



Aerobe biologische Behandlung von festen Abfällen aus Gerbereien

Diplomarbeit von
Martin R. PLEIL

Institut für Entsorgungs- und Deponietechnik

**Betreuer: O.Univ.Prof.Dipl.-Ing.Dr. K.E. Lorber
Dipl.-Ing. Ch. Konrad**

Chile, im Sommer 1999/2000



Eidesstattliche Erklärung

„Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Diplomarbeit selbständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche erkenntlich gemacht habe“

Martin R. Pleil



Abstract

Within the framework of the INCO-DC project „EILT“ (Reduction of Environmental Impact of Leather Tanneries) Montanuniversität Leoben/Austria investigates the biological treatment of solid waste.

Crudely spoken two different types of solid waste generated at tanneries can be distinguished: non-chromium and chromium containing waste.

Non-chromium containing waste are fleshing and split. This type of waste characterised by high water content (> 80 %), high pH – value (13 - 14) and low porosity (sludge – like) makes about 75 % of the total amount of solid waste.

Mono- & Co-Composting of this waste were investigated. Aerated windrows and reactor composting were the technologies applied at pilot – scale level.

About 20 % of the total quantity of solid waste are chromium containing leather shavings and dust.

By identifying bacteria which can use leather as nutrient source possibilities to treat this type of waste were investigated. The influence of the parameter C/N ratio, temperature, species of bacteria and residence time on this aerobic treatment was shown in laboratory scale experiments.



Inhaltsverzeichnis

A	ALLGEMEIN	10
A.1	Zusammenfassung	10
A.2	Problemstellung.....	14
A.3	Einleitung	15
B	THEORETISCHER TEIL.....	17
B.1	Lederherstellung.....	17
B.1.1	Prozess der Rindslederherstellung mittels Chromgerbung [17], [18].....	17
B.1.2	Feste Abfälle einer Gerberei [17], [19].....	20
B.1.2.1	Leimleder	20
B.1.2.2	Chromlederreststoffe	22
B.2	Grundlagen der Kompostierung.....	24
B.2.1	Begriffsbestimmung [2], [3].....	24
B.2.1.1	Kompostierung.....	24
B.2.1.2	Kompost.....	24
B.2.1.3	Rotte	25
B.2.1.4	Miete	25
B.2.2	Positive und negative Auswirkungen des Kompostes [2], [4], [11], [12], [13].....	25
B.2.2.1	Nutzen des Kompostes.....	25
B.2.2.2	Mögliche negative Auswirkungen des Kompostes.....	26
B.2.3	Ausgangsmaterialien für die Kompostierung	26
B.2.3.1	Typisch organische Abfälle [2], [10].....	27
B.2.4	Beteiligte Mikroorganismen und deren Tätigkeiten [2], [3], [4], [5], [15], [16].....	28
B.2.5	Phasen der Kompostierung [2], [3], [16].....	30
B.2.5.1	Abbauphase.....	31
B.2.5.2	Umbauphase.....	31
B.2.5.3	Aufbauphase (Reifephase)	31
B.2.6	Kompostierung von Fleischabfällen.....	31
B.2.7	Abgrenzung zur Anaerobenbehandlung [2], [8], [10].....	32
B.2.7.1	Hydrolyse.....	32
B.2.7.2	Säurebildung.....	32
B.2.7.3	Methanbildung	33
B.2.8	Sickerwasser- & Abluftproblem [1], [8], [10].....	33
B.2.8.1	Sicker- und Kondenswässer	33
B.2.8.2	Abluft.....	35
B.2.9	Ablauf und Verfahren der Kompostierung [2], [4], [5], [6], [9].....	35
B.2.9.1	Ablauf einer Kompostierung.....	36
B.2.9.2	Gebräuchliche Verfahren der Kompostierung.....	36
B.2.10	Parameter für die Überwachung und Steuerung des Rotteprozesses und deren Größenordnungen [1], [7], [10].....	40
B.2.10.1	Gehalt an organischer Substanz und deren Abbaubarkeit.....	40
B.2.10.2	Wassergehalt.....	41
B.2.10.3	Substratstruktur, Schüttgewicht und Sauerstoffgehalt	42
B.2.10.4	Nährstoffgehalt und Stickstoffumsatz.....	43
B.2.10.5	pH-Wert	44
B.2.10.6	Temperatur	44



B.2.11	Berechnungen [15].....	45
B.2.11.1	Wassergehalt der Mischung bei bekannten Massen.....	45
B.2.11.2	Masse der Materialien bei angenommenem Wassergehalt der Mischung.....	46
B.2.11.3	C/N – Verhältnis der Mischung bei bekannten Massen	46
B.2.11.4	Masse der Materialien bei angenommenem C/N – Verhältnis der Mischung.....	46
B.2.11.5	Massen von zwei Materialien bei angenommenem Wassergehalt und C/N – Verhältnis der Mischung mit drei Materialien	47
B.2.12	Anforderungen und Qualitätsmerkmale [1], [2], [7].....	47
B.2.12.1	Anforderungen an die Kompostqualität.....	47
B.2.12.2	Qualitätsmerkmale	47
B.2.13	Analyseparameter	51
B.2.13.1	Probenahme und Probeaufbereitung	51
B.2.13.2	Analysen der Frischsubstanz.....	52
B.2.13.3	Analysen in der Trockensubstanz.....	52
B.2.14	Analysemethoden.....	52
B.2.14.1	Wassergehalt	53
B.2.14.2	Maximale Korngröße.....	53
B.2.14.3	Rohdichte.....	53
B.2.14.4	Rottegrad im Selbsterhitzungsversuch	53
B.2.14.5	Pflanzenverträglichkeit mittels Kresse	54
B.2.14.6	Keimfähige Samen und austriebfähige Pflanzenteile.....	54
B.2.14.7	pH-Wert	55
B.2.14.8	Glühverlust und organischer Kohlenstoffgehalt	55
B.2.14.9	Fremdstoff- und Steingehalt.....	55
B.3	Grundlagen der Mikrobiologie.....	56
B.3.1	Grundformen der Bakterien [20], [22]	56
B.3.2	Aufbau einer Bakterienzelle [20, 22].....	56
B.3.3	Gram-positive und Gram-negative Bakterien [20], [22].....	58
B.3.4	Bakterienstoffwechsel [20].....	59
B.3.5	Wachstum und Zelltod [20], [22]	60
B.3.5.1	Vermehrung	60
B.3.5.2	Wachstumskurve	60
B.3.6	Bakteriengenetik.....	61
B.3.7	Toxische Wirkungen von Metallen auf Bakterien [21].....	61
B.3.8	Physische und biologische Eigenschaften des Chroms [21].....	62
B.3.9	Bakterienresistenz [21], [24]	62
B.3.9.1	Resistenzmechanismen allgemein.....	62
B.3.9.2	Resistenz gegenüber Metallen in Bakterien.....	62
B.3.9.3	Chromresistenz.....	64
B.3.10	Biofilm [25]	65
C	<u>PRAKTISCHER TEIL</u>	<u>66</u>
C.1	Kompostierung	66
C.1.1	Einleitung.....	66
C.1.2	Mietenkompostierung	67
C.1.2.1	Versuchsbeschreibung	67
C.1.2.2	Ergebnisse.....	71
C.1.2.3	Diskussion	86
C.1.3	Reaktorkompostierung br02	90



C.1.3.1	Versuchsbeschreibung	90
C.1.3.2	Ergebnisse	92
C.1.3.3	Diskussion	96
C.1.3.4	Ausblick	98
C.1.4	Reaktorkompostierung br03	99
C.1.4.1	Versuchsbeschreibung	99
C.1.4.2	Ergebnisse	104
C.1.4.3	Diskussion	113
C.1.4.4	Ausblick	116
C.2	Mikrobieller Abbau – Chromlederabfall	118
C.2.1	Einleitung	118
C.2.2	Versuchsbeschreibung	118
C.2.2.1	Proben der Gerberei GACEL S.A. / Concepción	118
C.2.2.2	Proben der Gerberei STOLZENBACH / Valdivia	124
C.2.2.3	Bioreaktor	125
C.2.3	Ergebnisse	126
C.2.3.1	Proben der Gerberei GACEL S.A. / Concepción	126
C.2.3.2	Proben der Gerberei STOLZENBACH / Valdivia	131
C.2.3.3	Bioreaktor	132
C.2.4	Diskussion	134
C.2.4.1	Rückschlüsse auf die Ergebnisse	134
C.2.5	Ausblick	135
D	<u>LITERATURVERZEICHNIS.....</u>	136
E	<u>ANHANG.....</u>	138

Abbildungsverzeichnis

Abbildung B-1	Prozess der Chrom-Lederherstellung (allgemein)	18
Abbildung B-2	Lebewesen in einer Kompostrotte	29
Abbildung B-3	Typische Bakterienformen	56
Abbildung B-4	Aufbau einer Bakterienzelle	57
Abbildung B-5	Begeißelungsformen von Bakterien	58
Abbildung B-6	Zellwände von Gram-positiven und Gram-negativen Bakterien	59
Abbildung B-7	Vereinfachte Darstellung der Zellteilung eines Bakteriums	60
Abbildung B-8	Wachstumskurve von Bakterien	61
Abbildung B-9	Transport von Chrom und Resistenz in <i>Alcaligenes eutrophus</i>	64
Abbildung C-1	Mietenanordnung	67
Abbildung C-2	Mietenaufbau	69
Abbildung C-3	Aufbau des Reaktors br02	90
Abbildung C-4	Aufbau der Kompostieranlage br03	100
Abbildung C-5	Reaktorkaskade eines möglichen Kompostierprozesses	117
Abbildung C-6	Replikator	120
Abbildung C-7	Schema zur Vermehrung der Bakterienkultur in Ledersuspension	121
Abbildung C-8	Schema für Auszählmethode zum Zeitpunkt t_0	121
Abbildung C-9	Schema für Auszählmethode zum Zeitpunkt t_{24}	122
Abbildung C-10	Schema zur Optimierung des C/N – Verhältnisses	123
Abbildung C-11	Bioreaktor	125

Tabellenverzeichnis

Tabelle B-1	Zusammensetzung von Maschinenleimleder	20
Tabelle B-2	Analyse von Maschinenleimleder aus verschiedenen Betrieben	21
Tabelle B-3	Zusammensetzung von Chromlederreststoffe	22
Tabelle B-4	Analyse von Chromfalzspänen	22
Tabelle B-5	Einteilung der Kompostierverfahren	36
Tabelle B-6	Definitionen der verwendeten Abkürzungen in den Berechnungen	45
Tabelle B-7	Kennwerte der Komposte	47
Tabelle B-8	Einteilungskriterien der Rottegrade	48
Tabelle B-9	Einteilung der Korngrößen	49
Tabelle B-10	Unterscheidung nährstoffarme von nährstoffreichen Komposten	50
Tabelle C-1	Wassergehalt und C/N – Verhältnis von Substrat und Co-Substraten	66
Tabelle C-2	Massen- und Volumsverhältnisse der Mietenkompostierung	69
Tabelle C-3	Daten – Miete 1	71
Tabelle C-4	Daten – Miete 2	75
Tabelle C-5	Daten – Miete 3	79
Tabelle C-6	Daten – Miete 4	82
Tabelle C-7	Massen- und Volumsverhältnisse der Reaktorkompostierung br02	91
Tabelle C-8	Daten – br02 / Versuch 01	92
Tabelle C-9	Daten – br02 / Versuch 02	93
Tabelle C-10	Daten – br02 / Versuch 03	94
Tabelle C-11	Massen- und Volumsverhältnisse der Reaktorkompostierung br03	102
Tabelle C-12	Daten – br03 / Versuch 01	104
Tabelle C-13	Daten – br03 / Versuch 02	107
Tabelle C-14	Daten – br03 / Versuch 03	110
Tabelle C-15	Probenahme bei Gerberei GACEL S.A. / Concepción	118
Tabelle C-16	Verwendete Nährböden in Petrischalen	119
Tabelle C-17	Chromkonzentrationen der PCA - Nährböden	120
Tabelle C-18	Analyse von sterilem Lederschleifstaub und Sägespäne	123
Tabelle C-19	Mengenverhältnisse für verschiedene C/N - Verhältnisse	123
Tabelle C-20	Probenahme bei Gerberei STOLZENBACH / Valdivia	124
Tabelle C-21	Verwendete Nährböden in Petrischalen	124
Tabelle C-22	Versuche mit dem Bioreaktor	125

Tabelle C-23	Wachstum der Bakterienkolonien auf verschiedenen Nährböden.....	126
Tabelle C-24	Auswahl und Charakterisierung der zwei Bakterienstämme I.....	127
Tabelle C-25	Auswertung der Bakterienanzahl (N) von 2 Stämmen bei t_0 und t_{24}	127
Tabelle C-26	chemische Analysen des Lederschleifstaubes zum Zeitpunkt t_0 und t_{24}	128
Tabelle C-27	Bakterienanzahl von Serratia bei t_0 und t_{24} mit unterschiedlichem C/N.....	131
Tabelle C-28	Wachstum von Bakterienkolonien auf MAC.C, Cr.....	131
Tabelle C-29	Auswahl und Charakterisierung der zwei Bakterienstämme II.....	132
Tabelle C-30	Abbauleistung mit verschiedenen C/N – Verhältnissen im Bioreaktor.....	132
Tabelle C-31	Abbauleistung mit verschiedenen Temperaturen im Bioreaktor.....	133
Tabelle C-32	Abbauleistung nach 7 und 14 Tage im Bioreaktor.....	134

Diagrammverzeichnis

Diagramm B-1	Temperaturentwicklung in der Kompostmiete.....	30
Diagramm B-2	Abbaugeschwindigkeiten nieder- und hochmolekularer Reststoffe.....	41
Diagramm B-3	Glühverlust während der Rotte.....	41
Diagramm B-4	Wassergehalt in der Rotte.....	42
Diagramm B-5	Schüttdichte in der Rotte.....	42
Diagramm B-6	Sauerstoffgehalt in der Rotte in 25 cm Höhe.....	43
Diagramm B-7	C/N-Verhältnis in der Rotte.....	44
Diagramm B-8	Temperatur in der Rotte.....	45
Diagramm C-1	Temperaturverlauf in der Miete 1.....	71
Diagramm C-2	Zeitlicher Verlauf des Wassergehaltes der Miete 1.....	72
Diagramm C-3	Zeitlicher Verlauf des pH-Wertes der Miete 1.....	72
Diagramm C-4	Zeitlicher Verlauf des Glühverlustes der Miete 1.....	73
Diagramm C-5	Wachstumsfaktor der Kompostmischungen von Miete 1 im Vergleich zur Einheitserde... 74	74
Diagramm C-6	Temperaturverlauf in der Miete 2.....	76
Diagramm C-7	Zeitlicher Verlauf des Wassergehaltes der Miete 2.....	76
Diagramm C-8	Zeitlicher Verlauf des pH-Wertes der Miete 2.....	77
Diagramm C-9	Zeitlicher Verlauf des Glühverlustes der Miete 2.....	77
Diagramm C-10	Wachstumsfaktor der Kompostmischungen von Miete 2 im Vergleich zur Einheitserde... 78	78
Diagramm C-11	Temperaturverlauf in der Miete 3.....	79
Diagramm C-12	Zeitlicher Verlauf des Wassergehaltes der Miete 3.....	80
Diagramm C-13	Zeitlicher Verlauf des pH-Wertes der Miete 3.....	80
Diagramm C-14	Zeitlicher Verlauf des Glühverlustes der Miete 3.....	81
Diagramm C-15	Temperaturverlauf in der Miete 4.....	82
Diagramm C-16	Zeitlicher Verlauf des Wassergehaltes der Miete 4.....	83
Diagramm C-17	Zeitlicher Verlauf des pH-Wertes der Miete 4.....	84
Diagramm C-18	Zeitlicher Verlauf des Glühverlustes der Miete 4.....	84
Diagramm C-19	Wachstumsfaktor der Kompostmischungen von Miete 4 im Vergleich zur Einheitserde... 85	85
Diagramm C-20	Wachstumsfaktoren verschiedener Kompostmischungen mit Einheitserde von Kresse ... 89	89
Diagramm C-21	Temperaturverlauf in Reaktor br02 / Versuch 01.....	92
Diagramm C-22	Temperaturverlauf in Reaktor br02 / Versuch 02.....	93
Diagramm C-23	Temperaturverlauf in Reaktor br02 / Versuch 03.....	95
Diagramm C-24	Wachstumsfaktor der Kompostmischungen von br02 / Versuch 03..... im Vergleich zur Einheitserde.....	96
Diagramm C-25	Temperaturverlauf der Rotte in Reaktor br03 / Versuch 01.....	105
Diagramm C-26	Zeitlicher Verlauf des Wassergehaltes neben der Temperatur in br03 / Versuch 01.....	105
Diagramm C-27	Zeitlicher Verlauf der pH - Werte des Substrates und des Sickerwassers..... in br03 / Versuch 01.....	106
Diagramm C-28	Zeitlicher Verlauf des Glühverlustes neben der Temperatur in br03 / Versuch 01.....	106
Diagramm C-29	Zeitlicher Verlauf der Volumenreduktion und des Sickerwasseranfalls..... neben der Temperatur in br03 / Versuch 01.....	107
Diagramm C-30	Temperaturverlauf der Rotte in Reaktor br03 / Versuch 02.....	108
Diagramm C-31	Zeitlicher Verlauf des Wassergehaltes neben der Temperatur in br03 / Versuch 02.....	108
Diagramm C-32	Zeitlicher Verlauf der pH - Werte des Substrates und des Sickerwassers..... in br03 / Versuch 02.....	109



Diagramm C-33	Zeitlicher Verlauf des Glühverlustes neben der Temperatur in br03 / Versuch 02.....	109
Diagramm C-34	Zeitlicher Verlauf der Volumenreduktion und des Sickerwasseranfalls neben der Temperatur in br03 / Versuch 02	110
Diagramm C-35	Temperaturverlauf der Rotte in Reaktor br03 / Versuch 03	111
Diagramm C-36	Zeitlicher Verlauf des Wassergehaltes neben der Temperatur in br03 / Versuch 03	111
Diagramm C-37	Zeitlicher Verlauf der pH - Werte des Substrates und des Sickerwassers in br03 / Versuch 03.....	112
Diagramm C-38	Zeitlicher Verlauf des Glühverlustes neben der Temperatur in br03 / Versuch 03.....	112
Diagramm C-39	Zeitlicher Verlauf der Volumenreduktion und des Sickerwasseranfalls neben der Temperatur in br03 / Versuch 03	113
Diagramm C-40	Temperaturverlauf der Rotte in Reaktor br03 / Versuch 01 bis 03.....	114
Diagramm C-41	Bakterienwachstum von Pseudomonas und Serratia in Nährmedien	127
Diagramm C-42	Lederabbau im Bioreaktor mit verschiedenen C/N – Verhältnissen.....	132
Diagramm C-43	Lederabbau im Bioreaktor mit verschiedenen Temperaturen	133

Fotoverzeichnis

Foto C-1	Mietenaufbau	68
Foto C-2	Ausgetrocknete fleshing.....	86
Foto C-3	Maden im Belüftungsrohr.....	87
Foto C-4	Unvollständiger Abbau (weißer Brei)	88
Foto C-5	Befüllung von br02 mit fleshing.....	97
Foto C-6	Wasserbehälter wb01	101
Foto C-7	Biofilter bf01	102
Foto C-8	Lederschleifstaub steril (Vergrößerung: 4000).....	129
Foto C-9	Serratia, Bakterienstamm Nr.° 10 (Vergrößerung: 4000).....	129
Foto C-10	Pseudomonas, Nr.° 4 und Lederschleifstaub (Vergrößerung: 4000).....	130
Foto C-11	Biofilm von Serratia, Nr.° 10, auf Lederschleifstaub (Vergrößerung: 4000)	130

A Allgemein

A.1 Zusammenfassung

Der erste Teil dieser Arbeit beschäftigt sich mit der Rindslederherstellung durch Chromgerbung und deren Einsatz- und Abfallströme. Ebenso wird auf die Problematik der festen Abfallstoffe einer Gerberei und deren Behandlungsmöglichkeiten eingegangen.

Das darauffolgende Kapitel behandelt die biologische aerobe Behandlung von organischen Abfällen, der Kompostierung. Allgemeine Kompostierungsgrundlagen, Kompostierverfahren, Parameter für die Steuerung des Prozesses, Berechnungen, Anforderungen und Qualitätsmerkmale, sowie Analyseparameter sind die Kernpunkte in diesem Kapitel.

Der letzte Punkt im theoretischen Teil bildet eine Abhandlung über die Grundlagen der Mikrobiologie. Dabei wurde hauptsächlich Augenmerk auf den Aufbau von Bakterien, deren Wirkungsweise und Resistenz gegenüber Chrom, sowie der Fähigkeit Biofilme zu bilden, gelegt.

Der zweite Teil dieser Arbeit befasst sich mit der praktischen Anwendung der aeroben Behandlung auf feste Gerbereiabfälle. Diese werden in chromhaltige und nicht-chromhaltige Abfälle eingeteilt.

Das Kapitel „Kompostierung“ wird in Mieten- und Reaktorkompostierung unterteilt und beschreibt jeweils die durchgeführten Versuche, Ergebnisse und gewonnenen Erkenntnisse.

Die anfallenden festen, nicht-chromhaltigen Abfälle sind Fleisch-, Haut- und Fettreste, die bei der Aufbereitung der zu gerbenden Haut in einer Gerberei entstehen. Dieses Unterhautbindegewebe hat eine Dicke bis 40 mm, eine Fläche von etwa 0,25 m² und hat einen hohen Wassergehalt (> 80 %). Dieser Abfall, im Fachjargon als „Maschinenleimleder“ bezeichnete, wurde in der Gerberei mit Äscherchemikalien, wie Natriumsulfid und Kalk, versetzt.

Es existieren Verfahren zur Verwertung von „Maschinenleimleder“ (fleshing). Benötigt werden dafür relativ hohe Mengen an Energie, wobei meist mit einer Nachbehandlung gerechnet werden muss (z.B. Behandlung der proteinhaltigen Abwässer, Entsorgung eines wässrigen Schlammes). Geringe Erlöse der Produkte, hohe Investitions- und Betriebskosten führen zu einer sehr langen Amortisationszeit. Eine andere Problematik stellt sich bei der Erzeugung von Futtermittel aus tierischem Fleisch, man braucht nur an nahe zurückliegende Skandale und Seuchen denken (BSE).

Die Entsorgung dieser Abfälle auf (ungesicherten) Deponien ist in den Nicht-Industriestaaten, „Stand der Technik“.

Abfälle wie diese, in einem südamerikanischen Land (Chile) zu behandeln und sich derer nicht einfach zu entledigen, im besten Fall deponieren, war die eigentliche Problemstellung der Arbeit. Es sollen somit für chilenische Gerbereien Wege aufgezeigt werden, wie sie kurzfristig und durch geringe Investitionskosten bis zu 75% ihres Abfalls verwerten können.

Da es sich bei den Abfällen um organisches Material handelt, liegt eine biologische Behandlung – anaerob oder aerob - nahe.

Die Anaerobbehandlung (Gewinnung von Biogas) bringt sowohl einen größeren anlagentechnischen Aufwand, aber auch eine komplexere und schwierigere Prozessführung mit sich. Daher wurde von Untersuchungen auf der Anaerobschiene Abstand genommen.

Aus dieser Überlegung heraus ist die Entscheidung für die Aerobbehandlung (Kompostierung) gefallen. Der schwer zu kompostierende Fleischabfall hat einen hohen Wassergehalt und ist stickstoffreich sowie strukturlos (breiförmig), womit eine Monokompostierung ausscheidet. Als gangbarer Weg wurde die Co-Kompostierung (Mischung mit kohlenstoffhaltigen, strukturreichen Substrat) gesehen.

Da Gerber keine Kompostproduzenten sind und in Chile der Markt für Kompost bis dato nur sehr schwach entwickelt ist, wurde folgende Zielhierarchie ausgearbeitet.

Ziel der Untersuchungen ist es, einen biologischen Prozess zu entwickeln, der es Gerbereien erlaubt, mit einem Minimum an Arbeitsaufwand, Betriebskosten und Investitionskosten und geringst möglichen negativen Umweltauswirkungen aus dem Abfallprodukt „fleshing“ ein biologisch stabiles Produkt herzustellen. Dieses Produkt soll auf seine Einsatzmöglichkeiten als Düngemittel beurteilt und optimiert werden.

Der Kompostqualität wurde aus obenstehenden Gründen bewusst die niedrigste Priorität zugeordnet.

Diese Behandlungsart kann nun auf 2 verschiedenen Wegen durchgeführt werden:

- ♦ **Mietenkompostierung:** Sogenannte „low-level technology“, die ohne großen finanziellen Aufwand und Kenntnis komplexer Prozessabläufe vom jeweiligen Gerber angewandt werden kann.
Die bei diesen Untersuchungen gewonnenen Erkenntnisse (Substratmischungen, Substratbeimischungen zur Strukturgebung, Belüftung, Bewässerung, Kompostqualität, etc.) sollen ausreichend sein, um Kompostmieten im großtechnischen Stil für chilenische Gerbereien anzulegen.
- ♦ **Reaktorkompostierung:** Zwei entscheidende Nachteile der Mietentechnik – hoher Platzbedarf und lange Rottedauer – sollen durch Entwicklung eines Reaktors zum kontrollierten biologischen Abbau der Fleisch- und Fettabfälle beseitigt werden. Da Gerbereien häufig in Ballungsgebieten angesiedelt sind, scheint ein platzsparender Lösungsansatz von Vorteil zu sein. Durch Variation der Prozessparameter soll das Kompostierverfahren in Hinblick auf Kompostqualität und Wirtschaftlichkeit optimiert werden.

Für die aerobe Behandlung der Fleischabfälle mit der low-level technology wurden vier Versuchsmieten mit unterschiedlichen Substratbeimischungen im Freien errichtet. Diese Tafelmieten, mit je etwa drei Kubikmeter Materialvolumen, wurden mit einer Druckbelüftung zur Sauerstoffversorgung versehen. Durch die richtige Einstellung der Parameter C/N – Verhältnis, Wassergehalt und pH-Wert, konnte ein Ansteigen der Temperatur und somit auch ein Abbau der organischen Bestandteile verzeichnet werden.

Die Ergebnisse der Mietenkompostierung zeigten, dass prinzipiell ein Abbau der organischen Gerbereiabfälle bei allen Mieten stattfand. Eine Miete erreichte jedoch nie die Hygienisierungstemperatur. Diese, sowie eine andere Miete, beinhalteten nach einer Rottezeit von ca. zwei Monaten noch einige ausgetrocknete, unabgebaute Fleischanteile.

Aufgrund der schlechten Homogenisierbarkeit der Gerbereiabfälle mit dem Strukturmaterial, kam es immer wieder zu Problemzonen innerhalb der Miete, wie zu anaeroben aber auch ausgetrockneten Zonen. Es zeigte sich sehr schnell, dass eine alleinige Luftzuführung der Miete für einen vollständigen Abbau der fleshing zu wenig war. Regelmäßiges, arbeitsaufwendiges Umsetzen der Mieten war notwendig.

Der Witterungseinfluss auf die verhältnismäßig kleinen Mieten war so groß, dass es trotz der täglichen Betreuung nicht gelungen ist, eine annähernd optimale Kompostierung durchzuführen. Dies kann am besten anhand der Temperaturkurven gezeigt werden.

Fliegen, Maden und andere Lebewesen sowie Geruchsbelästigung, die durch die anaeroben Zonen entstehen, brachten ein großes Akzeptanzproblem mit sich.

Trotz langer Rottezeiten, einer platzbeanspruchenden und arbeitsintensiven Kompostiermethode und sehr vielen Problemen konnte immerhin hochwertiger Kompost produziert werden.

Aus der Vielzahl der Probleme und der nicht optimalen Prozessführung konnte gezeigt werden, dass die Mietenkompostierung für die Kompostierung von fleshing nicht geeignet ist.

Aufgrund der durch die Mietenkompostierung gewonnenen Ergebnisse, wurde ein Reaktor geplant und gebaut, der die oben genannten Probleme weitgehend beseitigen sollte. In ihm soll die temperaturintensive, zeitlich kürzere Frischrotte ablaufen.

Die langandauernde, volumenmäßig kleinere Reiferotte sollte in Mieten zum fertigen Kompost heranreifen.

Dieser Reaktor besteht aus einem isolierten Behälter mit kontinuierlicher Temperaturmessung, einer Wasserzufuhr, Sickerwasserableitung, Luftzufuhr und – ableitung, einer Probenahmeöffnung und einer Austragsschnecke.

Die Luft wurde regelbar von einem Kompressor geliefert, wobei sie vor dem Eintritt in den Reaktor mit Wasser gesättigt wurde. Die geruchsbehaftete Abluft wurde kollektiv gefasst und mittels Biofilter gereinigt.

Der Wasserbehälter diente primär als Sammelgefäß der entstehenden Sickerwässer, die dann weiter zur Bewässerung des Rottegutes und des Biofilters verwendet wurden. Außerdem wurde in ihm die Prozessluft mit Wasser gesättigt, um eine Bilanzierung der Anlage vornehmen zu können.

Der ca. 600 l fassende Reaktor wurde mit Fleischabfällen und verschiedenen Substratbeimischungen gefüllt und stellt somit einen geschlossenen Prozess dar. Diese Versuche wurden hinsichtlich Optimierung des Lufteintrages, des Fleischeinsatzes und der Rottezeit untersucht.

Die Ergebnisse der Reaktorkompostierung zeigten, dass bei dieser witterungsunabhängigen Methode hohe Temperaturen über einen längeren Zeitraum und somit auch vollständige Hygienisierungen erreicht wurden. Die Umsetzung der organischen Abfallstoffe in Frischkompost dauerte im Vergleich zur Mietenkompostierung ein Viertel der Zeit.

Durch die gezielte Erfassung und Behandlung des Abluftstromes im Biofilter kam es zu keiner merklichen Geruchsbelästigung. Das Abwasser wurde im Kreis geführt und diente zur Bewässerung des Rottensystems. Fliegen, Maden oder andere Lebewesen konnten aufgrund des geschlossenen Systems nicht an das Rottegut kommen und eine Belästigung hervorrufen.

Probleme bei der Reaktorkompostierung ergaben sich eher auf der verfahrenstechnischen Seite. Durch die Brückenbildungen des Rottegutes erwies sich der alleinige Schneckenaustrag als unzureichend. Ein weiteres Augenmerk ist noch der korrosiven Atmosphäre innerhalb des Reaktors zu widmen, die den Einsatz von normalem Kohlenstoffstahl erschwert.

Im letzten Kapitel des praktischen Teils, „Mikrobieller Abbau – Chromlederabfall“, wird die Arbeit mit Bakterien, deren Kultivierung, Isolierung und Prüfung auf Chromresistenz, sowie Optimierungsversuche für den Lederabbau im Bioreaktor, deren Ergebnisse und Aussichten, beschrieben.

Die zweite Art von festen Abfällen die in Gerbereien anfallen sind chromhaltiger Natur und betragen ca. 20 % der gesamten festen Abfälle. Dieser Abfall, der nach der Chromgerbung entsteht, ist bereits Leder, wobei die Chromkonzentrationen um 2 – 3 % der trockenen Ledermasse liegen.

Die Problematik bei anfallenden dreiwertigen Chromoxid liegt darin, dass es bei Oxidationsvorgängen zu dem weitaus gefährlicheren Cr (VI) umgewandelt werden kann.

In den Industriestaaten gibt es einige Konzepte zur Behandlung und Verwertung von Chromlederresten, jedoch landet der Großteil davon auf einer Deponie (ca. 90 %). Vermeidung ist wie in jedem Produktionsprozess oberstes Gebot.

Aufgabe des Leders ist es eine hohe Beständigkeit gegenüber seiner Umwelt aufzuweisen. Es ist somit biologisch schwer abbaubar.

Trotzdem liegt aufgrund des hohen organischen Anteils von Leder (ca. 70 %) ein mikrobieller Abbau nahe. Einziges Hindernis ist die mangelnde Chromresistenz der meisten Bakterien.

Ziel ist es, chromresistente Bakterien (in chromhaltiger Atmosphäre) zu isolieren, sowie die Parameter und Verfahrensstufen für einen effizienten Lederabbau zu ermitteln. Das Abfallvolumen soll dadurch minimiert und der anfallende anorganische Reststoff mit Chrom angereichert werden. Dieser kann bei hoher Chromkonzentration möglicherweise im Stahlwerk eingesetzt werden.



In den Versuchen konnten zwei Bakterienstämme mit hoher Chromresistenz (> 10 mMol) isoliert werden. Diese Bakterienstämme nutzen Leder als Nahrungsquelle und vermehrten sich. Elektronenmikroskopische Aufnahmen zeigten die Bildung von Biofilmen auf Leder. Analysen brachten die Bestätigung des Lederabbaus und eine leichte Aufkonzentrierung von Chrom im Reststoff.

In einer weiteren Versuchsserie wurde in einem Bioreaktor eine Bakteriengemeinschaft, nicht wie vorher ein einzelner Bakterienstamm, getestet. Diese zeigte sich als weniger chromresistent.

Durch Variation des Nahrungsangebotes (des C/N – Verhältnisses), der Temperatur und der Prozesszeit, konnten die Optimalbedingungen dieser Bakterien für den Lederabbau ermittelt werden. In Versuchen mit der Bakteriengemeinschaft fand nur ein geringer Abbau des Leders und Wachstum der Bakterien statt, wobei es zu keiner Bildung von Biofilmen kam.

A.2 Problemstellung

Wird über Gerbereiabfälle gesprochen, so sind meist Abwässer gemeint und die festen Abfälle vernachlässigt. Quantitativ betrachtet, entstehen jedoch große Mengen an festen Abfällen. Pro eingesetzte 1000 kg Rohhaut entstehen etwa 500 bis 600 kg feste Abfälle, wobei in einem klein- bis mittelständischen chilenischen Betrieb ca. 3000 kg Rohhaut pro Tag verarbeitet werden.

Es existieren bereits Verfahren zur Behandlung und Verwertung dieser festen, nicht-chromhaltigen Gerbereiabfälle.

