

Zum Wasser- und Wärmehaushalt des Intensivrotteprozesses der mechanisch-biologischen Abfallbehandlung

J. Kaiser, K. Soyez

Zusammenfassung

Der Artikel beschreibt in mathematischer Form die thermodynamischen Grundlagen, die den Verlauf des Intensivrotteprozesses der mechanisch-biologischen Abfallbehandlung bestimmen. Das Modell umfasst Stoff- und Wärmeaustausch, Wassersättigung von Prozessluft sowie Wandlung organischer Komponenten zu CO_2 und H_2O . Das Modell ermöglicht die Prognose einiger wesentlicher technischer Daten, z. B. der Ablufttemperatur und des Wasserzugabebedarfs je nach Rohmaterialzusammensetzung und Belüftungsrate. Den Prognosen nach diesem Modell sind Ergebnisse zweier früherer großtechnischer Experimente gegenübergestellt, um das Maß der Übereinstimmung nachzuweisen.

Summary

The article presents a mathematical formulation of the thermodynamic fundamentals that govern the primary degradation process of mechanical-biological waste treatment. The model includes mass transfer, heat transfer, water saturation of process air, and conversion of organic compounds into CO_2 and H_2O . The model can predict some important process results such as temperature of outlet air, and need of water supply, depending on parameters like raw material composition, and air supply rate. The predictions by this model are contrasted to results of two earlier large scale experiments to check how realistic the model's assumptions are.

Einleitung

Die mechanisch-biologische Abfallbehandlung (MBA) ist ein Verfahren zur aeroben Behandlung von Siedlungsabfällen und somit dem traditionellen Verfahren der Kompostierung verwandt. Rohstoff der MBA ist die organischen Fraktion des Siedlungsrestabfalls, die im Siebschnitt unterhalb etwa 40 mm enthalten ist. Wegen des Schadstoffgehalts der Ausgangsstoffe ist das Prozessresultat nicht wie bei der Kompostierung ein Wertstoff, sondern ein abzulagerndes Material. Es muss bestimmte Deponierungsbedingungen erfüllen, die durch gesetzliche Vorgaben beschrieben werden. Dabei ist ein niedriger Restkohlenstoffgehalt ausschlaggebend. Daneben ist der Schadstoffgehalt, insbesondere die Fracht an Schwermetallen, auf Minimalwerte zu reduzieren. Einzuhalten sind ferner mechanische Eigenschaften, die beim Bau der Deponie eine Rolle spielen.

Von ausschlaggebender Bedeutung für einen wirkungsvollen Prozess sind die richtige Einstellung der Feuchte des Materials sowie der Temperatur; sie bestimmen die Geschwindigkeit des Prozesses und haben Auswirkungen auf die Belastung der Abgasströme mit Schadstoffen.

Berechnungsgrundlagen zur Auslegung von MBA-Anlagen gleichen naturgemäß weitgehend jenen von Kompostieranlagen (Kaiser 1999). Die größere Komplexität der chemischen und mikrobiologischen Vorgänge hat jedoch zur Folge, dass sich Kinetik und Dynamik der MBA einer mathematisch-naturwissenschaftlichen Herleitung entziehen. Dass hingegen für den wichtigen Spezialaspekt „Wasser- und Wärmehaushalt“ eine Reihe von Berechnungsmöglichkeiten bestehen, soll diese Arbeit aufzeigen.

Die zunehmend verfügbar werdenden Daten großtechnischer MBA-Prozesse bieten Gelegenheit zum Vergleich von Theorie und Praxis. Aktuelle Daten liegen insbesondere als Ergebnisse aus dem BMBF-geförderten Verbundvorhaben zur mechanisch-biologischen Behandlung vor (Soyez 1999).

Naturwissenschaftliche Verfahrensgrundlagen und physikalische Größen zur Charakterisierung des Prozesses

Das Rottegut. Die MBA zielt primär auf eine Stabilisierung des Rotteguts und sekundär auf eine Reduzierung von Masse und Volumen. Grundlegendes Verfahrensprinzip ist die mikrobielle Oxidation („kalte Verbrennung“) eines Teils der Inhaltsstoffe. Vor allem ein Teil der organischen Inhaltsstoffe, auch organische Substanz (oS) genannt, ist im MBA-Prozess biologisch abbaubar. Dabei fällt das Gros der Stoff- und Energiewandlung in den Prozessabschnitt „Intensivrotte“, der am Beginn des Stoffwandlungsprozesses der MBA steht.

