

Dedicated to Prof. Antonius Kettrup on the occasion of his 60th birthday

DIE ROTTEGRADBESTIMMUNG VON KOMPOST IN DEWAR-GEFÄßEN – EINE KALORIMETRISCHE INTERPRETATION

P. Weppen, U. Gudladt und A. Willert*

Forschungsstelle für Ökosystemforschung und Ökotechnik, Christian-Albrechts-Universität Kiel, Olshausenstraße 40, D-24098 Kiel, Deutschland

Abstract

Composting technologies rely on standard methods for quality determination. The maturity of a compost is assayed by self-heating experiments in Dewar-vessels. The resulting maximum temperature is classified on a five-level scale. This study demonstrated systematic errors that might occur when assays are performed in Dewars of different size. The vessels were characterized as heat conduction calorimeters and the processes of biochemical decomposition and heat generation and autothermic effects (temperature) were evaluated quantitatively.

Keywords: compost, Dewar, heat conduction calorimetry, metabolic activity

Einführung

Die Kompostierung von getrennt erfassten organischen Abfällen hat in Deutschland durch die TA-Siedlungsabfall [1] und die Abfall-Gesetzgebung in den letzten Jahren erheblich an Bedeutung gewonnen. Anfang 1996 standen in Deutschland Anlagenkapazitäten für ca. 4,5 Mio. t. organische Abfälle pro Jahr zur Verfügung [2]. Entsprechend dieser Dimension besteht ein Regelwerk mit Methoden zur Qualitätskontrolle und Produktüberwachung, die inzwischen weit verbreitet in Anwendung sind. Jeder Kompostanlagen-Betreiber untersucht regelmäßig den sogenannten Rottegrad seiner Kompostprodukte, um den Rotteverlauf zu überwachen und den Zeitpunkt für die Vermarktung festzulegen. Unter dem Rottegrad von Kompost wird eine Maßzahl für die mikrobiologische Aktivität des ausreichend feuchten Materials verstanden; je niedriger diese Aktivität liegt, desto höher ist der Reifegrad. Es hat in den vergangenen Jahren verschiedene methodische Ansätze zur Bestimmung der mikrobiellen Aktivität

* Author for correspondence. e-mail: weppen@fsoe.uni-kiel.de

gegeben. Die Bestimmung der Selbsterhitzungstemperatur in Dewar-Gefäßen ist darunter die älteste und inzwischen verbreitetste Methode. Methodisch entspricht diese Vorgehensweise einfachen Verfahren zur Bestimmung der Lagerstabilität von Chemikalien durch quasi-adiabatische Lagerung. Methodisch besser quantifizierbare Ansätze wurden auf der Grundlage chemischer Analytik [3] oder mit Respirometern (Sapromat) und barometrischen Messanordnungen unternommen, in denen direkt der Gasaustausch von Kompostmaterial erfasst wird [4]. In der Praxis konnten sich diese Systeme aus Kostengründen kaum etablieren.

In dem vorliegenden Beitrag wird die Dewar-Methode in Anlehnung an die Empfehlung nach LAGA Merkblatt M 10 [5] und die Durchführungsvorschrift der Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V. [6] aus kalorimetrischer Sicht näher analysiert, da ein Dewar-Gefäß im Prinzip als Wärmeleitungs-Kalorimeter [7] betrachtet werden kann und Aussagen über die Wärmetönung des Prozesses im Dewar gestatten sollte. Im Gegensatz zu bekannten Wärmeleitungs-Kalorimetern, bei denen nur sehr kleine Temperaturdifferenzen auftreten, kommt es bei der Rottegradbestimmung im Dewar zu recht hohen Temperaturunterschieden zwischen Kalorimeterzelle und Umgebung. Der Wärmeaustausch eines Dewar mit Füllung wird durch die Wärmeleitung und -strahlung im evakuierten Doppelmantel und Stoff- und Wärmeaustauschvorgänge über die Gefäßöffnung charakterisiert. Die resultierende Temperatur des Füllmaterials ergibt sich als integrales Ergebnis aus der biochemischen Reaktionsenthalpie, der Wärmekapazität von Probenmaterial und Gefäß und den zusammengesetzten Strahlungs-Wärmeleitungs- und Stoffaustauschvorgängen am Gefäß und Material. Mit experimentell ermittelten charakteristischen Daten für Dewar-Gefäße lassen sich Temperaturdaten aus Selbsterhitzungsversuchen in Stoffwechselaktivitäten ΔH_{met} des Kompostmaterials überführen. Unter Hinzuziehung des oxykalorischen Quotienten von etwa $-440 \text{ kJ mol}^{-1} \text{ O}_2$ -Konsum werden Daten von Respirometrie und Dewar-Technik bedingt ineinander überführbar. Es bleibt allerdings der prinzipielle Unterschied zwischen einer quasi-isothermen Respirationssmessung und einer autothermischen Messmethode im Dewar bestehen, der sich aus der Änderung von Reaktionsraten mit der Temperatur ergibt. Um den Einfluss der kalorimetrischen Eigenschaften des Dewars auf das Ergebnis einer Rottegradbestimmung zu ermitteln, wurden vergleichende Untersuchungen an drei unterschiedlich dimensionierten Dewars durchgeführt, um die Frage eines Normierungsbedarfes für die Dewar-Gefäße für die Rottegradbestimmung wissenschaftlich abzusichern.

