg oTM. Der mit diesem Wärmeaustausch verbundene Wasseraustrag über die Abluft beträgt durchschnittlich 6 kg/kg oTM [MÄHL, 2005].

- **Bewässerung**

Die Bewässerung übernimmt zum einen die Funktion, einen optimalen Wassergehalt für den Prozessbeginn einzustellen, zum anderen ist der mit der Abluft bewirkte Feuchteustrag durch kontinuierliche Bewässerung, die im Wesentlichen von der Belüftungsintensität abhängig ist, auszugleichen.

- **Umsetzung**

Eine Umsetzung des Abfallmaterials bewirkt eine Homogenisierung (Durchmischung der Abfallsubstanzen) sowie eine Auflockerung und damit Vergrößerung des Luftporenvolumens, so dass der mögliche Luftdurchsatz erhöht wird.

3 Prozesssimulation von Intensivrotteverfahren

3.1 Kinetik biologischer Abbau- und Umbauprozesse

Die Abbaukinetik biologischer Abfallstabilisierungsprozesse wird in Abbildung 2 durch eine Reaktion erster Ordnung beschrieben, für die folgende Randbedingungen zugrunde gelegt wurden:

- **Atmungsaktivität AT_4**

Der Parameter Atmungsaktivität (AT_4) wird von $AT_{4;In} = 80 \text{ mg O}_2/\text{g TM}$ auf $AT_{4;Out} = 20 \text{ mg O}_2/\text{g TM}$ reduziert. Die Behandlungs- bzw. Prozess-Zeit in der Intensivrotte beträgt 28 Tage.

- **Abfallmasse**

Der Wassergehalt WG_{In} beträgt 45 %, d. h. 1 Mg Feuchtmasse (FM) entsprechen 0,55 Mg Trockenmasse (TM). Der Glühverlust GV_{In} beträgt 50 %, d. h. 0,55 Mg TM entsprechen 0,275 Mg organische Trockenmasse (oTM).

- **Abbaugeschwindigkeit**

Die Abbaugeschwindigkeit der organischen Trockenmasse (oTM) wird aufgrund der hier gewählten Randbedingungen mit durchschnittlich etwa 2,4 kg oTM pro Tag bezogen auf einen Intensivrotte-Input von 1 Mg FM angesetzt.