Das Spektrum der „organischen Substanz“ des Rotteguts umfasst Stoffgruppen unterschiedlicher biologischer Abbaubarkeit. Dabei überwiegen im Regelfall jene Stoffgruppen, die von Mikroorganismen als alleinige Kohlenstoffquelle genutzt werden können, z.B. Glukose, Zellulose oder etwa Normalparaffine. Für diese Stoffgruppen ist – wenigstens theoretisch – ein Massenverlust von 100% im MBA-Prozess zu erzielen. Andere Stoffe sind bedingt (z.B. kometabolisch) abbaubar, wie Lignin oder einige komplexe Aromaten, ihr Massenverlust im MBA-Prozess liegt zwischen 0 und 100%. Schließlich bleibt auf die bioresistenten oder persistenten organischen Stoffe hinzuweisen, z. B. Huminstoffe oder synthetische Polymere: ihr Massenverlust im MBA-Prozess ist praktisch Null.

Die organische Substanz tritt in der Analytik als „flüchtiger Feststoff“ in Erscheinung, da sie bei einer Glühprobe ausgäst. Entsprechend wird die anorganische Substanz des Rotteguts als Asche bezeichnet, da sie nach einer Glühprobe als Asche verbleibt.

Anschauliche und zweckmäßige Bezugsgröße für Stoff- und Energierfrachten des Rotteguts in der MBA ist das „Mg Anfangs-Feuchtmasse“ oder gleichbedeutend die „Tonne Anfangs-Feuchtmasse“, die „Tonne Anfangs-Feuchtsubstanz“ oder die „Tonne Anfangs-Frischsubstanz“, kurz „t Anfangs-FS“ oder „t Input“. In der Analytik wird wegen der großen Bedeutung wasserfreier Proben gewöhnlich die Trockenmasse als Bezugsgröße verwendet, also z. B. die „Tonne Trockenmasse“ = „t TS“ und die „Tonne Anfangs-Trockenmasse“ = „t Anfangs-TS“.

Für das Rottegut in Großversuchen wurden analytische Eckdaten nach Tabelle 1 ermittelt.

Tab. 1: Leistungsdaten von Großversuchen (Fricke und Müller, 1999)

Versuch	Glühverlust GV ₀ (vor Rottebe-ginn	Glühverlust GV ₁
Mietenrotte HV 1-1	54	31%(nach 17 Wochen):
Rottecontainer ROCO 4	54%	32%(nach 18 Wochen):

Dabei sind hier die Zeitspannen von 17 bzw. 18 Wochen nicht nach der (vorgeplanten) Dauer der Intensivrotteprozesses gewählt, sondern entsprechen der (aus den Analysedaten erkennbaren) Zeitspanne des Organikabbaus.

Aus den Daten zum Glühverlust lässt sich der Massenverlust an organischer Substanz ableiten, z. B. nach Pichler (1999):

$$L^{\text{oS}} = \frac{GV_0 - GV_1}{GV_0 \cdot (1 - \frac{GV_1}{100})} \cdot 100 \%$$

Dies ergibt mit $GV_1 = 31\%$ für den Massenverlust der organischen Substanz: $L^{\text{oS}} = 62\%$. Dies bedeutet weiter nach den Werten von Tab. 3 eine Reduzierung der Konzentration oS von 324 um 200 auf 124 kg/(t Input).

Mit einem angenommenen konstanten Wassergehalt (Feuchtegrad) von 40% ergibt sich für das Rottegut – je nach Konzentrationsmaß – die Prozess-Ergebnisbilanz von Tab. 2 bzw. Tab. 3.

Tab. 2: Zusammensetzung des Rotteguts, Trockensubstanz-bezogen

	Konzentration (Ma.-% TS)	
	Prozessbeginn	Prozessende
oS (Glühverlust)	54	31
Asche (Glührückstand)	46	69

Tab. 3: Zusammensetzung des Rotteguts, Input-bezogen bei 40% Feuchte

	Konzentration (kg/(t Input))	
	Prozessbeginn	Prozessende
oS	324	124
Asche	276	276
Wasser	400	267
<i>Summe</i>	<i>1000</i>	<i>667</i>

Rotteluft. Die Prozessluft der MBA ist den Gesetzen der Thermodynamik von Feuchtluft unterworfen. Auf diesem Spezialgebiet ist das „kg Trockenluft“ die gebräuchlichste Bezugsgröße für Stoff- und Energiefrachten von Luftpaketen, da der Wert der Trockenluftmasse ($N_2 + O_2 + \text{ggf. } CO_2$ usw.) zwischen Input und Output eines Prozesses wenigstens näherungsweise konstant bleibt, gemessen an den Alternativen Feuchtluftmasse oder Feuchtluftvolumen.