Material und Methoden

Selbsterhitzungsversuche fanden in zylindrischen, geometrisch ähnlichen, Dewar-Gefäßen mit 2 L, 4 L und 10 L (KGW-Isotherm) statt. Die Gefäße hatten die Dimension innerer Durchmesser und Höhe von 102×287 mm; 144×310 mm und 200×342 mm für 2 L, 4 L bzw. 10 L Nennvolumen. Kompost für Mess-

beispiele wurde vom Zweckverband Ostholstein bereitgestellt oder aus eigenen Kompostierungsversuchen entnommen. Der Kompost wurde durch Absiebung auf <20 mm Korngrösse für die Untersuchungen vorbereitet und mit Wasser auf eine Feuchte von 45 bis 55% der Frischmasse eingestellt. Zur raschen Ermittlung des Wassergehaltes während der Versuchsvorbereitung wurde ein gravimetrisches Schnellbestimmungssystem (Sartorius Thermo Control YTC O1L) eingesetzt. Wassergehalt und Glühverlust für Zwecke der Berechnung von Wärmekapazitäten wurden entsprechend den Methoden der Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V. [6] ermittelt.

Als spezifische Wärmekapazitäten wurden folgende Werte in Berechnungen eingesetzt: $4.177 \text{ J g}^{-1} \text{ K}^{-1}$ (Wasser); $1.088 \text{ J g}^{-1} \text{ K}^{-1}$ (Mineralstoffe); $1.25 \text{ J g}^{-1} \text{ K}^{-1}$ (organische Substanz); $0.84 \text{ J g}^{-1} \text{ K}^{-1}$ (Pyrex-Glas); $0.66 \text{ J g}^{-1} \text{ K}^{-1}$ (Stahl) [8]. Korrekturen für die Temperaturabhängigkeit der Wärmekapazitäten blieben in allen Berechnungen unberücksichtigt. Temperaturmessungen in den Dewars wurden mit stahlummantelten Pt-100 1/3 DIN-B Widerstandsthermometern (Testo GmbH) und einem programmierbaren Data-Logger (Campbell-Scientific, U.K.) kontinuierlich erfasst und mit einem Tabellenkalkulationsprogramm (Microsoft-Excel V.7) bzw. einem numerischen Optimierungsprogramm (Enzfit, Elsevier Biosoft) weiterbearbeitet.

Ergebnisse

Kalorimetrische Betrachtung des Systems Dewar und Füllmaterial

Dewar-Gefässe sind hinsichtlich ihres Wärmeaustausches durch den evakuierten Glas-Doppelmantel oder über die Gefässöffnung nicht präzise definiert. Es lassen sich durch Zerlegung in Einzelphänomene zwar Modellgleichungen für Teilbeiträge zum Wärmefluss Φ_{sys} formulieren, wie in der kalorimetrischen Literatur belegt wird [7], eine exakte Parametrierung erscheint unter Praxisgesichtspunkten aber zu aufwendig. Aus diesem Grunde wurde die kalorimetrische Charakteristik von drei verschiedenen grossen Dewar-Gefässen experimentell aus Temperatur-Abklingkurven zwischen 353 und 293 K mit definierter Wasserfüllung abgeleitet, indem Werte der Wärmeleitfähigkeit $\lambda_T(T)$ über den interessierenden Temperaturbereich ermittelt wurden und die erhaltene Funktion für Rechenzwecke durch eine Exponentialfunktion angenähert wurde. Die Parametrierung und Fehlerabschätzung erfolgte durch Marquard-Optimierung. Die kalorimetrische Interpretation der Dewar-Gefässe zielte auf die Bestimmung einer Wärmetransportfunktion hin, die im Temperaturbereich von 298 K bis 353 K eine ausreichend genaue Berechnung des stationären Wärmestromes Φ_{sys} erlaubte.

