
PRACE

**Instytutu Ceramiki
i Materiałów Budowlanych**

Scientific Works
of Institute of Ceramics
and Building Materials

Nr 10

ISSN 1899-3230

Rok V

Warszawa–Opole 2012

Theoretische Grundlagen der Kompostierung

Schlüsselwörter: Kompostierung; Rotteprozess; Intensivrotte; Einflussmöglichkeiten.

Dieser Artikel soll theoretisches Hintergrundwissen zur Kompostierung geben um ein besseres Verständnis für den Prozess und das Zusammenspiel möglicher beeinflussender Faktoren zu bekommen.

1. Zielsetzung der Kompostierung

Abhängig vom Inputmaterial ergeben sich verschiedene Zielsetzungen der Behandlung mittels Kompostierung:

Biomüll

Das Ziel der Kompostierung von Biomüll ist der möglichst zügige und geruchsarme Abbau von organischen Substanzen und deren Überführen in stabile, pflanzenfreundliche Humussubstanzen. Dabei wird angestrebt, bei möglichst kurzer effektiver Intensivrottendauer und bei geringen Emissionen ein qualitativ hochwertiges Produkt zur Pflanzendüngung herzustellen. Der produzierte Kompost kann dabei als Humus- und Nährstofflieferant, als Bodenverbesserungsmittel oder als Bestandteil von Pflanzsubstraten und Kulturerden eingesetzt werden. Die Dauer der Nachrotte ist unter Anderem abhängig von den gewünschten Qualitätsmerkmalen wie z.B. Strukturstabilität bei der Begrünung von Böschungen, Wasserkapazität und Gießfestigkeit für Topferden oder Ausreifungsgrad (Stabilität) im Falle der Vermarktung als Sackware [2].

Restmüll

Das Ziel der Kompostierung von Restmüll ist die möglichst rasche und emissionsarme Stabilisierung des enthaltenen organischen Anteils, der für potentielle Methanemissionen in Deponiekörpern verantwortlich ist, zu einem geruchstoffarmen Zwischenprodukt. Neben der Verringerung der Deponiegas- und Sickerwassermengen, kommt es auch zu einer Massen- und Volumenreduktion

* Dipl.-Ing., Maschinen-Umwelttechnik-Transportanlagen GmbH, Österreich.

des Restmülls. Falls gewünscht, kann mit einer Restmüllkompostierung das Material auch für eine weitergehende Behandlung wie Mitverbrennung getrocknet werden oder der Restmüllkompost zur Begrünung oder Oberflächenabdeckung von Deponien eingesetzt werden [1].

2. Einflussmöglichkeiten auf den Verlauf der Intensiv- bzw. Nachrotte

Der Prozess der Stoffumwandlung bedarf aufgrund der Anhäufung der organischen Ausgangsstoffe, deren unzureichender Struktur und der Beschleunigung des Prozesses verfahrenstechnischer Hilfsmittel, um den aerob ablaufenden Rotteprozess überhaupt zu ermöglichen bzw. ihn zu optimieren.

Die Optimierung des Rotteprozesses, sowohl hinsichtlich des Emissionsmanagements als auch der Kompostqualität bei Biomüll, ist nur über vier elementare Steuergrößen beeinflussbar [2]:

- Materialmischung und Wassergehalt des Inputmaterials,
- Steuerung des Wasserhaushaltes,
- Sauerstoffversorgung des Intensiv- oder Nachrottematerials,
- Steuerung der Temperatur des Intensiv- oder Nachrottematerials.

Die Grundlage für eine optimale Prozesssteuerung ist aber zunächst ein ausreichendes Verständnis der Biologie des Rotteprozesses.

3. Biologie des Rotteprozesses

Die Kenntnis der sukzessiv verlaufenden bio-chemischen Prozesse im Zuge des Ab- und Umbaus der organischen Substanzen ist eine Grundvoraussetzung für eine gezielte Steuerung bzw. Regelung des Prozessablaufes in der Kompostierung.