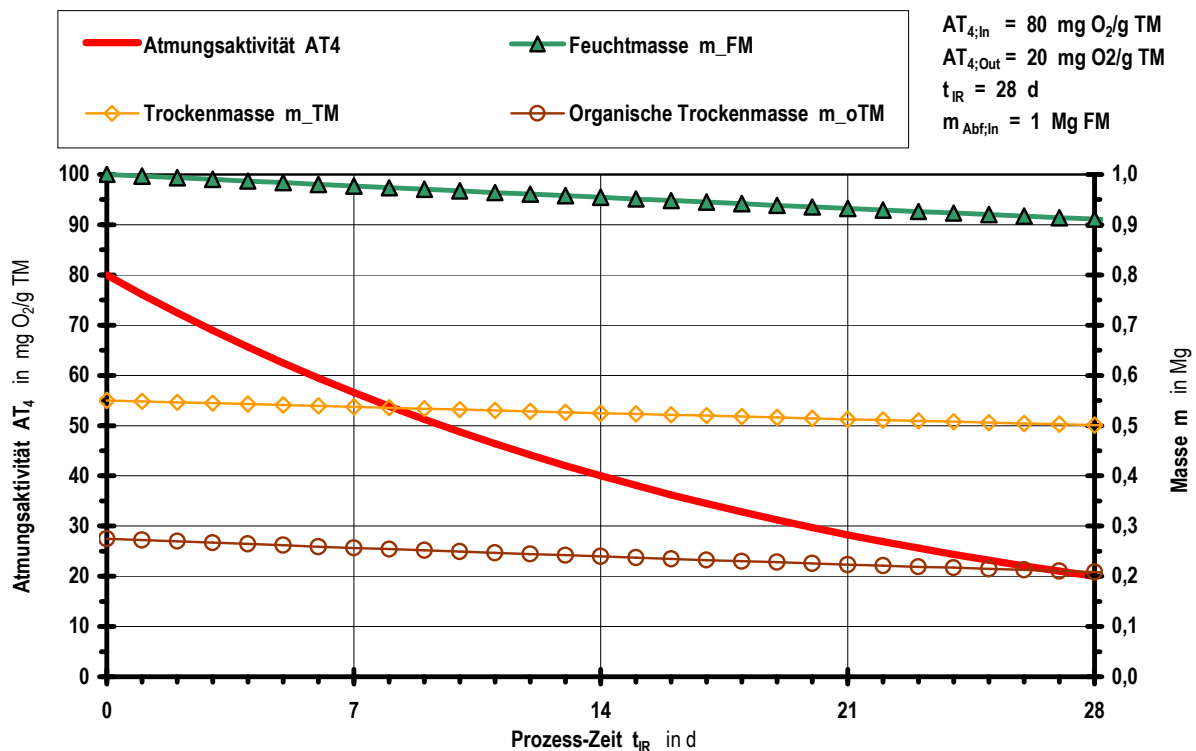


Abbildung 2 Kinetik biologischer Abbau- und Umbauprozesse

3.2 Stöchiometrie und Thermodynamik aerober Abbau- und Umbauprozesse

Der stöchiometrischen und thermodynamischen Berechnung aerober Abbau- und Umbauprozesse liegt eine Auswahl folgender organischer Substanzen zugrunde:

- **Stoffgruppen**

Die Stoffgruppen organischer Substanzen enthalten verschiedene Kohlenhydrate, Fette, Proteine, Kohlenwasserstoffe und Alkohole.

- **Abfallfraktionen**

Die Abfallfraktionen umfassen die organischen Substanzen, die in Restabfällen aus Haushaltungen, Bioabfällen (Küchenabfällen sowie Garten- und Parkabfällen), Papier und Pappe sowie Klärschlämmen enthalten sind.

Die organische Substanz wird bei einem vollständigen aeroben Abbau unter Verbrauch von Sauerstoff O_2 zu Kohlendioxid CO_2 , Wasser H_2O und Ammoniak NH_3 umgesetzt. In dem Verlauf der aeroben Abbaureaktionen wird Energie in Form von Wärme freigesetzt, im Folgenden als Reaktionswärme bezeichnet.

Tabelle 2 zeigt den stöchiometrischen Sauerstoffbedarf, die Stoffwechselprodukte und die Reaktionswärme, jeweils je kg abgebaute organische Trockenmasse (oTM).

Tabelle 2 Stöchiometrie und Thermodynamik aerober Abbau- und Umbauprozesse

	O₂- Verbrauch	CO₂- Produktion	H₂O- Produktion	NH₃- Produktion	Reaktions- wärme
	kg O ₂ /kg oTM	kg CO ₂ /kg oTM	kg H ₂ O/kg oTM	kg NH ₃ /kg oTM	kJ/kg oTM
Stoffgruppen:					
Min	0,18	0,96	0,20	0,00	- 2.420
Max	3,99	3,09	2,25	0,23	- 54.334
Mittel	1,56	1,79	0,74	0,02	- 21.266
Abfallfraktionen:					
Min	0,56	1,53	-0,09	0,00	- 7.561
Max	2,82	2,85	1,03	0,19	- 38.476
Mittel	1,14	1,81	0,29	0,04	- 15.534
Stoffgruppen, Abfallfraktionen:					
Mittel	1,57	1,91	0,62	0,04	- 21.356

3.3 Thermodynamik der Luftströme

Für die Ermittlung der erforderlichen Belüftung und Bewässerung während des Behandlungsprozesses wurden folgende Varianten berechnet:

- **Variante 1**

Zuluft: Relative Feuchte $\varphi = 0,7$; Temperatur $t = 15, 20, 25, 30, 35, 40$ und 45 °C

Abluft: Relative Feuchte $\varphi = 1,0$; Temperatur $t = 55\text{ °C}$

- **Variante 2**

Zuluft: Relative Feuchte $\varphi = 0,7$; Temperatur $t = 15, 20, 25, 30, 35, 40$ und 45 °C