Zur Identifizierung der reinen Wärmeleitungs- und Strahlungseffekte wurde der Stoffaustausch durch die Verdunstung von Wasser über die Oberfläche durch eine Ölschicht unterbunden (Abb. 1a).

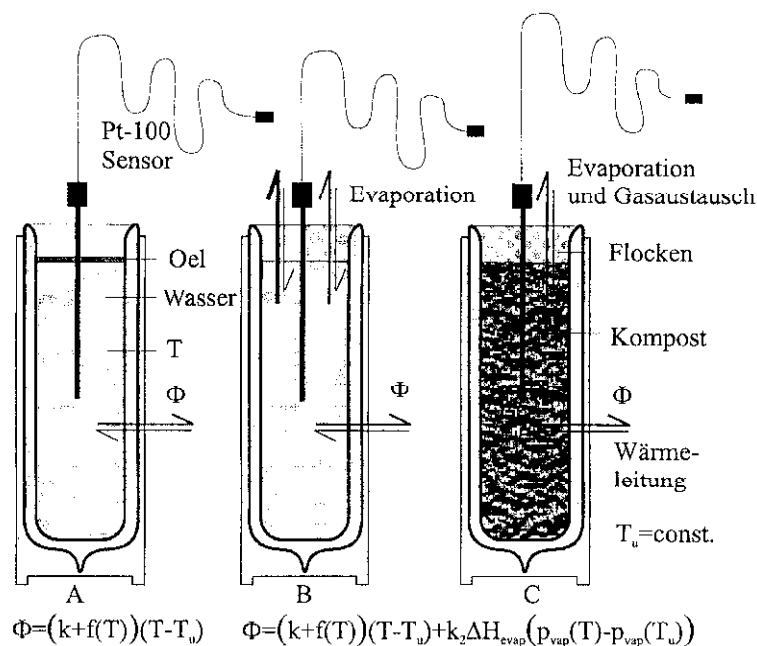


Abb. 1 Dewar-Gefäß als Wärmeleitungs-Kalorimeter in unterschiedlichen Betriebszuständen. a) Wärmeaustausch ohne Stoffaustausch im Wassermodell, b) Wärme- und Stoffaustausch im Wassermodell mit unterschiedlicher Behinderung, c) Rottegradbestimmung

Unter Bedingungen der Rottegradbestimmung musste ein freier Gasaustausch zwischen dem feuchten Kompost und der Umgebung über die Dewar-Öffnung bestehen, da die Rottevorgänge sauerstoffabhängig verlaufen. Im Rotteversuch wurde das Kompostmaterial im Dewar mit einer Lage Polystyrol-Schaumflocken überschichtet (Abb. 1c), um die Verdunstungsverluste einzuschränken. Diese Situation wurde durch Abkühlungsexperimente mit einer freien Oberfläche der Wasserfüllung im Dewar kalorimetrisch dargestellt (Abb. 1b). Als Referenztemperatur T_u und Wärmesenke diente die relativ konstante Temperatur in einem Kellerraum von ca. 295 K.

Zur Auswertung der Abkühlfunktionen hinsichtlich $\lambda_T = f(T)$ war eine präzise Abschätzung der zusammengesetzten Wärmekapazität der Dewar-Systeme bei den Abkühlexperimenten erforderlich, wie in den Gleichungen 1–4 für die drei untersuchten Systeme dargestellt wird. Die Werte von c_{psyst} wurden aus Einwaagen berechnet bzw. für die Dewar-Gefäße aus geometrischen Daten sorgfältig abgeschätzt (Tab. 1). Aus den Werten $\delta T / \delta t c_{\text{psyst}} / (T - T_u)$ ergab sich unmittelbar der gesuchte Funktionsverlauf für $\lambda_T(T)$. Die empirische formelmässige Annäherung an die gefundene Funktion folgte für ölüberschichtete Dewar's in guter Näherung Gl. (5). Der Term IT beschreibt die Temperaturabhängigkeit des Wärmeleitungskoeffizienten $\lambda_T(T)$.