Eine Übersicht relevanter Eigenschaften gesättigter Feuchtluft unter MBA-typischen Druck- und Temperaturverhältnissen gibt Tab. 9 (Anhang), darunter Wasser- und Wärmefrachten. Einige dieser Abhängigkeitsverhältnisse sind zugleich in Abb. 5 bis Abb. 9 (Anhang) dargestellt.

Welche Rottegut-Input-bezogenen Luftpakete verlangt die MBA? In der Bemessung des Luftdurchsatzes besteht prinzipiell ein weiter Spielraum. Minimum ist dabei die Deckung des biologischen Sauerstoffbedarfs: bei dieser minimalen Bemessung akkumuliert die Prozesswärme im Rottegut – sofern sie nicht auf anderem Wege abgeführt wird – so weit, dass die Temperatur auf Werte um 80°C ansteigt, was den Bioabbau stark verzögert. Zum Erreichen der größtmöglichen Prozessgeschwindigkeit ist eine Prozessführung bei biologischer Optimaltemperatur erforderlich: diese ist nur mit mehrfach

größerem Luftdurchsatz zu erreichen. Finstein & al. (1986) empfehlen einen 9-fach größeren Luftdurchsatz.

Wiemer (1999) stellt fest, dass nach den Ergebnissen des BMBF-Vorhabens verschiedene Autoren sinngemäß 15000 bis 35000 m³ Luft / (t Input) als Prozessluftbedarf ansetzen, obwohl der Luftbedarf zur O₂-Versorgung weit darunter liegt. Weiter nach Wiemer (1999) ergeben sich davon abweichend rechnerisch aus dem Auslegungswert für den Betrieb der Trockenstabilatanlage in Aßlar (Hessen) nur 3000 m³ Luft / (t Input). Das in Aßlar angewandte Verfahrensprinzip der Kreislaufführung schließt allerdings Maßnahmen zur Abführung der Prozesswärme ein: Doedens und Cuhls (2000) nennen „Kühlung von Umluft“.

Unter „Luft“, speziell „Zuluft“, wird bei der MBA atmosphärische Luft unter Normalbedingungen verstanden. In den o. g. thermodynamischen Größen formuliert, entsprechen:

3000 m³ Luft = ca. 4000 kg Trockenluft, 30000 m³ Luft = ca. 40000 kg Trockenluft.

Der Luftbedarf der MBA lässt sich somit auf 4000 bis 40000 kg Trockenluft pro Tonne Rottegut-Input beziffern.

Ein Luftdurchsatz von 3000 m³ Luft bzw. 4000 kg Trockenluft pro Tonne Input wird im Folgenden als „minimale Belüftung“ bezeichnet, und 30000 m³ Luft bzw. 40000 kg Trockenluft als „maximale Belüftung“. Minimale Belüftung hat eine Sauerstoff-Restkonzentration in der Abluft von (nahezu) Null zur Folge – lediglich Sauerstofflimitation und erst recht Anaerobie muss vermieden werden. Maximale Belüftung hat entsprechend eine Minderung des Sauerstoffgehalts der Abluft gegenüber der Zuluft von einem Zehntel zur Folge, also von 21% auf ~19%.

Die in dieser Arbeit verwendeten Begriffe „minimale“ und „maximale“ Belüftung berücksichtigen nur die Notwendigkeiten von Sauerstoffzufuhr und Wärmeabfuhr – der Bestimmung einer engeren Spanne nach weiteren Kriterien soll damit nicht vorgegriffen werden.

Stoff- und Wärmebilanzen für den MBA-Prozess

Aus den Eckdaten des Prozesses nach Tab. 3 folgen jene physikalischen Größen, die die Bilanz der Stoff- und Energiewandlung kennzeichnen. Tab. 4 listet sie in der logischen Reihenfolge ihrer Herleitung auf.