3.1. Mikroorganismen

Im Zuge des Rotteprozesses wird die in den Abfallstoffen enthaltene organische Substanz von aeroben Mikroorganismen unter Sauerstoffaufnahme als Energie- und Nährstoffquelle verwertet. Dabei wird ein Teil des Kohlenstoffs in der Zellsubstanz der Mikroorganismen (mikrobielle Biomasse) festgelegt und ein anderer Teil als Kohlendioxid (CO_2) freigesetzt. Eiweiß, Kohlenhydrate und Fette werden hydrolysiert. Die Hydrolyseprodukte (Monosaccharide aus Kohlehydraten, Peptide und Aminosäuren aus Eiweißstoffen und phenolische Bausteine aus aromatischen Zellwandbestandteilen) werden teilweise zu organischen Säuren (Essigsäure, Buttersäure, Valeriansäure, Propionsäure) und Kohlendioxid, letzteres unter Abgabe von Wärme, umgebaut (Tab. 1). Unter aeroben Bedingungen

entsteht dabei ein erheblicher Kohlenstoffverlust. Anschließend kommt es zum Aufbau mikroorganismeneigener Eiweißstoffe, aber auch zur direkten Bildung von CO₂, Wasser und -in Abhängigkeit vom pH-Wert und Stickstoffgehalt- Ammoniak bzw. Ammonium. Bei ausreichendem Sauerstoffangebot wird in der späteren Rottephase bei gemäßigten Temperaturen Ammonium über Nitrit zu Nitrat oxidiert [2].

Tabelle 1

Aerober Abbau von Zucker und Energiebilanz [2]

AEROBER Abbau im Rotteprozess	C ₆ H ₁₂ O ₆ + 6 O ₂ --> 6 CO ₂ + 6 H ₂ O
	frei werdende Energie - 2.875 [kJ / Mol]

3.2. Sauerstoffbedarf

Der Sauerstoffbedarf und die Sauerstoffverteilung im Intensiv- oder Nachrottematerial hängen von einer Vielzahl von Faktoren ab. Die Wesentlichen sind [2]:

- die Art des biogenen Abfallstoffs, also dessen Zusammensetzung der organischen Substanz,
- der aktuelle Abbauzustand,
- der Wassergehalt,
- die anteilige Größe und Stabilität des luftführenden Porenvolumens,
- die Geometrie der Intensiv- bzw. Nachrotte (z.B. bei Mietenkompostierung).

3.3. Temperatur

3.3.1. MIKROBIELLE TEMPERATURBEREICHE

Die Intensität des Abbaus während der exothermen Intensiv- oder Nachrotte hängt wesentlich von der mikrobiellen Verfügbarkeit der Ausgangssubstanzen ab. Unterschieden werden leicht und schwer abbaubare organische Substanzen. Beim Abbau der organischen Substanz durch Mikroorganismen kommt es in Abhängigkeit von der Intensität der Abbauvorgänge und vom Volumen der Biomasse zu einer Erhöhung der Milieutemperatur („Selbsterwärmung“).

Bei der Kompostierung von Biomüll (bzw. biogener Abfälle aus dem Küchen- und Nahrungsmittelbereich) ist diese Selbsterwärmung aus zwei Gründen erwünscht [2]:

- 1) Es kommt zu einer Änderung der Mikroorganismenpopulation und damit zu einem beschleunigten Abbau.
- 2) Es kommt neben antibiotischen Effekten (v.a. durch pilzliche Stoffwechselprodukte) auch zu einer thermischen Inaktivierung potenziell pathogener

Keime. Hierfür müssen Temperaturen von zumindest 55°C über einen bestimmten Zeitraum auf die aktive Mikroflora einwirken.

Es wird zwischen drei Temperaturbereichen unterschieden, die das jeweils vorherrschende mikrobielle Artenspektrum bedingen (vgl. Tab. 2).

Tabelle 2

Temperaturbereiche bzw. -phasen und Arten von Mikroorganismen [2]

Temperaturbereich	Temperatur [°C]	Art der Mikroorganismen
Psychrophiler Bereich	-4 bis 20	Bakterien und Schimmelpilze
Mesophiler Bereich	15 bis 42	Bakterien und Actinomyceten
Thermophiler Bereich	45 bis 75	Bakterien und mesophile bis thermotolerante Pilzsporen

Ab 75°C beginnt die Denaturierung des Eiweißes, sodass die biologischen Rotteprozesse bei der Kompostierung in diesem Temperaturbereich zum Erliegen kommen.