Tabelle 1 Parametrierung der Gleichungen für den Wärmeleitkoeffizienten $\lambda_r(T)$ für verschiedene Dewar-Gefäße unter Bedingungen ohne Stoffaustausch, bei behindertem Stoffaustausch und freiem Stoffaustausch

Dewar-Vol. und Versuchstyp	$k/JK^{-1}s^{-1}$	$l/lK^{-2}s^{-1}$	m
2 L-Oel	$-0.0741 \pm 6.06 \cdot 10^{-4}$	$-0.608 \cdot 10^{-3} \pm 1.41 \cdot 10^{-2}$	n.b.*
4 L-Oel	$-0.1136 \pm 8.20 \cdot 10^{-4}$	$-1.399 \cdot 10^{-3} \pm 1.82 \cdot 10^{-2}$	n.b.*
10 L-Oel	$-0.2266 \pm 19.7 \cdot 10^{-4}$	$-2.722 \cdot 10^{-3} \pm 3.04 \cdot 10^{-2}$	n.b.*
2 L-iso	$-0.0813 \pm 5.86 \cdot 10^{-3}$	$2.426 \cdot 10^{-3} \pm 3.34 \cdot 10^{-4}$	$5.764 \pm 4.70 \cdot 10^{-2}$
4 L-iso	$-0.1043 \pm 6.35 \cdot 10^{-3}$	$1.012 \cdot 10^{-3} \pm 3.51 \cdot 10^{-4}$	$5.041 \pm 4.61 \cdot 10^{-2}$
10 L-iso	$-0.1982 \pm 1.45 \cdot 10^{-2}$	$4.949 \cdot 10^{-3} \pm 8.94 \cdot 10^{-4}$	$5.709 \pm 8.811 \cdot 10^{-2}$
2 L-offen	$-0.2467 \pm 1.57 \cdot 10^{-2}$	$8.556 \cdot 10^{-3} \pm 1.02 \cdot 10^{-2}$	$6.781 \pm 3.99 \cdot 10^{-2}$
4 L-offen	$-0.5337 \pm 5.59 \cdot 10^{-2}$	$18.51 \cdot 10^{-3} \pm 3.64 \cdot 10^{-3}$	$6.323 \pm 5.93 \cdot 10^{-2}$
10 L-offen	$-1.1410 \pm 7.35 \cdot 10^{-2}$	$40.13 \cdot 10^{-3} \pm 4.69 \cdot 10^{-3}$	$6.179 \pm 4.02 \cdot 10^{-2}$

* i. b. nicht berücksichtigt

$$C_{\text{Pinst.}} = C_{\text{PGlas}} m_{\text{Glas}} + \sum_{i=1}^n C_{\text{P}i} m_i \quad (1)$$

$$C_{\text{P} \text{ syst. A}} = C_{\text{Pinst.}} + C_{\text{PH}_2\text{O}} m_{\text{H}_2\text{O}} + C_{\text{POel}} m_{\text{Oel}} \quad (2)$$

$$C_{\text{P} \text{ syst. B}} = C_{\text{Pinst.}} + C_{\text{PH}_2\text{O}} m_{\text{H}_2\text{O}} \quad (3)$$

$$C_{\text{P} \text{ syst. C}} = C_{\text{Pinst.}} + C_{\text{PH}_2\text{O}} m_{\text{Kompost}} \eta_{\text{H}_2\text{O}} + C_{\text{P} \text{ inorg.}} m_{\text{Kompost}} \eta_{\text{inorg.}} + C_{\text{P} \text{ org.}} m_{\text{Kompost}} \eta_{\text{org.}} \quad (4)$$

$$\lambda_T = k + lT \quad (5)$$

Unter Bedingungen simultanen Stoffaustausches wird dem Dewar Wärme durch den Phasenübergang $\text{H}_2\text{O}_{\text{aq}} \rightleftharpoons \text{H}_2\text{O}_{\text{g}}$ entzogen. Dieser Beitrag ist vom Wasserdampfpartialdruck abhängig und somit sehr stark von der Temperatur abhängig und erfordert zur Beschreibung eine Exponentialfunktion (Gl. 6), die aus Gründen der Vergleichbarkeit der Parameter mit dem Ansatz nach Gl. 5 formuliert wurde. Die Optimierung der Parameter erfolgte durch Marquardt-Algorithmen. Jedes Dewar-System wird durch einen eigenen Parametersatz für $\lambda_T(T)$ beschrieben. Zur Vereinfachung wurde die Celsius-Skala für die Parametrierung zugrundegelegt. Daten zur Temperatur-Abkühlkurve sind in Abb. 2 dargestellt. Die zugehörigen $\lambda_T(T)$ -Daten zeigt Abb. 3a für flockenisolierte Gefäße und Abb. 3b für offene Dewars.