Tab. 4: Physikalische Größen zur Stoff- und Energiewandlung im MBA-Prozess, bezogen auf 1 t Input bei 40% Feuchte

Physikalische Größe	Wert	Berechnungsgleichung, Anmerkungen
C-Verlust m _C ^{bio}	120 kg	200kg·60%, wegen Verlust oS = 264kg und C-Gehalt der oS: 60%. Vergleichswerte: C-Gehalt von Zellulose ca. 44%, Rottegut QB 1-1 nach Pichler, 1999: 55% (Anfang), 61% (Ende)
CO ₂ -Gewinn m _{CO2} ^{bio}	440 kg	120kg·(44/12) : Molmassen!
O ₂ -Verbrauch m _{O2} ^{bio}	320 kg	120kg·(32/12) : Molmassen!
H ₂ O-Gewinn m _{H2O} ^{bio}	80 kg	200kg-120kg
Energieverlust, Wärmegewinn Q ^{bio}	4480 MJ	320kgO ₂ ·14000kJ/kgO ₂ nach Finstein & al., 1986

Hier liegt die Beobachtung zugrunde, dass die Stoffwandlung im Intensivrotteprozess der MBA nahezu ausschließlich durch den Betriebsstoffwechsel der Mikroorganismen bewirkt wird, demgegenüber der Baustoffwechsel vernachlässigt werden kann. Deshalb fußt die Berechnung auf der Modellvoraus-

setzung eines vollständigen Abbaus der Verlust-oS zu CO_2 und H_2O . Weiter wird angenommen, dass analog zur Oxidation der Glukosen $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6\text{O}_2 \rightarrow 6\text{CO}_2 + 6\text{H}_2\text{O}$ der C-freie Rest des oxidierten MBA-Substrats als H_2O verbleibt, d. h.

$$m_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{bio}} = m_{\text{oS}}^{\text{abgebaut}} - m_{\text{C}}^{\text{bio}} \quad , \text{ hier} \quad m_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{bio}} = 200\text{kg} - 120\text{kg} = 80\text{kg} \quad .$$

So entstehen als Konsequenz der höheren C-Anteils der MBA-oS gegenüber der Glukose (~60 Ma.-% gegenüber 40 Ma.-%) nur ~0,4 Mol H_2O pro Mol CO_2 , während bei der Oxidation der Glukose genau 1 Mol H_2O pro Mol CO_2 entsteht.

Der Energieverlust des Rotteguts wird praktisch vollständig als Wärmegewinn der Prozessluft wirksam, vor allem in Form von Verdampfungswärme von Wasser. Sonstige Wege des Wärmeaustauschs sind im großtechnischen Maßstab der MBA vernachlässigbar, auch spezielle technische Maßnahmen zum Wärmeaustausch bleiben in dieser Arbeit außer Betracht.

Die im vorherigen Abschnitt genannte Prozessluftmenge mit Trockenluftgehalt zwischen 4000 und 40000 kg wird demnach mit 4480 MJ beladen. Die Konsequenzen dieser Beladung für die Einstellung der (durchschnittlichen) Ablufttemperatur sind in Tab. 5 wiedergegeben. Mit der Temperatur der Abluft sind dann weitere Eigenschaften ableitbar:

Tab. 5: Eigenschaften der Abluft im MBA-Prozess, bezogen auf 1 t Input

Physikalische Größe	Wert		Berechnungsgleichung, Anmerkungen
	bei 4000kg TL	bei 40000kg TL	
Temperatur	76 °C	35 °C	interpoliert nach Tab. 9
Wasseraustausch pro kg TL	0,396 kg	0,0329 kg	nach Tab. 9
Wasseraustausch gesamt	1585 kg	1315 kg	$0,396\text{kg} \cdot 4000; 0,0329\text{kg} \cdot 40000$

Der zur Interpolation beider Ablufttemperaturen verwendete Temperaturwert der Zuluft von 6,7°C beeinflusst die Ergebnisse nicht wesentlich.

Damit sind die Wasser- und Wärmebilanzen des Intensivrotteprozesses für den Fall „Rottegutfeuchte = 40%“ vollständig (Abb. 1). Weitere Fallstudien sind im Anhang zu finden (Abbn. 10-21).

Bemerkenswert ist der Wert des Wasseraustauschs, der – unabhängig von der eingesetzten Prozessluftmenge – 1300 kg/(t Input) übersteigt. Da das Rottegut dazu voraussetzungsgemäß nur $(400-267) = 133$ kg/(t Input) beisteuert (nach Tab. 2), der biologische Wassergewinn $m_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{bio}}$ nur 80 kg/(t Input) beträgt (Tab. 4) und der Eintrag per Zuluft nur 26,8 bzw. 268 kg/(t Input) ausmacht (bei 4000 bzw. 40000 kg TL), muss der verbleibende Wasserbedarf von ca. 1000 kg/(t Input) aus anderer Quelle gedeckt werden.