Klein- und mittelständische Betriebe in Chile haben meist nicht die notwendigen finanziellen Mittel, diese Abfälle selbst zu behandeln. Zudem fehlt der komplette Industriezweig, der eine externe Abfallbehandlung durchführen könnte, wie z.B. die Tierkörperverwertung.

Aus diesen Gründen werden die anfallenden, nicht-chromhaltigen festen Gerbereiabfälle meistens deponiert. Die Deponien in Chile haben jedoch nicht den „Stand der Technik“, den man in Industriestaaten finden kann. Diese bestehen meist nur aus ungesicherten Halden, die mit jeglichem Müll unkontrolliert aufgefüllt werden.

Ziel ist es daher, eine Behandlung für die festen, nicht-chromhaltigen Gerbereiabfälle zu entwickeln, die ohne großen finanziellen Aufwand und Kenntnis komplexer Prozessabläufe vom Gerber angewandt werden kann.

Aufgrund des hohen organischen Anteils liegt eine biologische Behandlung nahe.

Der hohe Wassergehalt (> 80 %) und die geringe Porosität des „Maschinenleimleders“ würden für die biologische anaerobe Behandlung (Gewinnung von Biogas) sprechen. Wegen des höheren anlagentechnischen Aufwandes, der komplexeren Prozessführung und den weiterzubehandelnden Reststoff, wurde jedoch nicht für dieses Verfahren entschieden.

Die aerobe biologische Behandlung deckt sich am besten mit oben stehenden Zielerfordernissen. Deswegen wurde die Kompostierung zur Minimierung und Umwandlung der festen, nicht-chromhaltigen Gerbereiabfälle in ein biologisch stabiles Produkt gewählt.

Mittels zweier Kompostiersysteme, der Mieten- und Reaktorkompostierung, soll das Kompostierverhalten von „Maschinenleimleder“ untersucht werden. Durch Variation der Prozessparameter und der eingesetzten Co-Substrate soll ein Maximum an eingesetzten Abfällen in minimaler Zeit zu einem biologisch stabilen Produkt umgewandelt werden.

Die zweite Gruppe fester Gerbereiabfälle entsteht nach der Chromgerbung und beinhaltet somit dreiwertige Chromverbindungen mit Konzentrationen von ca. 2 – 3 % der trockenen Ledermasse. Zu diesen Abfällen zählen Chromfalzspäne, Chromlederstaub und sonstige Lederreste, die biologisch schwer abbaubar sind.

Es existieren bereits Verfahren zur Behandlung und Verwertung dieser chromhaltigen Gerbereiabfälle, wobei es bei manchen Verfahren (Verbrennung) zur Aufoxidierung zu den weitaus problematischeren sechswertigen Chromverbindungen kommen kann.

Der Hauptanteil der Chromlederreste wird jedoch deponiert (ca. 90 %). Die Eluierbarkeit der Chromverbindungen, sowie gesetzliche Richtlinien (Deponierverbot von Materialien mit mehr als 5 % organischem Kohlenstoff) machen die Deponierung problematisch bzw. in Zukunft in einigen Ländern finanziell untragbar. Es müssen daher attraktive Behandlungsmöglichkeiten gefunden werden, die diese anfallenden Abfallmengen mit einfachen und kostengünstigen Prozessen in stabile Produkte umwandeln.

Wegen des hohen organischen Anteils der Chromlederreste (ca. 70 %) wurde eine biologisch aerobe Behandlung angestrebt. Dabei sollen chromresistente Bakterien das vorhandene Leder als Nahrungsquelle nutzen und es dadurch abbauen. Der anorganische, mengenmäßig geringere Reststoff soll soweit mit Chrom aufkonzentriert werden, dass man ihn z.B. in einem Stahlwerk einsetzen und somit recyceln kann.

Es müssen daher zunächst chromresistente Bakterien gefunden und isoliert werden. Durch Variation des Nahrungsangebotes (C/N – Verhältnisses), der Temperatur und der Prozesszeit, sollen die Optimalbedingungen dieser Bakterien ermittelt werden.

A.3 Einleitung

Leder und seine Herstellung gehört zu den ältesten handwerklichen Kulturgütern der Menschheit und ist noch heute ein bedeutender Industriezweig. Dabei wird die Rohhaut, ein Nebenprodukt der Fleischherstellung, in verschiedenen Schritten und Prozessen in ein dauerhaft konserviertes Produkt umgewandelt. Für den Herstellprozess revolutionierend wirkte sich vor allem die Entdeckung der Chromgerbung, Mitte des 19. Jahrhunderts, aus. Mit der progressiven Technisierung und dem Einsatz immer neuerer Chemikalien vergrößerten sich auch die negativen Umweltauswirkungen.

In der heutigen Zeit werden in Industrieländern sämtliche Emissionen und Abfälle einer Gerberei, aufgrund gesetzlicher Verordnungen, kontrolliert behandelt und/oder entsorgt. In den restlichen Ländern der Welt fehlen oft nicht nur die gesetzlichen Voraussetzungen, sondern fast immer die finanziellen Möglichkeiten und Anreize, sowie das Umweltbewusstsein der Bevölkerung.

Diese Diplomarbeit wurde im Rahmen eines internationalen Projektes der Europäischen Gemeinschaft in Concepción/CHILE durchgeführt.

Das INCO-DC (International Cooperation with Developing Countries) Projekt „EILT“ (Reduction of Environmental Impact of Leather Tanneries) wird von 6 Universitäten getragen und beschäftigt sich mit der umweltgerechten Behandlung von Abfallströmen aus Gerbereien. Zu den oben genannten Universitäten zählen die Montanuniversität Leoben/Österreich, TU-Berlin/Deutschland, Universidad de Santiago de Compostela/Spanien, Universidad de la Frontera – Temuco/Chile, Escuela Politécnica Nacional – Quito/Ecuador, Universidad de Concepción/Chile.

Die Montanuniversität Leoben ist neben der Funktion als Projektkoordinator für die Behandlung der festen Gerbereiabfälle zuständig.

In südamerikanischen Ländern ist der Stand der Technik in punkto Abfallvermeidung, -entsorgung und -behandlung leider noch sehr gering. Ein Umweltbewusstsein findet man wenn überhaupt, dann nur in der jungen Generation. Bestehende und entstehende Umweltgesetze, die den Umgang mit Abfällen regeln sollen, werden zur Zeit nur sehr wenig exekutiert. Resultierend daraus landet der Löwenanteil der entstehenden Abfälle auf (wilden) Deponien, in Flüssen und im Meer.

Abfallbehandlungsanlagen, z.B. Müllverbrennungsanlagen, Tierkörperverwertungen, existieren momentan noch nicht in Chile, weshalb alle Abfälle deponiert werden müssen. Die Deponierung findet unter katastrophalen Umständen statt, so dass es eigentlich nur wilde und ungesicherte Deponien gibt, die in Zukunft noch zu Problemfällen werden können (Grundwasser- und Deponiegasproblematik).

In den Entwicklungsländern wirkt sich auch die geringe Finanzkraft problematisch auf den Umweltschutz aus, der dann oft zum Überlebensfaktor wird. Finanzielle Anreize z.B. Pfandsysteme oder Förderungen, fehlen bzw. sind erst im Entstehen.

Daher werden zur Zeit die festen Abfälle von chilenischen Gerbereien hauptsächlich deponiert.

Die nicht chromhaltigen Gerbereiabfälle werden in Österreich mehrheitlich in der Tierkörperverwertung entsorgt. Diese spaltet das Fleisch in Fett und Eiweiß auf und erzeugt somit Ausgangsprodukte für einen weiteren Industriezweig. Da diese Produkte auch zu Futtermittel verarbeitet werden und es in jüngster Vergangenheit zu Seuchen (BSE) aufgrund von Tierfutter kam, ist diese Behandlungsschiene umstritten.

Das Kompostieren ist eines der ältesten, natürlichsten und sinnvollsten Verfahren, um biologische Abfallmengen zu reduzieren und kontrolliert in neue Produkte umzuwandeln. Diese bewährte Behandlungsmethode inkludiert theoretischer Weise auch Fleischabfälle. Praktisch wird in der Literatur davon abgeraten, da es zu einer Vielzahl von Problemen



kommen kann. Fleisch weist einen hohen Wassergehalt und geringe Porosität auf, seine Fettanteile sind schwer abzubauen und es ist Nährboden für Insekten und Kleinlebewesen. Jedoch ist es organischer Natur und somit abbaubar.

Die Vorteile der Kompostierung liegen in der relativ einfachen technischen Durchführbarkeit, den geringen Kosten und dem leicht produzierbaren, verkaufsfähigen Kompost. Dieser kann als Dünger und Bodenverbesserungsmittel eingesetzt werden.

Nachteilig wären die lange und arbeitsintensive Behandlungsdauer (ca. 2 Monate bis zum fertigen Kompost) zu nennen.

Die Hauptmenge der chromhaltigen Gerbereiabfälle (ca. 90 %) wird in Österreich deponiert. Problematisch ist jedoch die Eluierbarkeit des Chroms, womit Chromfalzspäne als Problemstoffe gesehen werden. Der hohe organische Anteil (ca. 70 %) lässt eine ordnungsgemäße Deponierung in Inertstoff- und Reststoffdeponien nicht zu. Aufgrund dieser Stoffeigenschaften kann eine Deponierung nur in einer sehr teuren Reaktordeponie stattfinden.

Aufgrund des hohen organischen Stoffanteils ist es naheliegend, die gegerbten Lederabfälle mit chromresistenten aeroben Bakterien abzubauen.

Diese biologische Abfallbehandlungsmethode reduziert die anfallenden Abfallmengen und produziert einen chromhaltigen Reststoff, der z.B. in der Stahlerzeugung eingesetzt werden kann.

Nachteilig bei diesem Verfahren sind die längeren Behandlungszeiten verglichen mit z.B. einer Verbrennung.

Grundsätzlich muss gesagt werden, dass entsprechend der Hierarchiepyramide eines modernen Abfallwirtschaftskonzeptes an erster Stelle die Abfallvermeidung zu stehen hat.

B Theoretischer Teil

B.1 Lederherstellung

Die von Haaren und Unterhautbindegewebe befreite, gegerbte tierische Haut nennt man Leder. Dieses Produkt ist durch die Gerbung dauerhaft konserviert und gegenüber äußeren Einwirkungen sehr widerstandsfähig. Durch längerer Einwirkung von Feuchtigkeit fault es nicht, wird im trockenen Zustand nicht hornartig hart und geht nicht durch Einwirkung von heißem Wasser in Leim über.

Die Gerbstoffe (pflanzlich oder mineralisch) lagern sich in die aus kollagenen Fasern bestehende Hautsubstanz ein und führen zu einer Vernetzung der Hautfasermoleküle. Resultierend daraus wird die Hautsubstanz verfestigt und ihr Quellvermögen nimmt stark ab.

Diese Diplomarbeit handelt von der biologischer Behandlung fester Abfälle einer chromleder-erzeugenden Gerberei. Aus diesem Grund wird in den folgenden Punkten auf den allgemeinen Herstellprozess von Chromleder und die dabei anfallenden festen Abfälle eingegangen.

B.1.1 Prozess der Rindslederherstellung mittels Chromgerbung [17], [18]

☞ Weiche

In diesem Prozessschritt erhält die durch Lagerung und Konservierung härter gewordene Haut ihre ursprüngliche Weichheit zurück.

Salze (zwecks Konservierung zugegeben) werden aus dem Hautfasergefüge herausgelöst, die Haut nochmals gereinigt und die Rohhaut erlangt ihren ursprünglichen Wassergehalt.
Dauer: 6 – 24 h

☞ Äscher

Haare, Oberhaut und Bindegewebe werden mittels chemischer und mechanischer Methoden entfernt.

Man unterscheidet:

- ♦ haarzerstörende Äscher: bessere Lederqualität, weniger arbeitsintensiv, höhere Abwasserbelastung, keine Rückgewinnung der Haare möglich
- ♦ haarerhaltende Äscher: arbeitsintensiv, geringere Abwasserbelastung, Rückgewinnung der Haare

Haarzerstörende Äscher werden hauptsächlich für Rinderhäute verwendet, wobei meistens eine Kombination von Calciumhydroxid und Natriumsulfid eingesetzt wird.

Natriumsulfid spaltet die Disulfid-Brücke des Keratin-Moleküls und löst dadurch die Haarsubstanz und die Epidermis.

Calciumhydroxid lockert durch alkalische Quellung die Struktur des Kollagen-Gewebes auf und löst interfibrillare, nicht-kollagene Proteine.

☞ Entfleischen

Das an den Häuten anhaftende Fleisch und das Unterhautbindegewebe werden in einem mechanischen Vorgang entfernt.

Die Rückstände „Maschinenleimleder“ (fleshing) bestehen aus Fett- und Eiweißstoffen und sind mit Sulfid und Kalk behaftet.

Moderne Gerbereien entfleischen vor dem Äscher (Grüntfleischung). In diesem Fall ist das anfallende „native Leimfleisch“ nicht durch Chemikalien verunreinigt.

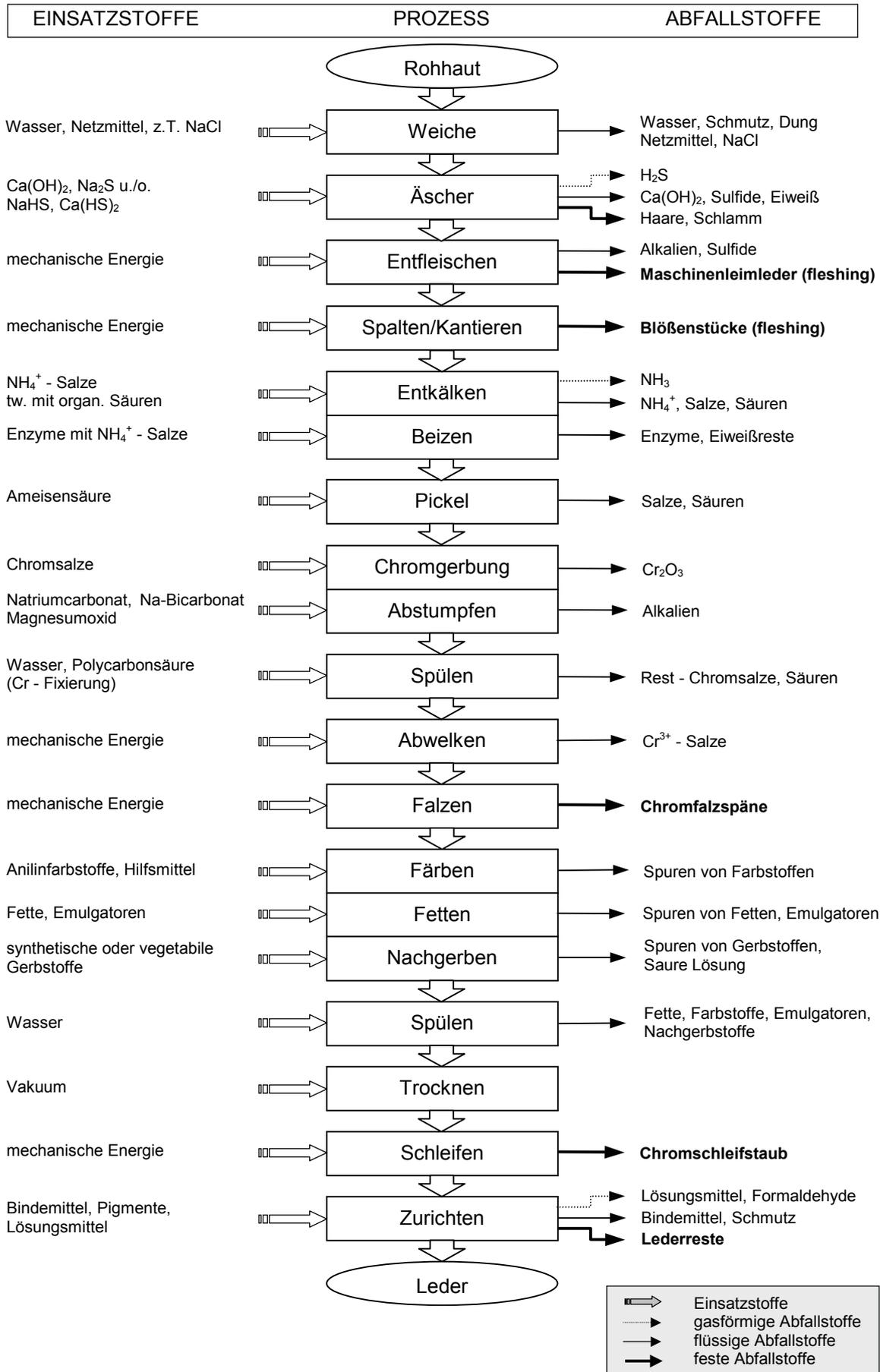


Abbildung B-1

Prozess der Chrom-Lederherstellung (allgemein)

☞ Spalten

Bei kräftigen Häuten kann das entfleischte Hautmaterial in zwei Schichten gespalten werden. Der obere Narbenspalt wird zu „Narben-“ oder „Vollleder“ und der untere „Fleischspalt“ zu weniger wertvollen „Spaltleder“ verarbeitet.

☞ Kantieren

Ist das Abschneiden von Hautfetzen.

☞ Entkälken

Entfernung des in der Blöße gebundenen (physikalisch und chemisch) Kalks. Gleichzeitig erfolgt eine teilweise Entquellung, wobei der pH – Wert in den Neutralbereich gesenkt wird, damit die Gerbstoffe bis in die feinsten Fibrillar–Zwischenräume des Hautfasergefüges eindringen können.

☞ Beizen

Entkälken und Beizen erfolgen meist in einem Arbeitsgang.

Die Beize bewirkt einen Hautaufschluss und die Entfernung von Oberhaut-, Haar- und Pigmentresten.

☞ Pickel

Vor dem Einwirken der Gerbstoffe muss die bloßgelegte Lederhaut (Blöße) von einem pH – Wert ca. 8 auf 3 – 4 sauer gestellt werden. Gleichzeitig wird vollständig entkälkt. Eine neutrale Blöße würde der Chrombrühe Säure entziehen, was zu einer Übergerbung führt.

☞ Chromgerbung

Bei diesem Vorgang wird das verderbliche Hautmaterial mit Chromsalzen in das dauerhaft konservierte und gegenüber vielen äußeren Einwirkungen widerstandsfähige Leder umgewandelt. Dabei wird der dreiwertige Chromgerbstoff in das Hautfasergefüge eingelagert und somit stabilisiert.

Das Leder, das nach 6 - 8 Stunden Gerbdauer entsteht, nennt man „wet blues“, nach seiner blauen Färbung.

☞ Abstumpfen

Dieser Vorgang dient zur besseren Vernetzung der Gerbstoffe. Abstumpfen wird meist gleich in der Gerbflotte angewandt.

☞ Spülen

Überschüssige, nicht gebundene Gerbstoffanteile und Neutralsalze werden mit Wasser entfernt.

☞ Abwelken

Ist ein mechanischer Entwässerungsvorgang

☞ Falzen

Um eine einheitliche Lederdicke zu erhalten, wird die Fleischseite mechanisch behandelt. Die entstehenden festen Abfälle nennt man (Chrom-) Falzspäne.

☞ Färben, Fetten, Nachgerben

Bei diesem Vorgang werden die optisch-modischen Eigenschaften des Leders erzielt.

- ◆ Färben: wasserlösliche organische Farbstoffe (Anilinfarben)
- ◆ Fetten: wasserlösliche oder emulgierbare Stoffe (Licker) um das Leder weich und geschmeidig zu machen.
Lederfasern müssen voneinander isoliert werden und frei beweglich sein.

- ◆ Nachgerben: synthetisch oder vegetabile Füllstoffe und Kombinationen um eine vollere dichtere Lederstruktur zu erhalten, den „Narben“ (oberen Narbenspalt) zu verfeinern oder zu verdichten

☞ Spülen

Letzter Reinigungsvorgang mit Wasser

☞ Trocknen

Der Wassergehalt von Leder nach dem Gerben beträgt ca. 65 – 70 % und soll auf eine Endfeuchte von ca. 15 % getrocknet werden. Wichtig ist das Leder vor dem Trocknen glatt zu ziehen.

Die Trocknungsdauer variiert stark mit der Behandlungsart und schwankt von mehreren Tagen (Trocknen an der Luft) bis 2 – 4 min bei Vakuumapparaten.

☞ Schleifen

Dieser mechanische Vorgang dient zur Verfeinerung der Oberfläche. Dabei fallen feine (Chrom-) Schleifstäube an.

☞ Zurichten

Sind all jene abschließenden Arbeiten, um dem Leder sein endgültiges Aussehen, sowie deren physikalischen und chemischen Eigenschaften zu geben.

- ◆ mechanische Prozesse: Bügeln, Narbenprägen, Schleifen, Entstauben,...
- ◆ chemische Prozesse: Zurichtemittel (wässrige oder lösungsmittelhaltige Polymerharze)

B.1.2 Feste Abfälle einer Gerberei [17], [19]

B.1.2.1 Leimleder

Tabelle B-1

Zusammensetzung von Maschinenleimleder

Quelle:

Branchenkonzept für die Ledererzeugenden Betriebe Österreichs, Wien 1992

Kenndaten	Einheit	Werte
Kollagen	[%]	15 - 20
Talg	[%]	10
Wassergehalt	[%]	75 - 85
Sulfid	[%]	0,005 – 0,5
Kalk	[%]	5

In den Prozessschritten „Entfleischen“ und „Spalten“ fallen feste, nicht-chromhaltigen Abfälle an. Pro Tonne verarbeiteter Rohhaut entstehen etwa 500 kg dieser Fleisch-, Fett- und Hautreste, die mit Sulfid und Kalk behaftet sind.

Der beim Entfleischen anfallende organische Abfall liegt in breiähnlicher, schwach bis nicht-strukturierter Konsistenz vor. Weiters fallen in diesem Prozessschritt Abschnitte mit einer Dicke von bis zu 40 mm und einer Fläche von etwa 0,25 m² an.

Beim Prozessschritt Spalten entstehen Hautlappen und –fetzen mit einer Dicke von 0 – 10 mm, mit einer Fläche von 0,25 bis 1 m².

Tabelle B-2 Analyse von Maschinenleimleder aus verschiedenen Betrieben

Quelle: Branchenkonzept für die Ledererzeugenden Betriebe Österreichs, Wien 1992

Kenndaten	Einheit	sulfidfreier Äscher	herkömmlicher Äscher
pH - Wert	[-]	11,6	12,7
Alkalireserve	[-]	0,31	1,00
Sulfidgehalt	[%]	0,00	0,06
Wassergehalt	[%]	75,7	81,5
Trockensubstanz	[%]	24,3	18,5
Sulfatasche	[% TS]	19,0	23,4
Fett	[% TS]	63,0	45,4
Hautsubstanz	[% TS]	18,0	31,3

Die derzeitige Entsorgungsschiene der Fleischabfällen aus chilenischen Gerbereien ist die Deponierung auf einer „ungesicherten“ Deponie.

Mögliche mittel- und langfristige Lösungen zur Vermeidung, Verminderung und Verwertung dieser Abfälle:

- ♦ besseres Entfleischen beim Abzug der Haut
- ♦ Grümentfleischen mit angeschlossener Aufarbeitung des nativen Leimleders
- ♦ Aufarbeitung des Maschinenleimleders unter Gewinnung von Talg und Proteinmehl (Verfahren wie in Tierkörperverwertung)
- ♦ Biologische anaerobe Behandlung des Leimleders
- ♦ Biologische aerobe Behandlung des Leimleders

Der erste Punkt ist Angelegenheit der Schlachthöfe und der anderen Hautlieferanten, die für eine bessere Entfleischung mit höheren Kosten (ev. Kauf einer neuen Maschine) zu rechnen hätten. Die Motivation und Bereitschaft diesen Schritt zu gehen fehlt, da es keine finanziellen Anreize gibt.

Die Gerberei kann den Anfall von Maschinenleimleder (Unterhautbindegewebe mit Chemikalien versetzt) insofern vermeiden, indem sie vor dem Äscher „grümentfleischt“. Das native Leimleder ist nicht mit Chemikalien versetzt und kann somit leichter verwertet werden (z.B. Entsorgung über die Tierkörperverwertung).

Grümentfleischen ist aber mit höheren Kosten im Betrieb verbunden (Kauf einer neuen Maschine,...).

Fehlt die anschließende Entsorgungskette für das native Leimleder z.B. die Tierkörperverwertung, so bringt es der Gerberei keine Anreize und Motivationen, diese kostenspieligere Entfleischungsmethode einzuführen.

Die thermische Trennung in die Komponenten Fett und Eiweiß ist nur dann interessant, wenn es einen entsprechenden Absatzmarkt der Produkte gibt und man diese Anlage wirtschaftlich betreiben kann.

Mit hohem Energieeinsatz können aus 1000 kg Leimleder ca. 80 kg Proteinmehl und je nach Fettgehalt ca. 100 kg Rohfett gewonnen werden.

Bei der anaeroben Behandlung erhält man energiereiches Methangas, aber auch einen (unproblematisch) zu entsorgenden wässrigen Schlamm.

Probleme ergeben sich durch die relativ schwierige Steuerung des Prozesses, der langen Inkubationszeit (bis 6 Monate) und Korrosionen (durch den H₂S – Anteil im Methangas).

Während die anaerobe Behandlung von nativem Leimfleisch schon durchgeführt wird, war die Kompostierung von Maschinenleimleder bisher wenig verbreitet.

Vermeidungs- und Verwertungsmöglichkeiten sollen daher verstärkt untersucht werden. Chromfalzspäne können einerseits durch genaueres Falzen und optimalere Spaltstärkeneinstellung, andererseits durch chromfreie Hauptgerbung vermieden werden. Chromfreies Leder hat andere Eigenschaften als das chromgegerbte Leder und kann deswegen nicht überall eingesetzt werden.

Behandlungs- und Verwertungsmöglichkeiten von Chromfalzspänen

- ◆ thermische Behandlung (Verbrennung)
- ◆ chemische Behandlung zur Entchromung
- ◆ Fixierung der Chrom III – Verbindungen
- ◆ biologische Behandlung mit Bakterien
- ◆ Einbindung in eine keramische Matrix
- ◆ Lefa – Herstellung

Bei der Verbrennung muss darauf geachtet werden, dass keine Chrom VI – Emissionen in Staubform entstehen.

Vorteile ergeben sich in der Nutzung der Wärmeenergie, der Reduzierung des Volumens und der Aufkonzentrierung der Chrom III – Verbindungen in der Asche. Das zurückgewonnene, behandelte Chrom könnte wieder in den Gerbprozess eingesetzt werden.

Die chemische Behandlung unterscheidet eine oxidative Entgerbung und eine Entgerbung durch Extraktionsverfahren. Bei beiden Verfahren wird ein Großteil des Chroms aus der Lederfaser herausgelöst. Dadurch kann einerseits das gewonnene Chrom wieder in den Gerbprozess eingesetzt, andererseits das chromfreie Leder leichter verwertet werden.

Eine Entchromung über 90 % ist schwierig und nur sehr kostenaufwendig zu erreichen.

Für die Erreichung einer besseren Deponierfähigkeit kann der pH - Wert neutralisiert werden, wobei es zur Fixierung der Chrom III – Verbindungen kommt.

Neuerdings laufen auch Versuche, chromgegerbtes Leder mittels Bakterien abzubauen. Unter aeroben Verhältnissen werden die Lederabfälle von den thermophilen Bakterien „aufgefressen“. Im stark volumsreduzierten, übrigbleibenden Reststoff liegt das Chrom in angereicherter Form vor. Dieses Chrom kann zurückgewonnen und erneut in den Gerbprozess eingesetzt werden.

Die biologische Behandlung der Chromfalzspäne mit Bakterien war Teil dieser Arbeit.

Durch Einbindung der Chromfalzspäne in den Ziegelherstellungsprozess, können diese einerseits entsorgt und andererseits die notwendigen Porenvolumen für die Ziegel hergestellt werden. Verfärbung der Ziegel und Akzeptanzprobleme bei der Vermarktung verhindern zur Zeit den Einsatz dieser Methode in Österreich.

Lefa - Materialien werden aus Lederabfällen zu Platten geformte Produkte umgearbeitet. Diese eigenständige Waren finden Einsatz wie z.B. in Teilbereichen von Futterleder. Die aufwendige Aufarbeitung, sowie der relativ kleine Absatzmarkt für Lefa sind die Schwachpunkte dieses Verfahrens.

B.2 Grundlagen der Kompostierung

B.2.1 Begriffsbestimmung [2], [3]

B.2.1.1 Kompostierung

Biologischer Abbau (Rotte) von aufbereiteten biogenen Abfallstoffen, die verfahrensmäßig gesteuert werden kann oder selbst abläuft. Es sind stoffliche, biologische und kompostierungstechnische Randbedingungen einzuhalten, damit der natürlich ablaufende biologische Vorgang ein hochwertiges Produkt, den Kompost, liefert.

Bei den stofflichen und biologischen Bedingungen handelt es sich um den Input, während die kompostierungstechnischen Bedingungen die Prozessführung und Betriebsbedingungen des Reaktors kennzeichnen.

Organische Abfallstoffe können durch die Kompostierung verwertet und in ein wertvolles Produkt umgewandelt werden.

B.2.1.2 Kompost

Verrottungsprodukt aus mechanisch aufbereiteten biologischen Abfällen gegebenenfalls unter Zugabe von Strukturstoffen. Der Kompost dient als Bodenverbesserungsmittel (durch den Aufbau von wertvollen Humusstoffen für die Pflanzennahrung und Bodenbelebung), Dünger und Bodenauflockerung und aktiviert das Bodenleben.

Kompostunterscheidungskriterien:

☞ vorwiegend verwendete Ausgangsmaterialien:

- ◆ Biokompost: aus Bio-, Garten- und Parkabfällen
- ◆ Rindenumus: aus Schälrinden
- ◆ Klärschlammkompost: hauptsächlich aus Klärschlamm

☞ Anwendungszweck:

- ◆ Mulchkomposte: zur Bodenabdeckung
- ◆ Erdkomposte: als Bodenersatz
- ◆ Substratkomposte: als Mischkomponenten für Kultursubstrate

☞ Rottegrad: (Maß für den Gehalt an biologisch abbaubaren Stoffen)

- ◆ Kompostrohstoff: Rottegrad I
- ◆ Frischkompost: Rottegrad II und III, Gut mit höheren Gehalten an leicht abbaubaren Stoffen
- ◆ Fertigkompost: Rottegrad IV und V, Endprodukt der Kompostierung, wobei die leicht abbaubaren organischen Stoffe weitgehend biologisch umgesetzt sind

☞ Korngröße:

- ◆ feinkörnige Komposte (Partikelgröße 0 - <12 mm)
- ◆ mittelkörnige Komposte (<25 mm)
- ◆ grobkörnige Komposte (<40 mm)

☞ Nährstoffgehalt:

- ◆ nährstoffreiche Komposte
- ◆ nährstoffarme Komposte

B.2.1.3 Rotte

Biologischer Um- und Abbau organischer Substanzen im vorwiegend aeroben Bereich.

An diesem Vorgang sind vor allem aerobe und fakultativ anaerobe – das sind aerobe Mikroorganismen, die durch anaerobe Prozesse (Gärungen) auch ohne Sauerstoff leben können – Bakterien, Aktinomyzeten und Schimmelpilze beteiligt. Die organischen Abfallstoffe dienen dabei als Nährstoffe für die Mikroorganismen, die daraus Kohlendioxid, Wasser, Ammoniak und Wärme produzieren.

Krankheitserreger werden durch Temperaturen im Bereich von mehr als 60°C in der Rotte und der Bildung von natürlichen Antibiotika unschädlich gemacht, Nährstoffe in nicht übelriechende Gase und Kompost umgewandelt.

B.2.1.4 Miete

Organisches Material wird stufenweise auf ein Haufenwerk aufgeschichtet. Die Kompostmiete besitzt eine langgestreckte Form, sollte nicht höher als 1,20 m sein, wobei die Größe und der Betrieb im wesentlichen von der Sauerstoffversorgung der Mikroorganismen abhängt. In der Praxis wird zwischen Dreiecks- und Trapezmiete unterschieden.

B.2.2 Positive und negative Auswirkungen des Kompostes [2], [4], [11], [12], [13]

B.2.2.1 Nutzen des Kompostes

Durch die Kompostierung kann man die Abfallmenge um 30 Massenprozent verringern. Sie ist somit für Städte und Gemeinden ein wichtiger Beitrag zur Abfallreduktion und Bereitstellung von Humusprodukten.

Manche Böden sind zu schwer, unbelebt oder können wegen zu hohem Sandgehalt nicht genug Wasser und Nährstoffe speichern. Durch richtigen Einsatz von hochwertigen Komposten kann man eine Verbesserung des Bodens und damit auch der Qualität der Ernte erreichen.

☞ Komposte verbessern bodenphysikalische Eigenschaften:

- ◆ hohes Porenvolumen
- ◆ großes Wasserspeichungsvermögen
- ◆ stabile Struktur der Bodenkrümel
- ◆ gute Durchlüftung
- ◆ schnelle Erwärmung des Bodens im Frühjahr durch die dunkle Farbe
- ◆ bessere Befahr- und Belastbarkeit der Böden
- ◆ leichtere Bodenbearbeitung

☞ Komposte unterstützen das Bodenleben bei seiner Tätigkeit

- ◆ um durch Humusabbau nachhaltig Nährstoffe für die Pflanzen bereitzustellen
- ◆ um die einzelnen Bodenteilchen stabil zum Krümelgefüge zu verbinden
- ◆ Krankheitserregern, die sich im Boden befinden, entgegenzuwirken
- ◆ gegen Bodenversauerung durch ihren Kalkgehalt entgegenzuwirken

☞ Komposte enthalten wertvolle Bestandteile für die Pflanzenernährung

- ◆ pflanzenverfügbare Nährstoffe
- ◆ mittel- und langfristig nachlieferbare Nährstoffe
- ◆ Spurenelemente in bedeutenden Mengen
- ◆ sehr viele Anlagerungsplätze für Nährionen

B.2.2.2 Mögliche negative Auswirkungen des Kompostes

B.2.2.2.1 Pflanzenunverträglichkeit

Anstatt der gewünschten fördernden Wirkung, kann Kompost auch das Pflanzenwachstum hemmen. Dies ist vor allem der Fall, wenn im Kompost zu hohe Salzgehalte, Hemmstoffe (organische Säuren, phenolische Verbindungen), Sauerstoffmangel im Wurzelbereich, eine ungünstige Stickstoffdynamik (mikrobielle N-Festlegung), phytotoxische Gase aber auch induzierte Nährstoffmängel (Mg-Mangel bei zu hohen K-Gehalten) vorherrschen.