$$\lambda_T = ke^m \left(\frac{1 + 273}{273} - 1 \right) + lT \quad (6)$$

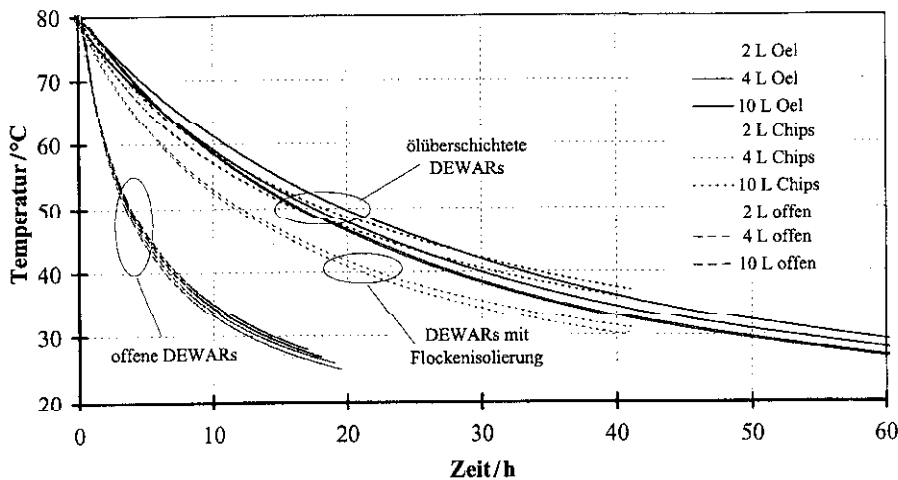


Abb. 2 Temperatur-Abkühlungskurve für Dewar-Gefäße in unterschiedlichen Betriebszuständen; ohne Stoffaustausch durch Ölschicht, isoliert mit Polystyrol-Chips, offen gegen die Atmosphäre

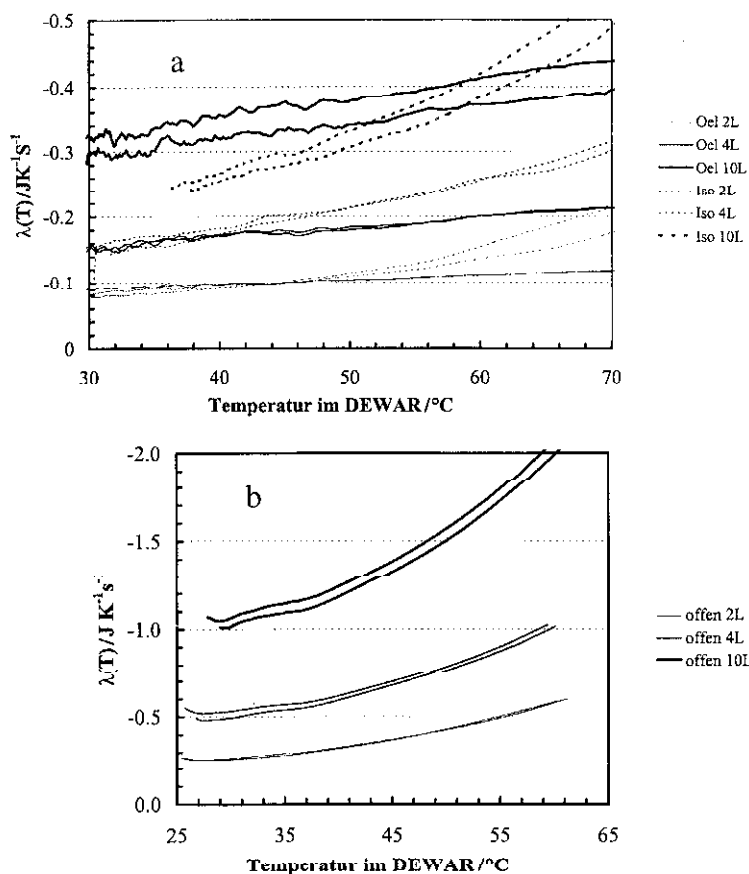


Abb. 3 Experimentell ermittelte Wärmeleitkoeffizienten λ_T als Funktion der Innentemperatur für Dewar-Gefäße in unterschiedlichen Betriebszuständen; a) ohne Stoffaustausch durch Ölschicht, isoliert mit Polystyrol-Chips; b) offen gegen die Atmosphäre