3.3.2. PROZESSANFORDERUNGEN AN DIE TEMPERATUR

Für die drei wesentlichen Anforderungen an den Rotteprozess selbst –Hygienisierung (bei Biomüll), Abbau der organischen Masse und maximale mikrobielle Vielfalt– können folgende Temperatur-Optima angegeben werden:

Tabelle 3

Prozessanforderungen und Temperaturbereiche [2]

Prozessanforderung	Temperatur [°C]
Hygienisierung	> 55
Abbaurate; beginnender Ligninabbau / Humifizierung	45 bis 55
Mikrobielle Vielfalt + Abbau der mikrobiellen Biomasse, Ligninabbau / Humifizierung	35 bis 40

3.3.3. TEMPERATURENTWICKLUNG

Eine Vielzahl von Rahmenbedingen beeinflusst die Temperaturentwicklung:

- Abbaubarkeit des organischen Materials,
- C/N-Verhältnis,
- Wassergehalt des Inputmaterials,
- Belüftung,
- Umsetzen.

Das Umsetzen bewirkt einerseits eine kurzfristige Abkühlung und heizt andererseits den Rotteprozess in der thermophilen Phase bzw. auch im Übergang zur mesophilen Phase durch die Sauerstoffzufuhr, die Schaffung neuer, mikrobiell angreifbarer Oberflächen neu an. In der Nachrotte ist die Nachhaltigkeit und Dynamik dieses Vorgangs wiederum eng mit dem Mietenquerschnitt verknüpft.

„Kleine“ Dreiecksmieten ermöglichen einen besseren Abtransport der Wärme über die Konvektion (Kamineffekt) während größere Trapezmieten öfters umgesetzt werden müssen.

3.3.4. TEMPERATURSTEUERUNG BEI BIOMÜLL

Für eine Temperatursteuerung kann von folgenden 2 Grundsätzen ausgegangen werden [2]:

1. Die Selbsterwärmung führt bei Vorhandensein von ausreichend reaktiven organischen Ausgangsmaterialien und deren homogenen Durchmischung zu den für eine thermische Hygienisierung erforderlichen Temperaturen von über 55°C. Um den thermischen Hygienisierungseffekt (für Biomüll-Chargen) zu gewährleisten, ist entsprechend den verfahrensbedingten Rahmenbedingungen darauf zu achten, dass diese Mindesttemperatur über den erforderlichen Zeitraum das gesamte Material erfasst.
2. Nach dieser Phase sollte das Material so rasch wie möglich durch Belüftungs-, Lockerungs und Bewässerungsmaßnahmen unter 50 bis 55°C gehalten werden, um einen zügigen Ab- und Umbau sowie eine rasche Humifizierung und Komplexbildung (Stabilisierung zu Ton- Humuskomplexen) zu erzielen.

3.4. Verlauf der Kompostierung

Die in der Startphase der Intensivrotte vorhandenen mesophilen und thermotoleranten/thermophilen Pilze stellen zwischen 60°C und 70°C ihre Abbautätigkeit ein. Die ohne künstliche Prozesskühlung nach der Hygienisierungsphase folgende Rottephase mit Temperaturen von zum Teil deutlich mehr als 60/65°C wird von thermophilen Bakterien dominiert. Auch thermophile Actinomyceten treten auf. Im Zuge der Umwandlung der primären organischen Ausgangssubstanzen werden vorerst nur intermediäre Stoffwechselprodukte unter Energiefreisetzung gebildet. Im weiteren Verlauf der Kompostierung werden zunehmend mittel und schwer abbaubare Bestandteile der verarbeiteten Abfälle angegriffen, da die leicht abbaubaren Fraktionen zum Teil bereits in der mesophilen bzw. in der Heißrottephase veratmet worden sind. Dabei wird das Substratspektrum verändert, was eine Abnahme der mikrobiologischen Aktivität und in der Folge einen Rückgang der Temperaturen bewirkt. Sobald die Temperaturen unter 60°C absinken, entwickelt sich in Abhängigkeit vom Substrat eine aus Bakterien, Actinomyceten und Pilzen bestehende Mischpopulation [2].

Erst wenn der mikrobielle Abbauprozess soweit fortgeschritten ist, dass die erwähnten reaktionsfähigen Spaltprodukte vorliegen, können in der Folge unter Energiebindung sekundäre stabile Huminstoffe, also neue organische Verbindungen, entstehen. In weiterer Folge bilden sich mit Tonmineralen or-

ganomineralische Komplexe – es entsteht ein nur mehr schwer bzw. langfristig mineralisierbarer Dauerhumus [2].