Frischkompost ist im Vergleich zu Fertigkompost, aufgrund der unvollständigen Kompostierungsprozesse, pflanzenunverträglicher. Für eine exakte Aussage sollte aber eine Pflanzenverträglichkeitsprüfung vorgenommen werden, da unter Umständen Frischkomposte pflanzenverträglicher sein können, wenn in Fertigkomposten anaerobe Abbauprodukte angereichert werden.

B.2.2.2.2 Nährstofffrachten

Einer der wichtigsten Parameter für die Güte des Kompostes ist der Gehalt an Nährstoffen. Probleme können nur dann entstehen, wenn zu viel von nährstoffreichem Kompost auf das Land aufgebracht wird, aus dem dann Nitrat in das Grundwasser ausgewaschen werden kann. Die Auswaschung von Nitrat ist stark von der Position des Nitratstickstoffes im Boden (der Tiefe, wo sich der Nitratstickstoff befindet), vom Klima und von der Bodenbeschaffenheit abhängig. So ist z.B. ein leichter, wasserdurchlässiger Boden bei viel Niederschlag und warmen Temperaturen höher auswaschgefährdet, als ein mittelschwerer bis schwerer eher dicht gelagerter Boden bei geringen Niederschlägen und kalter Witterung.

Durch angepasste Kompostmengen sowie den geeigneten Anwendungszeitpunkten und –techniken kann man unerwünschte Umweltauswirkungen und auch gute Pflanzenerträge erzielen.

B.2.2.2.3 Schadstofffrachten

Im wesentlichen handelt es sich hier um Schwermetalle und organischen Schadstoffe.

Schwermetalle können überall vorkommen und sind einerseits – in geringen Dosen - Spurenelemente, haben aber andererseits eine humantoxologische Wirkung und können daher Menschen, Tiere und Pflanzen nachhaltig schädigen. Um dies zu verhindern gibt es für die Problemschwermetalle - wie Blei, Cadmium, Chrom, Kupfer, Nickel, Quecksilber und Zink – Grenzwerte, die nicht überschritten werden dürfen.

Zu den organischen Schadstoffen zählen vor allem chlorierte Kohlenwasserstoffe wie chlorierte Pestizide, polychlorierte Biphenyle, polychlorierte Dibenzodioxine und –furane sowie die polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffe (PAK). Während der Kompostierung ist mit einem Abbau der organischen Schadstoffe zu rechnen.

Der Gehalt von Schadstoffen im Kompost ist generell stark abhängig von der Herkunft der Rohstoffe. Durch die getrennte Sammlung von organischen Rohmaterialien, gezielte Rohstoffaufbereitung und Ausschluss von Problemstoffen aus Konsumgütern kann man beide Schadstofffrachten reduzieren.

B.2.3 Ausgangsmaterialien für die Kompostierung

Prinzipiell eignen sich für die Kompostierung alle organischen Naturstoffe. Es werden daher hauptsächlich Abfälle aus dem Grünland und der Nahrungsmittelverarbeitung verwendet.

Zucker und Stärke, die wie Zellulosen und Hemizellulosen zu den Kohlehydraten zählen, werden dabei am leichtesten abgebaut. Es folgen Proteine, Fette und schließlich Hemizellulose, Zellulose, Lignin und Wachse.

Hauptgruppen der nativ organischen Naturstoffe:

- ◆ Lignin, Hemizellulose und Zellulose
- ◆ Zucker und Stärke
- ◆ Fette und Wachse
- ◆ Proteine

Um einen günstigen Rotteverlauf zu gewährleisten und zur Optimierung des Kompostierprozesses, müssen folgende biochemische bzw. verfahrenstechnische Maßnahmen getroffen werden:

- ◆ richtiges Nährstoffverhältnis C/N
- ◆ passende Feuchtigkeit
- ◆ ausreichende Luftzufuhr
- ◆ genügend verfügbare organische Substanz
- ◆ gute Durchmischung, Partikelgröße, Struktur und Schüttgewicht
- ◆ pH-Wert
- ◆ Schadstoffgehalt

Einschränkungen zur Kompostierung gibt es bei den Materialien, die durch Schadstoffe belastet sind, welche während des Kompostiervorganges nicht abgebaut werden können und sich zum Teil auch noch anreichern. Zu diesen Schadstoffen zählen Schwermetalle, organische Schadstoffe wie chemische Rückstände von Pflanzenschutzmitteln, chlorierte Kohlenwasserstoffe und polychlorierte Biphenyle (PCB).

Allgemeine Kriterien an Kompostrohstoffe:

- ◆ Sortenreine Erfassung
- ◆ Schad- und Fremdstoffarmut
- ◆ Eignung im Hinblick auf Aufbereitung, Abbaubarkeit, Kompostierbarkeit und notwendige Rottezeit
- ◆ Eignung im Hinblick auf die angestrebte Qualität des Kompostes

B.2.3.1 Typisch organische Abfälle [2], [10]

B.2.3.1.1 Bioabfall

Bioabfall hat einen relativ hohen Anteil strukturarmer Materialien, deswegen muss man bei der Kompostierung auf eine gute Mischung mit Strukturmaterialien achten.

- ◆ Küchenabfälle: Lebensmittel und Speisereste, Obst- und Gemüsereste, in kleinen Mengen gespritzte Schalen von Südfrüchten, Kaffeesatz und Teereste inklusive Filter oder Beutel, zerkleinerte Eierschalen
- ◆ Blumenerde, Topfpflanzen und abgestorbene Stängel von Sommerblumen
- ◆ Haarschnitt, Kleintiermist und Einstreu (kein mineralisches Katzenstreu: nimmt zuviel Flüssigkeit aus dem Kompost auf)
- ◆ Verpackungsabfälle aus Stroh und Zellulosederivate, kleine Mengen an Haushalts- und Zeitungspapier

nicht auf den Kompost sollen

- ◆ kranke Pflanzen oder Pflanzenteile: Krankheitserreger könnten unter Umständen nicht abgetötet werden
- ◆ größere Mengen von gekochtem Essen sowie Suppen, Saucen: sind sehr feucht und locken Ungeziefer an
- ◆ Asche aus Holz und Kohle
- ◆ Exkremate größerer Tiere (Katzen, Hunde)
- ◆ Knochen und Fischabfälle
- ◆ Nussschalen: verrotten zu langsam
- ◆ Fette oder Öle in größeren Mengen
- ◆ Leder und Gummi
- ◆ große Mengen Schalen von Südfrüchten: verrotten schlecht

- ♦ Metalle, Glas, Porzellan, Kunststoffe, Medikamente, Hygienepapiere, Wegwerfwindeln, Zigarettenkippen/-asche, bunt bedrucktes Papier

B.2.3.1.2 Garten- und Grünabfälle

Diese Abfälle haben einen sehr hohen Anteil an strukturbildenden Stoffen, die alleine schlecht verrotten. Aus diesem Grund sollen sie bei der Kompostierung mit Material mit geringer Struktur gemischt werden.

- ♦ Rasenschnitt und Mähgut von Straßenrändern
- ♦ Baum- und Gehölzschnitt
- ♦ Laub, Schilfschnitt und Wasserkraut
- ♦ kleine Mengen an Fallobst
- ♦ Pflanzenreste
- ♦ Friedhofsabfälle

Problematisch sind Verunreinigungen von z.B. Kränzen oder Blumengebinden durch Metall oder Kunststoffe, wie beispielsweise bei Friedhofsanlagen, aber auch Böschungsmähgut von stark befahrenen Straßen, das mit Schwermetallen behaftet sein kann.

B.2.3.1.3 Organische Abfälle und Reststoffe aus Gewerbe

Dieser Bereich ist gekennzeichnet durch:

- ♦ Forstwirtschaftliche Abfälle wie Astwerk, Schlagabraum und Windbruch, (die für die Kompostierung auf jeden Fall zerkleinert werden müssen) Holzspäne, Sägemehl
- ♦ Landwirtschaftliche Abfallstoffe wie Überschussstroh, verdorbenes Heu, Rübenblattreste, Festmist vermischt mit Strukturträger (Stroh), Flüssigmist. Diese Abfallstoffe weisen meist einen hohen Wassergehalt und schlechte Struktureigenschaften auf und sind deshalb mit Strukturbildner zu mischen.
- ♦ Produktionsabfälle wie Trester, pflanzliche Rückstände aus der Ölfruchtverarbeitung, pflanzliche Rückstände aus der Nahrungs- und Genussmittelproduktion z.B. Abfälle aus Großküchen und Kantinen, Panseninhalte vom Schlachthof, Rinden, Rückstände von Kartoffelerzeugnissen, Milch-, Fisch-, Getränke-, Gemüsekonserven- und der Heilmittelproduktion

B.2.3.1.4 Biokunststoffe

Das sind Kunststoffe die biologisch vollständig abgebaut und daher einer Kompostierung zugeführt werden können.

Sie bestehen im wesentlichen aus natürlichen Polyestern oder aus modifizierten Stärken (aus Mais oder Weizen).

Das Problem liegt hierbei in der Verwechselbarkeit zu anderen, nicht verrottenden Plastikmaterialien, die der Endverbraucher oft nicht unterscheiden kann.

B.2.4 Beteiligte Mikroorganismen und deren Tätigkeiten [2], [3], [4], [5], [15], [16]

Der aerobe Kompostierungsprozess basiert auf dem Stoffwechsel (=Metabolismus) der Mikroorganismen. Dieser Prozess umfasst alle biochemischen Vorgänge, wie den Aufbau, Umbau, die Erhaltung der Körpersubstanz und die Aufrechterhaltung seiner Funktionen. Die Stoffwechselaktivität ist abhängig von der Sauerstoffverfügbarkeit, der Temperatur und der Feuchtigkeit des Aufgabematerials.

Bei der Kompostierung mineralisieren aerobe Mikroorganismen einerseits einen Teil der organischen Bestandteile des biologischen Abfalls, d.h. anorganische Ionen werden dabei freigesetzt, die dann von Pflanzen als Nährstoffe aufgenommen werden können. Als Endprodukte entstehen Kohlendioxid, Wasser und Mineralsalze.

Die Energie, die die Mikroorganismen für diese Arbeit benötigen, erhalten sie aus den organischen Stoffen, wobei nun die einfachen organischen Stoffe durch den Stoffwechsel in komplizierte neue organische Verbindungen umgewandelt werden, d.h. es erfolgt die Huminisierung: Kohlenstoffverbindungen werden in Huminsäuren, Humine und Fulvosäuren – den Humus – umgewandelt.

Aerobe Mikroorganismen benötigen zum Leben Wasser, da sie die Nährstoffe nur aus wässriger Lösung aufnehmen können und Sauerstoff, den sie aus der Luft beziehen.

Mit Hilfe des Sauerstoffes werden die Kohlenstoffverbindungen entweder vollkommen bis zur Endstufe Kohlendioxid und Wasser oder unvollkommen, deren Endprodukte einer anderen Mikrobenart als Nahrung und Energiequelle dienen kann, oxidiert.

Lebensbereiche der Bakterien werden in folgenden Temperaturzonen eingeteilt:

- ♦ Psychrotolerante (Bakterien, Schimmelpilze) bei -4 bis 30°C
- ♦ Mesophile (Bakterien, Actinomyceten) bei 20 bis 45°C
- ♦ Thermophile (Bakterien, Actinomyceten, mesophile Sporen) bei 45 bis 65°C

Die an einem Rottevorgang beteiligten Mikroorganismen sind:

- ♦ aerobe und fakultativ anaerobe Bakterien (vorwiegend Stäbchen und Endosporenbildner)
- ♦ Aktinomyceten (Strahlenpilze)
- ♦ Schimmelpilze
- ♦ Algen und Protozoen

	<p>Aerobe Bakterien,</p> <p>Bazillen, Kokken, Spirillen, mesophil, thermophil, ernähren sich von organischem Material</p>
	<p>Aktinomyceten</p> <p>pilzähnliche Bakterien, mesophil, thermophil ernähren sich von organischem Material</p>
	<p>Hefe und Schimmelpilze</p> <p>mesophil ernähren sich von organischem Material</p>
	<p>Protozoen</p> <p>wie Pantoffeltierchen und Rädertierchen spielen eine untergeordnete Rolle beim Abbau mesophil</p>

Abbildung B-2 Lebewesen in einer Kompostrotte

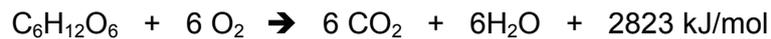
Quelle:

<http://www.merian.fr.bw.schule.de/beck/skripten/bs11-21.htm>

Die Mikroorganismen verwenden beim aeroben Stoffwechsel ca. ein Fünftel des organischen Kohlenstoffes für den Baustoffwechsel, der Rest steht dem Betriebsstoffwechsel und somit zur Energiegewinnung zur Verfügung. Die dabei freigesetzte chemische Energie tritt in Form von Wärme auf und führt zur Selbsterhitzung des Rottegutes.

B.2.4.1.1 Selbsterwärmung des Kompostes

Mikroorganismen benötigen Nährstoffe, die als Baustoff sowie als Energielieferant dienen. Ein häufig in der Natur vertretener Nährstoff ist die Glucose, die entweder als einfacher „Traubenzucker“, als Bestandteil von zweifachen Zuckern – z.B. normaler Rübenzucker – aber auch als Baustein von „Biopolymeren“ – also in langkettigen bzw. verzweigten Strukturen wie z.B. der Zellulose – vorliegt. In diesem energiereichen Glucosemolekül liegt der Wasserstoff durch Bindung an den Kohlenstoff in einen metastabilen Zustand vor. Mikroorganismen lösen den Wasserstoff wieder aus der Kohlenstoffbindung und setzen ihn in einer „biologischen Knallgasreaktion“ unter Freisetzung von Energie um. Die Glucose wird dabei zu Kohlendioxid und Wasser exotherm „verbrannt“.



Die Zusammensetzung der Population der Mikroorganismen in der Rotte ist eng an die Wärmeentwicklung gekoppelt.

B.2.5 Phasen der Kompostierung [2], [3], [16]

Wie bereits im Kapitel 2.4 erwähnt, ist die Rotte ein exothermer biologischer Oxidationsprozess, bei dem es zu Temperaturentwicklungen bis ca. 70°C kommt. Diese Selbsterhitzung ist aus biologischen und hygienischen Gründen notwendig, da auf der einen Seite die Tätigkeit der Organismen stark erhöht wird und auf der anderen Seite pathogene Keime und Parasiten, bei einer mindestens drei Wochen anhaltenden Temperatur von 55°C oder bei einer mindestens 14 Tage anhaltenden Temperatur von mehr als 65°C (mit einem neutralen bis leicht alkalischen pH-Wert und einem Anfangswassergehalt von ca. 45 bis 50%), abgetötet werden.

Der kontinuierliche Ablauf einer Rotte kann in drei Phasen eingeteilt werden, die durch ihre spezifische Temperatur, den pH-Wert und ihre unterschiedlichen Bodenlebewesen charakterisiert sind.

- ◆ Abbauphase
- ◆ Umbauphase
- ◆ Aufbauphase

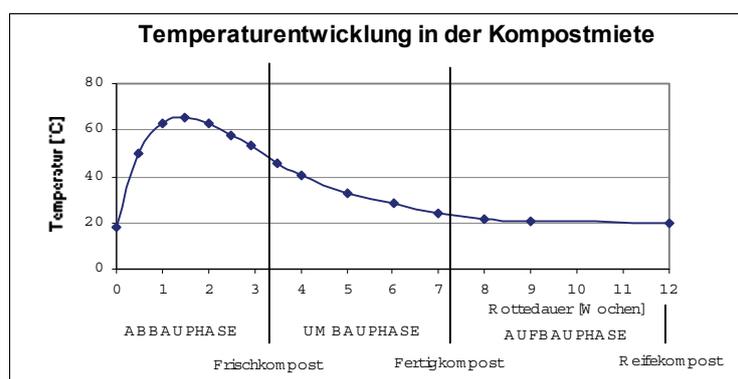


Diagramm B-1

Temperaturentwicklung in der Kompostmiete

Quelle:

U. Krogmann, „Kompostierung: Grundlagen zur Einsammlung und Behandlung von Bioabfällen unterschiedlicher Zusammensetzung“ Economica Verlag GmbH, 1994,

B.2.5.1 Abbauphase

In dieser 1.Phase, die etwa drei bis vier Wochen dauert, können Temperaturen von 50 bis 70°C erreicht werden.

Die mesophilen Mikroorganismen (bis etwa 40°C) ernähren sich zu Beginn der Rotte von den leicht abbaubaren Substanzen wie Zucker, Eiweiß und Stärke. Bei diesem Vorgang wird, aufgrund zahlreich vorhandener Säurebildner, das ursprünglich neutrale bis leicht basische Ausgangsmaterial angesäuert, sodass nun der organische Säuregehalt zunimmt.

Es setzt nun ein Temperaturanstieg ein, wobei die mesophilen Mikroorganismen absterben, aber thermophile und thermotolerante Mikroorganismen den Abbauprozess weiter übernehmen oder weiterführen. Sind 50°C erreicht, treten massiv thermophile Pilze und Aktinomyzeten auf.

Über 65°C ist das Temperaturoptimum thermophiler Pilze schon überschritten, darum übernehmen nun sporenbildende Bakterien den Abbauprozess. Diese zersetzen zusätzlich zu den leicht abbaubaren Stoffen auch Zellulose und Hemizellulose. Wegen der Freisetzung von Alkali- und Erdalkalitionen, sowie wegen der Verwertung der organischen Säuren steigt der pH-Wert wieder an.

Die Grenze der mikrobiologischen Aktivität liegt etwa bei 75°C. Durch exotherme chemische Reaktionen kann eine weitere Temperaturerhöhung trotzdem stattfinden, was aber wegen der nun auftretenden reinen Substanzverluste tunlichst verhindert werden sollte.

Als Stoffwechselprodukte erhält man kleine „Bausteine“ wie Nitrat, CO₂, Wasser und Ammoniak. Die Nährstoffe, die in der organischen Substanz gebunden sind, werden herausgelöst und in die ursprüngliche mineralische Form übergeführt (Mineralisierung).

B.2.5.2 Umbauphase

Diese nun anschließende Phase streckt sich über einen Zeitraum von der vierten bis zur achten bzw. zehnten Woche, wobei sich die Temperatur in der Rotte wieder langsam auf 40 bis 45°C senkt. Die Stoffwechsellätigkeit wird in diesem Temperaturbereich von mesophilen Mikroben und Kleintieren übernommen, wobei hauptsächlich Zellulose weiter zersetzt und Lignine, vorwiegend von Hutpilzen, abgebaut werden.

Die mineralisierten Nährstoffe werden als Bausteine zu einem „Humuskomplex“ zusammengeführt. Die organischen Ausgangsstoffe und -strukturen sind nun zu einem großen Teil aufgelöst. Man kann das am gesetzten und volumenreduzierten Komposthaufen erkennen. Der Kompost hat nun für Düngezwecke seine beste Wirkung.

B.2.5.3 Aufbauphase (Reifephase)

In dieser letzten Phase sinkt die Temperatur weiter bis auf Umgebungstemperatur ab. Die Huminstoffbindung wird nun von Kleintieren wie Milben, Asseln, Schnurfüßer, Springschwänze und dem „Kompostwurm“ übernommen, indem sie mineralische und organische Bestandteile miteinander verbinden.

Die Düngewirkung nimmt ab, weil die Nährstoffe immer fester gebunden werden. Die Humuswirkung (bodenaufbauende Wirkung) hingegen wird in dieser Phase immer besser.

Lagert man nun den Kompost noch länger, setzt der Veredelungsprozess ein, wobei der Gehalt an organischer Substanz immer mehr abnimmt. Aus diesem Grunde sollte der Kompost nicht länger als nötig gelagert werden.

B.2.6 Kompostierung von Fleischabfällen

Fleischabfälle sind prinzipiell für die Kompostierung geeignet, da es sich um organische Substanzen handelt.

Die Fleischkompostierung bringt aber viele Probleme mit sich. So benötigt man für den Abbau, vor allem dem des Fettes, hohe Temperaturen. Weiters hat Fleisch einen hohen

Wassergehalt, so dass es wegen der Kompaktierung und in weiterer Folge der inhomogenen und schlechten Sauerstoffzufuhr zu anaeroben Abbauvorgängen kommen kann. Damit auch verbunden ist die erhöhte Geruchsbelastung sowie das Problem mit Insekten, Ratten und auch anderen Fleischfressern.

Die Kompostierung von Fleischabfällen ist deshalb nur in kontrollierten, geschlossenen Prozessen, wie z.B. einem Bioreaktor mit nachgeschaltetem Biofilter, vorzunehmen.

Im Eiweiß beträgt der mittlere Stickstoffgehalt 16%. Bei einigen Komponenten unterscheidet sich der Stickstoffgehalt wesentlich vom Mittelwert (z.B. Stickstoffgehalt von Kollagenen 17,8%).

Im Fleisch sind an Lipidverbindungen Triglyceride, Phospholipide, Steride und Sterine enthalten. Die Lipide des Fettgewebes bestehen praktisch nur aus Triglyceriden. Sie enthalten lediglich geringe Mengen anderer Lipidverbindungen (1%).

Zusammensetzung von Unterhautbindegewebe einer Rinderhaut nach dem Äschern in einer Gerberei (fleshing):

Wassergehalt:	WS:	80 m%
organischer Kohlenstoffgehalt:	TOC:	51 m%
organisch gebundener Stickstoff:	N:	2 m%

Aufgrund des hohen Wassergehalts ist ein entsprechendes Substrat oder Co-Substrat (z.B. saugfähiges Material) der Ausgangsmenge beizumischen, sodass der Wassergehalt am Beginn der Kompostierung bei ca. 60 % liegt. Natürlich soll dabei das C/N – Verhältnis im Bereich von 20 – 30 liegen.

B.2.7 Abgrenzung zur Anaerobenbehandlung [2], [8], [10]

Der anaerobe Stoffwechsel findet weitgehend ohne Sauerstoff statt und wird auch Vergärung oder Verfaulung genannt. In diesen Prozessen werden geeignete organische Substanzen unter Energiegewinnung intermediär oxidiert, wobei heizwertreiches Biogas und anaerob nicht weiter abbaubare Gärrückstände gebildet werden.

Fakultativ anaerob nennt man aerobe Mikroorganismen, die durch anaerobe Prozesse ohne Sauerstoff leben können. Für obligat anaerobe Bakterien ist Sauerstoff ein tödliches Gift.

Der anaerobe Stoffwechsel lässt sich in drei Phasen unterteilen:

- ◆ Hydrolyse
- ◆ Säurebildung mit
 - acidogener Stufe
 - acetogener Stufe
- ◆ Methanbehandlung

B.2.7.1 Hydrolyse

An dieser ersten Stufe sind sowohl fakultative als auch obligat anaerobe Bakterien beteiligt, die die Makromoleküle wie Kohlenhydrate, Proteine und Fette mit Hilfe von Exoenzymen in einfachere Bausteine (Monomere) wie Glykose, Aminosäuren, Fettsäuren und Glycerin aufspalten.

B.2.7.2 Säurebildung

Die erste Stufe dieser Phase, die eigentlich Vergärung, ist für die Bildung organischer Säuren (Ameisen-, Essig-, Propion-, Butter und Valeriansäure), Alkohole, Kohlendioxid, sowie Wasserstoff zuständig. Weiters werden in dieser Stufe Proteine zu Schwefelwasserstoff (H₂S) und Ammoniak (NH₄⁺), das für den typischen Fäulnisgeruch verantwortlich ist, vergoren.

In der acetogenen Stufe werden methanogene Verbindungen, die wiederum als Ausgangsmaterialien für die Methanbildung dienen, produziert.

B.2.7.3 Methanbildung

Anaerobe Methanbakterien können nun Wasserstoff, HCO_3 und Essigsäure, das sind die vorher gebildeten Zwischenprodukte, direkt in methanreiches Biogas umsetzen.

Die Gasausbeute und die Vergärbarkeit hängt in erster Linie von der Zusammensetzung der organischen Substanzen, der Art der Prozessführung und dem Grad der Zerkleinerung ab.

Die Kompostierung sollte ohne anaeroben Stoffwechsel stattfinden, da einerseits diese Abbauprozesse länger dauern, und andererseits beim anaeroben Stoffwechsel eine Reihe leicht flüchtiger Zwischenprodukte frei werden, die zu Geruchsbelästigungen führen können.

Im anaeroben Stoffwechsel können folgende Geruchsstoffe gebildet werden:

- ♦ Kurzkettige organische Säuren wie Buttersäure
- ♦ Alkohole
- ♦ Schwefelhaltige Moleküle wie H_2S
- ♦ NH_3 (vom pH-Wert abhängig, $\text{NH}_4^+/\text{NH}_3$ – Gleichgewicht)

In der Praxis ist es bei der Kompostierung nicht immer einfach einen aeroben Stoffwechsel ablaufen zu lassen, da die Feuchtigkeit und die Luftversorgung zueinander in Konkurrenz stehen. Die Lücken (Poren) eines Komposthaufens können entweder mit Luft oder Wasser gefüllt sein. Zu viel freies Luftporenvolumen kann auf Dauer zum Austrocknen und somit zum Ende der Stoffwechselforgänge führen. Wassergesättigte Poren versperren hingegen die Luftzufuhr und das System wird anaerob. Dieses Phänomen kann man bei der Kompostierung von nassen, strukturschwachen Abfällen feststellen.

Im Vergleich zur Kompostierung ist jedoch bei der Anaerobbehandlung der anlagentechnische Aufwand größer. Als weiteres Problem gilt die komplexe und schwierige Prozessführung und die nur unvollständige Entseuchung der Abfälle.

Ein Vorteil der Vergärungsanlage ist, dass sie stets ein geschlossener Prozess ist. Dadurch kann man einerseits die Geruchsemissionen gezielt erfassen und einem Biofilter zuführen, andererseits das entstehende Produkt Biogas für die Erzeugung von Energie sammeln.

Die Auswahl der Abbaumethode, aerob oder anaerob, ist vor allem von den Ausgangsmaterialien abhängig. Haben Abfälle z.B. hohe Wassergehalte von etwa 80% und mehr, ist die Vergärung das bessere Behandlungsverfahren, da bei einer Kompostierung der Einsatz großer Mengen an Strukturmaterial notwendig ist und Emissionsprobleme auftreten können.

Für die Vergärung schwierige Abfälle sind welche, die:

- ♦ schwer mit Wasser mischbar sind
- ♦ sehr heterogen sind und
- ♦ einen sehr hohen Anteil an Zellulose in der organischen Substanz haben.

B.2.8 Sickerwasser- & Abluftproblem [1], [8], [10]

B.2.8.1 Sicker- und Kondenswässer

Man kann bei der Kompostierung prinzipiell drei Arten von Sickerwässer, nach der Art ihrer Entstehung unterscheiden:

- ♦ Presswässer aus der Eigenfeuchte des Materials
- ♦ endogene, durch biochemische Umwandlung entstandene
- ♦ exogene, durch eindringenden Niederschlag verursachte Wässer

Kondenswässer fallen bei der Erfassung und Reinigung von Abluftströmen an, die aber im Prinzip den selben Entstehungskriterien wie Sickerwässer unterliegen. Darum wird in der folgenden Abhandlung nur über Sickerwässer gesprochen. In der Regel sind Kondenswässer geringer verschmutzt als Sickerwässer, sie beinhalten aber erhebliche Mengen an Ammonium.

B.2.8.1.1 Überdachte oder nicht überdachte Rotte

Die anfallende Menge an Sickerwässer ist stark abhängig, ob die Rotte überdacht ist oder nicht.

Geringe Mengen unverdünnter Sickerwässer fallen bei den vollständig überdachten Rotten von kompostierten Bioabfällen an (ca. 20 bis 30 l/t FS). Der Sickerwasseranfall kann bei diesen Rotten durch die Zugabe von gut gefasertem Holzhäcksel oder Rinde sowie unter gleichzeitiger Verwendung von Mietenunterlagen wie Holzhäcksel, Rinde, gehäckseltem Stroh, Sägespäne/-mehl aber auch Papier fast vollständig verhindert werden.

Bei offenen, nicht überdachten Rotten, richtet sich der Sickerwasseranfall nach der Menge der Niederschläge, wobei dann das Sickerwasser mit Niederschlagswasser verdünnt ist. In der Praxis zeigte sich, dass im Jahresmittel ca. 90% der auf Mieten niedergehenden Niederschlagsmengen verdunstet oder vom Mietenkörper absorbiert wird. Die tatsächliche Menge an abfließendem Wasser richtet sich nach der Oberflächenbeschaffenheit der Abflussfläche, wie viel vom niedergegangenen Regen versickert, verdunstet oder in den Vertiefungen zurückgehalten und am Abfließen gehindert wird.

B.2.8.1.2 Sickerwasservermeidung und –verminderung

Steuerungs- und verfahrenstechnische Schritte zur Verminderung und Vermeidung von Sickerwässern auf Kompostierungsanlagen:

- ◆ Überdachung / Abdecken der Rotteflächen bzw. Mieten
- ◆ Verwendung von strukturreichen und/oder saugfähigen Zuschlagsstoffen: Holzhäcksel, Rinde, Stroh, Sägespäne/-mehl, aufbereitetes Siebrückgut, biogen vorgetrocknetes Laub, Papier
- ◆ Kompostierung auf organischen Unterlagen: Holzhäcksel, Rinde, Stroh, Sägespäne/-mehl, aufbereitetes Siebrückgut
- ◆ optimale Flächenauslegung (Anteil von Frei- bzw. Wegeflächen zu belegten Rotteflächen)

B.2.8.1.3 Sickerwasserbehandlung

Es gibt verschiedene Möglichkeiten das nicht mehr zu vermeidende Sickerwasser aufzubereiten:

- ◆ Rückberieselung
- ◆ Wurzelraumverfahren
- ◆ Kommunale Kläranlage

☞ Rückberieselung

Voraussetzung für die Rückführung des Sickerwassers in den Rotteprozess ist eine exakte Trennung von Sickerwasser und Niederschlagswasser, das bei vollständig überdachten Rotten am leichtesten zu bewerkstelligen ist. Bei dieser sinnvollsten Maßnahme werden die ausgewaschenen Inhaltsstoffe dem Kompost zurückgeführt und die eventuell zu trockenen Mieten befeuchtet.

Um Geruchsstoffe zu minimieren empfiehlt es sich, eine Teilreinigung des Sickerwassers – d.h. eine Reduzierung der leicht abbaubaren organischen Schmutzstoffe – vorzunehmen.

☞ Wurzelraumverfahren [1]

Eine Wurzelraumanlage besteht im wesentlichen aus Wurzelraumbetten, die mit Sickerwasser beschickt werden und einem nachgeschalteten Auffangteich, wo das Ablaufwasser der Beete gesammelt wird. Die Wurzelraumbette sind Behälter, in denen in einer Streuschicht (Bodensubstrat) Pflanzen z.B. Phragmites communis (Schilf) gepflanzt sind, wobei die Bakterien an deren Wurzeln das Sickerwasser reinigen.

Die Reinigungsleistung dieses Verfahrens ist auch für die Geruchselimination ausgesprochen wirksam.

☞ Kommunale Kläranlagen

Für die Einleitung von Sickerwässer in kommunale Kläranlagen dürfen bestimmte, gesetzlich geregelte Grenzwerte nicht überschritten werden. Aus abwassertechnischer Sicht sind Frachten und Konzentrationen wie CSB- und BSB₅-Werte, Stickstoff, Phosphat, Schwefel aber auch Zink von Bedeutung.

B.2.8.2 Abluft

Neben Staubemissionen, die z.B. beim Umsetzen des Kompostes (trockenes Material) oder im Lagerbereich entstehen, ist vor allem die Geruchsemission, die beim biologischen Abbau organischer Substanz auftritt, eine unangenehme Begleiterscheinung.

Staubemissionen kann man durch gezielte Absaugungen von Einzelaggregaten z.B. bei Sieben, Übergabestellen und Hartstoffabscheider relativ leicht in den Griff bekommen.

Für die Behandlung der Geruchsemissionen kann man prinzipiell unterscheiden:

- ♦ teilweise oder ganz ohne Einhausung arbeitende Verfahren
- ♦ komplett eingehauste Kompostwerke

Geruchsemission kann man prinzipiell durch gezielte Steuerung der Rottebedingungen – Rottetemperatur kleiner 60°C, Absenkung des pH-Wertes vermeiden – minimieren.

Bei teilweise oder ganz ohne Einhausung arbeitenden Verfahren wie z.B. Kompostmieten, ist neben der oben genannten Prozessführung auch die Abdeckung der Mieten mit einer 5 cm dicken Schicht gesiebten Reifekompostes zur Geruchsemissionsreduzierung zielführend. Dieses, auf dem Biofilter basierende Verfahren der abgedeckten Mieten, zeigte bei olfaktometrischen Untersuchungen eine 30fach geringere Abstrahlintensität gegenüber nicht abgedeckten Mieten.

Die Abluftreinigung bei komplett eingehausten Kompostwerken kann mittels Saug- oder Druckbelüftung über einen Biofilter erfolgen, wobei die emittierten Gerüche nach dem Biofilter wesentlich verringert werden.

In Biofilter können aliphatische und aromatische Kohlenwasserstoffe sowie Alkohole und Phenole, Aldehyde, schwefelhaltige und chlorierte Verbindungen abgebaut werden. Die Leistungsfähigkeit von Biofiltern wird durch das eingesetzte Material, der Nährstoffversorgung über die Inhaltsstoffe der Abluft, dem spezifischen pH-Wert und Temperaturbereich sowie einer ausreichenden Sauerstoffzuführung und Feuchte bestimmt. Dafür geeignete Filtermaterialien sind Humus, Torf und Kompost.

Aufgrund der Kreisführung eines Luftteilstromes ist bei der Druckbelüftung der Mieten, im Vergleich zu den saugbelüfteten Mieten, eine kleinere Luftmenge zu behandeln.