Analoge Berechnungen mit weiteren Werten des Parameters Rottegutfeuchte führen auf die Resultate von Tab. 6 und Tab. 7 bzw. Abb. 2 und Abb. 3. Dabei findet man generell, dass die eingesetzte Prozessluftmenge starken Einfluss auf die resultierende Ablufttemperatur hat (und damit auf die Prozessgeschwindigkeit), jedoch nur geringe Auswirkung auf den Wasserzugabebedarf. Der Wasserzugabebedarf hängt vielmehr ganz wesentlich von der Feuchte des Rotteguts (also insbesondere der Anfangsfeuchte) ab. Unterschiedliche praktische Erfahrungen zum Wasserzugabebedarf verschiedener Anlagen finden möglicherweise darin eine Erklärung.

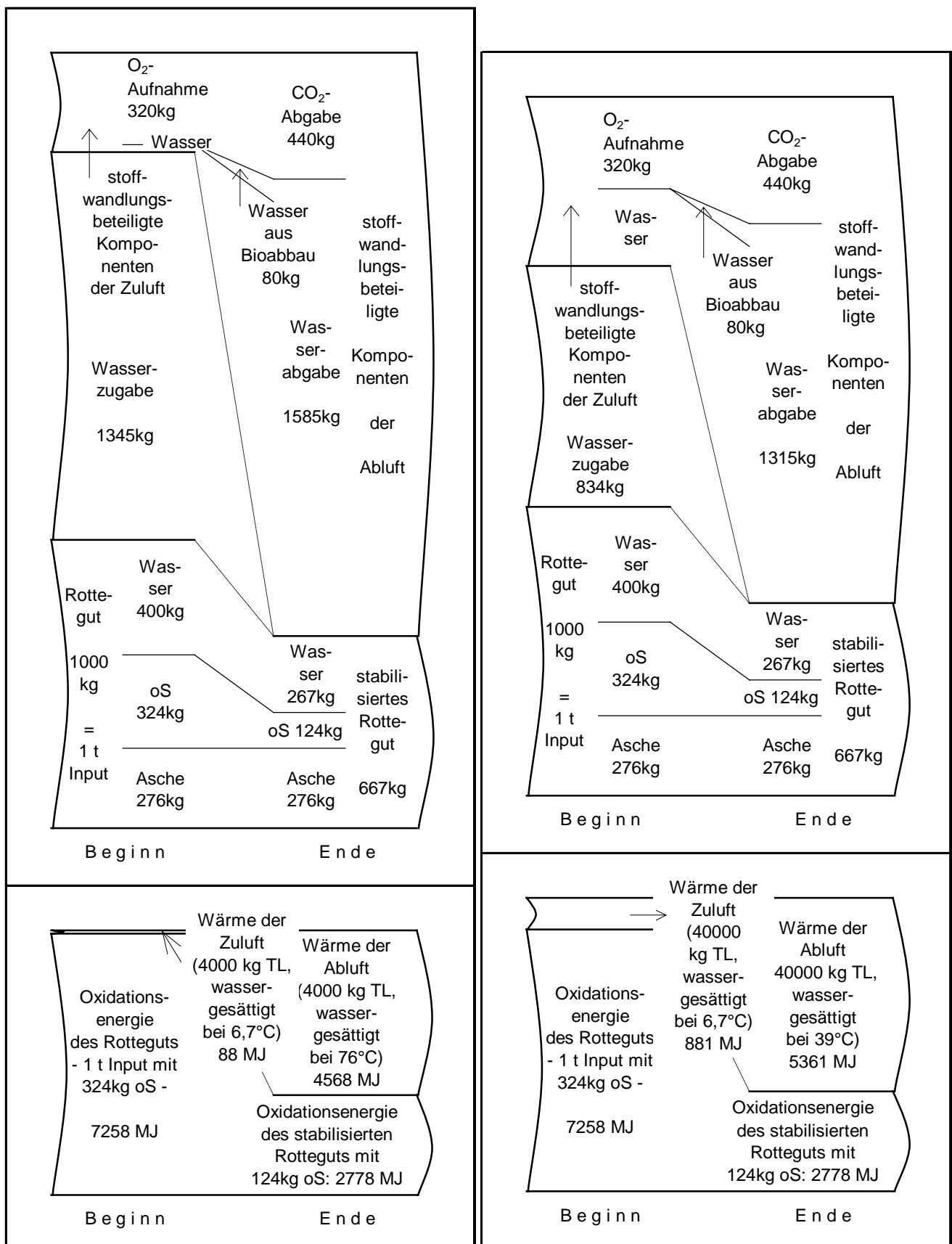


Abb. 1: Stoffbilanz (oben) und Energiebilanz (unten) eines MBA-Prozesses bei minimaler Belüftung (links) und des analogen MBA-Prozesses bei maximaler Belüftung (rechts), jeweils bei 40% Rottegutfeuchte