Mit der parametrisierten Näherungsgleichung für $\lambda_T(T)$ lassen sich stationäre Wärmeströme nun problemlos berechnen (linker Term in Gl. 7). Soll eine Entschmierung der kalorimetrischen Daten für instationäre Temperaturen im Dewar erfolgen, so kommt auch der rechte Term der TIAN-Gleichung (7) bei der Berechnung des Wärmestromes zur Anwendung. Die Kenntnis der Wärmekapazität von Kompostmaterial und Dewar-System ist erforderlich.

$$\Phi_{\text{sys.}} = \lambda_T(T - T_u) + \frac{\delta T}{\delta t} c_{\text{p,sys.}} \quad (7)$$

Nach den vorliegenden Parameterschätzungen zeigten die Dewar-Gefäße eine systematisch abnehmende spezifische Wärmeleitfähigkeit $\lambda_T/V_{\text{Dewar}}$ mit

zunehmenden Nennvolumen (vgl. k -Werte in Tab. 1). Ein grosses System erreicht somit eine gegebene Temperatur mit niedrigerer spezifischer Wärmetönung als ein kleines System.

Kalorimetrische Analyse zur Rottegradbestimmung

Zur Anwendung auf die Rottegradbestimmung wurden die Dewars mit Kompost der Humifizierungsanlage Lensahn mit einer Rottedauer von ca. 6 Wochen nach Absiebung auf einen Siebschnitt <20 mm bzw. mit selbst erzeugtem Reifkompost von 5 Wochen aus einem Labor-Intensivrotteverfahren befüllt. Das Material wird nach den Ergebnissen der Schnellanalyse (Sartorius) auf eine Arbeitsfeuchte von ca. 50% eingestellt und locker in die Dewars geschüttet und anschließend randhoch abgestrichen. Durch Aufstossen und Einsatz der T-Fühler (Pt100) wird ein Rand von ca. 2 cm erhalten, der mit Styroporflocken locker aufgefüllt wird. Die Wärmekapazität des Materials wird für Berechnungen als zusammengesetzte Größe aus Wasseranteil η_{Wasser} , organischer Substanz $\eta_{\text{org.}}$ und mineralischen Stoffen $\eta_{\text{min.}}$ abgeschätzt.

Die Temperaturprofile der untersuchten Varianten sind in Abb. 4 zusammengefasst. Deutlich erkennbar erwärmen sich große Gefäße aufgrund der besseren Isolation stärker, als kleine. Aus den Daten wurden die Wärmetönungen $\Phi_{\text{spec}} = \Phi_{\text{syst}} m_{\text{Kompost}}^{-1}$ mit Gl. (7) unter Berücksichtigung der Materialeinwaage berechnet (vgl. Abb. 5). Darin blieb der Differenzenquotient im zweiten Term bei den langsamen Temperaturänderungen relativ unbedeutend. Die Zahlenwerte sind in Tab. 2 zusammengefasst. Unter der Annahme, daß die Wärmetönung aus dem oxidativen Abbau stammt, wurden die Sauerstoffequivalente