B.2.9 Ablauf und Verfahren der Kompostierung [2], [4], [5], [6], [9]

Der Hauptprozess der Kompostierung ist die Rotte, in der die organische Substanz zu humushaltigem Produkt umgesetzt wird und gleichzeitig eine Entseuchung stattfindet.

Ein wesentlicher Punkt in bezug auf die Qualität des Kompostes und seiner Wirtschaftlichkeit bei der Erzeugung ist die Rotteführung.

Durch die richtige Rotteführung kann folgendes erreicht werden:

- ♦ Beschleunigung des Prozesses durch Optimierung der Prozessbedingungen
- ♦ Kontrolle des aeroben Prozesses
- ♦ Emissionsbeherrschung

Während des Rotteprozesses kann man im wesentlichen die Feuchtigkeit des Kompostmaterials, die Sauerstoffzufuhr und das Umsetzen der Mieten steuern.

B.2.9.1 Ablauf einer Kompostierung

Die Kompostierung lässt sich prinzipiell in vier Verfahrensschritte unterteilen:

- ◆ Aufbereitung
- ◆ Hauptrotte
- ◆ Nachrotte
- ◆ Konfektionierung

B.2.9.1.1 Aufbereitung des Materials

Dieser erste Schritt ist vor allem für den späteren Rotteverlauf und der Kompostqualität entscheidend. Zuerst werden Fremdstoffe wie Metall und Plastik aussortiert. Danach wird das Grobmaterial zerkleinert, aufgefasernd und homogenisiert, sodass eine möglichst große Angriffsfläche für die Mikroorganismen entsteht. Weiters wird das C/N-Verhältnis und der Wassergehalt angepasst.

B.2.9.1.2 Hauptrotte

Sie ist die „heiße Phase“ der Kompostierung, wobei sie im thermophilen Bereich mit Temperaturen über 50°C verläuft.

Ziel der Hauptrotte ist der Abbau von leicht abbaubaren organischen Stoffen, die Reduzierung des Volumens, des Wassergehaltes und des Gewichtes, sowie die Abtötung von human- und phytohygienischen Keimen. In dieser Phase treten vor allem Emissionen wie Geruch und Sickerwasser auf.

Das Produkt der Vorrotte ist entseuchter Frischkompost mit dem Rottegrad II.

B.2.9.1.3 Nachrotte

In dieser zweiten Phase der Kompostierung werden die organischen Stoffe weiter ab- und umgebaut aber auch biologisch stabilisiert – man nennt diesen Vorgang Humifizierung.

Der Frischkompost wird dabei zu einem Fertigkompost mit dem Rottegrad III bis V.

B.2.9.1.4 Konfektionierung

In dieser letzten Phase erfolgt die Aufbereitung des fertigen Kompostes zu einem verkaufsfähigen Produkt, wie z.B. Siebung, Reinigung, Verpackung.

B.2.9.2 Gebräuchliche Verfahren der Kompostierung

Zunächst unterscheidet man ob das Kompostierverfahren in einem Reaktor abläuft oder nicht. Verfahren ohne Reaktor können eingehaust oder nicht eingehaust sein, dabei kann ein statisches (Rottegut wird nicht umgesetzt) oder quasidynamisches Verfahren (sporadische, diskontinuierliche Bewegung bzw. Umsetzung des Materials) angewendet werden. Ein dynamisches Verfahren (kontinuierliche Bewegung bzw. Umsetzung) hingegen läuft in einem Reaktor ab.

Tabelle B-5 Einteilung der Kompostierverfahren

statisch	quasi-dynamisch	dynamisch
Dreiecks-/Walmenmieten ohne Umsetzen	Dreiecks-/Walmenmieten mit Umsetzen	Trommelreaktor
Tafelmieten ohne Umsetzen	Tafelmieten mit Umsetzen	Turmreaktor
Brikollareverfahren	Zeilen-/Tunnelkompostierung	Tunnelreaktor
Container-/Boxenkompostierung		

Vorteile der statischen Systeme:

- ◆ einfacher und weniger reparaturanfällig als quasidynamische und dynamische Systeme
- ◆ längere Verweilzeiten bei gleichen Gesamtkosten
- ◆ der gewonnene Kompost kann ohne Nachbehandlung für pflanzenbauliche Bereiche verwendet werden

Vorteile der dynamischen Systeme:

- ◆ besser steuerbar, dadurch schneller ablaufende Rotte
- ◆ gute Kontrolle der Emissionen

B.2.9.2.1 Rottesysteme mit Reaktor

Im Reaktor wird hauptsächlich die Hauptrotte mit der geruchsintensiven Abluft durchgeführt. Diese Abluft kann bei relativ geringem Volumen sicher gefasst und einem Biofilter zugeführt werden. Der Rotteverlauf lässt sich relativ leicht überwachen und die Parameter wie Wassergehalt, Sauerstoff- und Kohlendioxidgehalt können gut eingestellt werden. Kondensate und Sickerwässer können in den Rotteprozess rückgeführt werden.

☞ Trommelkompostierung

Bei diesem dynamischen System kommt es durch die drehende Bewegung der Trommel zu einer guten Zerkleinerung und Durchmischung sowie einer gleichzeitigen kontinuierlichen Durchlüftung des Rottegutes.

Dieses Verfahren wird hauptsächlich zum Mischen und Homogenisieren für die Vorrötte, mit Aufenthaltszeiten zwischen 24 und 36 Stunden, eingesetzt. Es eignet sich allerdings nicht für feuchte, strukturlose Abfälle. Ein weiterer Nachteil ist, dass dieses Verfahren nur für die Vorbehandlung des Materials dient, und daher danach auf jeden Fall eine Mietenrotte, mit all ihren Problemen wie Geruchsentwicklung, nachgeschaltet werden muss.

☞ Zeilen-/Tunnelkompostierung

Bei der Zeilenkompostierung wird das Rottegut in verschiedenen, nach oben offenen Rottezeilen abgelegt, die durch feste Zwischenwände voneinander getrennt sind. Jede dieser Zellen wird separat belüftet und in verschiedenen Intervallen umgesetzt.

Die Tunnelkompostierung hat die nach oben offenen Zeilen verschlossen (wie bei einem Tunnel). Dadurch kann das Abluftvolumen minimiert und die anfallenden Abluftmengen gezielt gereinigt werden. Das zerkleinerte Material wird mittels Schubböden von der Stirnseite horizontal in mehreren parallelen zwangsbelüfteten Kanälen, innerhalb von zwei Wochen, zum anderen Ende transportiert.

Findet keine Durchmischung des Materials statt, bilden sich trotz Belüftung Zonen unterschiedlicher Feuchte, die jedoch nicht aufgelöst werden und erst später verrotten.

Bewegte Reaktoren setzen hingegen das Rottegut um, wobei nach 10 bis 12 Wochen ein Kompost mit dem Rottegrad IV bis V entsteht.

Zeilen- als auch Tunnelkompostierung zählen zu den quasidynamischen Verfahren.

☞ Turmreaktor

Dieses dynamische System besteht aus einem Turm mit mehreren Etagen. Ein Stetigförderer bringt das Rottegut in die oberste Etage ein. Dort wird dieses von sich drehenden Pflügen erfasst, gewendet, belüftet und transportiert. Durch Öffnungen im Boden jeder Etage wird das Gut in die nächst untere Etage abgeworfen, wo es wieder von Pflugarmen erfasst, gewendet, belüftet und transportiert wird. Diese schlangenförmigen Bewegungen des Materials gewährleisten eine relativ schonende Behandlung und gute Umsetzung. Belüftet wird im Gegenstrom durch Öffnungen in den Etagen wobei die Abluft gut erfasst einer Desorption zugeführt wird.

Die Vorteile dieses Verfahrens sind der geringe Platzbedarf im Vergleich zu einer Mietenkompostierung mit gleichem Durchsatz und die in einem geschlossenen, automatischen System ablaufende Rotte.

Als Nachteile sind der hohe Mechanisierungsgrad der Anlage mit dem erhöhten Wartungsaufwand und den Problemen bei einem Störfall (die Austragsschnecke, die sich unter dem Rottegut befindet ist nur sehr schwer zugänglich), sowie die relativ kurze Rottezeit (6 Wochen), die wahrscheinlich nicht zum Erreichen des Rottegrades IV genügt, zu nennen.

☞ Boxen-/Containerkompostierung

Bei diesen statischen Verfahren erfolgt die Rotte in einem völlig abgeschlossenen, z.T. wärmeisolierten Raum, der durch Löcher im Reaktorboden zwangsbelüftet werden kann.

Innerhalb der Rottezeit von zwei Wochen soll ein möglichst großer Masseabbau, eine Hygienisierung des Rottematerials sowie die Umsetzung zum Frischkompost erfolgen.

Dieses System eignet sich hervorragend zur Steuerung und Überwachung der rottespezifischen Parameter, wobei die Abluft gezielt erfasst und einer Behandlung zugeführt werden kann.

Nachteile sind darin zu sehen, dass bei dieser kurzen Rottezeit maximal Rottegrad II erreicht wird und das Material für eine Nachrotte meist angefeuchtet werden muss, wodurch sich aber wieder Geruchsemissionen in der Miete ergeben.

B.2.9.2.2 *Rottesysteme ohne Reaktor*

☞ Dreiecksmiete/Walmenmiete

Die Mietenverrottung ist die einfachste Verfahrensvariante der Kompostierung. Die Form dieser Miete, mit etwa 1,5 bis 2 m Höhe, 2,8 bis 4,0 m Breite und einer Länge von mindestens 4,0 m, besitzt eine relativ große Oberfläche sowie geringe Diffusionswege von Zu- und Abluft zum Mietenrand. Ist das Luftporenvolumen genügend groß (geringer Zerkleinerungsgrad), benötigt man keine künstliche Belüftung. Durch mehrmaliges Umsetzen der Mieten erreicht man eine ausreichende Sauerstoffversorgung der Mikroorganismen.

Der Vorteil dabei liegt in dem einfachen, technisch niedrig aufwendigem Verfahren mit geringen Wartungsproblemen, das jedoch erst mit Umsetzen ohne Zwangsbelüftung nach einer Rottezeit von 10 bis 12 Wochen einen Kompost mit Rottegrad IV sicher gewährleistet.

Abgesehen von der entstehenden Geruchsemission bei diesem quasidynamischen Verfahren ist der große Flächenbedarf ein Nachteil.

☞ Tafelmietenkompostierung

Das aufbereitete Rottegut soll unter optimaler Flächenausnutzung kompostiert werden, wobei es bis ca. 2 m Mietenhöhe zu einer Tafel aufgesetzt wird. Bei dieser Mietenform ist das Verhältnis von Mietenoberfläche zum Mietenvolumen so gering, dass eine künstliche Belüftung notwendig ist. Besonders wichtig für eine gleichmäßige Luftverteilung ist eine gleichmäßige Korngrößenverteilung mit einer guten Homogenisierung.

Statische Tafelmieten haben einerseits das Problem, dass sich relativ leicht Zonen mit unterschiedlicher Feuchte bilden, wobei der Rotteprozess teilweise gestoppt wird. Andererseits kann die zugeführte Luft, aufgrund materialbedingter Kanäle, das Rottegut nicht gleichmäßig durchströmen, wodurch sich wiederum anaerobe Zonen bilden können.

Bei quasidynamischen Verfahren wird das Rottegut bei jedem Umsetzvorgang durchmischt. Das nun aufgelockerte Material kann gleichmäßig durchlüftet und befeuchtet werden.

Hier kommt es bei einem relativ einfachem Verfahrensaufwand nach mindestens 12 Wochen zu Produkten mit Rottegraden von IV.

Neben dem großen Flächenbedarf, der nicht fassbaren Geruchsemission ist die Rotte auch direkt der Witterung ausgesetzt, was den Wassergehalt stark beeinflussen kann.

☞ Gekapselte Tafelmietenkompostierung

Dieses System besteht aus einer umhausten –geschlossenen –Miete, die belüftet und durch automatische Maschinen umgesetzt wird. Die Sauerstoffzuführung erfolgt über Saug- oder Druckbelüftung. Während des Umsetzungsvorganges, der mittels Schaufelräder erfolgen kann, kann das Rottegut befeuchtet werden. Nach einer Aufenthaltszeit von ca. 12 Wochen erreicht der Kompost den Rottegrad IV.

Positiv hervorzuheben sind die hohe Automatisierung mit der Umsetzmaschine, die auch den Kompost befeuchten und den Flächenschwund kompensieren kann, sowie die wegen der geschlossenen Anlage geruchsfreie Betriebsführung.

Probleme kann es allerdings, wegen der aggressiven Atmosphäre in der Rottehalle, mit Korrosionen der Bauteile und Maschinen geben, was man durch einen erhöhten Bauteilschutz wieder wettmachen muss.

☞ Brikollare Kompostierung

Bei diesem statischen System wird der Kompostrohstoff nach einer intensiven Zerkleinerung zu Formlingen gepresst und auf Paletten in einer belüfteten Rottehalle gelagert. Diese bis zu 30 kg schweren Presslinge weisen einen Wassergehalt von 50 bis maximal 60% auf. Das Wasser wird nun durch die Kapillarwirkung in den Presslingen von innen nach außen gefördert, während Sauerstoff eindringen kann. Dabei kommt es zu einer Entwässerung, einer Erwärmung bis zu 70°C und einer starken Verpilzung.

Nach ca. drei bis sechs Wochen entsteht ein trockenstabiler Frischkompost mit ca. 20% Restfeuchte und einem Rottegrad von III.

Vorteile bei diesem geschlossenen Verfahren sind die gering zu behandelnde Geruchsfracht, da es keine aktive Belüftung gibt und der einfache vollautomatische Rotteablauf, der ohne Bearbeitung auskommt.

Nachteilig ist vor allem; dass maximal nur ein Rottegrad von III erreicht werden kann.

B.2.9.2.3 Vergleichende Beurteilung von Rotteverfahren

Ziel der Rotteverfahren ist es eine große Menge von Material, mit geringem Personaleinsatz in möglichst kurzen Zeiträumen zu verarbeiten. Die Anlage sollte einen hohen Grad an Automatisierbarkeit aufweisen und die entstehenden Geruchsstoffe sollten kontrolliert erfasst und anschließend behandelt werden.

Bezüglich der Rottegrade kann man bei der Rottetrommel schon nach einer Aufenthaltszeit von 24 bis 36 Stunden einen Frischkompost mit Rottegrad I erreichen. Boxen-, Container-, Tunnel- und Zeilenkompostierung erreichen innerhalb zwei Wochen einen Rottegrad von II. Beim Tunnelverfahren erreicht der Kompost nach 10 bis 12 Wochen Aufenthaltszeit einen Rottegrad IV bis V. Die verschiedenen Mietenkompostierungen erreichen den selben Rottegrad allerdings erst nach 12 bis 20 Wochen Verweilzeit in der Rotte.

Der Vorteil der eingehausten Systeme gegenüber Reaktoren liegt darin, dass sie über längere Zeit (10 bis 12 Wochen) überwacht werden können, da für Reaktoren Aufenthaltszeiten von nur zwei bis sechs Wochen zu rechnen sind (ausgenommen die automatisch umsetzenden Tunnelsysteme). Statische Systeme haben gegenüber den dynamischen den Vorteil der optimalen Rottesteuerung.

Nachteilig ist bei geschlossenen Anlagen neben dem Problem der korrosiven Atmosphäre auch die hohe zu desodierende Abluftmenge, da wegen der Umsetzmaschinen eine lichte Hallenhöhe von 6 bis 10 m erforderlich ist.

Nicht in Betracht kommen daher nach SCHEFFOLD/VOGEL (1992) Verfahren mit sehr kurzen Vor- und Hauptrottezeiten, wie z.B. Rottetrommelsysteme oder die Boxen- und Containerrotte, da bei Realisierung ausreichender Hauptrottezeiten diese Systeme zu

kostenintensiv werden. Ebenfalls nicht in Betracht kommt, aufgrund ihrer Geruchstoffproblematik bei hohen Durchsatzmengen, die offene Mietenrotte.

Anforderungen zur Auswahl eines Verfahrenstypen, nach SCHEFFOLD/VOGEL (1992):

- ◆ hoher Grad der Automatisierung
- ◆ kurze Rottezeiten bei größtmöglichem Abbau/Inertisierung des Aufgabematerials
- ◆ geschlossene Rotte, keine Nachrotte im Freien
- ◆ geringer Verschleiß, wartungsfreundlich, hohe Verfügbarkeit
- ◆ Funktionsnachweis durch Referenzanlagen
- ◆ Wirtschaftlichkeit, vertretbare Behandlungskosten
- ◆ geringer Platzbedarf, Einbindung in die Landschaft

B.2.10 Parameter für die Überwachung und Steuerung des Rotteprozesses und deren Größenordnungen [1], [7], [10]

Zielvorgaben zur Steuerung der Kompostherstellung nach KROGMANN (1994)

- ◆ möglichst geringe Umweltbeeinträchtigungen
 - geringer Energieverbrauch
 - geringe Geruchsbelästigung
 - geringer Lärmpegel
 - geringe Mengen an Sekundärprodukten wie Sickerwasser, Kondenswasser
- ◆ geringe Kosten
 - geringer Flächenbedarf d.h. rascher Abbau der organischen Substanz bis zum gewünschten Rottegrad
 - geringe Investitionen
 - geringer Wartungsaufwand
 - geringe Personalkosten
- ◆ gewünschte Qualität des Endproduktes bezüglich
 - Hygienisierung
 - Pflanzenverträglichkeit
 - Rottegrad
 - Wassergehalt
 - Körnung
 - Struktur
 - Unterschreitung der festgelegten Schadstoffgrenzwerte

Für die Optimierung des Kompostierungsprozesses sind folgende chemisch-physikalische Parameter von Bedeutung:

- ◆ Gehalt an organischer Substanz und deren Abbaubarkeit
- ◆ Wassergehalt
- ◆ Struktur, Partikelgröße, Luftbedarf und Schüttgewicht
- ◆ Nährstoffgehalt
- ◆ pH-Wert
- ◆ Temperatur

B.2.10.1 Gehalt an organischer Substanz und deren Abbaubarkeit

Wie schon in Kapitel 2.5 beschrieben, steigt die Abbaubarkeit der organischen Substanz von Lignin über Zellulose, Hemizellulose, Fette und Proteinen bis zu Stärken und Zuckern, währenddessen Wachse schwer zersetzbar sind.

Zucker und Stärke können von allen Mikroorganismen, andere Kohlenstoffquellen hingegen nur von bestimmten Organismen verwertet werden.

Der Gehalt an organischer Substanz wird durch den Glühverlust, der neben der abbaubaren Substanz auch noch den Anteil an resistenten, nichtabbaubaren Stoffen (z.B. Kunststoffe) enthält, bestimmt. Rein pflanzliche Abfälle haben einen sehr hohen Gehalt an organischer

Masse (50 bis 90% TS). Der Gehalt in Fäkalien, tierischer oder menschlicher Herkunft, ist hingegen deutlich niedriger.

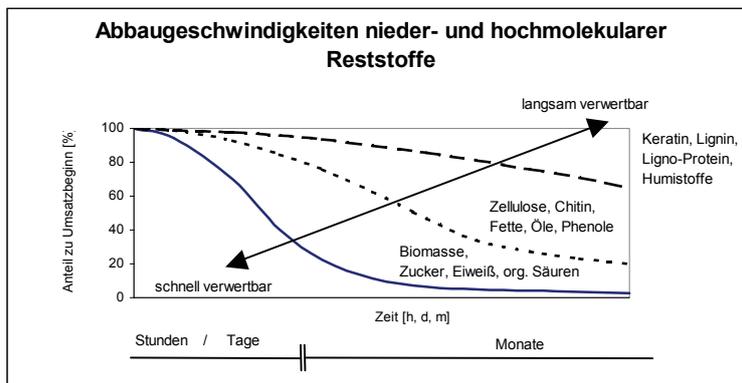


Diagramm B-2 Abbaugeschwindigkeiten nieder- und hochmolekularer Reststoffe

Quelle: Krogmann, „Kompostierung – Grundlagen zur Einsammlung und Behandlung von Bioabfällen unterschiedlicher Zusammensetzung“, Economica Verlag, 1994, S. 124

Für die Kompostierung sollte der Gehalt an organischer Substanz über 40% TS liegen. Ist dieser Gehalt als organischer Kohlenstoff (C_{org}) gegeben, so soll er für die Ausgangsstoffe über 17% TS liegen. Dies ergibt sich aus der Forderung im fertigen Kompost einen organischen Kohlenstoffgehalt C_{org} von größer 12% TS zu haben. Der Trockensubstanzverlust wurde dabei mit 30% der Ausgangsmenge und der C_{org} -Verlust mit ca. 50% angenommen.

Hat ein Substrat zu geringen organischen Anteil kann es zu einer mangelnden Erwärmung dieses Substrates vor allem im Winter kommen.

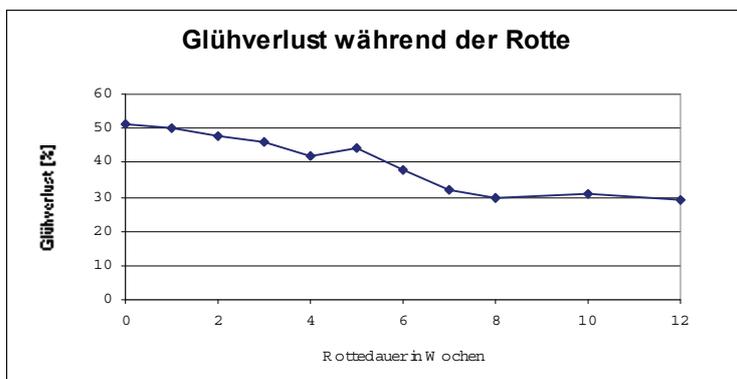


Diagramm B-3 Glühverlust während der Rotte

Quelle: Heerenklage/Heyer/Leikam/Stegmann, „Restmüllbehandlung – Mechanisch-biologische Vorbehandlung“, Economica Verlag, 1994, S. 66

B.2.10.2 Wassergehalt

Mikroorganismen können ihre Nahrung durch Osmose nur in gelöster Form aufnehmen, wobei die Oberfläche des abzubauenen Substrates von Wasser umhüllt sein muss. Die geringste Wasserkonzentration in der Miete für ein Wachstum der Mikroorganismen ist mit 20% H_2O für Bakterien und 12% H_2O für Pilze in der Literatur angegeben. Laut

[ALBRECHTER, 1993] wird die Tätigkeit der Mikroorganismen bei einem Wassergehalt unter 45% schon gehemmt.

Wassergehalte größer 65% bewirken eine zu geringe Luftzirkulation, da das Luftporenvolumen hauptsächlich mit Wasser gefüllt ist. Dadurch entstehen anaerobe Zonen mit unerwünschter Fäulnis.

Optimale Wassergehalte zu Rottebeginn liegen zwischen 40 bis 60%.

Die richtige Feuchtigkeit wird häufig mit der Faustprobe festgestellt. Bei dieser Probe soll maximal ein Tropfen Wasser beim Zusammendrücken des Materials mit der Faust herausrinnen und beim Öffnen der Faust soll das Material nicht auseinanderfallen.

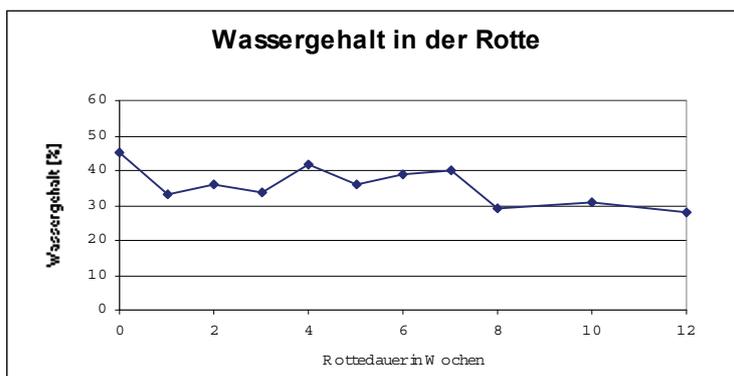


Diagramm B-4 Wassergehalt in der Rotte

Quelle: Heerenklage/Heyer/Leikam/Stegmann, „Restmüllbehandlung – Mechanisch-biologische Vorbehandlung“, Economica Verlag, 1994, S. 68

B.2.10.3 Substratstruktur, Schüttgewicht und Sauerstoffgehalt

Die Struktur des Kompostrohstoffes ist ein Netzwerk aus festen Partikeln mit Hohlräumen unterschiedlicher Größe, die entweder mit Luft, Wasser oder einem Gemisch aus beiden gefüllt sind.

Über das Schüttgewicht, das im wesentlichen durch den H₂O-Gehalt, die Korngrößenverteilung und die Art und Form der einzelnen Kornspektren bestimmt ist, kann man indirekt auf das Maß und die Verteilung des Luftporenvolumens schließen.

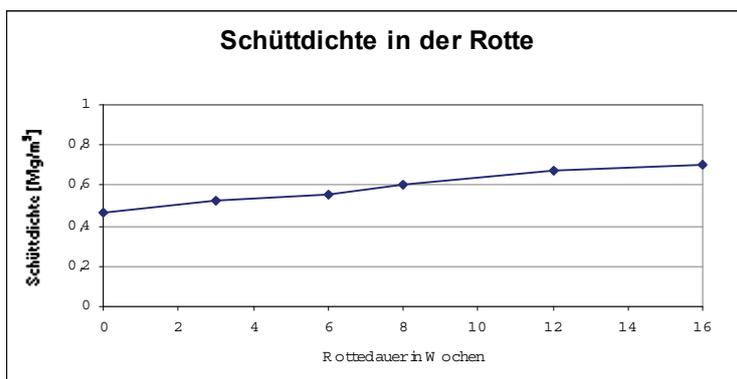


Diagramm B-5 Schüttdichte in der Rotte

Quelle: Heerenklage/Heyer/Leikam/Stegmann, „Restmüllbehandlung – Mechanisch-biologische Vorbehandlung“, Economica Verlag, 1994, S. 71

Das freie Porenvolumen im Kompostsubstrat kann durch Zugabe von Strukturmaterial und/oder trockener Zuschlagstoffe, wie z.B. recyceltem Kompost, erhöht werden, wobei allerdings wiederum der Wassergehalt gesenkt wird.

Eine Zerkleinerung des Substrates verschlechtert zwar die Struktur und Porosität des Kompostmaterials, jedoch wird die Angriffsfläche für die Mikroorganismen erhöht, was zu einer schnelleren Abbaugeschwindigkeit führt. Je feiner das Material ist, desto niedriger muss es aufgesetzt oder häufiger muss es umgesetzt werden.

Beim Rotteprozess müssen die Mikroorganismen ausreichend mit Sauerstoff versorgt werden, da dies ein aerober Vorgang ist. Die Sauerstoffzuführung in die Rotte kann über Druck- oder Saugbelüftung, aber auch durch natürliche Konvektion mit Hilfe von strukturreichen Materialien und mehrmaligem Umsetzen der Miete erfolgen. Durch die Belüftung wird neben der Sauerstoffversorgung das Kompostmaterial getrocknet und der Temperaturanstieg in der Rotte begrenzt.

Laut Literatur soll für eine ausreichende Sauerstoffversorgung der Sauerstoffgehalt etwa 10% O₂ in der Abluft betragen. Aus praktischen Versuchen entspricht das etwa 1 bis 5 mg O₂/g organischer Ausgangssubstanz oder 5 bis 12 ml Luft/g TS*h.

Durch die Verrottung sackt die Miete zusammen und verringert so das Luftporenvolumen, was wiederum zu einer ungenügenden Luftversorgung im Inneren der Miete führt. Zur besseren Auflockerung und Luftzirkulation aber auch zur intensiveren Durchmischung und Zerkleinerung soll die Miete regelmäßig umgesetzt werden.

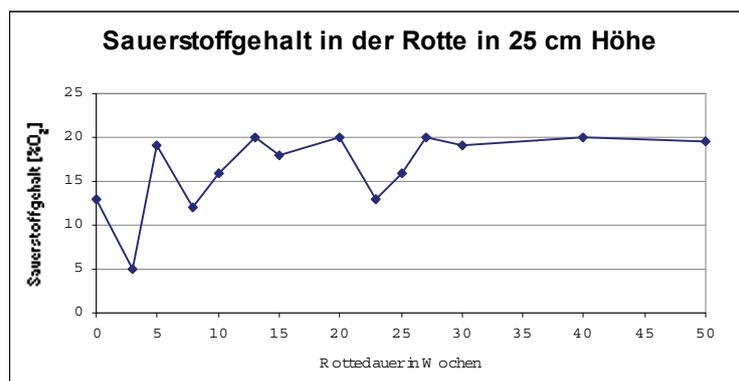


Diagramm B-6

Sauerstoffgehalt in der Rotte in 25 cm Höhe

Quelle:

Krogmann, „Kompostierung – Grundlagen zur Einsammlung und Behandlung von Bioabfällen unterschiedlicher Zusammensetzung“, Economica Verlag, 1994, S. 305

B.2.10.4 Nährstoffgehalt und Stickstoffumsatz

Zu den Nährstoffen für Mikroorganismen zählen Kohlenstoff, Stickstoff, Phosphor und Kalium. Bedeutend ist vor allem das Verhältnis Kohlenstoff zu Stickstoff.

Das C/N-Verhältnis der Mikroorganismen liegt im Bereich von 5:1 bis 7:1. Für ihren Zellaufbau wird zusätzliche Energie, die durch den Abbau organischer Substanz gewonnen wird, benötigt. Daraus ergibt sich für den Beginn der Kompostierung ein optimales C/N-Verhältnis von 25:1 bis 35:1.

Ist das C/N-Verhältnis am Beginn der Kompostierung kleiner als 20:1, so kommt es zu einer schnellen und heißen Rotte, allerdings mit sehr hohen Stickstoffverlusten (bis 50%). Durch den Kohlenstoffmangel können die Mikroorganismen nicht genügend körpereigene Substanz bilden. Weiters verbrauchen und fixieren sie deshalb weniger Stickstoff, der gasförmig in Form von Ammoniak verloren geht.

Liegt ein Überschuss von Kohlenstoff vor (das C/N-Verhältnis ist größer als 40:1), so kommt die Rotte nicht richtig in Gang, da erst der überschüssige Kohlenstoff verbraucht werden muss und in Form von CO₂ an die Umgebung abgegeben wird.

[GRAY und BIDDLESTONE, 1981] schlagen zur Stickstoffvermeidung eine niedrige Temperatur, ein hohes C/N-Verhältnis, die Reduzierung des Luftdurchsatzes oder die Zugabe von Kleie oder phosphathaltigem Material vor. Ammonium wird bei fast anaeroben Verhältnissen in CO₂ – reicher Luft als Ammoniumcarbonat gebunden.

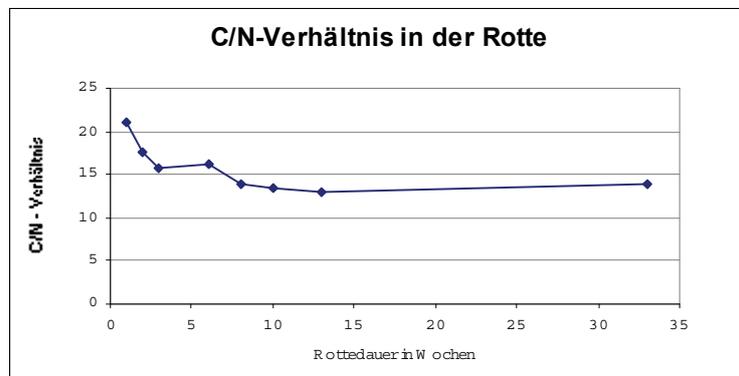


Diagramm B-7 C/N-Verhältnis in der Rotte

Quelle:

Krogmann, „Kompostierung – Grundlagen zur Einsammlung und Behandlung von Bioabfällen unterschiedlicher Zusammensetzung“, Economica Verlag, 1994, S. 397

Die Nitrifikation, die mikrobielle Oxidation von Ammoniumionen über Nitrit zu Nitrat, beginnt erst nach Abklingen der thermophilen Phase. Ammoniak entsteht bei der Mineralisation von organischen Stickstoffverbindungen. Bei der Nitrifikation sind immer 2 Bakteriengruppen beteiligt, wobei *Nitrosomonas* Ammoniak zu Nitrit und *Nitrobacter* Nitrit zu Nitrat oxidieren.

Im Anhang ist eine Tabelle mit C/N-Verhältnissen diverser Kompostmaterialien dargestellt.

B.2.10.5 pH-Wert

Der pH-Wert des Ausgangssubstrates hat einen wesentlichen Einfluss auf die Rotteintensität, da die Mikroorganismen am besten in einem bestimmten pH-Wert Bereich, der zwischen 6 und 9 liegt, wachsen. Der optimale Bereich liegt im neutralen bis leicht alkalischen. Mit zunehmender Rottezeit sinkt der pH-Wert, der zu Beginn leicht alkalisch war, zunächst durch die Bildung von organischen Säuren und der CO₂-Produktion ab, um dann wieder aufgrund des Abbaus oder der Verflüchtigung der vorher gebildeten Säuren bzw. der Freisetzung von Basen anzusteigen und sich mit fortschreitender Rotte auf einen Wert um pH 7 einzupendeln.

Der pH-Wert des Ausgangsmaterials hängt vom Substrat und der Dauer der Lagerung vor Kompostierung ab, da der pH-Wert bei längerer Lagerung aufgrund anaerober Prozesse sinkt. Die meisten Pflanzen haben einen leicht sauren pH-Wert (pH=6).

B.2.10.6 Temperatur

Durch die Stoffwechselfvorgänge der Mikroorganismen kommt es während der Kompostierung zu einer Temperaturerhöhung in der Miete. Die Temperaturen steigen zunächst bis 40°C (mesophile Phase) und dann weiter auf ca. 50 bis 70°C (thermophile Phase), wo die Zahl der thermophilen Organismen zunimmt und dadurch ein rascher Abbau der organischen Substanz gewährleistet ist. Bei diesen Temperaturen werden über einen längeren Zeitraum sämtliche Krankheitskeime abgetötet, sodass der Kompost den seuchenhygienischen Anforderungen entspricht.