Tab. 6: Berechnete Ablufttemperatur (°C) bei minimaler und maximaler Belüftung in Abhängigkeit von der Rottegutfeuchte

	Feuchte = 20%	Feuchte = 40%	Feuchte = 60%
Belüftung 4000 kg TL / (t Input)	80	76	69
Belüftung 40000 kg TL / (t Input)	40	35	29

Tab. 7: Berechneter Wasserzugabebedarf (kg/(t Input)) bei minimaler und maximaler Belüftung in Abhängigkeit von der Rottegutfeuchte

	Feuchte = 20%	Feuchte = 40%	Feuchte = 60%
Belüftung 4000 kg TL / (t Input)	1940	1345	758
Belüftung 40000 kg TL / (t Input)	1423	834	217

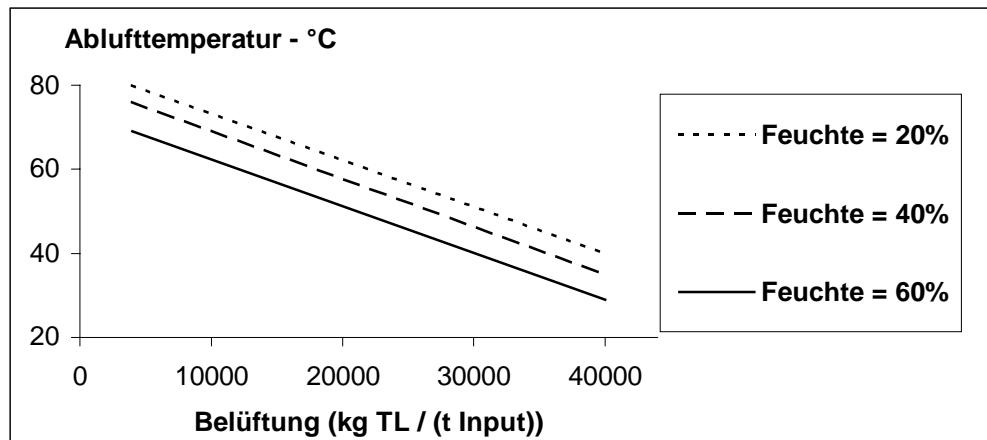


Abb. 2: Berechnete Ablufttemperatur in Abhängigkeit von Belüftung und Rottegutfeuchte

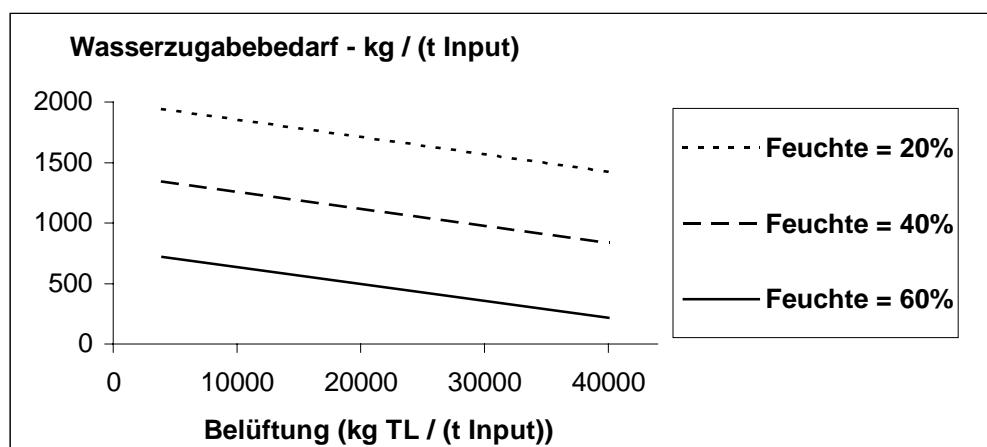


Abb. 3: Berechneter Wasserzugabebedarf in Abhängigkeit von Belüftung und Rottegutfeuchte

Vergleich des Wasserhaushalts der MBA nach modellgestützter Prognose und Großversuchen

Ein Teil der für den Wasser- und Wärmehaushalt der MBA maßgeblichen physikalischen Größen ist der messtechnischen Erfassung zugänglich und dokumentiert (Fricke und Müller, 1999). Einige besonders charakteristische Daten sind in Tab. 8 zusammengestellt.