Abluft: Relative Feuchte $\varphi = 0,9$; Temperatur $t = 50\text{ °C}$

Die theoretisch erreichbaren Zustände der für die Varianten gewählten Lastfälle unterscheiden sich durch den gewählten Wärmeaustrag, d. h. Feuchtegehalt im Zusammenhang mit der Temperaturdifferenz von Zuluft und Abluft. **Variante 1** enthält die Randbedingung, dass die Zuluft das Abfallmaterial vollständig durchströmt, mit einer Sättigung von 100 % austritt und die Einstellung einer Abfalltemperatur von 55 °C bewirkt. **Variante 2** ist im Hinblick auf die erforderliche Zuluftmenge der härtere Lastfall, da die Abluft mit einer Sättigung von 90 % und einer Temperatur von 50 °C angesetzt wird, so dass aufgrund der geringeren Enthalpie (verringertes möglicher Wärmeaustrag aufgrund $\varphi = 0,9$) und der höheren auszutragenden Wärmemenge die erforderliche Luftmenge im Vergleich zu Variante 1 größer ist.

Die Berechnungsergebnisse der Varianten sind für Container- und Tunnel-Systeme in Tabelle 3 und Tabelle 4 für folgende Parameter zusammengestellt:

- **Volumen der feuchten Zuluft im Betriebszustand V_{Zul} ,**

d. h. $15, 20, 25, 30, 35, 40$ bzw. 45 °C bei $\varphi = 0,7$

- **Volumen der feuchten Abluft im Betriebszustand V_{Abl} ,**

d. h. 55 °C bzw. 50 °C bei $\varphi = 1,0$ bzw. $0,9$

- **Ausgetragene Enthalpie H_{Aus} ,**

bezeichnet die Wärmemenge, die über die Abluft aus dem System ausgetragen wird;

- **Ausgetragene Wasserdampfmasse $m_{WD;Aus}$,**

bezeichnet die Wasserdampfmenge, die über die Abluft aus dem System ausgetragen wird;

- **Erforderliche Bewässerung V_{H_2O-Zuf} ,**

bezeichnet die Wasserdampfmenge, die über die Abluft aus dem System ausgetragen wird und durch kontinuierliche Prozess-Bewässerung wieder zuzuführen ist.

Tabelle 3 Erforderliche Zuluft sowie über die Abluft ausgetragene Wärme und Wasserdampfmasse - **Variante 1**

Zuluft	V _{Zul} m ³ /h	V _{Abl} m ³ /h	H _{Aus} kJ/d	m _{WD;Aus} kg WD/d	V _{H2O-Zuf} m ³ H ₂ O/d
Container-Intensivrotte, Abfall-Feuchtmasse = 18 Mg FM, Wassergehalt = 45 %					
(a) 15 °C	100	133	914.191	306	0,31
(b) 20 °C	106	138	914.191	310	0,31
(c) 25 °C	114	145	914.191	314	0,31
(d) 30 °C	124	155	914.191	318	0,32
(e) 35 °C	138	168	914.191	322	0,32
(f) 40 °C	159	187	914.191	326	0,33
(g) 45 °C	192	219	914.191	331	0,33
Tunnel-Intensivrotte, Abfall-Feuchtmasse = 240 Mg FM, Wassergehalt = 45 %					
(a) 15 °C	1.331	1.774	12.189.218	4.084	4,08
(b) 20 °C	1.415	1.844	12.189.218	4.136	4,14
(c) 25 °C	1.519	1.936	12.189.218	4.187	4,19
(d) 30 °C	1.656	2.060	12.189.218	4.239	4,24
(e) 35 °C	1.844	2.235	12.189.218	4.293	4,29
(f) 40 °C	2.120	2.496	12.189.218	4.352	4,35
(g) 45 °C	2.562	2.921	12.189.218	4.420	4,42

Tabelle 4 Erforderliche Zuluft sowie über die Abluft ausgetragene Wärme und Wasserdampfmasse - **Variante 2**