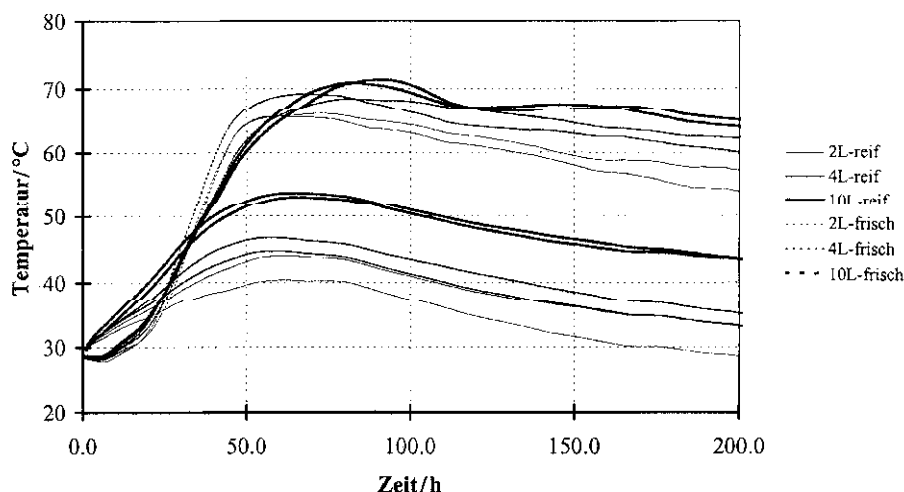


Abb. 4 Temperaturverlauf bei der Rottegradbestimmung in Dewar-Gefässen. Einsatz von Reifkompost bzw. Frischkompost in Gefässen von 2 L, 4 L bzw. 10 L Nennvolumen

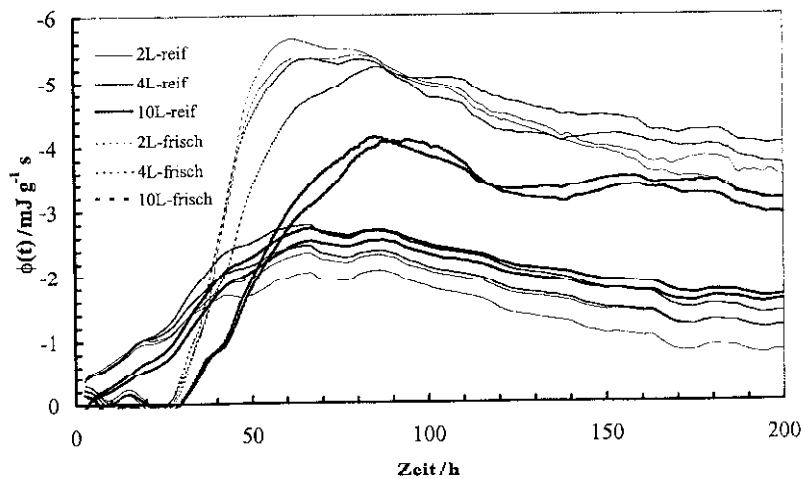


Abb. 5 Spezifische Wärmeflußdaten zur Rottegradbestimmung an Frisch- und Reifkompost in Dewar-Gefäßen

für Φ_{spec} und die integrale Wärmemenge für den Zeitraum 0–200 h ebenfalls errechnet. Diese Werte belegen, daß der Kompost in der Messzeit noch erheblichen biochemischen Umsetzungen unterlag. Die Einstufung der Rottegrade erfolgte nach [9].

Diskussion der Ergebnisse

Erwartungsgemäß hat die Dimensionierung von Dewars einen Einfluß auf seine Wärmeleitungseigenschaften. Auf die Selbsterhitzungstemperatur eines darin verlaufenden exothermen Rotteprozesses hat somit die Gerätedimension einen Einfluss, da in erster Näherung gilt, daß die Gleichgewichtstemperatur dem Kehrwert des Wärmeleitkoeffizienten λ proportional ist. Für Kompost des Rottegrades I (sehr hohe Aktivität) tritt dieser Effekt nicht in Erscheinung, da bei 65–70°C eine Selbsthemmung der Rotteprozesse eintritt. Dies wird in den Daten nach Tab. 2 und den zugehörigen Temperaturkurven deutlich. Der Frischkompost produzierte umso weniger Wärme, je größer das Dewar-Gefäß gewählt wurde, weil die Aktivität durch die Temperatur begrenzt wurde. Im Falle des Reifkompostes steigt die Temperatur in größeren Dewars auf höhere Werte, so daß ein abweichender Rottegradbefund resultierte. Die kalorimetrische Interpretation dieser Versuchsgruppe lieferte trotz der abweichenden Temperaturen aber sehr ähnliche spezifische Wärmetönungen Φ_{spec} , die den homogenen Rottegrad des Materials besser belegen als die Temperaturdaten. Eine weitere Information liefert die integrale spezifische Wärmemenge, die vom Rottegut freigesetzt wurde. Diese Maßzahl kann möglicherweise als Equivalent zur biochemischen Oxidierbarkeit des Kompostmaterials herangezogen werden.