Tab. 8: Daten zum Wasser- und Wärmehaushalt von Großversuchen

physikalisch-technische Größe	Versuch HV 1-1 (Miete)	Versuch ROCO 4 (Container)
Fassungsvermögen (m ³)	250	50
Füllmenge, Input, Anfangs-Feuchtsubstanz (t)	168	11,3
Anfangs-Schüttvolumen (m ³)		15,94
betrachtete Prozessdauer („Intensivrotte“, Wochen)	17	18
Belüftungsrate (m ³ /m ³ h)		0-27
mittlere Belüftungsrate (m ³ /m ³ h)		10,34
→ gesamte Luftmenge (m ³)	918000	71202 ****
→ spezifische Luftmenge (m ³ /(t Input))	5464	6301 *****
→ spezifische Luftmenge (kg TL / (t Input))	7064 ***	8147 *****
Rottegutfeuchte (%)	34-45	34-52
mittlere Rottegutfeuchte (%)	37,7	45
wöchentliche Wasserzugabe (kg)	0-39740	0-1290
gesamte Wasserzugabe (kg)	79480	3640
→ spezifische Wasserzugabe ((kg / (t Input))	473	322

$$* 918000 = 2250 * 17 * 24$$

$$** 5464 = 918000 / 168$$

$$*** 7064 = 5464 * 1,293$$

$$**** 71202 = 10,34 * 18 * 24 * 15,94$$

$$***** 6301 = 71202 / 11,3$$

$$***** 8147 = 6301 * 1,293$$

Ausblick

Modellprognose und experimentelle Daten beider Großversuche zum Wasser- und Wärmehaushalt stimmen gut überein und geben Sicherheit bezüglich der mathematischen Modellbasis. Die Autoren hoffen, mit dieser Arbeit ein wenig zur Objektivierung der Diskussion um Möglichkeiten und Grenzen der MBA beizutragen, und der weiteren ingenieurtechnischen Entwicklung von MBA-Anlagen ein nützliches Hilfsmittel zur Verfügung zu stellen.

Über kleinere Differenzen zwischen berechneten und Meßdaten bleibt zu diskutieren, insbesondere auch vor dem Hintergrund der spezifische Probleme bei der Auswertung von großtechnischen Versuchen.

Anhang

- (a) Eigenschaften gesättigter Feuchtluft unter Normaldruck (Lindner, 1969) bei verschiedenen MBA-typischen Temperaturen
- (b) Stoff- und Wärmebilanzen für den MBA-Prozess – sechs Fallstudien

Der Anhang im Umfang von 17 Seiten ist bei den Autoren erhältlich.