Zuluft	V _{Zul} m ³ /h	V _{Abl} m ³ /h	H _{Aus} kJ/d	m _{WD;Aus} kg WD/d	V _{H2O-Zuf} m ³ H ₂ O/d
Container-Intensivrotte, Abfall-Feuchtmasse = 18 Mg FM, Wassergehalt = 45 %					
(a) 15 °C	146	183	914.191	295	0,30
(b) 20 °C	159	194	914.191	300	0,30
(c) 25 °C	175	208	914.191	305	0,31
(d) 30 °C	198	230	914.191	310	0,31
(e) 35 °C	232	263	914.191	316	0,32
(f) 40 °C	290	320	914.191	322	0,32
(g) 45 °C	410	437	914.191	331	0,33
Tunnel-Intensivrotte, Abfall-Feuchtmasse = 240 Mg FM, Wassergehalt = 45 %					
(a) 15 °C	1.953	2.434	12.189.218	3.929	3,93
(b) 20 °C	2.115	2.580	12.189.218	3.996	4,00
(c) 25 °C	2.331	2.779	12.189.218	4.064	4,06
(d) 30 °C	2.634	3.064	12.189.218	4.133	4,13
(e) 35 °C	3.093	3.505	12.189.218	4.208	4,21
(f) 40 °C	3.872	4.262	12.189.218	4.295	4,30
(g) 45 °C	5.468	5.828	12.189.218	4.418	4,42

Für die direkte Übertragung der berechneten Werte auf großtechnische Anlagen ist zu berücksichtigen, dass die Größenordnungen unter folgenden Randbedingungen gelten:

- **Isotherme Verhältnisse**, die sich im großtechnischen Maßstab nicht realisieren lassen; im Praxisbetrieb großtechnischer Anlagen ist immer von einer räumlichen Temperaturverteilung mit teilweise hohen Temperaturgradienten auszugehen.
- **Ausreichendes Luftporenvolumen**, das sowohl die Luftmenge als auch die Bewegungsmöglichkeit der Luft im Substrat bestimmt. Das Porenvolumen verringert sich mit zunehmender Prozess- bzw. Behandlungszeit aufgrund von Setzungs Vorgängen und des Abbaus organischer Substanzen.

Die ermittelten Werte für die erforderliche Belüftung und Bewässerung sind von unterschiedlichen Randbedingungen abhängig, die an die tatsächlichen Prozessbedingungen für den jeweiligen Einzelfall in MBA-Anlagen entsprechend anzupassen sind. Im Wesentlichen zählen dazu die Reaktionswärme, die Abbaugeschwindigkeit, der Druck, die relative Feuchte und Temperatur der Zuluft und Abluft sowie der mögliche Luftdurchsatz, der von dem zur Verfügung stehendem Luftporenvolumen bestimmt wird und durch Umsetzung bzw. Bewegung des Abfallmaterials während des Behandlungsprozesses deutlich erhöht wird.

4 Zusammenfassung

Als Maßnahmen der Prozessoptimierung dienen die Bewässerung des Abfallmaterials vor Prozess- bzw. Behandlungsbeginn, die im Anschluss an die mechanische Aufbereitung in der Regel in der Mischtrommel stattfindet, sowie die Belüftung, Bewässerung und Umsetzung während des Behandlungsprozesses. Praxisbezogene Untersuchungen in unterschiedlichen MBA-Anlagen haben gezeigt, dass für die Prozessoptimierung von Intensivrotteverfahren folgende Maßnahmen zielführend sind:

- **Bewässerung**

Die Bewässerung des Abfallmaterials vor Prozess- bzw. Behandlungsbeginn stellt den Wassergehalt des Intensivrotte-Inputs ein. Um eine Behinderung des Luftdurchsatzes weitestgehend zu vermeiden, ist ein Wassergehalt von 45 % anzustreben. Demzufolge ist bei einem Wassergehalt zwischen 35 und 40 % im Abfallmaterial vor der Intensivrotte eine Wassermenge zwischen 1,6 und 3,3 m³ je Container und zwischen 22 und 44 m³ je Tunnel zuzuführen.