4. Dauer des Rotteprozesses

Unter günstigen Rahmenbedingungen (C/N-Verhältnis, Feuchtigkeitssteuerung, Strukturstabilität und ausreichender Luftdurchsatz) kann für Biomüll als auch für Restmüll nach einer Behandlungszeit von 21 bis 28 Tagen in einer geschlossenen Intensivrotte eine ausreichende Stabilität für die Überführung zu einer offenen Nachrotte erreicht werden. Die tatsächliche Dauer des Rotteprozesses ist jedoch von der gewünschten Outputqualität abhängig.

5. Faktoren für eine erfolgreiche Kompostierung

5.1. Mikrobielle Abbaubarkeit

Hierunter ist die Abbau- bzw. Mineralisierungsgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Stabilität und des verfügbaren C/N-Verhältnisses der organischen Komponenten zu verstehen. Unterschieden werden leicht und schwer abbaubare organische Substanzen wie sie beispielhaft in Tabelle 4 aufgelistet sind.

Tabelle 4
Abbaugeschwindigkeiten verschiedener Stoffklassen während des Rotteprozesses [2]

Herkunft	Intensivrotte schneller Abbau	→	Nachrotte langsamer Abbau
Pflanzlich	Stärke, Zucker	Zellulose	Holz
	Fett, Fettsäuren	Hemizellulose	Lignin
	Eiweiße, Peptide	Pektin, Chitin	Keratin
	Vitamine	Fette, Öle, Wachse	
Tierisch	Kot, Harn	Gallensäuren	Gallenfarbstoffe
	Schleim, Blut		Knochen

5.2. Wassergehalt

Die ausreichende Feuchtigkeit vor allem beim Start und auch während der Intensivrotte ist vor allem deswegen unerlässlich, weil Mikroorganismen Nährstoffe und auch Sauerstoff nur in gelöster Form aufnehmen können. Reine Küchen- und Gemüseabfälle weisen Wassergehalte von 80 bis 95% in der Frischmasse auf, was bereits während Sammlung und Transport zur Bildung von Presswasser führt. In Abhängigkeit der Strukturstabilität und der Wasserkapazität der organischen Ausgangsmaterialien, können die Wassergehalte der einzelnen Materialkomponenten in einem weiten Bereich schwanken. Die Strukturstabilität gewährleistet ein ausreichendes Luftporenvolumen bei maximalen Feuchtigkeitsgehalten sowie die Ableitung überschüssigen Wassers.

5.3. Strukturstabilität

Die Strukturstabilität ist die Voraussetzung für die Erhaltung des erforderlichen Luftporenvolumens und des Gasaustausches im Intensiv- oder Nachrottematerial. Dies gilt gleichermaßen für geschlossene Reaktorsysteme als auch für offene Mieten. Ein optimaler Anteil von gehäckseltem Baum- und Strauchschnitt als Strukturgut hängt vom gewählten Intensivrotteverfahren, den Struktureigenschaften und dem Wassergehalt der übrigen Mischungspartner ab. Als Grundregel gilt: je größer der Querschnitt der Charge, desto größer die Eigenpressung und daher auch die Wahrscheinlichkeit, dass eine gleichmäßige Durchlüftung durch Konvektion („Kaminzugeffekt“ bei Mieten) bzw. auch durch die Zwangsbelüftung -auch bei hohem Strukturgutanteil- nicht mehr gewährleistet wird [2].

5.4. pH-Wert

Besonders Ausgangsmaterialmischungen mit hohen Anteilen an frischen Küchen- und Gemüseabfällen führen während der Initialphase der ersten 3 bis 7 Tage zu niedrigen pH-Werten von 4 bis 6. Diese saure Phase bewirkt eine deutliche Verzögerung des C-Abbaus („lag-Phase“) und geht einher mit dem Auftreten niederer Karbonsäuren. Eine Abdämpfung oder Verkürzung der lag-Phase kann durch eine Zugabe von Kalk bereits in einer Konzentration von 0,2% (m/m) erreicht werden. Kalkmengen über 0,4% führen jedoch zu einer stärkeren Ammoniak (NH_3) Freisetzung und somit Geruchsbelästigung [2].

5.5. C/N-Verhältnis

Das C/N-Verhältnis (sprich C zu N Verhältnis) meint das Gewichtsverhältnis von organischem Kohlenstoff zu Stickstoff in organischem Material.