Symbole

ρ_{TL}	Dichte von Trockenluft = 1,293 kg/m ³ bei p=1atm und T= 0°C
c_p^{TL}	spezifische Wärme von Trockenluft bei 0°C = 1,004 kJ / (kg Trockenluft K)
c_p^{Dampf}	spezifische Wärme von Wasserdampf bei 0°C = 1,92 kJ / (kg Wasserdampf K)
FS	Feuchsubstanz, Original-Rottengut
GV	(eigentlich c ^{oS}) fachsprachlich Glühverlust bzw. korrigierter Glühverlust, Konzentration der organischen Substanz in der Rottengut-Trockenmasse (Masse-% , d. h. 100%·(kg oS) / (kg TS))
GV ₀ , GV ₁	Glühverlust vor und nach der Intensivrotte
h	Gesamtenthalpie der Luft (kJ / (kg Trockenluft))
$h^{\text{Trockenluft}}$	partielle Enthalpie Trockenluft (kJ / (kg Trockenluft))
$h^{\text{Dampferwärmung}}$	partielle Enthalpie Dampferwärmung (kJ / (kg Trockenluft))
$h^{\text{Verdampfung}}$	partielle Enthalpie Verdampfung (kJ / (kg Trockenluft))
L^{oS}	Massenverlust der organischen Substanz im Prozessergebnis (% , d. h. 100%·(Masse oS vor dem Prozess - Masse oS nach den Prozess) / (Masse oS vor dem Prozess)) (so bei Pichler 1999), Abbau oTS (%) (so bei Fricke und Müller 1999)
m_C^{bio}	C-Verlust durch Bioabbau von oS (kg)
$m_{\text{CO}_2}^{\text{bio}}$	CO ₂ -Gewinn durch Bioabbau von oS (kg)
$m_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{bio}}$	H ₂ O-Gewinn durch Bioabbau von oS (kg)
$m_{\text{O}_2}^{\text{bio}}$	O ₂ -Verbrauch durch Bioabbau von oS (kg)
oS	organische Substanz
p	Druck (atm)
$p_{\text{sat}} = p_{\text{sat}}(T)$	Sättigungspartialdruck von Wasser (atm) als Funktion der Temperatur, Dampfkurve von Wasser
Q ^{bio}	Wärmegewinn durch Bioabbau von oS (MJ)
r ₀	Verdampfungswärme des Wassers bei 0°C = 2502 kJ / (kg Wasser(-dampf))
$x_{\text{sat}} = x_{\text{sat}}(T)$	Sättigungsbeladung (kg Wasser / kg Trockenluft) als Funktion der Temperatur
T	Temperatur (°C)
TL	Trockenluft als Bestandteil von Feuchtluft
TS	Trockensubstanz, getrocknetes Rottengut
V	Gesamtvolumen (m ³)
V^{TL}	Partialvolumen Trockenluft (m ³)
V^{Dampf}	Partialvolumen Dampf (m ³)

Literatur

BAEHR, H. (1996): Thermodynamik: e. Einf. in die Grundlagen und ihre techn. Anwendungen. 9. Aufl., Springer, Berlin. (Kap. 5.3 Feuchte Luft, 5.3.5 Die Wasserbeladung)

DOEDENS, H.; C. CUHLS (2000): Möglichkeiten und Grenzen der Abluftbehandlung von MBV-Anlagen. In: R. Stegmann (Hrsg.), Deponietechnik 2000. Hamburger Ber., Bd. 16, Stuttgart: 105 - 120

FINSTEIN, M. S.; C. F. MILLER; P. F. STROM (1986): Waste treatment composting as a controlled system. In: W. Schönborn (Hrsg.), Biotechnology., vol. 8 (Biodegradations.) - VCH, Weinheim: 363 - 398. (Kap. III.E. Relationship between Removing Heat and Supplying Oxygen)

FRICKE, K.; W. MÜLLER (1999): Stabilisierung von Restmüll durch mechanisch-biologische Behandlung und Auswirkungen auf die Deponierung. Endbericht zum Teilvorhaben Nr. 1480945 des BMBF-Verbundvorhabens „Biologische Behandlung von zu deponierenden Abfällen“. IGW Ingenieurgemeinschaft Witzenhausen Fricke & Turk GmbH, Witzenhausen

KAISSER, J. (1999): Ein Simulationsmodell des Kompostierungsprozesses und seine Anwendung auf Grundfragen der Verfahrensgestaltung und Verfahrensführung. Bd. 10 der Reihe „Beiträge zur Abfallwirtschaft“ (B. Bilitewski & D. Weltin, Hrsg.), Techn. Univ. Dresden

LINDNER, H. (1969): Lehrbuch der Physik. Kap. Wärmelehre. 3. Auflage. VEB Fachbuchverlag, Leipzig

PICHLER, M. (1999): Humifizierungsprozesse und Huminstoffhaushalt während der Rotte und Deposition von Restmüll. Fortschr.-Ber. VDI, Reihe 15 (Umwelttechnik), Nr. 213. VDI Verlag, Düsseldorf

SOYEZ, K. (Hrsg.) (1999): BMBF-Verbundvorhaben "Mechanisch-biologische Vorbehandlung von zu deponierenden Abfällen". Beiträge der Ergebnispräsentation, 7. - 8. September 1999, Univ. Potsdam

WIEMER, K. (1999): Praxisgerechter Wert. Durch Kreislaufführung kann die mechanisch-biologische Aufbereitung den Standard der Abluft-Emissionsbegrenzung nach 17. BImSchV problemlos einhalten. In: Müllmagazin 4/1999: 41 - 42

Anschrift der Autoren

Dr. Jürgen Kaiser
Dr. Konrad Soyez
Universität Potsdam
Zentrum für Umweltwissenschaften
AG Ökotechnologie
Park Babelsberg 14
14482 Potsdam