Durch die Verarmung an organischen Nährstoffen kommt es mit fortschreitender Rottedauer zum Absterben der Mikroorganismen und somit zum Abklingen der hohen Temperaturen.

Durch die Temperaturmessungen kann man erkennen, ob das Material rottefähig ist, der Wassergehalt den Anforderungen entspricht und die Seuchenhygiene eingehalten wird.

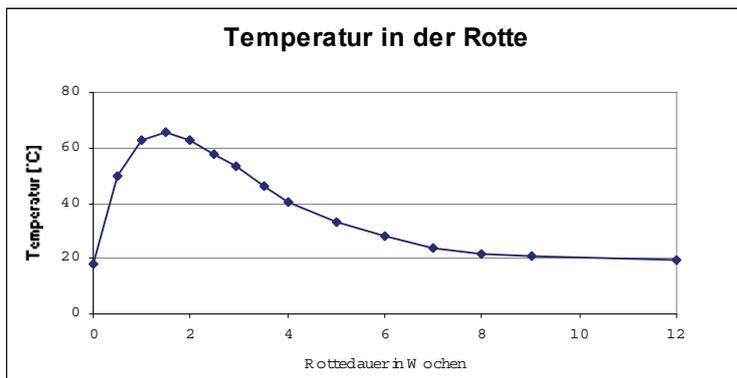


Diagramm B-8 Temperatur in der Rotte

Quelle: Krogmann, „Kompostierung – Grundlagen zur Einsammlung und Behandlung von Bioabfällen unterschiedlicher Zusammensetzung“, Economica Verlag, 1994, S. 305

B.2.11 Berechnungen [15]

Für unten angeführte Berechnungen wird angenommen, dass man für die Kompostierung maximal drei verschiedene Substrate verwendet. Die Kohlenstoff-, Stickstoff- und Wassergehalte der verwendeten Materialien sowie mindestens die Masse eines Substrates müssen bekannt sein damit man den Wassergehalt und das C/N - Verhältnis der Mischung sowie die unbekanntenen Massen ermitteln kann.

Tabelle B-6 Definitionen der verwendeten Abkürzungen in den Berechnungen

Material	Masse	Wassergehalt	Kohlenstoffgehalt	Stickstoffgehalt	C/N - Verhältnis
A	m_A	g_A^W	g_A^{TOC}	g_A^N	-
B	m_B	g_B^W	g_B^{TOC}	g_B^N	-
C	m_C	g_C^W	g_C^{TOC}	g_C^N	-
AB (Mischung)	-	g_{AB}^W	-	-	C/N_{AB}
ABC (Mischung)	-	g_{ABC}^W	-	-	C/N_{ABC}

B.2.11.1 Wassergehalt der Mischung bei bekannten Massen

B.2.11.1.1 Wassergehalt der Mischung mit zwei Materialien

$$g_{AB}^W = \frac{g_A^W \cdot m_A + g_B^W \cdot m_B}{m_A + m_B}$$

B.2.11.1.2 Wassergehalt der Mischung mit drei Materialien

$$g_{ABC}^W = \frac{g_A^W \cdot m_A + g_B^W \cdot m_B + g_C^W \cdot m_C}{m_A + m_B + m_C}$$

B.2.11.2 Masse der Materialien bei angenommenem Wassergehalt der Mischung

B.2.11.2.1 Masse m_B der Mischung mit zwei Materialien

$$m_B = m_A \cdot \frac{g_A^W - g_{AB}^W}{g_{AB}^W - g_B^W}$$

B.2.11.2.2 Masse m_C der Mischung mit drei Materialien

$$m_C = m_A \cdot \frac{g_A^W - g_{ABC}^W}{g_{ABC}^W - g_C^W} + m_B \cdot \frac{g_B^W - g_{ABC}^W}{g_{ABC}^W - g_C^W}$$

B.2.11.3 C/N – Verhältnis der Mischung bei bekannten Massen

B.2.11.3.1 C/N_{AB} – Verhältnis der Mischung mit zwei Materialien

$$\frac{C}{N_{AB}} = \frac{g_A^{TOC} \cdot m_A \cdot (100 - g_A^W) + g_B^{TOC} \cdot m_B \cdot (100 - g_B^W)}{g_A^N \cdot m_A \cdot (100 - g_A^W) + g_B^N \cdot m_B \cdot (100 - g_B^W)}$$

B.2.11.3.2 C/N_{ABC} – Verhältnis der Mischung mit drei Materialien

$$\frac{C}{N_{ABC}} = \frac{g_A^{TOC} \cdot m_A \cdot (100 - g_A^W) + g_B^{TOC} \cdot m_B \cdot (100 - g_B^W) + g_C^{TOC} \cdot m_C \cdot (100 - g_C^W)}{g_A^N \cdot m_A \cdot (100 - g_A^W) + g_B^N \cdot m_B \cdot (100 - g_B^W) + g_C^N \cdot m_C \cdot (100 - g_C^W)}$$

B.2.11.4 Masse der Materialien bei angenommenem C/N – Verhältnis der Mischung

B.2.11.4.1 Masse m_B der Mischung mit zwei Materialien

$$m_B = m_A \cdot \frac{100 - g_A^W}{100 - g_B^W} \cdot \frac{\frac{C}{N_{ABC}} \cdot g_A^N - g_A^{TOC}}{g_B^{TOC} - \frac{C}{N_{ABC}} \cdot g_B^N}$$

B.2.11.4.2 Masse m_C der Mischung mit drei Materialien

$$m_C = m_A \cdot \frac{100 - g_A^W}{100 - g_C^W} \cdot \frac{\frac{C}{N_{ABC}} \cdot g_A^N - g_A^{TOC}}{g_C^{TOC} - \frac{C}{N_{ABC}} \cdot g_C^N} + m_B \cdot \frac{100 - g_B^W}{100 - g_C^W} \cdot \frac{\frac{C}{N_{ABC}} \cdot g_B^N - g_B^{TOC}}{g_C^{TOC} - \frac{C}{N_{ABC}} \cdot g_C^N}$$

B.2.11.5 Massen von zwei Materialien bei angenommenem Wassergehalt und C/N – Verhältnis der Mischung mit drei Materialien

Für diese Berechnung wird die Formel aus 5.2.2 und aus 5.4.2 herangezogen und so umgeformt, dass man m_B und m_C daraus erhält.

Mit dieser Masse m_B kann man nun, nach der Formel in 5.2.4, m_C berechnen.

$$m_B = m_A \cdot \frac{(100 - g_C^W) \cdot \left(g_C^{TOC} - \frac{C}{N}_{ABC} \cdot g_C^N \right) \cdot \frac{g_A^W - g_{ABC}^W}{g_{ABC}^W - g_C^W} - (100 - g_A^W) \cdot \left(\frac{C}{N}_{ABC} \cdot g_A^N - g_A^{TOC} \right)}{(100 - g_B^W) \cdot \left(\frac{C}{N}_{ABC} \cdot g_B^N - g_B^{TOC} \right) - (100 - g_C^W) \cdot \left(g_C^{TOC} - \frac{C}{N}_{ABC} \cdot g_C^N \right) \cdot \frac{g_B^W - g_{ABC}^W}{g_{ABC}^W - g_C^W}}$$

B.2.12 Anforderungen und Qualitätsmerkmale [1], [2], [7]

Tabelle B-7

Kennwerte der Komposte

Analyse	Einheit	Kennwert
organischer Anteil	[%]	32 – 39
pH-Wert	[%]	7,5 – 8,0
C/N Verhältnis	[%]	8,0 – 12,0
Stickstoff	[%]	0,85 – 1,12
Kohlenstoff	[%]	15 – 18
Wassergehalt	[%]	25 – 35
Phosphor	[%]	0,6 – 0,78
Kalium	[%]	0,5 – 0,70

B.2.12.1 Anforderungen an die Kompostqualität

Kompost wird vor allem als Bodenverbesserungsmittel mit Düngewert verwendet. Dieser soll dabei in optimaler Menge und in allen Bereichen nutzbringend angewendet werden.

Um dabei nachteilige Wirkungen auszuschließen, müssen folgende Kriterien erfüllt werden:

- ◆ Eignung im vorgesehenen Anwendungsbereich (Pflanzenverträglichkeit)
- ◆ hygienische Unbedenklichkeit
- ◆ Freiheit von Verunreinigungen
- ◆ niedriger Gehalt an Schadstoffen
- ◆ bekannter Anteil an wertgebenden Eigenschaften
- ◆ gleichbleibende Produktqualität

Voraussetzungen für die oben genannten Anforderungen sind einerseits die sortenreine Sammlung des organischen Materials und andererseits eine fachgerechte Rotteführung.

B.2.12.2 Qualitätsmerkmale

B.2.12.2.1 Seuchenhygienische Unbedenklichkeit

Krankheitserreger im Kompost müssen aufgrund human-, veterinär- sowie phytohygienischen Gesichtspunkten unbedingt unschädlich gemacht werden. Phytopathogene verschleppte Erreger im Kompost können große Kulturschäden

hervorrufen. Durch die kompostgedüngten Lebensmittel können Krankheitserreger auf Mensch und Tier, auch durch Keimverschleppungen, übertragen werden. Abhilfe schafft eine sorgfältige Rottesteuerung während des Kompostierungsprozesses, in einer Anlage nach dem Stand der Technik.

B.2.12.2.2 Rottegrad

Dieser gibt darüber Auskunft, wie weit die verfügbare organische Substanz des Ausgangsmaterials im Verlauf der Rotte umgesetzt wurde und welchen Reifegrad der Kompost nun erreicht hat.

Charakteristisch für den Rottegrad eines Kompostes ist die erreichte Maximaltemperatur im Selbsterhitzungsversuch.

Tabelle B-8 Einteilungskriterien der Rottegrade

Rottegrad	T _{max} [°C]	Produktbezeichnung
I	> 60	Kompostrohstoff
II	50 – 60	Frischkompost
III	40 – 50	Frischkompost
IV	30 – 40	Fertigkompost
V	< 30	Fertigkompost

B.2.12.2.3 Pflanzenverträglichkeit

Gute Komposte sind pflanzenverträglich, fördernd außerdem das Pflanzenwachstum und die Bodenfruchtbarkeit und dürfen keine Wuchshemmstoffe enthalten.

Bei der Anwendung von Kompost darf es nicht zu einer Fixierung des pflanzenverfügbaren Stickstoffes im Boden kommen, wobei die Mikroorganismen im Boden den Stickstoff für den raschen Abbau der organischen Substanz im Frischkompost nutzen, aber die Pflanze unter Stickstoffmangel leidet. Dieses Phänomen kann man vor allem bei Frischkomposten beobachten, weshalb diese nur eingeschränkt nutzbar sind.

Bei Fertigkomposten ist nicht mehr mit einer Stickstoffmobilisierung zu rechnen, da die Mineralisation der organischen Substanz bereits weit fortgeschritten ist.

B.2.12.2.4 Gehalt an organischer Substanz

Der Wert von Kompost als Bodenverbesserungsmittel ist mit dem Gehalt an organischer Substanz gleichzusetzen, der über den Glühverlust anzugeben ist. Der Glühverlust macht keine Aussage über die Qualität, Zusammensetzung und Wirksamkeit der organischen Substanz. Diesbezüglich sind andere Analysen wie die der Huminstoffe und der wirksamen organischen Substanz (WOS) notwendig.

Generell sollte der Mindestgehalt an organischer Substanz 25 Gew.% in der Trockenmasse nicht unterschreiten und sich im Bereich von 35 Gew.% bewegen.

B.2.12.2.5 Wassergehalt

Der Wassergehalt im Kompost sollte nicht zu hoch aber auch nicht zu niedrig sein.

Zu hohe Wassergehalte vermindern die Streufähigkeit, erhöhen Transport- und Aufbringungskosten, erhöhen das Volumen und begünstigen bei der Lagerung Fäulnisprozesse.

Trockene Komposte sind hydrophob (wasserabweisend) und verursachen Staubemissionen.

Der Wassergehalt von Kompost, der anzugeben ist, sollte bei loser Ware < 45% der Frischmasse und bei abgepackter Ware < 35% der Frischmasse sein.

B.2.12.2.6 Volumengewicht

Das anzugebende Volumengewicht ist abhängig vom Wassergehalt, von der Korngrößenzusammensetzung und dem Verhältnis von organischen zu mineralischen Bestandteilen. Mit zunehmender Rottedauer erhöht sich das Volumengewicht von Kompost, wegen der Zunahme von mineralischer Substanz im Vergleich zur organischen Substanz.

B.2.12.2.7 Körnung

Der ebenfalls anzugebende Grad der Körnung richtet sich nach dem Anwendungszweck im Garten- und Pflanzenbau. Für Düngungszwecke bzw. zur Substratherstellung eignet sich besonders nährstoffreicher, feinkörniger (< 10 mm) Kompost.

Tabelle B-9 Einteilung der Korngrößen

Bezeichnung	Unterteilung	Korngröße
feinkörnig	I	< 5 mm
	II	< 10 mm
mittelkörnig		< 25 mm
grobkörnig		< 40 mm

B.2.12.2.8 Salzgehalt

Der Salzgehalt im Kompost wird durch wasserlösliche Salze von vorwiegend Chloriden und Sulfaten der Alkali- und Erdalkalimetalle hervorgerufen und ist anzugeben. Nährstoffreiche Komposte besitzen höhere Salzgehalte als nährstoffarme. Zu hohe Konzentrationen an gelösten Salzen können die Wurzelfunktionen und somit das Wachstum von Pflanzen negativ beeinflussen.

Verwendet man Kompost als Mischkomponente für Pflanz- und Blumenerde, sollte man Komposte mit einem Gehalt von weniger als 5 g/l löslichen Salzen nehmen. Für Komposte mit dem Verwendungszweck als Bodenverbesserungsmittel und Dünger ist für den Salzgehalt kein Grenzwert vorgeschrieben.

B.2.12.2.9 pH-Wert

Der pH-Wert ist aufgrund des Anwendungsbereiches des Kompostes anzugeben. Normal sollte er im neutralen Bereich von pH=7 liegen.

B.2.12.2.10 Pflanzennährstoffe

Komposte enthalten die für die Pflanzenernährung notwendigen Haupt- und Spurenelemente, wobei die Hauptnährstoffe anzugeben sind. Seine Hauptnährstoffe sind Stickstoff, Phosphor, Kalium, Magnesium und Kalzium. Zu den Spurennährstoffe zählt man Eisen, Mangan, Zink, Kupfer, Bor und Molybdän.

B.2.13 Analyseparameter

B.2.13.1 Probenahme und Probeaufbereitung

Die Probenahme und –aufbereitung ist eines der wichtigsten Schritte für die nachfolgende Analyse, da trotz genauester Analyse keine richtigen Ergebnisse vorliegen, wenn die Probe nicht repräsentativ war.

Für die Probenahme und –aufbereitung dürfen keine Geräte oder Materialien verwendet werden, die einen der zu analysierenden Stoffe an die Proben abgeben können.

Die Probe soll daher folgenden Ansprüchen genügen:

- ◆ Repräsentanz (d.h. die Probe soll weitgehend der Beschaffenheit der Gesamtmenge entsprechen)
- ◆ Probe darf nur mit zufälligen Fehlern behaftet sein, d.h. keine systematischen Fehler bei der Probenahme

B.2.13.1.1 Probenahme

Definitionen:

☞ Einzelprobe

Ist die in einem Arbeitsschritt entnommene Substanzmenge

Je größer und je uneinheitlicher das Material desto größer müssen die Einzelprobe und die Sammelprobe gewählt, aber auch desto öfter muss beprobt werden.

Das entnommene Mindestvolumen richtet sich nach der Korngröße. Es beträgt bei einer Korngröße von > 20 mm 5 Liter und bei < 20 mm 3 Liter.

Für die Mindestmenge benutzt man die nachfolgende Formel:

$$G[kg] = 0,06 \cdot \phi[mm]$$

☞ Sammelprobe

Sie besteht aus mehreren, gut homogenisierten Einzelproben. Diese verschiedenen Einzelproben müssen zunächst gut zu einer Sammelprobe durchmischt werden. Danach reduziert man die Menge mittels der Viertelmethode, indem man die gegenüberliegenden Viertel wieder mischt und die anderen 2 Teile verwirft, bis man schlussendlich zu der gewünschten Probemenge gelangt.

☞ Probenahme aus einem Profil

- ◆ das Profil ist mit einem Radlader auszuheben
- ◆ die gesamte Profilhöhe ist gleichmäßig zu beproben
- ◆ die Mindestmenge der Teilprobe je Profilwand ist 30 Liter

☞ Probenahme aus einem ruhenden Lager

- ◆ Bohren im jeweiligen Mietenabschnitt bis zur Mietensohle mit einem Schraubenbohrer
- ◆ jeder Querschnitt soll mit fünf gleichartigen Bohrungen beprobt werden

☞ Probenahme aus bewegtem Kompost

- ◆ die Mindestanzahl der Einzelproben richtet sich nach der Korngröße und liegt im Bereich bei Korngrößen > 20 mm von 10 bis 15 und bei Korngrößen < 20 mm von 5 bis 10 Proben
- ◆ Mindestmenge einer Teilprobe beträgt 30 Liter

B.2.13.1.2 Probeaufbereitung

Die frisch genommene Probe wird in gut verschlossenen PE-Behältern zur Aufbereitung gebracht.

B.2.13.2 Analysen der Frischsubstanz

☞ Siebung der frischen Originalprobe

Für die folgenden Analysen stehen Siebe mit der Maschenweite 10 mm, 2 mm und 0,25 mm zur Verfügung, sodass das Material auf jeden Fall nach der Siebung < 10 mm Korngröße besitzt. Man gibt die Mengen an Siebüberlauf und –durchgang bezogen auf die Gesamtmasse in Prozent an.

$$SDG_r = \frac{SDG}{SDG + SÜL} \cdot 100[\%]$$

$$SÜL_r = \frac{SÜL}{SDG + SÜL} \cdot 100[\%]$$

SDG_r: Siebdurchgang in [%]

SÜL_r: Siebüberlauf in [%]

SDG: Siebdurchgang in [g]

SÜL: Siebüberlauf in [g]

☞ Einstellen eines optimalen Wassergehaltes

Mit Hilfe der Faustprobe wird ein Teil der abgeseibten Frischsubstanz (ca. 5 Liter) auf einen optimalen und standardisierten Wassergehalt eingestellt.

B.2.13.3 Analysen in der Trockensubstanz

☞ Trocknung der ungesiebten Originalprobe bei 105 °C

Ziel ist es den Wassergehalt und die Trockensubstanz, auf die man die verschiedenen Parameter bezieht, zu bestimmen.

Man benötigt etwa 5 Liter ungesiebte Originalprobe, die man bis zur Gewichtskonstanz bei 105 °C trocknet, wobei man ca. einen Liter des getrockneten Materials als Rückstellprobe aufbewahren sollte.

☞ Mahlen des getrockneten Probematerials

Für weitere Analysen müssen etwa 100 g des getrockneten Probenmaterials mittels geeigneter Mühlen auf Korngrößen < 0,25 mm gemahlen werden. Der Mahlvorgang darf nicht mit Mahlwerkzeugen vorgenommen werden, die eine Kontamination der Probe mit den zu analysierenden Schwermetallen hervorrufen können.

☞ Trocknung der ungesiebten Originalprobe bei 40 °C

Für die Bestimmung der organischen Schadstoffe wird etwa ein Liter der ungesiebten Originalprobe bei 40 °C getrocknet und anschließend auf < 0,5 mm gemahlen.

B.2.14 Analysemethoden

Hierbei wurden nur die wichtigsten Untersuchungsmethoden angeführt, die mit einfachen Mitteln selbst durchführbar sind.

Andere Methoden benötigen aufwendige Geräte zur Analyse.

B.2.14.1 Wassergehalt

Zur Wassergehaltsbestimmung wird eine repräsentative Probe (mindestes 150 g FS), die sich in einem geeigneten Gefäß befindet, eingewogen, danach bis zur Gewichtskonstanz im Trockenschrank (normal 24h) getrocknet und nach dem Trockenvorgang wieder zurückgewogen.

B.2.14.2 Maximale Korngröße

Ziel der Siebanalyse ist es die geringste Siebmaschenweite zu finden, bei der kein Material mehr als Siebüberlauf übrigbleibt.

B.2.14.3 Rohdichte

Diese wird zur Umrechnung der Frischmasse auf das Volumen der Frischsubstanz, auf das man einige Parameter wie den Salzgehalt und lösliche Nährstoffe bezieht, verwendet. Nachdem man den leeren Messzylinder abgewogen hat, füllt man mit Hilfe des Pulvertrichters das Probematerial locker bis zum Rand in den Zylinder. Dieser Kunststoffzylinder wird nun angehoben so das sich seine Unterkante genau 10 cm über der Gummiunterlage befindet und anschließend mit Hilfe der Fallvorrichtung fallen gelassen. Diesen Vorgang macht man 10 mal, liest danach das gesetzte Volumen des Probematerials auf 10 ml genau ab und bestimmt die Masse des gefüllten Messzylinders auf 1 g genau. Die ganze oben beschriebene Prozedur ist drei mal mit jeweils locker eingefülltem Probematerial durchzuführen.

B.2.14.4 Rottegrad im Selbsterhitzungsversuch

Der Selbsterhitzungsversuch, der eine Aussage über den Rottegrad liefert, muss bei einem optimalen und standardisierten Wassergehalt der Probe, der mittels der sogenannten „Faustprobe“ eingestellt wird, durchgeführt werden.

Die Proben sollen für den Selbsterhitzungsversuch noch ganz frisch sein, d.h. sie sollen bei Raumtemperatur direkt nach der Probenahme oder wenn es nicht anders möglich ist nach einer Kühlung verwendet werden.

Einstellen des optimalen Wassergehaltes, der bei Komposten mit geringen organischen Gehalten kleiner ist als bei Komposten mit hohen Gehalten, mittels „Faustprobe“. Es wird dabei eine Kompostprobe in der Faust gepresst und zunächst geschaut ob zwischen den Fingern Wasserperlen austreten oder nicht. Kommt es zum Austritt von Wasserperlen, so ist die Probe zu nass. Zerfällt jedoch die Probe beim Öffnen der Faust ohne weiteres Zutun in der Hand, ist die Probe zu trocken. Die Probe besitzt einen optimalen Wassergehalt, wenn die gepresste Probe nach Öffnen der Faust unter leichtem Druck zerkrümelt – alleiniges Verformen deutet jedoch auf eine zu nasse Probe hin.

Zu trockenes Probematerial ist durch gleichmäßiges Einmischen von Wasser zu befeuchten, während zu feuchtes Material schonend auf die optimale Feuchtigkeit zu trocknen ist.

Die Probe mit dem optimalen Feuchtigkeitsgehalt (<10 mm) wird nun in die Dewar-Gefäße in loser Schüttung unter leichtem Stoßen auf einer Unterlage bis zum Rand gefüllt, wobei man den Temperaturfühler in das untere Drittel des Gefäßes positioniert. Nun stellt man die Gefäße bei Raumtemperatur offen auf und beschließt den Versuch, nachdem die Maximumtemperatur überschritten wurde (normal nach 2 bis 5 Tagen) und ein deutlicher Temperaturabfall bemerkbar ist oder spätestens nach 10 Tagen.

Der Wassergehalt für den Selbsterhitzungsversuch sollte über 35 % liegen.

Frischkompost besitzt einen Rottegrad von II und III, Fertigkompost hingegen einen Rottegrad von IV und V.

B.2.14.5 Pflanzenverträglichkeit mittels Kresse

Bewährt hat sich die schnell wachsende Gartenkresse (*Lepidium sativum*).

Abgesiebtes Kompostsubstrat wird locker in die Pflanzschalen bis zum Rand gefüllt, glattgestrichen und angegossen. Nachdem eine gleichmäßige Durchfeuchtung erfolgt und das überschüssige Wasser abgelaufen ist, werden 1 g Kresse gleichmäßig auf die Saatoberfläche ausgestreut, wobei Samen ohne Bodenkontakt angedrückt wird.

Nun deckt man die Schalen mit einer Glasplatte, die als Verdunstungsschutz dient, ab, wobei ein kleiner Zwischenraum für den Gasaustausch verbleiben sollte. Diese Glasplatte nimmt man erst wieder ab, wenn die Keimpflanze innerhalb der nun 7 tägigen (inklusive Tag der Aussaat) Wachstumsphase im Gewächshaus, diese berührt.

Ziel ist es nun einerseits den Wassergehalt der Pflanze bei einer Temperatur von 105 °C und andererseits den Glührückstand der getrockneten Pflanzenmasse bei 550 °C im Muffelofen zu bestimmen. Damit die Pflanzen nach der Ernte, die man 7 Tagen nach der Aussaat zwischen Wurzel und Stiel durchführt, nicht sofort an den Schnittflächen abtrocknen, soll die Ernte rasch vor sich gehen.

Im Vergleich baut man eine Kressekultur auf Einheitserde EE0, die mit Nährstoffdünger versehen wird, an.

Es wird zunächst beobachtet ob die Kresse überhaupt zu keimen beginnt. Für die empfindlichen Pflanzen kann man dabei eine Keimhemmung auf Kompost im Vergleich mit der Kultur auf Einheitserde leicht feststellen. Eine Keimhemmung oder schlechtes Wachstum kann bei Kresse oft auf einen erhöhten Salzgehalt im Substrat zurückgeführt werden.

B.2.14.6 Keimfähige Samen und austriebsfähige Pflanzenteile

Will man Kompost als Mischkomponente für Kultursubstrate verwenden muss er *frei* von keimfähigen Samen und austriebsfähigen Pflanzenteilen sein. Hingegen für die Anwendung als Mulch- und Bodenverbesserungsmittel muss der Kompost *weitgehend frei* von keimfähigen Samen und austriebsfähigen Pflanzenteilen sein.

Zunächst wird das abgesiebte und feuchte zu prüfende Substrat auf eine Temperatur von +4°C gebracht. Nach 3 Tagen wird dann eine Menge von ca. 3 Litern, mit einer geeigneten Mischkomponente so verdünnt, dass sich für das Prüfsubstrat ein Salzgehalt von < 2 g KCl/l ergibt. Man muss zuerst natürlich den Salzgehalt der Frischsubstanz kennen und nimmt den der Mischkomponente mit 0 g KCl/l an.

Für die Mischkomponente empfiehlt sich ein schwachzersetzer Hochmoortorf mit kohlensaurem Kalk von ca. 4 g/l, der frei von keimfähigen Samen und austriebsfähigen Pflanzenteilen sein muss.

In die, mit Gießmatten ausgelegten Versuchsschalen, wird nun die Nadelfolie - zum Schutz vor Verschmutzung – aufgebracht und anschließend wird das gemischte Substrat gleichmäßig in die Schalen mit einer Schicht von ca. 10 mm aufgebracht, leicht angedrückt und auf volle Wasserkapazität gegossen.

Die Versuchsschalen werden nun so aufgestellt, dass sie keine direkte Sonnenstrahlung und eine Raumtemperatur von 18 – 20°C erhalten. Dabei soll der Wasserverlust durch Bewässerung regelmäßig ausgeglichen werden, wobei sich eine Abdeckung mit Glas- oder Kunststoffscheiben empfiehlt. (Luftspalt offen lassen)

Die gesprossenen Keimpflanzen werden nach Versuchsende gezählt und pro Liter Prüfsubstrat berechnet. Wenn möglich ist eine Artenzusammensetzung anzugeben.

Ergebnisse:

- ♦ *freier* Kompost von keimfähigen Samen und austriebsfähigen Pflanzenteilen:
< 0,5 Keimpflanzen/l Prüfsubstrat
- ♦ *weitgehend freier* Kompost von keimfähigen Samen und austriebsfähigen Pflanzenteilen:
< 2 Keimpflanzen/l Prüfsubstrat
- ♦ *deutlicher Gehalt* an keimfähigen Samen und austriebsfähigen Pflanzenteilen:
> 2 Keimpflanzen/l Prüfsubstrat

B.2.14.7 pH-Wert

Die Ermittlung des pH-Wertes erfolgt mit einem pH-Meßgerät in einer Suspension von Kompostfrischsubstanz in 0,01 molarer CaCl_2 -Lösung.

Zunächst wird die Suspension erstellt, indem man zu 20 g abgeseihten Probematerial 200 ml (Verhältnis: 1+10) einer 0,01 molaren CaCl_2 -Lösung gibt und mit einem Glasstab mehrmals umrührt. Nach einer Stunde kann man den pH-Wert mit dem kalibrierten pH-Messgerät ermitteln, wobei die Temperatur der Suspension ebenfalls zu messen ist.

B.2.14.8 Glühverlust und organischer Kohlenstoffgehalt

Zuerst wiegt man den leeren, trockenen Porzellantiegel ab, füllt ihn mit ca. 30 g der zerkleinerten, trockenen Probe und wiegt ihn erneut ab. Nun stellt man den vollen, gewogenen Porzellantiegel in den Muffelofen, wo er bis zur Gewichtskonstanz bei 550 °C verweilt (ca. 2 bis 3 Stunden). Danach nimmt man den Tiegel aus dem Ofen, lässt ihn im Exikator abkühlen und wiegt den Porzellantiegel erneut ab.

Der Glühverlust und der organische Kohlenstoffgehalt werden auf die Trockensubstanz bezogen und in Prozent angegeben.

B.2.14.9 Fremdstoff- und Steingehalt

Fremdstoffe wie Steine sind unerwünschte Inhaltsstoffe in Komposten, die auf der einen Seite das optische Erscheinungsbild beeinträchtigen und andererseits bei der Anwendung von Komposten störend wirken können.

Zu den Fremdstoffen, die meistens nicht organische Stoffe sind und optisch auffallen, zählen Metalle, Kunststoffe, Glas, Verbundstoffe, etc. nicht aber Papier. Da kleinere Fremdstoffpartikel nicht so auffallen, werden für die Bewertung des optisch wirksamen Verunreinigungsgrades nur Fremdstoffe im Kompost mit Partikelgröße >2 mm gezählt.

Für Steine, die nicht zu den Fremdstoffen zählen, sind Partikelgrößen >5 mm von Bedeutung.

Abhängig von der Korngröße des Kompostes werden unterschiedliche Mengen an getrocknetem (105 °C) Prüfsubstrat benötigt.

- ◆ feinkörniger Kompost (0 bis 10 mm): 1 Liter
- ◆ mittelkörniger Kompost (0 bis 20 mm): 2 Liter
- ◆ grobkörniger Kompost (0 bis >20 mm) 3 Liter

Bevor nun die getrocknete Probe durch ein 5 mm Sieb und dieser Siebdurchgang durch ein 2 mm Sieb gerieben wird, wiegt man die Probe ab. Die Siebfraction >5 mm wird für die Bestimmung der Steine herangezogen, wobei diese ausgelesen und abgewogen werden. Die Siebfraction 2-5 mm wird danach mit der >5 mm vereinigt, auf einer flachen Unterlage ausgebreitet und die Fremdstoffe mit der Pinzette ausgelesen. Bei dieser Untersuchung sollte jeweils nicht mehr als 100 ml vereinte Siebfraction behandelt werden. Die Fremdstoffe >2 mm werden nun gesondert gefasst und gewogen. Der Siebdurchgang < 2mm wird verworfen.

B.3 Grundlagen der Mikrobiologie

B.3.1 Grundformen der Bakterien [20], [22]

Die meisten Bakterien lassen sich der Gestalt nach von der Kugel und dem Zylinder ableiten. Als Grundformen unterscheidet man Kokken (kugelförmig) oder stäbchenförmige Bakterien. Letztere können gleich dick mit abgerundeten Enden, keulenförmig (Korynebakterien) oder an den Enden zugespitzt (Fusobakterien) sein, aber auch pleomorphe Fäden bilden.

Gekrümmte Stäbchen können einfach gekrümmt sein (Vibrionen) oder spiralige bzw. schraubenförmige Krümmungen haben (Spirochäten).

Nach der Zellteilung bleiben bei vielen Bakterien die Zellen in ganz charakteristischen Formationen beisammen. Man kann somit aufgrund der Zellteilungsebene und der Anzahl der Zellteilungen in Kokkenpaare (Diplokokken), Kokkenketten (Streptokokken) oder Kokkenhaufen (Staphylokokken) unterscheiden.

Für die Stäbchenbakterien unterscheidet man Paar- und Kettenbildung.

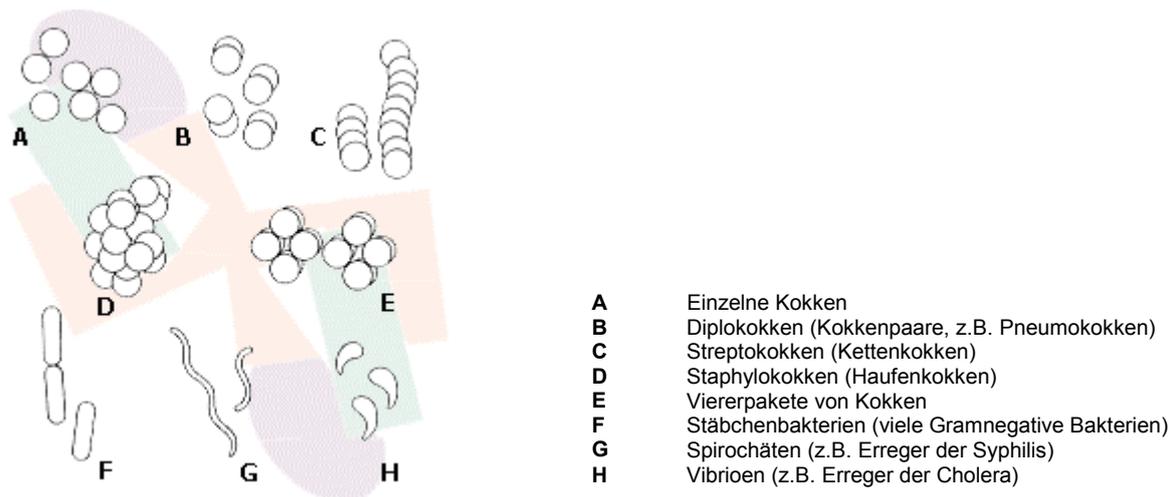


Abbildung B-3 Typische Bakterienformen

B.3.2 Aufbau einer Bakterienzelle [20, 22]

Im Vergleich zur menschlichen Zelle ist die der Bakterien wesentlich kleiner, besitzt keinen echten Zellkern und keine Organelle (z.B. Mitochondrien). Hingegen hat sie eine Zellwand und statt dem Zellkern ein Kernäquivalent.