Mikroorganismen benötigen, wie alle lebenden Organismen, Kohlenstoff und eine vergleichsweise geringe Menge an Stickstoff. Erhalten sie diese Elemente im richtigen Verhältnis, so vermehren sie sich rasch und können so organisches Material im Abfall schnell abbauen. Das optimale C/N-Verhältnis des Abfallmaterials liegt zum Beginn des Intensivrotteprozesses im Bereich von 25 bis 35. Bei einem größerem C/N-Verhältnis (> 35) verläuft der Abbauprozess langsamer. Bei C/N-Verhältnissen von < 20 kann es zum Entweichen von gasförmigem Ammoniak in die Atmosphäre kommen dadurch wird nicht nur die Umwelt (v.a. durch Geruchbelästigung) belastet, sondern auch die Kompostqualität verringert. Bei Abfallstoffen mit einem größerem C/N-Verhältnis (> 30) kann eine Zugabe von Stickstoff (z.B. Gülle, Harnstoff oder Klärschlamm) den Abbauprozess beschleunigen. Das Outputmaterial sollte ein C/N-Verhältnis von < 20 haben. Je höher der Stickstoffanteil im Kompost ist, desto besser ist er als organischer Dünger verwendbar [2].

In Tabelle 5 sind beispielhaft C/N-Verhältnisse verschiedener möglicher Inputmaterialien dargestellt.

Tabelle 5

Beispiele für C/N-Verhältnisse [2]

Wirtschaftsdünger		Grünabfälle	
Material	C/N-Verhältnis	Material	C/N-Verhältnis
Jauche	2–3	Rasenschnitt	12–25
Hühnerkot	10	Beetabraum	20–60
Mistkompost	10	Kartoffelkraut	25
Rindermist (stroharm)	20	Laub	30–60
Pferdemist	25	Nadelstreu	30–100
Rindermist (strohreich)	30	Stroh (Gerste, Hülsenfrüchte)	40–50
Bioabfälle		Stroh (Hafer)	60
Material	C/N-Verhältnis	Stroh (Roggen, Weizen)	100
Gemüseabfälle	10–20	Rinde	100–130
Essensreste	12–20	Baum- und Gehölzschnitt	100–150
Obstreste	15–25	Sonstiges	
Blumen- und Pflanzenabfälle	20–60	Material	C/N-Verhältnis
Küchenabfälle	23	Torf	30–50
Obst	35	Sägemehl (Vollholz)	100–500
Papierabfälle	120–170	Karton	200–500

6. Unsachgemäße Kompostierung

Folgende Punkte müssen bei der Kompostierung vermieden werden [2]:

Mischungen nach Behandlung

Die Vermischung von Nachrotte- oder Outputmaterial mit Inputmaterial muss vermieden werden [2].

„Trockenstabilisierung“

Bei falscher Materialeinschätzung bzw. Steuerung kann es in der Intensivrotte zu einer Austrocknung des Intensivrottematerials (sog. „Trockenstabilisierung“) kommen. Dies geschieht, wenn die Belüftung zu hoch und der Wassergehalt während der Intensivrotte zu gering ist. Die Folge ist, dass bei einem Austrag auf die Nachrotte und entsprechender Befeuchtung, ein erneuter intensiver Rotteprozess auf der offenen Miete einsetzt mit den für die Intensivrotte typischen Geruchsemissionen [2].

„Überhitzung“ organischer Materialien bei $> 70^{\circ}\text{C}$

Temperaturen von über 70°C sind zu vermeiden, da sich ab ca. 65°C die Abbaugeschwindigkeit in der Intensivrotte deutlich verlangsamt. Dies kann zu

Geruchsemissionen führen und weiters die Qualität des Kompostes negativ beeinflussen [2].

Literatura/Literaturverzeichnis

[1] BMLFUW, 2002 – Richtlinie für die mechanisch-biologische Behandlung von Abfällen.

[2] BMLFUW, 2005 – Stand der Technik Kompostierung – Grundlagenstudie.

ROBERT GLANZ

THEORETICAL BASIS OF COMPOSTING

Keywords: Composting, composting process, intensive composting, influence possibilities.

This article explains the theoretical background of any composting technology. It provides the reader with a deeper understanding of the biology and how to influence the process of composting.