Tabelle 2 Daten zur Rottegradbestimmung an Bioabfallkomposten in Dewar-Gefäßen unterschiedlicher Dimension. Wärmestrom Φ_{spec} und Wärmemenge Q_{200} wurden unter Verwendung der Koeffizienten aus Tab. 1 errechnet

Parameter	Frischkompost			Reifkompost			Dimension
	2 L	4 L	10 L	2 L	4 L	10 L	
Wasser		0.474			0.507		η_{Wasser}
Organische Substanz		0.213			0.252		$\eta_{\text{org.}}$
Mineralstoffe		0.312			0.241		η_{min}
C_p Kompost		2.585			2.695		$J g^{-1} K^{-1}$
Einwäge	1250	2560	6060	868	1754	4041	g
C_p	438	712	1710	438	712	1710	$J K^{-1}$
$C_p^{\text{inn.}}$	3230	6617	15665	2339	4727	10890	$J K^{-1}$
$C_p^{\text{cont.}}$	309	653	1603	59	143	414	g
Massenverlust _{10d}	65.7	68.8	71.1	42.2	45.7	53.5	$^{\circ}C$
T_{max}	I	I	I	III	III	IV	
Rottegrad							
Wärmetönung T_{max}	5.52	5.29	4.11	2.21	2.62	2.63	$ml g^{-1} s^{-1}$
O_2 -Equivalent.rate	1.44	1.38	1.08	0.58	0.69	0.69	$mg g^{-1} h^{-1}$
Heat output _{(t=20th), Q_{200}}	2580	2600	1880	1056	1285	1309	$J g^{-1}$
O_2 -Equivalent.summe	187	189	36	77	93	95	$mg g^{-1}$

Bei der Überführung der kalorimetrischen Daten in respirometrische Größen durch Anwendung des Oxykalorischen Koeffizienten ergaben sich Maßzahlen für die Respirationsrate bzw. die integrale Atmung über 200 h, die nicht in das bekannte Skalierungssystem [9] übertragbar waren, da die respirometrischen Daten normalerweise bei $T \approx 25^\circ\text{C}$ erhoben werden. Die entsprechenden Methoden werden in [9] ausführlich vorgestellt.

Für die Praxis der Rottegradbestimmung in Dewars muß der Schluß gezogen werden, dass eine gute Standardisierung der Meßeinrichtung vorzunehmen ist und die Stoff- und Wärmeaustauschvorgänge an der Gefäßöffnung sorgfältig definiert werden müssen, da offene und teilabgedeckte Dewars bereits erhebliche Unterschiede in den Wärmeleitungsparametern aufweisen (Tab. 1). Eine Vertiefung der kalorimetrischen Betrachtung verbietet sich an dieser Stelle jedoch, da auch die Wärmeleitung und der Stofftransport in Biokompostmaterialien zunächst Gegenstand eigener Untersuchungen werden müssten.

* * *

Diese Arbeit wurde mit Unterstützung der Deutschen Bundesstiftung Umwelt durchgeführt.

Literatur

- 1 K. R. Müller und G. Schmitt-Gleser, Handbuch der Abfallentsorgung, Kap. II-3/Anl.1: Ta-Siedlungsabfall, Ecomed, Landsberg-Lech, 1993.
- 2 K. Wiemer und M. Kern, Kompost-Atlas 1996/97. M.I.C. Baeza-Verlag, Witzenhausen.
- 3 J. Grundmann, Müll und Abfall, 5 (1991) 268.
- 4 H. Kohmann und P. Fischer, Entsorga-Magazin, 6 (1993) 72.
- 5 Länderarbeitsgemeinschaft Abfall: Merkblatt M 10, Qualitätskriterien und Anwendungsempfehlungen für Kompost, MuA Lfg. 5/1995, Erich-Schmidt-Verlag, Berlin.
- 6 Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V. (Hrg. 1994): Methodenbuch zur Analyse von Kompost, Selbstverlag, Köln.
- 7 Hemminger und Höhne, Grundlagen der Kalorimetrie, Verlag Chemie, Weinheim 1979.
- 8 J. Tinoco Jr., K. Sauer and J. C. Wang, Physical Chemistry, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey 1995.
- 9 P. Lepom und P. Henschel, Müll und Abfall, 7 (1993) 530.