☞ Kernäquivalent (Nukleoid)

Enthält einen Grossteil der bakteriellen Gene. Das Chromosom, ein ringförmiges DNA-Molekül liegt frei im Cytoplasma.

☞ Zytoplasma

Ist der Inhalt einer Zelle, jedoch ohne Nukleoid. Enthält in Wasser gelöste nieder- und hochmolekulare Stoffe, Ribonukleinsäuren und Ribosomen.

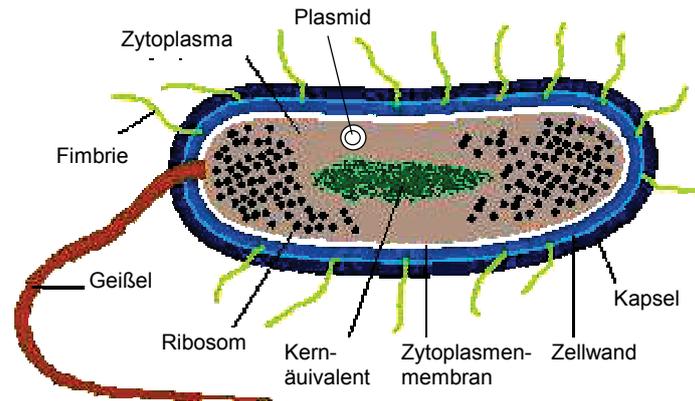


Abbildung B-4 Aufbau einer Bakterienzelle

Quelle: <http://www.eduvinet.de/mallig/bio/Repetito/Bbgenet.html>

☞ Zytoplasmenmembran

Sie umhüllt das Cytoplasma und durch diese semipermeable Doppelschicht aus Phospholipiden erfolgt der Stofftransport.

Geladene Stoffe und Stoffe mit Molekulargewichten über 1000 können nicht durch sie diffundieren. Solche Stoffe müssen mittels spezifischer Membranproteine transportiert werden. Dies kann auch unter Verbrauch von Energie (ATP) gegen einen Konzentrationsgradienten erfolgen (aktiver Transport).

In der Zytoplasmenmembran sind auch die Enzyme der oxidativen Phosphorylierung eingebaut.

☞ Zellwand

Sie gibt der Zelle die charakteristische äußere Form und ist komplex zusammengesetzt. Das Stützskelett der Bakterienzellwand besteht aus untereinander vernetzten Polysaccharidketten, dem Murein. Dieses Glykopeptid ist aufgebaut, indem zwei aneinandergeschaltete „Zucker“ lange unverzweigte Ketten bilden, die in einem gewissen Abstand parallel verlaufen und mit kurzen Peptiden (Aminosäuren) rechtwinklig verbunden werden. Dieses Mureinnetz gibt der Zelle Form und Halt.

Die Zellwand ist verantwortlich für die spezifische Gramanfärbbarkeit, für die Adhärenz an Epithelzellen, für die Invasivität und für die Antigenität (O-Antigene).

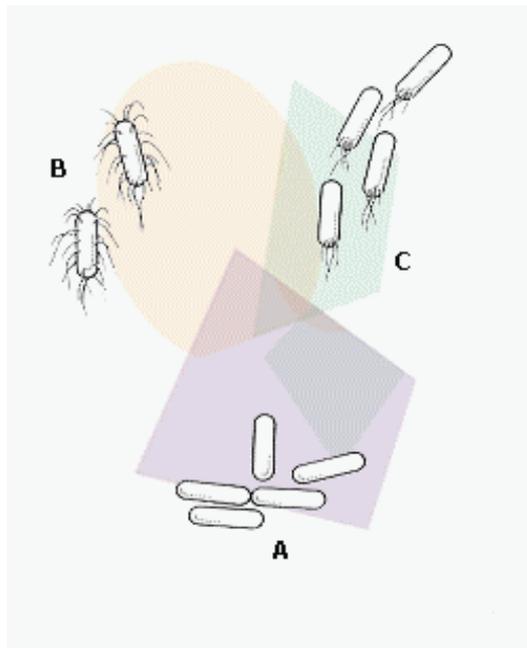
Bei gramnegativen Bakterien haben Teile dieser Wand Toxinwirkung. Dieses Endotoxin ist ein Lipopolysaccharid und wird selbst bei der Sterilisation im Autoklaven nicht inaktiviert.

☞ Kapsel

Die aus einem Polysaccharidpolymer bestehende, relativ feste Schleimschicht, schützt die Zelle vor Phagozytose (Auflösung u. Unschädlichmachung) und besitzt Antigeneigenschaft. Wenn das Polysaccharidnetzwerk sehr lose um die Zelle angeordnet ist (Glykokalix), können Bakterien an glatten Oberflächen oder an Wirtszellenoberflächen „ankleben“.

☞ Geißeln

Sie dienen zur Fortbewegung der Zelle und befinden sich nur an beweglichen Bakterien. Geißeln bestehen aus Proteinen und haben Antigeneigenschaft (H-Antigene). Der Wirkungsweise nach können sie als Schub- oder Zuggeißeln funktionieren, wobei ihre Anordnung charakteristisch ist. So gibt es Bakterien mit nur einer Geißel, einem Geißelbüschel oder rundherum begeißelte Bakterien.



- A Grundform der Gram-negativen Stäbchen-Bakterien ohne Geißeln
- B Peritriche Begeißelung (rundherum begeißelt)
- C Polare Begeißelung (an einem Ende begeißelt)

Abbildung B-5 Begeißelungsformen von Bakterien

☞ Bakteriosporen

Diese Dauerformen können nur wenige Bakterienarten bilden und dienen dem „Überleben“ des Bakteriums in ungünstigen oder feindlichen Umgebungen. Die Sporen können jahre- bis jahrzehntelang lebensfähig sein und sind kugelig bis oval, sowie stark lichtbrechend. Zur Sporenbildung kann es kommen, wenn Nährstoffe fehlen oder zu viele Stoffwechselprodukte angehäuft sind. Im günstigen Nährmilieu erfolgt wieder die Umwandlung in die vegetative Zellform. Sporen sind sehr hitzebeständig.

☞ Pili und Fimbrien

Pili (Konjugations- oder Sexualpili) sind Proteinrohre und für die Übertragung von DNA von einer Zelle zur anderen (Konjugation) sowie der Adhäsion ans Wirtsgewebe verantwortlich.

Fimbrien sind Proteinfäden, die die Zelle pelzartig umgeben und vor allem auf gramnegativen Bakterien vorkommen. Sie haben Antigeneigenschaften und sind für die Adhärenz (Anbindung) an die Wirtszelle verantwortlich.

☞ Ribosom

Besteht hauptsächlich aus Ribosenukleinsäuren und Proteinen und ist für den Eiweißaufbau wichtig.

B.3.3 Gram-positive und Gram-negative Bakterien [20], [22]

Bakterien werden in zwei Gruppen, den Gram-positiven und Gram-negativen Bakterien eingeteilt. Durch die unterschiedlichen Zellwand-Eigenheiten kann man die Gram-Zugehörigkeit eines Bakteriums feststellen.

Die Färbemethode nach Gram (1884) wird folgendermaßen durchgeführt.

Zunächst werden die Bakterienzellen auf einem Objektträger ausgestrichen (verteilt) und hitzefixiert. Danach wird erst mit dem Farbstoff Kristallviolett angefärbt und anschließend mit Jodlösung behandelt. Durch diesen Vorgang werden in Wasser unlösliche und in Alkohol oder Azeton nur mäßig lösliche Lacke gebildet.

Auf diese Tatsache der Löslichkeit basiert die Unterscheidung in Gram-positive oder Gram-negative Bakterien. Die Objektträger mit den Bakterien werden nun mit Alkohol gewaschen.

Gram-positive Zellen halten den Farbstoff-Jod-Komplex zurück und bleiben blau, Gram-negative Zellen werden entfärbt. Letztere kann man durch Gegenfärbung (rot) sichtbar machen.

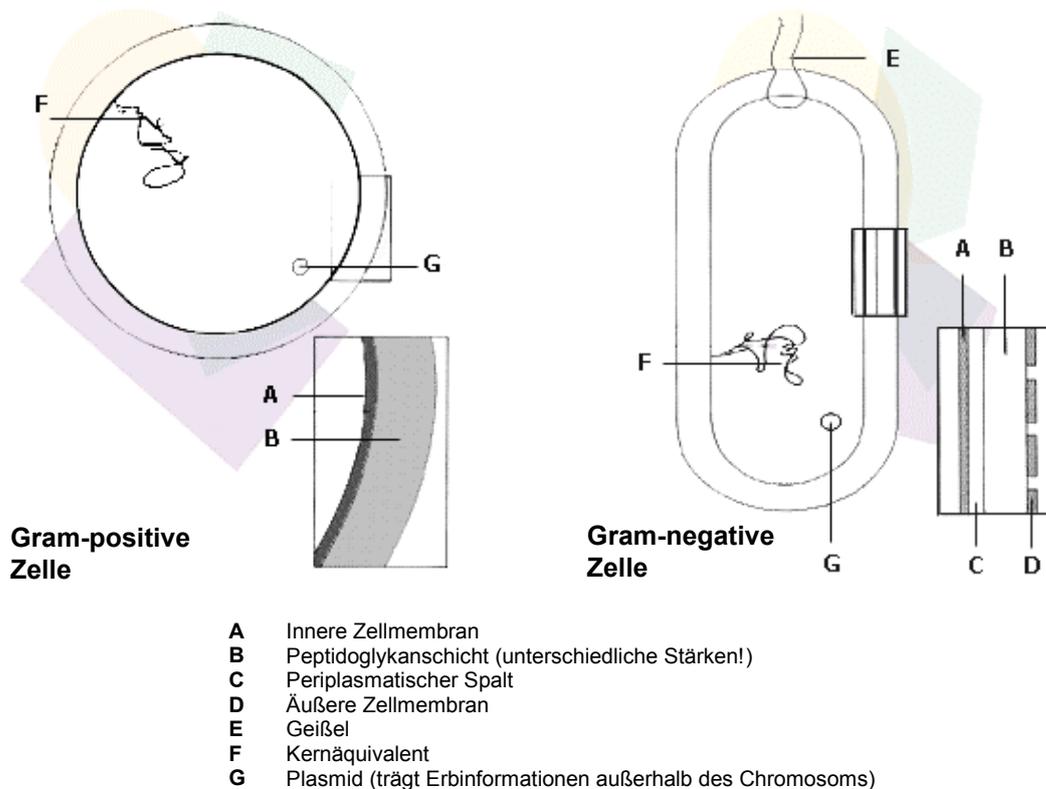


Abbildung B-6 Zellwände von Gram-positiven und Gram-negativen Bakterien

In Abbildung B-6 ist der unterschiedliche Zellwandaufbau der beiden Bakteriengruppen gut ersichtlich. Haben Gram-positive Zellen eine dicke, aber relativ einfach aufgebaute Zellwand, so findet man bei den Gram-negativen Zellen dünne, aber kompliziert aufgebaute Wände.

B.3.4 Bakterienstoffwechsel [20]

Darunter sind alle in der Bakterienzelle ablaufenden, zur Erhaltung und Vermehrung von Lebewesen notwendigen Reaktionen zu verstehen.

Sämtliche in der Natur vorkommenden organische Stoffe dienen als Nährsubstrate (vor allem Kohlenhydrate, Stickstoff, Mineralien und Spurenelemente). Beim Abbau dieser Nährstoffe, der über eine Reihe enzymatischer Prozesse abläuft, wird Energie gewonnen.

Man unterscheidet zwischen zwei Grundformen der Oxidation:

- ♦ Atmung (Respiration): Energiegewinnung durch Sauerstoffaufnahme
- ♦ Gärung (Fermentation): Energiegewinnung durch Gärung (ohne Sauerstoff)

Genauer betrachtet gibt es:

- ♦ Fakultative Anaerobier: können Nährsubstrate sowohl veratmen als auch vergären (viele aeroben Bakterien sind in Wirklichkeit fakultativ anaerob)
- ♦ Obligate Aerobier: können sich nur bei Anwesenheit von O_2 im Nährmedium vermehren
- ♦ Obligate Anaerobier: sterben bei Anwesenheit von O_2 ab; Sie können aufgrund der fehlenden Katalase das giftige Stoffwechselprodukt H_2O_2 nicht abbauen.

B.3.5 Wachstum und Zelltod [20], [22]

Für das Wachstum der Bakterien sind ein günstiger pH-Wert, eine bestimmte Temperatur, sowie besondere Nährstoffansprüche notwendig.

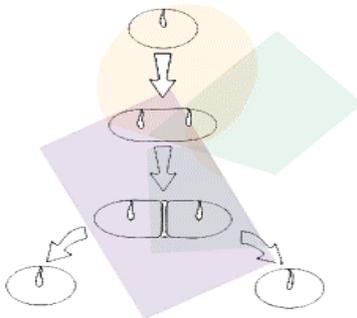
B.3.5.1 Vermehrung

Die Vermehrung einer Zelle erfolgt durch einfache Spaltung oder Zweiteilung. Das einzige ringförmige, aus zwei DNA – Strängen bestehende Chromosom, das die genetischen Informationen der Zelle trägt, entspiralisiert sich unter Beteiligung bestimmter Enzyme (Gyrasen). Die beiden Stränge weichen auseinander und die komplementären Bausteine setzen sich so an jeweils einen Einzelstrang, dass wieder zwei identische Doppelstränge gebildet werden.

Ebenfalls mit dieser Zweiteilung geht auch die des Plasmas einher.

Nach außen hin wird die Zelle mit einer Membran und einer Zellwand umgeben.

Die Generationszeit beträgt bei schnell wachsenden Bakterien 15 bis 20 Minuten und kann durch Nährstoffmangel verlängert werden.



Das Bakterium wächst primär in die Länge.

Das Chromosom verdoppelt sich.

Eine Zellwand wird zwischen den beiden entstehenden Tochterzellen gebildet.

Nun können sich die Tochterzellen voneinander lösen.

Abbildung B-7 Vereinfachte Darstellung der Zellteilung eines Bakteriums

Die Zunahme der Zellzahl N in einer Bakterienkultur in Abhängigkeit von der Anzahl Zellgenerationen n lässt sich durch die Exponentialfunktion

$$N = N_0 \cdot 2^n$$

beschreiben, wobei N_0 die Ausgangszellzahl der Messung darstellt.

Angenommen eine Kultur geht von $N_0 = 1$ Zelle aus und alle Zellen teilen sich gleichförmig. So erreicht die Gesamtzahl nach $n = 10$ Zellgenerationen einen Umfang von $(N = 1 \cdot 2^{10})$ 1024 Zellen.

Generationendauer nennt man die Zeit, welche zur Verdoppelung der Zellzahl benötigt wird. Eine exponentielle Zunahme der Zellzahl in Abhängigkeit von der Zeit ist nur unter Bedingungen gegeben, wo die Generationendauer konstant bleibt.

B.3.5.2 Wachstumskurve

Eine Wachstumskurve erhält man, indem man ruhende Bakterien in ein flüssiges Medium impft und in regelmäßigen Zeitabständen ihre Anzahl bestimmt.

- ♦ Lag-Phase: Bakterienstoffwechsel passt sich an das neue Milieu an; keine Vermehrung, nur Größenzunahme der Zelle
- ♦ Exponentielle Phase: Exponentielle Zunahme bis max. 10^{10} Bakterien/ml
- ♦ Stationäre Phase: Verlangsamung der Vermehrung infolge Nährstoffmangel. Anhäufung von toxischen Stoffwechselprodukten
- ♦ Absterbphase: Bakterien sterben ab

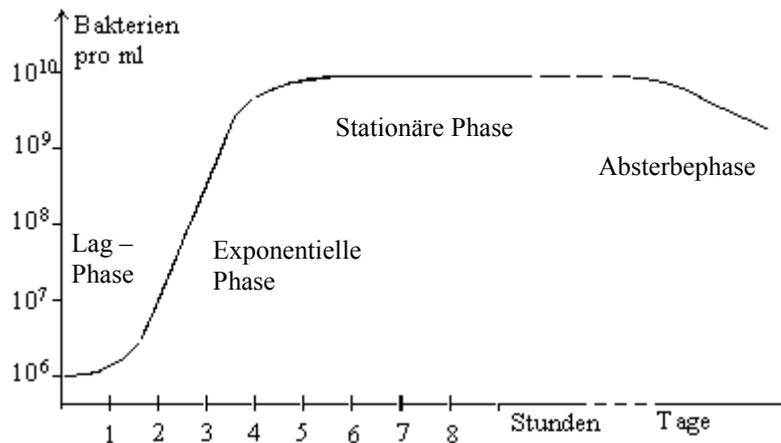


Abbildung B-8 Wachstumskurve von Bakterien

B.3.6 Bakteriengenetik

Im DNA - Molekülfaden des Kernäquivalents sind die genetischen Informationen der Bakterien gespeichert (Bakterienchromosom).

Neben dieser chromosomalen DNA gibt es in den Bakterien außerhalb des Kernäquivalents weitere autonom sich vermehrende DNA – Moleküle, die Plasmide. Sie sind für den Normalzellmetabolismus überflüssig und verändern meist auch nicht das Erscheinungsbild der Bakterien.

Drei Gruppen von Plasmiden werden unterschieden:

- ◆ Virulenzplasmide: genetische Determinanten der Virulenz
- ◆ Resistenzplasmide: (R-Plasmide), beinhalten die genetischen Informationen für Resistenzen
- ◆ Metabolische Plasmide: Marker, die den Stoffwechsel ihrer Wirtszelle beeinflussen

Plasmide können nicht nur übertragen werden, sondern auch spontan oder induziert (z.B. durch UV-Strahlung) „verloren“ werden.

Plasmidnegative Zellen vermehren sich rascher als positive, da zusätzliche Gene vermehrte metabolische Leistungen erfordern.

Spontane und ungerichtete Änderungen des Erbgutes von Bakterien nennt man Mutationen.

B.3.7 Toxische Wirkungen von Metallen auf Bakterien [21]

Die Toxizität eines Metalls hängt primär von der einwirkenden Konzentration ab.

Toxische Effekte können folgendes bewirken:

- ◆ Blockade von funktionalen Gruppen, wie Enzyme, Nucleoide
- ◆ Blockade wichtiger Transportsysteme für die Nahrungsversorgung
- ◆ Verlust und Inaktivierung von Enzymen
- ◆ Zerstörung von Zellstrukturen wie Membran oder Organellen

Generell können toxische Metalle stabile Verbindungen mit verschiedenen Zellkomponenten eingehen.

Trifft die Zelle auf ein „gefährliches“ Metall, so wird es zunächst von der Kapsel geschützt. Die äußere Zellmembran und Zytoplasmemembran sind die Barrieren gegen das Eindringen von gelösten Substanzen in das Zellinnere. Gram-negative Bakterien verfügen in der äußeren Zellmembran über Proteine, welche nur den Eintritt von Verbindungen mit niedrigem Molekulargewicht erlauben.

B.3.8 Physische und biologische Eigenschaften des Chroms [21]

Chrom findet man in der Natur vorwiegend in dreiwertiger Form mit Konzentrationen in der Luft $< 0,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$, dem Boden zwischen 5 und 1500 mg/kg und Wasser bei ca. $1 \mu\text{g}/\text{l}$. Das weniger stabile, jedoch weitaus toxischere sechswertige Chromat wird aufgrund der freiwerdenden Energie zum Cr (III) reduziert, was in folgender chemischer Gleichung zu sehen ist.



Dies wiederum bedeutet, dass eine Oxidation von Cr (III) zu Cr (VI) Energie benötigt, weshalb dieser Prozess nicht spontan in der Natur abläuft.

Chromate sind toxische, sowie mutagene als auch kanzerogene Substanzen, wobei sich die Mutagenität aber nur bei Cr (VI) zeigte.

Für die Toxizität gilt prinzipiell gilt das alte Sprichwort: „Die Dosis macht das Gift!“.

Durchschnittlich nimmt der Mensch täglich $60 \mu\text{g}$ Cr auf.

Toxizitätsuntersuchungen (LD_{50}) bei Ratten lieferten bei löslichen Chrom-III Verbindungen für Cr-Sulfat, wie auch für Cr-Nitrat, Werte um die 3500 mg pro kg Körpergewicht. Für unlösliche Chrom-III Verbindungen konnte keine letale Dosis festgestellt werden.

In Versuchen konnte nachgewiesen werden, dass dreiwertiges Chrom nicht in die Zellmembran eindringen kann.

B.3.9 Bakterienresistenz [21], [24]

Prinzipiell unterscheidet man zwischen natürlicher und erworbener Resistenz.

Die natürliche Resistenz ist auf das Wirkungsspektrum einer Arteigenschaft von Bakterien zurückzuführen.

Die erworbene Resistenz ist durch das Auftreten resistenter Stämme empfindlicher Bakterienarten charakterisiert.

B.3.9.1 Resistenzmechanismen allgemein

- ◆ Produktion inaktivierender Enzyme: vor allem durch R – Plasmide bedingt
- ◆ Resistente Zielmoleküle: Unempfindlichkeit der normalerweise empfindlichen Angriffspunkte
- ◆ Permeabilitätsbarriere: Ist ein Mechanismus der dafür sorgt, dass die Substanzen ihren Wirkungsort nicht mehr erreichen, z.B. durch Veränderung der Permeabilität der Zellwand oder durch Störung des Transportes durch diese.
- ◆ andere Mechanismen: z.B. gesteigerte Bildung von Stoffwechselprodukten, die das Antibiotikum antagonisieren

B.3.9.2 Resistenz gegenüber Metallen von Bakterien

Es gibt tolerante und resistente Bakterien.

Resistenz ist definiert als die Überlebensfähigkeit von Mikroorganismen bei Anwesenheit von toxischen Metallen, aufgrund ihrer produzierten Entgiftungsmechanismen gegenüber dem Metall (z.B. bakterielle Reduktion von Hg(II) zu Hg (0)).

Toleranz ist die Überlebensfähigkeit von Mikroorganismen bei Anwesenheit von toxischen Metallen, wobei wesentliche Eigenschaften der Toxizität des Metalls durch Umwelteinflüsse geändert werden.

Studien zeigten, dass Gram-negative Bakterien sich bei Vorhandensein von Schwermetallen viel besser adaptieren können, als Gram-positive Bakterien.

Die Fähigkeit des Bakterienwachstums bei hohen Metallkonzentrationen hängt von verschiedenen Faktoren ab:

- ◆ Biochemischen Eigenschaften und den Strukturen
- ◆ Genetische oder physiologische Anpassungsfähigkeit
- ◆ Einflüsse von außen wie biologische Verfügbarkeit und Toxizität des Metalls

In Versuchen konnte gezeigt werden, dass kontaminierte isolierte Bakterienstämme eine größere Anzahl von Plasmiden und ein höheres Molekulargewicht aufweisen, als nichtkontaminierte Proben. Für Resistenz eines Bakteriums sind unter anderem seine Plasmide ein wichtiger Faktor.

☞ Aufgabe von Metallionen in Bakterien

Prinzipiell werden 96 % der trockenen Zellmasse von den nichtmetallischen Elementen C, O, H, N, P und S gebildet. Die Zelle benötigt aber auch Metallionen.

Diese Ionen haben verschiedene Aufgaben und werden verwendet:

- ◆ für Redox – Prozesse (speziell die Metalltransporten wie Fe, Cu, und Ni)
- ◆ um andere Moleküle mittels elektrostatische Kräfte zu stabilisieren (Mg^{2+} in Mg^{ATP} , Zn^{2+} in verschiedenen Enzymen und DNA-Bindungsregulationsproteine)
- ◆ um komplexe Komponenten mit verschiedenen Funktionen (Fe^{2+} -, Mg^{2+} -, Ni^{2+} - and Co^{2+} -haem, Fe-S-Cluster) zu bilden
- ◆ für den innerzellulären osmotischen Druck zu sorgen (K^+)
- ◆ als Zählion für die gebildeten Nichtmetallblocks und Stoffwechselfvorgänge in der Zelle.

Hiermit kann man sehen, dass Metallionen für Zellen außerordentlich wichtig sind.

Nichtmetallische Elemente, wie C, O, H und N, werden bei Bedarf von der Zelle eingelagert bzw. bei Nichtbedarf ausgeschieden. Dieser Vorgang ist bei Metallionen nicht möglich. Deshalb muss die innerzelluläre Konzentration der notwendigen Metallionen geregelt werden. Die Hauptregulierung ist eine Membran für die Transportsysteme.

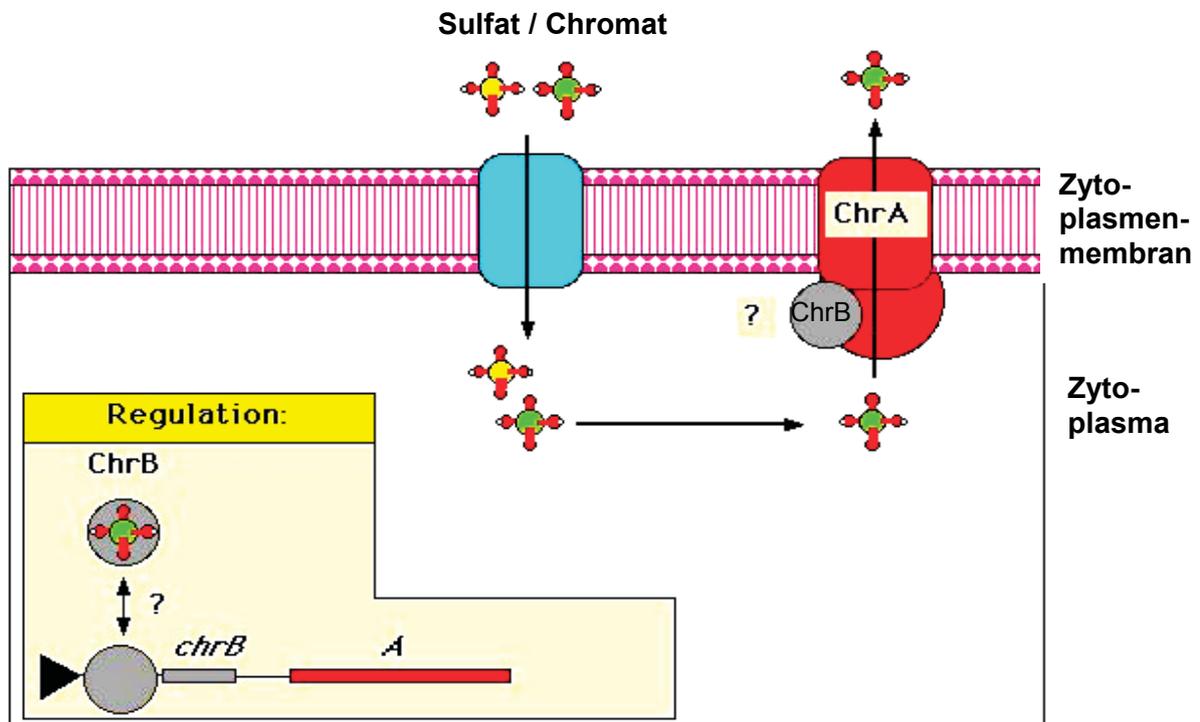
Das Vorhandensein eines Metallionen – Transporters ist abhängig vom jeweiligen Metallion, der Spezies des Bakteriums und dem physiologischen Status der Zelle.

Herrscht nun Mangel an Metallionen in der Zelle, werden spezielle Transportsysteme mit hoher Affinität benötigt. Dies wiederum bedeutet zusätzlichen Energieaufwand für die Bildung von Proteinen und manchmal auch für die Aufrechterhaltung deren Funktion.

Bei Metallionenüberfluss werden Metallionen – Ablasssysteme (Efflux) gebildet, die das Zuviel an Ionen aus der Zelle ausschleusen.

Diese Ablasssysteme tragen wesentlich zur Resistenz gegenüber den Kationen und Anionen von As, Cd, Zn, Co, Ni und Cr bei.

B.3.9.3 Chromresistenz

Abbildung B-9 Transport von Chrom und Resistenz in *Alcaligenes eutrophus*

Quelle:

Nies und Silver (1995), <http://www.biologie.uni-halle.de/Microbiology/nies/Paper/JIM.html>

In Abbildung B-9 wird der Transport von Chromat über den Sulfat-Transporter in das Zytoplasma veranschaulicht. Bei zu hohen Chromatkonzentrationen in der Zelle wird das Chromat über das ChrA – Protein (möglicherweise mit dem Protein ChrB) nach außen gepumpt. Die Regulation des ChrB-A Prozesses wird möglicherweise vom Protein ChrB übernommen.

Die Chromresistenz in Abbildung B-9 von *Alcaligenes eutrophus* wird durch die chr-Determine, die sich im Plasmid pMOL28 befindet, hervorgerufen. Diese Determinante verschlüsselt die zwei Proteine ChrA und ChrB, wobei das Gen ChrA vom Gen ChrB abgeleitet wird.

Eine andere Determinante der Chromresistenz kann im Plasmid pUM505 gefunden werden. Das Protein ChrA von *A. eutrophus* weist 29 %ige Übereinstimmung seiner Aminosäuren mit dem des Proteins ChrA von *Pseudomonas* auf.

Wird das ChrB aus der Zelle entfernt, so führt dies zu einer Anhäufung von Chromat in *A. eutrophus*.

Die Chromresistenz ist das Ergebnis der geringen Anhäufung von Chromat in den Bakterien *Alcaligenes* und *Pseudomonas*

Durch die Resistenz kann ein Gram-negatives Bodenbakterium, wie *Alcaligenes eutrophus*, sich auch in stark mit Schwermetallen belasteten Böden gut vermehren. Metalle wie die Ionen von Zink, Kobalt, Cadmium und Nickel werden durch Export vom Bakterium entgiftet. Ist die induzierbare *Chr* Resistenz-Determinante vorhanden, so kann auch Chromat, Cr(VI) verringert und in der Zelle akkumuliert werden.

Neuerdings zeigte sich, dass nicht nur der ChrA-Transporter über sein Abflusssystem (Efflux) Chromat ausschleusen kann und so für die Entgiftung verantwortlich ist. Es wird auch Chromat direkt in den Zellen reduziert. Durch den Sulfat-Mangel wird einerseits die Aufnahme von Chromat (durch Sulfat-Aufnahme-Systeme) gefördert, sowie eine verstärkte Reduktion – wahrscheinlich zu Cr (III) – bewirkt.

Neben den Chr-Determinanten sind weitere (flankierende) Gene für den Chromat-Stoffwechsel verantwortlich. Das Chr-System könnte das divalente Cr (II)-Kation durch den Efflux entgiften.

B.3.10 Biofilm [25]

Mikrobieller Abbau von Stoffen erfolgt meist in der Form, in dem die Oberfläche des abzubauenen Stoffes (Trägermaterial) mit Bakterien umhüllt wird.

Der überwiegende Anteil von Mikroorganismen befindet sich nicht frei in Suspension, sondern ist an Trägermaterialien gebunden, wobei sie diese gewissermaßen als „Biofilm“ überziehen.

In der Biotechnologie erfüllen Biofilme wichtige Funktionen, wobei sie z.B. als biologische Filter wirken und biologisch abbaubare Stoffe aus dem Wasser entfernen zu können und somit Selbstreinigungskräfte der Umwelt aufweisen. Jedoch können sie auch an unerwünschten Stellen auftreten und zu massiven technischen und wirtschaftlichen Schäden führen.

Biofilme sind überall verbreitet und kommen unter extremen Bedingungen von Temperatur, pH-Wert, Druck, Redoxpotential oder Strahlung vor (Überblick bei Flemming, 1991). In allen nicht-sterilen Wassersystemen ist mit Biofilmen zu rechnen

Biofilme sind heterogen aufgebaut. Sie bestehen aus einer stark wasserhaltigen Matrix (EPS – extrazelluläre polymere Substanz - mit bis zu 98 % WG), einem Cluster von Mikroorganismen, großen und kleinen Poren sowie Kanäle, in denen auch konvektiver Transport von Wasser und gelösten Stoffen möglich ist.

Die aus extrazellulären polymeren Substanzen (EPS) aufgebaute Matrix ist heterogen, wobei ihre Bestandteile stark variieren können. Entscheidend dabei ist, welche Mikroorganismen anwesend sind, unter welchen Nährstoffbedingungen sie sich befinden, welche hydrodynamische Bedingungen vorliegen und wie alt der Biofilm ist. Im wesentlichen bestehen die EPS aber aus Polysacchariden und Proteinen, enthalten aber auch Lipide, Nucleinsäuren und andere Bestandteile der Biofilm-Zellen (Christensen u. Characklis, 1990; Christensen, 1989; Neu, 1991; Cooksey, 1992; Lazarova u. Manem, 1995).

Diese hydratisierte, gelförmige Schleim-Matrix ist vermutlich wie ein Schwamm aufgebaut, kann aber auch fibrilläre Strukturen enthalten.

Biofilme können sich folgendermaßen bilden (Characklis, 1981):

- ◆ organische Moleküle werden zur Trägeroberfläche transportiert
- ◆ Adsorption dieser an die Oberfläche
- ◆ Adhäsion der Zellen an die Trägeroberfläche
- ◆ Wachstum der Kolonien an der Oberfläche

C Praktischer Teil

C.1 Kompostierung

C.1.1 Einleitung

Die bei der Kompostierung behandelten festen Gerbereiabfälle sind jene nicht-chromhaltigen, die in den Prozessschritten „Entfleischen“ und „Spalten anfallen. Ziel dieser Untersuchungen ist es, für chilenischen Gerbereien Wege aufzuzeigen, wie sie kurzfristig und mit geringen Investitionskosten bis zu 75% ihrer Gesamtabfallmenge verwerten können.

Da es sich bei den Abfällen um organisches Material handelt, liegt eine biologische Behandlung – anaerob oder aerob - nahe.

Im Vergleich zur aeroben Behandlung (Kompostierung) bringt die Anaerobbehandlung (Gewinnung von Biogas) sowohl einen größeren anlagentechnischen Aufwand wie auch eine komplexere und schwierigere Prozessführung mit sich.