- **Prozess-Belüftung**

Die bedeutende Anforderung an die Belüftung liegt in dem Wärmeaustrag über die Abluft, um im System Temperaturen von etwa 55 °C einzustellen und somit unlimitierte Abbaureaktionen zu ermöglichen. Der Wärmeaustrag hängt in erster Linie von der Temperatur der Zuluft, d. h. Frischluft- bzw. Umluftanteil in der Zuluft, ab. Für die

in Abschnitt 0 berechneten Varianten ergibt sich, dass bei einer Zulufttemperatur von 20 °C eine Zuluftmenge von 110 bis 160 m³/h je Container bzw. 1.400 bis 2.100 m³/h je Tunnel erforderlich ist, um die überschüssige Wärme aus dem Abfallmaterial auszutragen. Die erforderliche Zuluftmenge erhöht sich bei einer Zulufttemperatur von 40 °C auf Werte zwischen 160 bis 290 m³/h je Container bzw. 2.100 bis 3.900 m³/h je Tunnel. Es ist darüber hinaus zu berücksichtigen, dass der tatsächliche Luftdurchsatz und damit Wärmeaustrag von dem zur Verfügung stehendem Luftporenvolumen im Abfallmaterial bestimmt wird.

- **Prozess-Bewässerung**

Mit dem Wärmeaustrag wird ebenfalls Wasser aus dem Abfallmaterial ausgetragen, so dass während des gesamten Behandlungsprozesses für die Aufrechterhaltung der mikrobiellen Aktivität eine Wassermenge von durchschnittlich 0,3 m³ je Tag und Container bzw. 4,2 m³ je Tag und Tunnel zuzuführen ist.

- **Umsetzung bzw. Bewegung des Abfallmaterials**

Der tatsächlich mögliche Luftdurchsatz wird entscheidend von dem zur Verfügung stehenden Luftporenvolumen bestimmt. Das Porenvolumen verringert sich während des Behandlungsprozesses aufgrund von Setzungen und des Abbaus organischer Substanzen. Durch eine Umsetzung und damit Bewegung des Abfallmaterials lässt sich die durch das Abfallmaterial strömende Luftmenge um das Vierfache steigern. Es wird daher empfohlen, das Abfallmaterial wöchentlich umzusetzen. Als entscheidend hat sich dabei das erste Umsetzen herausgestellt, das etwa 7 Tage nach Beginn der Intensivrotte durchgeführt werden sollte.

Das Ingenieurbüro gewitra mbH führt in diesem Zusammenhang Arbeiten durch, um die Prozesssteuerung in Abhängigkeit der jeweiligen Randbedingungen einzelner MBA-Anlagen optimal auszunutzen und einzustellen. Die Ziele der spezifizierten Prozessoptimierung sind:

- Minimierung der Prozess- bzw. Behandlungszeit bei hoher Abbauleistung,
- Reduzierung der Abluftmengen durch ein innovatives Abluftmanagement,
- Erhöhung der Reinigungsleistung bestehender Abluftbehandlungsaggregate im Hinblick auf kritische Parameter, wie Kohlenstoff-, Lachgas- und Geruchsemissionen,
- Verbesserung der Verfügbarkeiten einzelner Systemkomponenten bis hin zur gesamten Abluftreinigung.

5 Literatur

- KRANERT, M. 2000 Grundlagen der Kompostierung.
In: Biologische Abfallverwertung; W. Bidlingmaier (Hrsg.); Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart; S. 37 - 55.
- MÄHL, B. 2005 Belüftung als Instrument zur Prozessoptimierung von Intensivrotteverfahren in MBA-Anlagen.
In: Internationale Tagung MBA 2005; M. Kühle-Weidemeier (Hrsg); Cuvillier Verlag, Göttingen, ISBN 3-86537-665-7; S. 281 - 293.
- SOYEZ, K.; HERMANN, T.; KOLLER, M.; PLICKERT, S.; THRÄN, D. 2000 BMBF-Verbundvorhaben „Mechanisch-biologische Behandlung von zu deponierenden Abfällen“ - Gesamtdarstellung der wissenschaftlichen Ergebnisse des Verbundvorhabens- Teilvorhaben TV 1, Projektteil 1, Förderkennzeichen 1470960; Projektträger des BMBF: Umweltbundesamt.

Anschrift der Verfasserin

Dipl.-Ing. Birte Mähl
 Ingenieurgesellschaft für Wissenstransfer gewitra mbH
 Betriebsstätte Nord
 Zur Bettfedernfabrik 1
 D-30451 Hannover
 Email: maehl@gewitra.de
 Website: www.gewitra.de