Aus dieser Überlegung heraus ist die Entscheidung für die Aerobbehandlung (Kompostierung) gefallen. Die Abfälle bestehen aus stickstoffreichem, strukturlosen (breiförmigen) Ausgangsmaterial. Damit scheidet eine Kompostierung ohne Zugabe von strukturgebendem Material aus. Als gangbarer Weg wurde die Co-Kompostierung (Mischung mit kohlenstoffhaltigen, strukturreichen Substrat) gesehen.

Da Gerber keine Kompostproduzenten sind und in Chile der Markt für Kompost bis dato nur sehr schwach entwickelt ist, wurde folgende Zielhierarchie ausgearbeitet: „Ziel der Untersuchungen ist es, einen biologischen Prozess zu entwickeln, der es Gerbereien erlaubt, mit einem Minimum an Arbeitsaufwand, Betriebskosten und Investitionskosten und geringst möglichen negativen Umweltauswirkungen aus dem Abfallprodukt „fleshing“ ein biologisch-stabiles Produkt herzustellen. Dieses Produkt soll auf seine Einsatzmöglichkeiten als Düngemittel beurteilt und optimiert werden“. Der Kompostqualität wurde aus obenstehenden Gründen bewusst die niedrigste Priorität zugeordnet.

Definitionen einiger fachspezifischer Ausdrücke:

fleshing:	nicht chromhaltige feste Abfälle aus Gerbereien, bestehend aus Fleisch- und Fettresten des Unterhautbindegewebes anfallend in den Prozessschritten Entfleischen und Spalten (ca. 10% Fett (Talg), ca. 80 % Wasser, pH = 13 – 14, C/N = 10)
Rinde:	Rinde von Bäumen - Strukturgeber
Holzchips:	Holzplättchen (max. Korngröße: 50 mm, max. Dicke: 5 mm) – Strukturgeber
Strukturkompost:	mit Kompost behaftete Holzchips, aus den abgeseibten Verrottungsprodukten diverser Mieten
Marktabfälle:	Gemüse- und Obstabfälle aus der städtischen Markthalle – Co-Substrat (C/N = 34 – 80, siehe Anhang)
Pferdeestreu:	Pferdeexkrementen gemischt mit Sägespäne – Co-Substrat und Strukturgeber

Tabelle C-1

Wassergehalt und C/N – Verhältnis von Substrat und Co-Substraten

Materialien [-]	Wassergehalt [%]	C/N - Verhältnis [-]
fleshing	81,4	10
Marktabfälle	~ 80	34 - 80
Pferdeestreu	51,4	5 - 25
Strukturkompost	~ 45	15

C.1.2 Mietenkompostierung

C.1.2.1 Versuchsbeschreibung

Ausgehend von der Überlegung eine einfache, kostengünstige Technologie ohne komplexe Prozessabläufe für Gerbereien (Klein- und Mittelbetriebe) zur Verfügung zu stellen, wurde die Trapezmiete für die aerobe Behandlung von fleshing herangezogen. Die bei diesen Untersuchungen gewonnenen Erkenntnisse wie Substratmischungen, Substratbeimischungen zur Strukturgebung, Belüftung, Bewässerung, Kompostqualität, etc., sollten ausreichend sein, um Kompostmieten im großtechnischen Stil für chilenische Gerbereien anzulegen.

Vier Mieten mit unterschiedlichen Substratmischungen wurden angelegt. Angestrebt wurde eine möglichst kurze Rottezeit, die Maximierung des Fleshinganteils sowie die Erreichung der Hygienisierungsbedingungen.

C.1.2.1.1 Aufbau der Mieten

Die vier Trapezmieten wurden auf einer 20 cm hohen Schüttung von Rindenmulch aufgebaut und hatten eine Basisfläche von 5x3 Metern und eine ungefähre Höhe von einem Meter. Um die aeroben Abbauvorgänge optimal ablaufen zu lassen und die Umsetzungsvorgänge der Mieten zu reduzieren, wurden die Rotten mit einer Druckbelüftung versehen. Diese bestand aus einem Ventilator, der zur Luftversorgung diente, vier perforierten Rohren ($\varnothing 75$ mm), die je eine Miete von ihrer Basis aus mit Luft versorgten und den notwendigen Ventilen zum Regulieren des Luftdurchflusses.

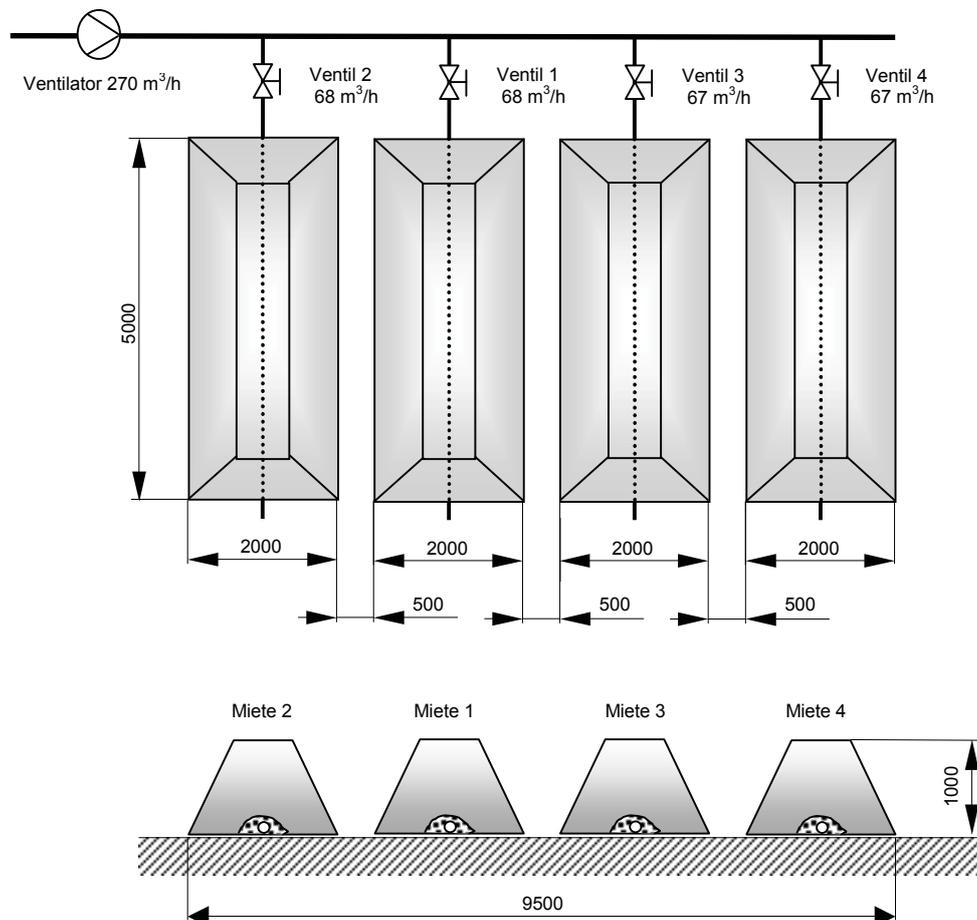


Abbildung C-1

Mietenanordnung

Fleshing der Gerberei GACEL S.A. haben eine Dicke von bis zu 40 mm und einer Fläche bis etwa 1 m². Bei diesen sehr wasserhältigen (ca. 80 %) Abfällen handelt es sich um zähe, „gummiähnliche“ Klumpen und Fetzen, die Zerteilen bzw. Ausbreiten schwierig machen. Ein Zerkleinern – „Faschieren“ – der Fleshing vor dem Kompostierprozess würde den bakteriellen Abbau durch erhöhte spezifische Oberfläche beschleunigen. Außerdem könnte eine homogene Mischung mit Co-Substraten bzw. Strukturmaterial erleichtert bzw. überhaupt erst ermöglicht werden.

Da Zerkleinern aber zusätzliche Investitionskosten sowie erhöhten Arbeitsaufwand bedeutet, sollte gezeigt werden, dass vorgeschaltetes Zerkleinern des Substrates für den Kompostierprozess nicht unbedingt erforderlich ist.

Eine Monokompostierung der fleshing scheid aufgrund ihrer relativ hohen Dichte und des hohen Wassergehaltes, was eher für einen anaeroben Prozess spricht, aus. Um für aerobe Bedingungen zu sorgen, ist die Zugabe von Strukturmaterial, wie Rinde oder Holzchips unabdingbar, wobei der Vorteil von Holzchips in seiner verhältnismäßig homogenen Korngröße liegt.

Zugabe von Co-Substrat, in den beschriebenen Fällen Marktabfälle und Pferdeeinstreu, kann auf der einen Seite das C/N – Verhältnis in den optimalen Startbereich von 20-30 schieben, zusätzlich als Strukturgeber dienen, aber auch für einen enzymatischen Abbau und zusätzlichen Starterbakterien sorgen.



Foto C-1 **Mietenaufbau**

Der Aufbau der Miete erfolgte schichtweise (siehe Abbildung C-2). Die erste Lage bestand immer aus Strukturmaterial gefolgt von einer Schicht fleshing.

Verwendete man für die Miete Co-Substrat und Strukturmaterial, so folgte der ersten Schicht fleshing eine Lage Co-Substrat dann Strukturmaterial, danach wieder eine Schicht fleshing, usw. Die letzte Lage bildete auf jeden Fall wieder eine Schicht Strukturmaterial.

Wurde für die Co-Kompostierung nur Strukturmaterial verwendet, so folgte der ersten Schicht fleshing wieder Strukturmaterial, dann fleshing, usw., wobei auch hier als letzte Lage Strukturmaterial benutzt wurde.

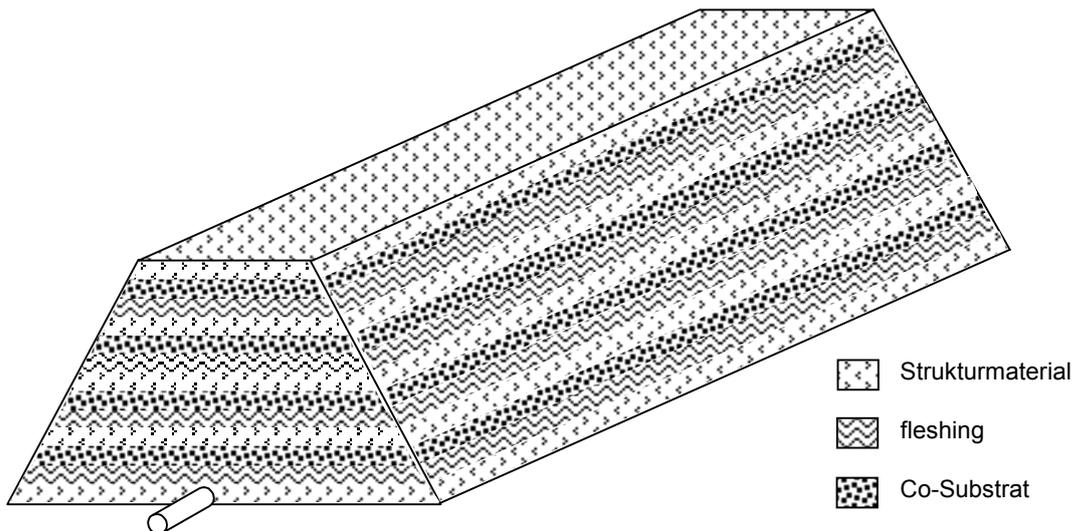


Abbildung C-2 Mietenaufbau

C.1.2.1.2 Materialien

Zunächst musste ermittelt werden, mit welchen Co-Substraten bzw. Strukturmaterialien der Abbau der fleshing am effektivsten vor sich geht. Dazu wurden alle vier Mieten mit unterschiedlichen Materialien und unterschiedlichen Mischungsverhältnissen aufgebaut. In unten stehender Tabelle sind die verschiedenen verwendeten Materialien, deren Einsatzmasse und -volumen (einzeln und in Summe) und die auf fleshing bezogenen Massen- und Volumsverhältnisse pro Miete angegeben.

Tabelle C-2 Massen- und Volumsverhältnisse der Mietenkompostierung

Miete	Einheiten	fleshing	Rinde	Holzchips	Pferde-einstreu	Markt-abfälle	Summe
	mittlere Dichte [kg/m ³]	1000	250	315	240	350	-
Miete 1	Masse [kg]	640	640	-	-	-	1280
Beginn: 11.11.1999	Massenverhältnis [-]	1,0	1,0	-	-	-	1,0 : 1,0
Dauer: 91 Tage	Volumen [dm ³]	640	2560	-	-	-	3200
	Volumsverhältnis [-]	1,0	4,0	-	-	-	1,0 : 4,0
Miete 2	Masse [kg]	520	-	403	-	392	1315
Beginn: 25.11.1999	Massenverhältnis [-]	1,0	-	0,8	-	0,8	1,0 : 1,6
Dauer: 82 Tage	Volumen [dm ³]	520	-	1280	-	1120	2920
	Volumsverhältnis [-]	1,0	-	2,5	-	2,2	1,0 : 4,7
Miete 3	Masse [kg]	240	-	706	144	-	1090
Beginn: 18.11.1999	Massenverhältnis [-]	1,0	-	2,9	0,6	-	1,0 : 3,5
Dauer: 89 Tage	Volumen [dm ³]	240	-	2240	600	-	3080
	Volumsverhältnis [-]	1,0	-	9,3	2,5	-	1,0 : 11,8
Miete 4	Masse [kg]	720	-	-	720	-	1440
Beginn: 18.11.1999	Massenverhältnis [-]	1,0	-	-	1,0	-	1,0 : 1,0
Dauer: 89 Tage	Volumen [dm ³]	720	-	-	3000	-	3720
	Volumsverhältnis [-]	1,0	-	-	4,2	-	1,0 : 4,2

Im Anhang sind Analyseergebnisse der verwendeten Materialien angeführt.

C.1.2.1.3 *Handling der Mieten*

Nach dem Mietenaufbau folgte das Betreuen und Arbeiten mit den Mieten. Die Temperatur, die den Rottefortschritt widerspiegelt und somit der wichtigste Parameter einer Miete ist, wurde täglich pro Miete an drei Stellen gemessen und gemittelt.

Aufgrund des C/N – Verhältnisses der fleshing von ca. 10, war es nicht unbedingt notwendig, zusätzliche organische Stoffe mit höherem Kohlenstoffgehalt einzubringen (das optimale C/N – Verhältnis zum Rottebeginn liegt zwischen 20 und 30). Die zugefügten Co-Substrate beinhalten einen höheren Kohlenstoffanteil und tragen somit zur Erhöhung des C/N – Verhältnisses der gesamten Rotte bei.

Die relativ großen Holzanteile des Strukturmaterials werden im Vergleich zum Substrat sehr langsam abgebaut. Daher wird angenommen, dass das Strukturmaterial innerhalb dieser Versuche nicht abgebaut wird und das C/N – Verhältnis nicht beeinflusst.

Der Glühverlust, der alle 3 bis 4 Tage bestimmt wurde, ist ein Indikator des Gehaltes an organischer Substanz und somit auch des mineralisierten Anteils in der Rotte.

Gleichzeitig mit der gezogenen Probe für den Glühverlust wurde ein Teil zur Bestimmung des Wassergehaltes verwendet. Der Anfangswassergehalt sollte im Bereich von 50 – 60 % liegen und während der Kompostierung nicht unter 40 % absinken, da sonst die Tätigkeit der Mikroorganismen gehemmt wird.

Ebenfalls mit der Entnahme der Probe für die Bestimmung von Glühverlust und Wassergehalt wurde der pH – Wert gemessen. Für die Kompostierung liegt der Idealbereich zwischen pH = 6 – 8. Durch die Behandlung der Häute mit Natriumsulfid, zur Haarzerstörung in der Gerberei eingesetzt, und Kalk haben auch die fleshing einen pH – Wert von ca. 13 - 14, wobei das Material somit als „steril“ angesehen werden kann.

Das aufgrund des organischen Abbaus entstehende CO₂ senkt den pH-Wert der fleshing auf ein für die Bakterien akzeptables Milieu.

Problematisch in diesen Versuchen war die Probenahme, die aufgrund des schichtweisen Aufbaus der Mieten nicht reproduzierbar ist und somit zu Schwankungen im Ergebnis führte. Dieses Phänomen kann man vor allem in den ersten Wochen feststellen, da einerseits die relativ großen Fleshingstücke noch nicht zersetzt waren, andererseits noch keine mechanische Umsetzung des Kompostes stattfand. So fand keine Durchmischung des Materials statt und man zog dadurch bei der Probenahme ein falsches Verhältnis fleshing zu Co-Material.

Bemerkbar machten sich die Fehler in der Probenahme vor allem beim Glühverlust, aber auch bei der Bestimmung des Wassergehaltes.

Die Belüftung der Mieten erfolgte durch einen Radialventilator, der einen Luftstrom von ca. 260 m³/h auf die vier Mieten aufteilte. Messungen mit einem Pitot-Rohr ergaben, dass jede Miete ziemlich genau ein Viertel (65 m³/h) des Gesamtluftstromes in Anspruch nahm. Die Luftzufuhr wurde so gesteuert, dass während der ersten drei Wochen der Rottezeit der Ventilator ständig, dann immer weniger - ca. 5 Stunden pro Tag - bis etwa 3 Wochen vor Beendigung des Versuches, gar nicht mehr lief.

Trotz Zwangsbelüftung musste das Rottematerial, dessen Volumen sich mit dem Rottefortschritt verkleinert, hie und da aufgelockert werden. Dadurch konnten einerseits anaerobe Zonen zerstört werden und andererseits die meist unterschiedlich durchfeuchteten Materialien durchmischt werden.

Im Schnitt wurden die Mieten alle 2 Wochen umgesetzt.

C.1.2.2 Ergebnisse

Unter Frischrottedauer versteht man jene Zeit vom Beginn der Kompostierung bis zur Auftrennung des Rottegutes in Grob- und Feinfraktion. Die separierte Grobfraktion (Korngröße $x > \frac{3}{4}$ ") besteht vorwiegend aus Strukturmaterial und die Feinfraktion (Korngröße $x < \frac{1}{4}$ ") hauptsächlich aus dem mineralisierten Kompost. Die Reiferottedauer ist jene Zeit ab der Auftrennung des Rottegutes bis zum Ende der Kompostierung.

C.1.2.2.1 Miete 1

Tabelle C-3 Daten – Miete 1

Materialien	Rinde – fleshing
Massenverhältnis	1:1
Volumsverhältnis	4:1
Frischrottedauer	55 Tage
Reiferottedauer	41 Tage (Korngröße $< \frac{1}{4}$ ")
Fleshingabbau	unvollständig, teilweise ausgetrocknete und unzersetzte Fleischreste
Hygienisierung	teilweise erreicht
Kompostausbeute	ca. 1/12 des gesamten Aufgabevolumens
Anmerkungen	wurde einmal anaerob

☞ Temperatur

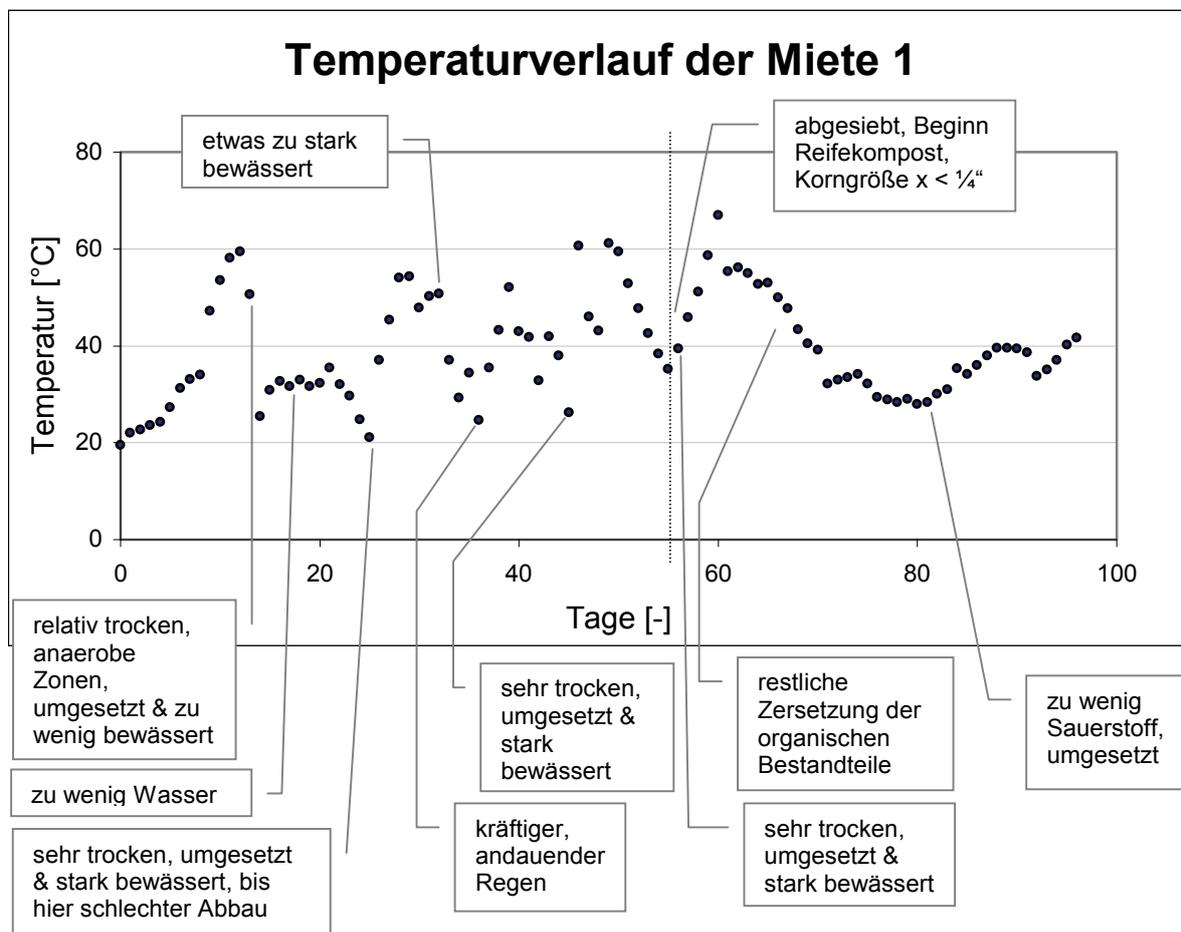


Diagramm C-1 Temperaturverlauf in der Miete 1

Gut erkennbar in Diagramm C-1, sind die sprunghaften Temperaturen bis zur vertikalen punktierten Linie, die den Zeitpunkt der Trennschnittlage kennzeichnet und dem nachfolgenden kontinuierlichen Kurvenverlauf.

Rückzuführen ist der sprunghafte Verlauf unter anderem auf die große Korngröße $x > \frac{3}{4}$ " , die aber für die Belüftung und die aerobe Behandlung am Beginn der Miete unabdingbar ist.

Die abgesiebte Miete mit einer Korngröße $< \frac{1}{4}$ " kann durch die kleineren Poren einerseits die Feuchtigkeit viel besser speichern, somit den Wassergehalt besser regulieren, andererseits die Wärmeabstrahlung und die Witterungsabhängigkeit deutlich reduzieren.

☞ Wassergehalt

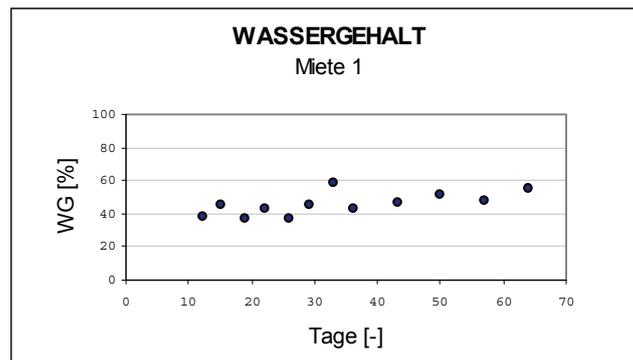


Diagramm C-2 **Zeitlicher Verlauf des Wassergehaltes der Miete 1**

Die anfänglichen Werte liegen um die 40 % Wassergehalt und waren aufgrund der mangelnden Erfahrung im Kompostieren von fleshing etwas zu niedrig (siehe Diagramm C-2). Die Feuchtigkeitsverteilung war sehr inhomogen. Die fleshing wiesen hohe Feuchtigkeitsgehalte auf, hingegen war die Rinde fast trocken. Die Erfahrungen zeigten, dass man für einen guten Fleshingabbau Wassergehalte von 45 – 60 % benötigt, der auch gegen Ende des Prozesses gut eingestellt wurde.

☞ pH – Wert

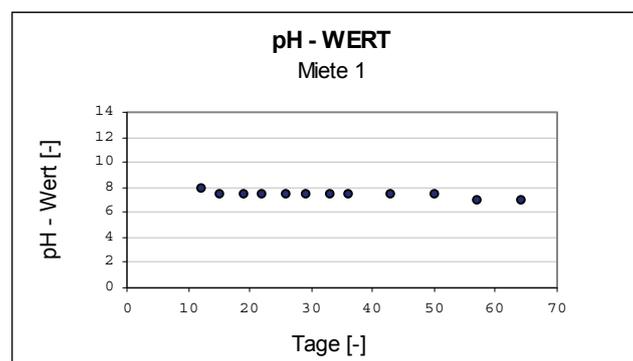


Diagramm C-3 **Zeitlicher Verlauf des pH-Wertes der Miete 1**

Dieser wurde mittels pH Messstreifen gemessen und ist somit nur alle 5 Zehntelschritte angegeben.

Entscheidend ist aber nicht die Genauigkeit der Messung, sondern die erkennbare Tendenz, des mit der Rottezeit sich verändernden pH-Wertes.

Fleshing haben vor der Kompostierung einen pH-Wert von ca. 13 - 14, sind also sehr basisch. Durch die Kompostmischung pendelt sich der Anfangswert auf ca. pH = 10,0. Die Praxis zeigte, dass der pH-Wert schon nach 10 Tagen auf pH = 8,0 abgesunken ist (siehe Diagramm C-3).

Schwierig und sicher mit großen Fehlern behaftet ist die Probenahme, die aufgrund der inhomogenen Mischung nicht reproduzierbar und somit nicht nachvollziehbar ist.

☞ Glühverlust

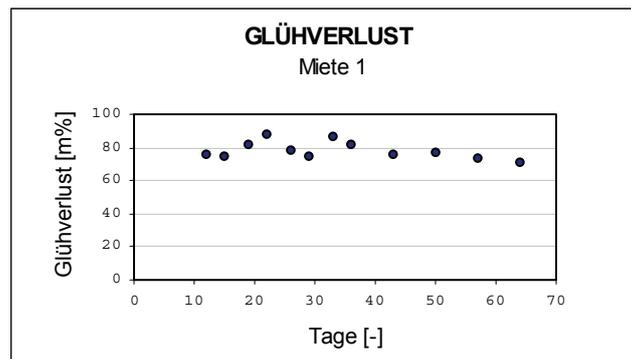


Diagramm C-4 **Zeitlicher Verlauf des Glühverlustes der Miete 1**

Der Glühverlust als Indikator des Gehaltes an organischer Substanz soll im Laufe der Kompostierung sinken, was eine Erhöhung der anorganischen Materialien bedeutet und somit auch Zeichen für die Umwandlung der Abfallstoffe in das Produkt Kompost ist.

Problematisch bei diesen Versuchen war die Probenahme, die aufgrund des schichtweisen Aufbaus immer zu Schwankungen im Ergebnis führte, da nie ein gleiches Verhältnis von fleshing zu Co-Substrat gezogen werden konnte (siehe Diagramm C-4).

☞ Kompostqualität

Um zu prüfen, ob Pflanzenverträglichkeit gegeben ist und der Kompost auch als Dünger einsetzbar ist, wurden Kressetests gemacht.

Man vergleicht dabei die Masse der gewachsenen Kressepflanzen in den Prüfmischungen mit derjenigen, die in der Einheitserde (ungedüngte Erde) gewachsenen.

Aus Prüfs substrat (Kompost) und Einheitserde, die beide $x < \frac{1}{4}$ " abgeseibt wurden, stellte man Prüfmischungen mit 0 Vol.%, 25 Vol.%, 50 Vol.%, 75 Vol.% und 100 Vol.% Prüfs substratanteil her, indem man für die 25 Vol.% Mischung 0,5 l Kompost und 1,5 l Einheitserde, für die 50 Vol.% Mischung je einen Liter von beiden Materialien usw., nimmt. Danach gibt man in jedes Gefäß die gleiche Menge an Kressesamen, befeuchtet diese und stellt sie an einem ausreichend beleuchteten Platz. Während der Zeit zwischen der Aussaat und Ernte sind die Kompostmischungen in den Gefäßen feucht zu halten.

7 Tage nach der Aussaat wird geerntet. Dabei werden die Kressepflanzen knapp überhalb des Mischmaterials abgeschnitten, von Verunreinigungen befreit und gewogen.

Die Wachstumsfaktoren erhält man, indem jede Kressemasse einer Prüfmischung auf die Masse der Kressepflanzen von ungedüngter Einheitserde bezogen wird.

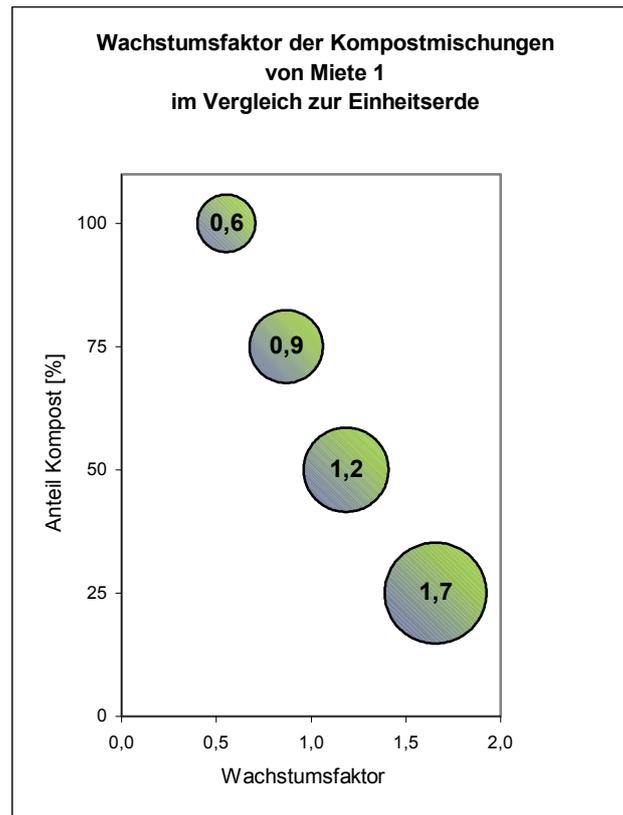


Diagramm C-5 Wachstumsfaktor der Kompostmischungen von Miete 1 im Vergleich zur Einheitserde

Aus diesem Diagramm C-5 ist ersichtlich, dass bei 25 %igem Kompostanteil in der Prüfmischung die Masse der gewachsenen Kressepflanzen 1,7 mal höher ist, als jene der in der Einheitserde gewachsenen Kressepflanzen. Die Prüfmischung mit 50 %igem Kompostanteil hat einen Wachstumsfaktor > 1 . Das bedeutet, dass der 18 Wochen alte Kompost für Düngezwecke sehr gut geeignet ist.

Verständlich ist auch das verminderte Wachstum bei 100 %igem Kompostanteil. Aufgrund des erhöhten Salzgehaltes und des konzentrierten Gehaltes an löslichen Pflanzennährstoffen wird das Wachstum eher gehemmt als gefördert.

Eine Bestimmung des Gehaltes an keimfähigen Samen brachte das Ergebnis, dass dieser Kompost der Miete 1 frei von keimfähigen Samen und austriebfähigen Pflanzenteilen ist.

☞ Kompostausbeute

Ist das Verhältnis jenes Volumen an abgeseibtem Feinanteil ($x < 1/4''$) zum Gesamtvolumen der Miete.

Dieser Faktor ist für die Wirtschaftlichkeit einer Kompostieranlage ebenso interessant, wie der der Kompostqualität.

Hohe Kompostausbeute bedeutet aber auch ein hohes Verhältnis eingesetzter fleshing zu Strukturmaterial. Dies bedeutet, dass für den gleichen zur Verfügung stehenden Komposterraum mehr Abfall behandelt und mehr gewinnbringendes Produkt erzeugt werden kann.

Bei diesen Versuchen wurde primär Wert auf die Funktionalität mit Hilfe diverser Co-Substrate gelegt, wobei die Kompostausbeute Nebensache war.

Um die maximale Ausbeute bestimmen zu können, müsste man mit den gewonnenen Erkenntnissen der richtigen Substratbeimischung die Einsatzmenge an fleshing solange erhöhen, solange es noch mit realistischen Mitteln möglich ist, eine aerobe Behandlung durchzuführen.

Die Kompostausbeute wurde im Zuge dieser Versuche nicht optimiert. Dadurch war die Kompostmenge sehr bescheiden.

Für die Miete 1 bekam man durch das Absieben für den Feinanteil ca. 1/12 des aufgegebenen Volumens als Kompost (ca. 270 l).

☞ Endbestimmungen

Alter: 20 Wochen
 Wassergehalt: 39,8 %
 Glühverlust: 22,3 %
 pH-Wert: 7,0

C.1.2.2.2 Miete 2

Tabelle C-4 Daten – Miete 2

Materialien	Holzchips – Marktabfälle - fleshing
Massenverhältnis	0,8 : 0,8 : 1
Volumsverhältnis	2,5 : 2,2 : 1
Frischrottedauer	39 Tage
Reiferottdauer	43 Tage (Korngröße < ¼“)
Fleshingabbau	vollständig
Hygienisierung	erreicht
Kompostausbeute	ca. 1/9 des gesamten Aufgabevolumens
Anmerkungen	Marktabfälle mit hohem Fremdstoffanteil, Maden- und Fliegenproblem

☞ Temperatur

Wie beim Versuch von Miete 1 teilt sich diese Temperaturkurve in Diagramm C-6 in zwei Abschnitte, vor und nach dem Zeitpunkt der Absiebung (vertikale punktierte Linie).

Aufgrund des hohen Anteils von leicht zersetzbaren Marktabfällen, stieg die Temperatur am Beginn des Versuches rasch an, sank aber dann aufgrund des zu geringen Wassergehaltes wieder ab.

Gut erkennbar sind auch die niedrigen Temperaturen im Kurvenverlauf, die durch das Einbringen von zuviel Wasser entstanden sind.

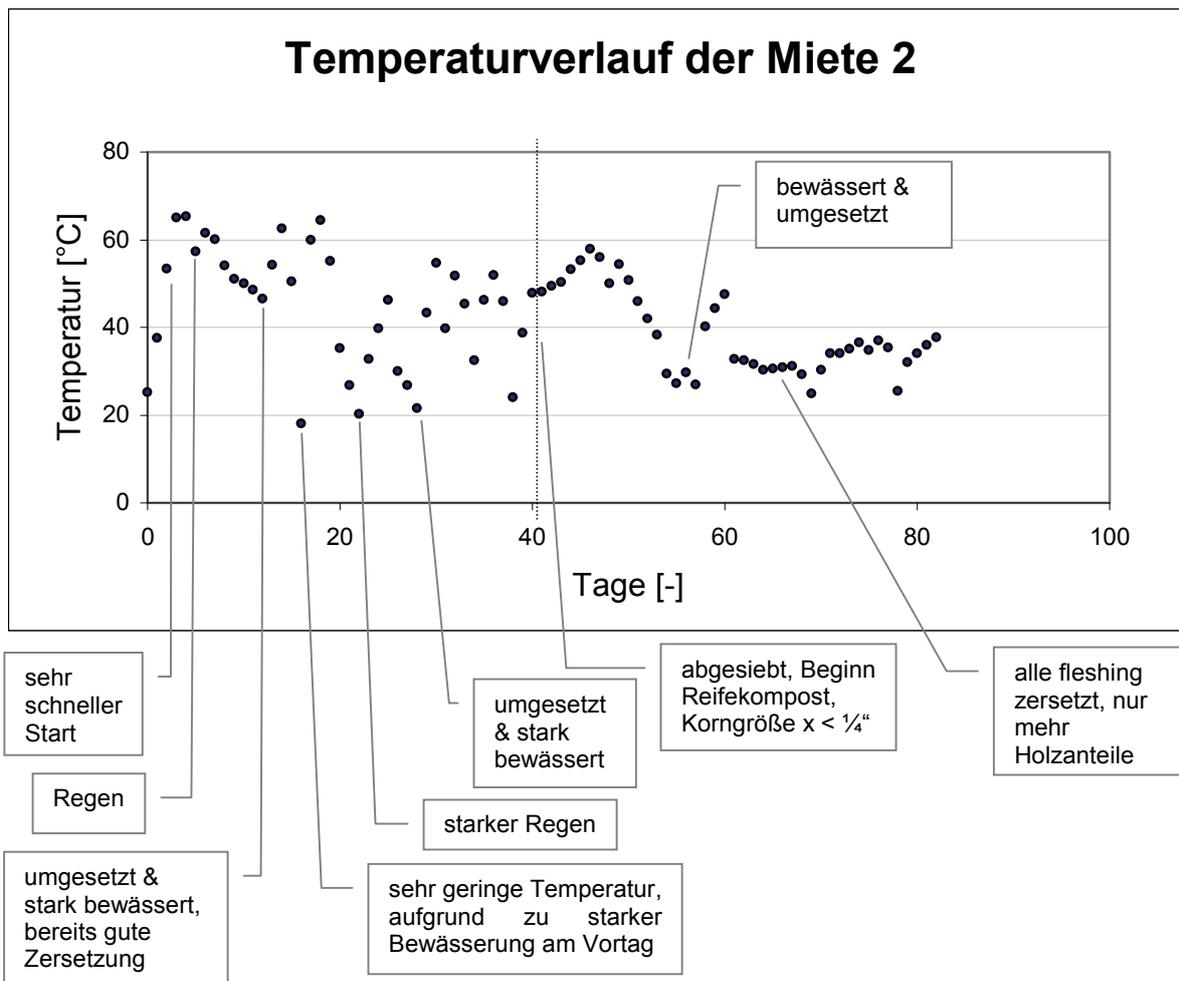


Diagramm C-6 Temperaturverlauf in der Miete 2

☞ Wassergehalt

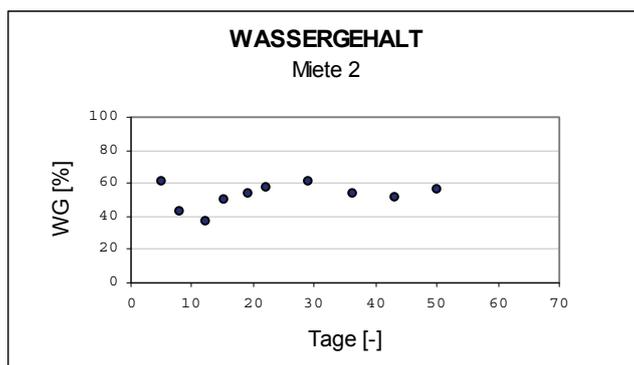


Diagramm C-7 Zeitlicher Verlauf des Wassergehaltes der Miete 2

Dieser Kurvenverlauf in Diagramm C-7 zeigt ebenfalls die anfänglichen Probleme mit dem Einstellen des richtigen Wassergehaltes. Diese Miete war die zeitlich letzte aufgebaute, dadurch konnte hinsichtlich der Kompostierungsparameter eine gewisse Erfahrung der anderen Mieten miteingebracht und schneller reagiert werden.

☞ pH – Wert

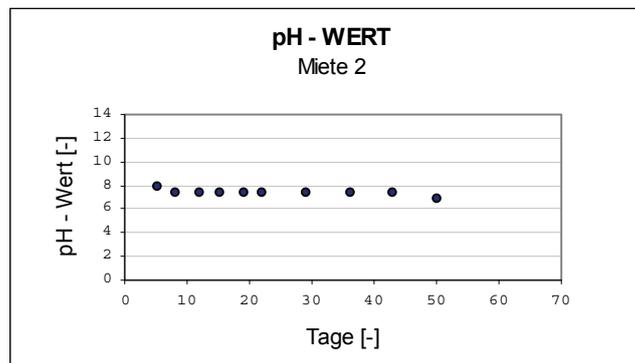


Diagramm C-8 **Zeitlicher Verlauf des pH-Wertes der Miete 2**

Gut ersichtlich in Diagramm C-8, ist das relativ schnelle Absinken des pH-Wertes auf ein für das Wachstum der Mikroorganismen akzeptables Milieu.

☞ Glühverlust

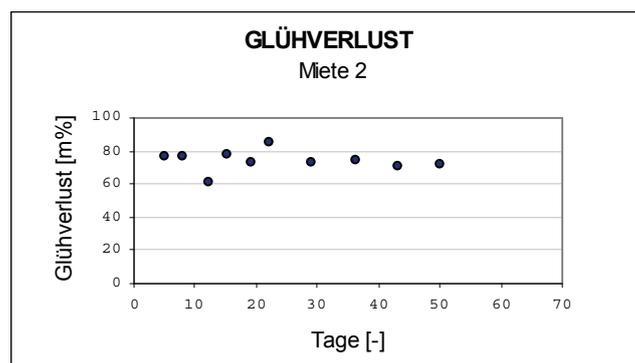


Diagramm C-9 **Zeitlicher Verlauf des Glühverlustes der Miete 2**

Die Probenahme war bei dieser Miete aufgrund der Mischung von drei Materialgruppen noch schwieriger und führte zu noch größeren anfänglicheren Schwankungen des Glühverlustes (siehe Diagramm C-9).

☞ Kompostqualität

Auch hier hat die Prüfmischung mit 25 %igem Kompostanteil einen größeren Masseanteil an Kresspflanzen, im Vergleich zur Vergleichserde hervorgebracht (siehe Diagramm C-9). Somit könnte dieser 16 Wochen alte Kompost ebenfalls als Dünger und jedenfalls als Bodenverbesserungsmittel eingesetzt werden.

Eine Bestimmung des Gehaltes an keimfähigen Samen brachte das Ergebnis, dass dieser Kompost der Miete 2 frei von keimfähigen Samen und austriebfähigen Pflanzenteilen ist.

Mit den Marktabfällen wurde ein hoher Fremdstoffanteil in den Kompostierprozess eingebracht, der jedoch weitgehend durch Siebung entfernt werden konnte. Eine

Schadstoffbelastung des Kompostes hinsichtlich Schwermetalle (Batterien) oder Giftstoffe (Spritzmittel auf Fruchtschalen) wurde aber nicht durchgeführt.

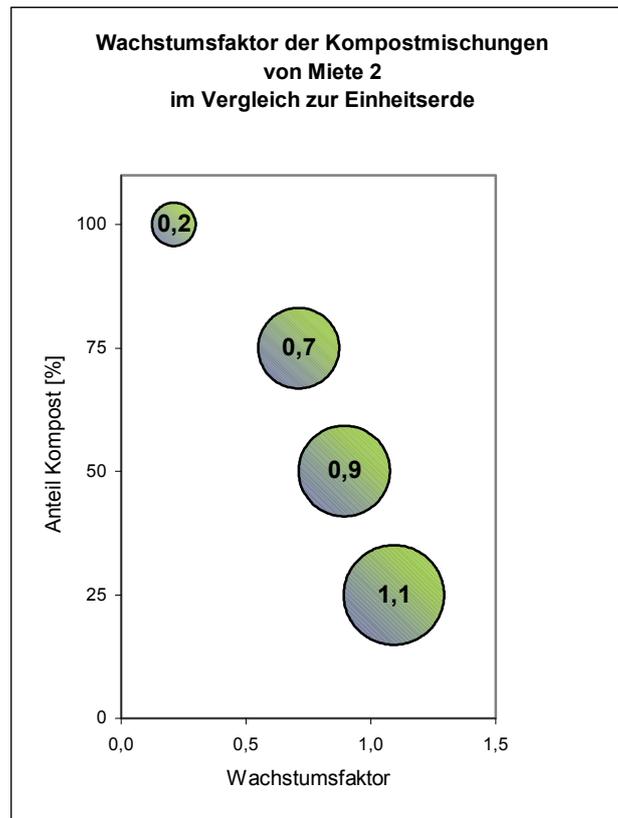


Diagramm C-10 Wachstumsfaktor der Kompostmischungen von Miete 2 im Vergleich zur Einheitserde

☞ Kompostausbeute

Aufgrund des erhöhten Einsatzes von organischem Material, Marktabfälle, erhöhte sich die Kompostausbeute im Vergleich zur Miete 1 etwas.

Für die Miete 2 bekam man durch das Absieben für den Feinanteil ca. 1/9 des aufgegebenen Volumens als Kompost (ca. 325 l).

☞ Endbestimmungen

Alter:	18 Wochen
Wassergehalt:	27,0 %
Glühverlust:	26,8 %
pH-Wert:	7,2

C.1.2.2.3 *Miete 3*

Tabelle C-5 Daten – Miete 3

Materialien	Holzchips – Pferdeeinstreu – fleshing
Massenverhältnis	2,9 : 0,6 : 1
Volumsverhältnis	9,3 : 2,5 : 1
Frischrottendauer	49 Tage
Reiferottendauer	40 Tage (Korngröße < ¼“)
Fleshingabbau	unvollständig, teilweise ausgetrocknete und unzersetzte Fleischfetzen
Hygienisierung	nicht erreicht
Kompostausbeute	ca. 1/16 des gesamten Aufgabevolumens
Anmerkungen	geringe Einsatzmenge an fleshing schlechte Zersetzung, keine hohen Temperaturen erreicht,

☞ Temperatur

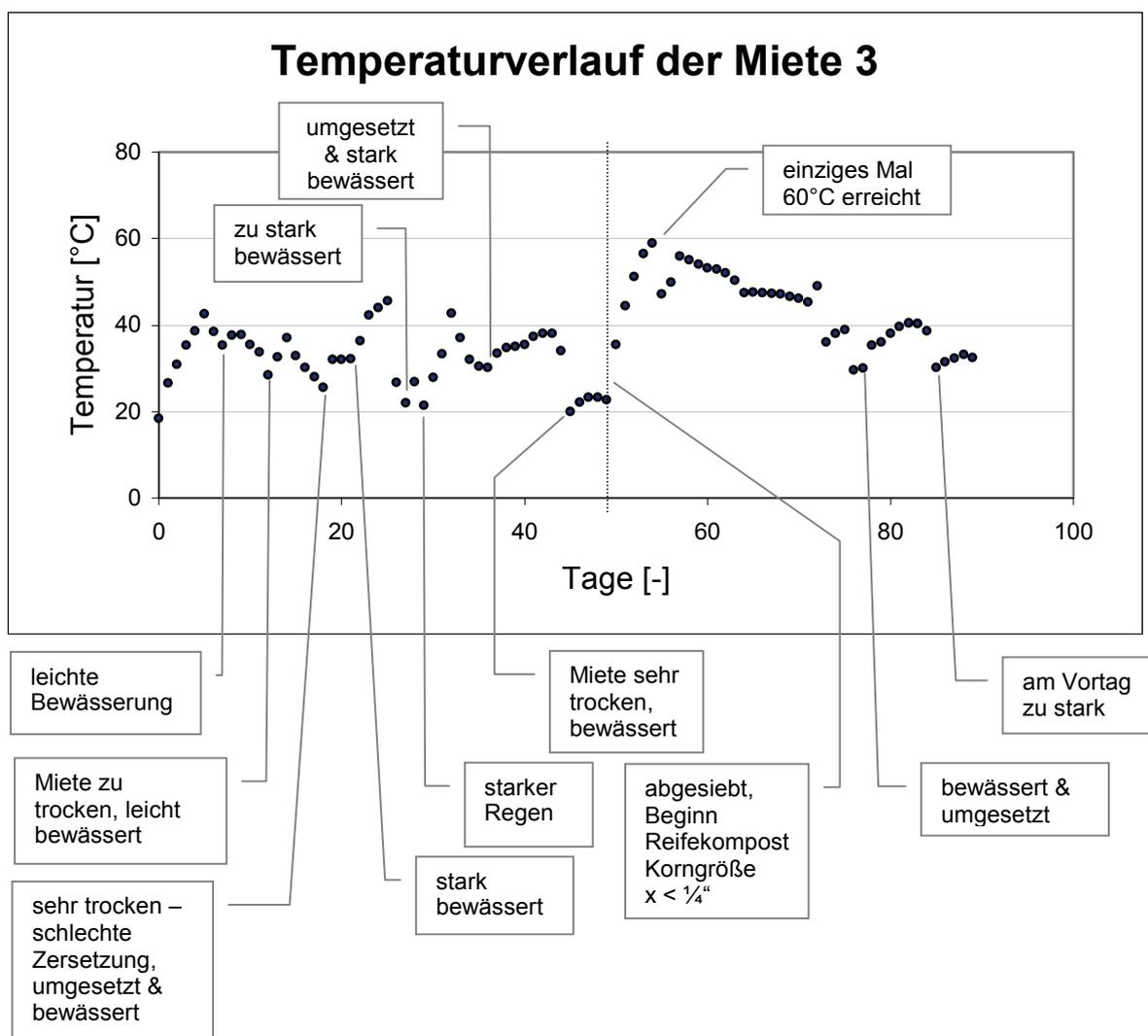


Diagramm C-11

Temperaturverlauf in der Miete 3

Der Kurvenverlauf (siehe Diagramm C-11) ist vor dem Zeitpunkt der Absiebung nicht so sprunghaft in Vergleich zur Miete 1 oder 2.

Diese Miete hat während ihrer knapp 90 Tage Rottezeit kein einziges Mal die 60 °C Linie überschritten. Durch die geringen Temperaturen fand keine vollständige Zersetzung der fleshing statt und damit verbunden ist auch keine Hygienisierung eingetreten.

Beim Absieben der Grobfraktion konnten ausgetrocknete aber auch unvollständig zersetzte (breiige) fleshing gefunden werden, die als Siebüberlauf nicht in den Feinanteil gelangen konnten.

Nach der Trennschnitllage verläuft die Temperatur ohne große Sprünge, wobei der organische Abbau gut verfolgt werden kann.

☞ Wassergehalt

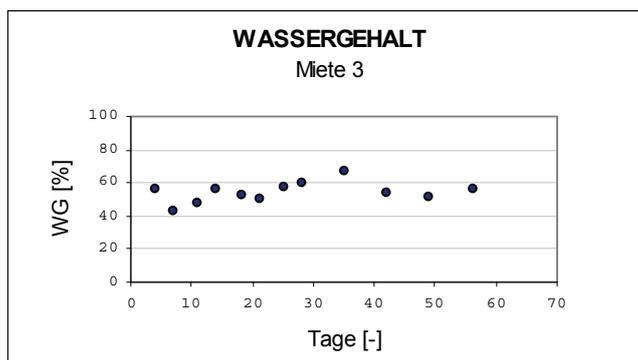


Diagramm C-12 **Zeitlicher Verlauf des Wassergehaltes der Miete 3**

Das Regulieren des Wassergehaltes war aufgrund des geringen Einsatzes von Substrat (fleshing) besonders schwierig und es bildeten sich immer wieder trockene Zonen rund um das abzubauenende Material. Die fleshing hingegen hatten für den aeroben Abbau einen zu hohen Feuchtigkeitsgehalt (siehe Diagramm C-12).

☞ pH – Wert

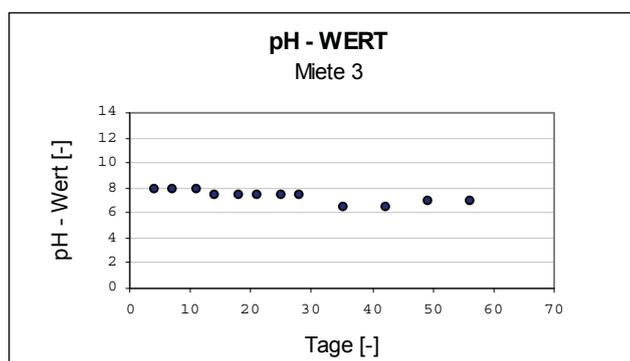


Diagramm C-13 **Zeitlicher Verlauf des pH-Wertes der Miete 3**

Auffällig im Kurvenverlauf sind die leicht sauren Werte um pH = 6,5, die sonst bei keinem Versuch erzielt wurden (siehe Diagramm C.13).

☞ Glühverlust

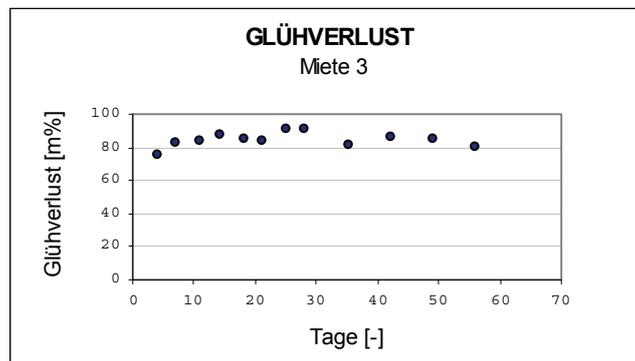


Diagramm C-14 **Zeitlicher Verlauf des Glühverlustes der Miete 3**

Durch den geringen Einsatz von fleshing und deren schlechte Zersetzung fand trotz mechanischem Umsetzen der Miete keine gute Homogenisierung des Materials statt, da die fleshing nach wie vor in fetzenähnlicher Form vorlagen.

Somit ergaben sich diesmal längere Schwankungen in den Ergebnissen durch die noch schwierigere, nichtreproduzierbare Probenahme (siehe Diagramm C-14).

☞ Kompostqualität

Für diese Miete wurden keine Pflanzenverträglichkeitsuntersuchungen und Bestimmungen des Gehaltes an keimfähigen Samen durchgeführt, da aufgrund der zu niedrigen Temperaturen keine Hygienisierung eingetreten ist und somit das Produkt Kompost nicht vermarktungsfähig ist.

☞ Kompostausbeute

Diese Miete bestand aus einem geringen Anteil von fleshing und somit wenig organischem Material, das in Kompost umgewandelt werden könnte.

Für die Miete 3 bekam man durch das Absieben für den Feinanteil ca. 1/16 des aufgegebenen Volumens als Kompost (ca. 190 l).

In diesem Kompost befand sich ein erhöhter Anteil an feinem Holz, der von den Sägespänen im Pferdeeinstreu herrührte.

C.1.2.2.4 Miete 4

Tabelle C-6 Daten – Miete 4

Materialien	Pferdeeinstreu - fleshing
Massenverhältnis	1 : 1
Volumsverhältnis	4,2 : 1
Frischrottendauer	47 Tage
Reiferottendauer	42 Tage (Korngröße < 1/4“)
Fleshingabbau	vollständig
Hygienisierung	erreicht
Kompostausbeute	ca. 1/12 des gesamten Aufgabevolumens
Anmerkungen	hohe Temperaturen, Maden- und Fliegenproblem, trockene Spots

☞ Temperatur

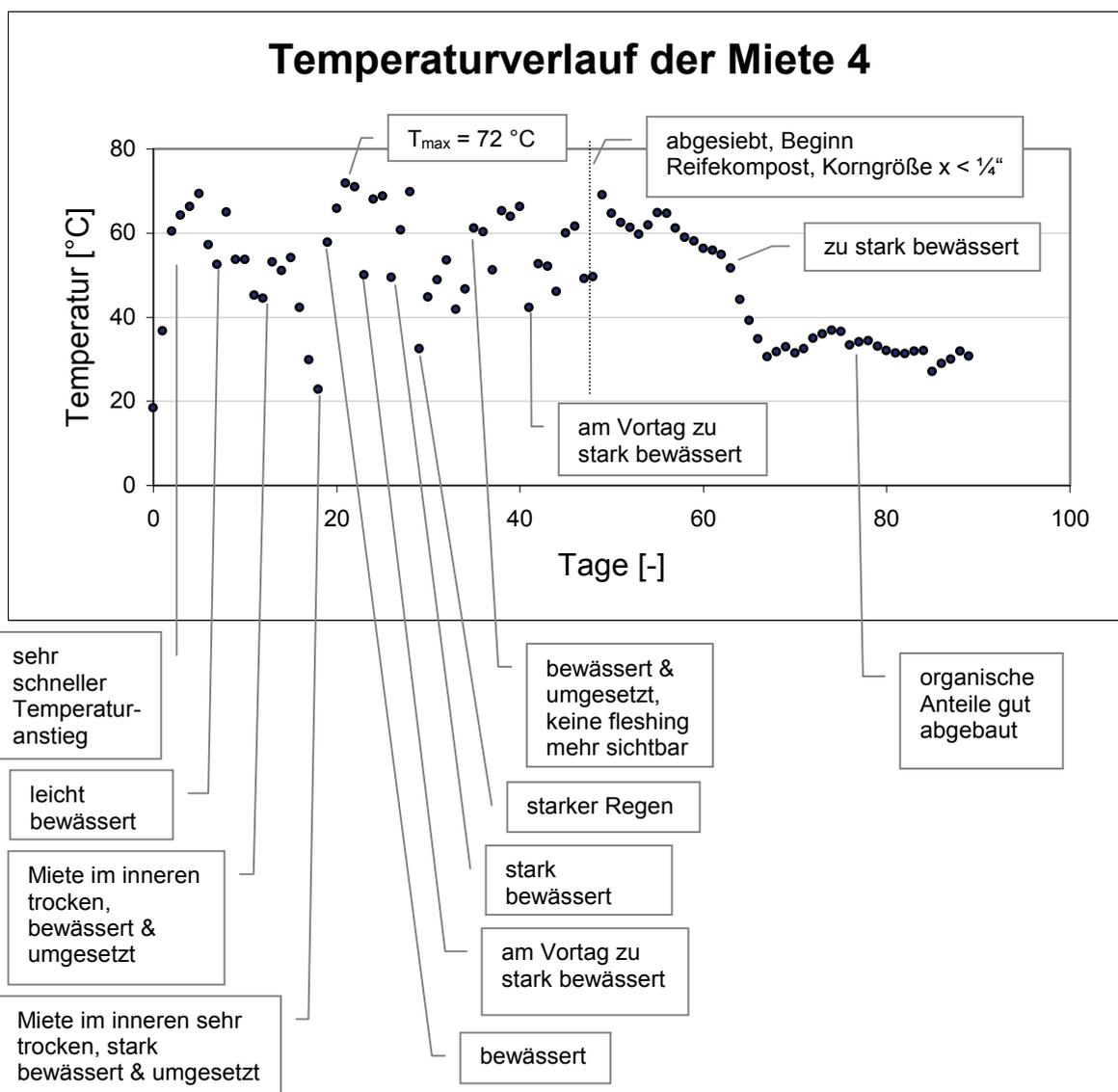


Diagramm C-15 Temperaturverlauf in der Miete 4

Bemerkenswert in Diagramm C-15 ist der schnelle Temperaturanstieg zu Beginn der Kompostierung und weiters die relativ hohen Temperaturen, die während der Rottezeit erzielt wurden. Dies ist aufgrund des Vorhandenseins von Pferdeexkrementen, die bei der Verrottung sehr hohe Temperaturen mit sich bringen, zurückzuführen.

Dank der hohen Temperaturen konnten die schwerer abbaubaren Anteile der fleshing, wie z.B. Fett, gut zersetzt werden.

Nachteilig zu Bemerkenswert wäre der hohe Anteil von Holz (Sägespäne) im Pferdeeinstreu, das sehr saugfähig ist und die Miete häufig zum Austrocknen führte. Aus diesem Grund war ein hoher Einsatz von Wasser notwendig. Die Sägespäne können in dieser kurzen Rottezeit nicht abgebaut werden und daher nicht als mineralische Komponente des Kompostes beitragen.

Der nach der Absiebung vorliegende Grobanteil bestand hauptsächlich aus Sägespänen.

☞ Wassergehalt

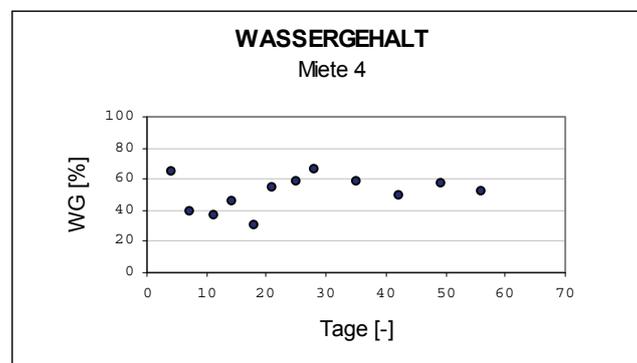


Diagramm C-16 **Zeitlicher Verlauf des Wassergehaltes der Miete 4**

Bei dieser Miete war eine gleichmäßige Befeuchtung besonders schwierig. Das Co-Substrat (Pferdeeinstreu), das gleichzeitig auch Strukturgeber war, hatte einen hohen Anteil von Sägespänen. Diese können Wasser gut aufnehmen und speichern, lassen aber dadurch das eindringende Wasser nicht weiter in den Mietenkörper einsickern. Es bildeten sich immer wieder trockene Zonen vor allem im unterem Drittel der Miete, in denen der Abbau gestoppt wurde und die Temperatur sank.

Ein richtiges „Einwässern“ der Miete brachte zwar eine homogene Feuchtigkeitsverteilung, aber auch eine totale Abkühlung der Rotte mit sich. Langsames erneutes Starten des Prozesses von niedrigen Temperaturen aus war die Folge.

☞ pH – Wert

Bemerkenswert ist der geringe Wert am Beginn der Kompostierung und die lange Zeitdauer bis zum Erreichen eines neutralen Milieus.

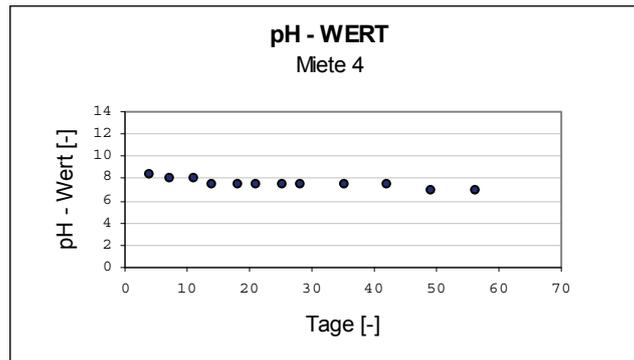


Diagramm C-17 **Zeitlicher Verlauf des pH-Wertes der Miete 4**

☞ **Glühverlust**

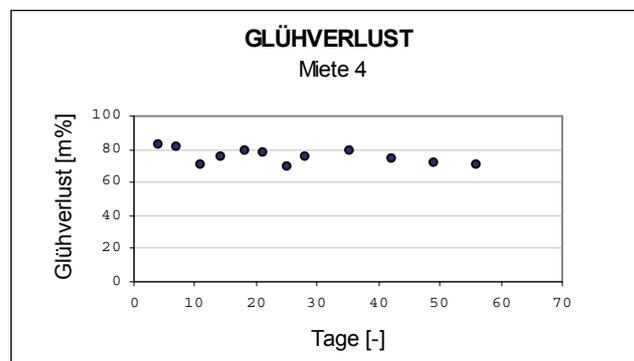


Diagramm C-18 **Zeitlicher Verlauf des Glühverlustes der Miete 4**

Die Probenahme wurde bei diesem Versuch insoweit erleichtert, da es zu einer sehr schnellen Zersetzung der fleshing und somit leichteren Homogenisierung durch mechanisches Umsetzen der Miete kam.

☞ **Kompostqualität**

Das Ergebnis dieser Pflanzenverträglichkeitsuntersuchung zeigt, dass dieser Kompost mit allen Mischungen, ausgenommen 100 %iger Kompost, eine Düngewirkung zeigt. In diesem Falle wurde durch den Einsatz von Pferdeexkrementen die Düngewirkung des Kompostes wahrscheinlich positiv beeinflusst.

Eine Bestimmung des Gehaltes an keimfähigen Samen brachte das Ergebnis, dass dieser Kompost der Miete 4 frei von keimfähigen Samen und austriebfähigen Pflanzenteilen ist.

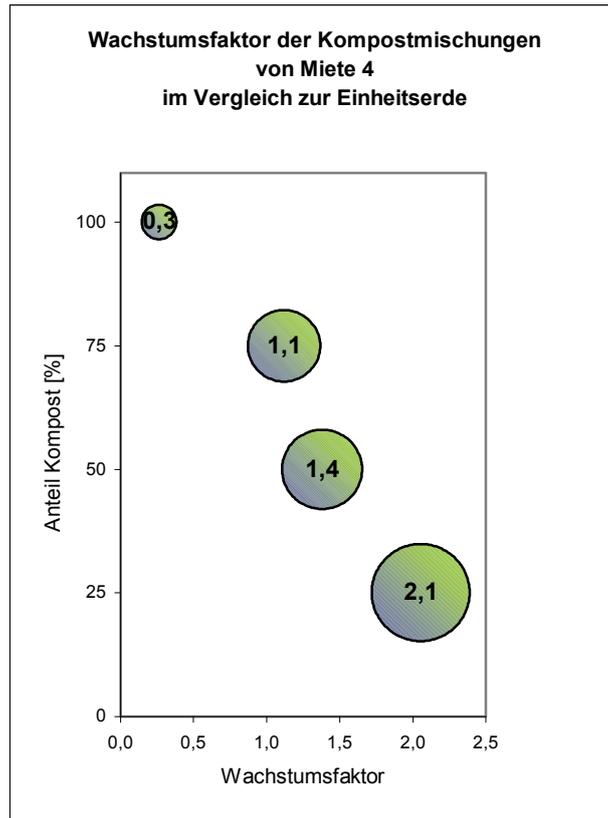


Diagramm C-19 Wachstumsfaktor der Kompostmischungen von Miete 4 im Vergleich zur Einheitserde

☞ Kompostausbeute

Durch den Einsatz von Sägespänen im Pferdeeinstreu gelangte nach der Absiebung ein beachtlicher Anteil des feinen Holzes in den Feinanteil, der als Kompost gesehen wurde.

Für die Miete 4 bekam man durch das Absieben für den Feinanteil ca. 1/12 des aufgegebenen Volumens als Kompost (ca. 330 l).

☞ Endbestimmungen

Alter:	19 Wochen
Wassergehalt:	39,4 %
Glühverlust:	33,9 %
pH-Wert:	7,4

C.1.2.3 Diskussion

Aus der Vielzahl der Probleme und der nicht optimalen Prozessführung konnte gezeigt werden, dass die Mietenkompostierung für die Kompostierung von fleshing nicht geeignet ist.

Trotz der täglichen Betreuung ist es nicht gelungen eine annähernd optimale Kompostierung durchzuführen, was man anhand der Temperaturkurven am besten erkennen kann.

Wie schon Eingangs erwähnt, wurden die Mieten in Schichten aufgebaut.

Eine mögliche Verbesserung in Hinblick auf einen besseren mikrobiologischen Abbau sowie in Hinblick auf eine bessere und homogenere Vermischung mit dem Strukturmaterial bzw. Co-Substrat kann durch Zerkleinern der fleshing erreicht werden.

Aus obenstehenden Gründen wurde aber der Ansatz „Kompostierung von unzerkleinerten Fleshing“ gewählt.

Durch die unvorteilhafte Struktur der fleshing kam es zu folgenden Problemen:

- ◆ schlechterer Abbau der fleshing
- ◆ anaerobe Zonenbildung
- ◆ Geruchsprobleme
- ◆ Bildung von trockenen Spots
- ◆ keine reproduzierbare Probenahme möglich

Zur Bildung von anaeroben Spots kommt es aufgrund unzureichender Sauerstoffversorgung des Rottegutes. Trotz der Druckbelüftung kam es vor allem im oberen Drittel des Rottekörpers zu anaeroben Zonen, die auf die Klumpenbildung der fleshing und deren Dichteigenschaften, aber auch auf die generelle Kompaktierung des Mietenkörpers und deren Struktur zurückzuführen sind.

Mit der anaeroben Zonenbildung einhergehend, ist das Entstehen von unangenehmen Gerüchen (H_2S , flüchtige organische Verbindungen). Da bei einer aeroben Kompostierung normalerweise keine Gerüche auftreten, ist dies auch das beste Indiz für eine anaerobe und somit schlecht funktionierende Miete. Das Produzieren von unangenehmen Gerüchen führt vor allem zu Akzeptanzproblemen der Anrainer, aber auch der eigenen Firmenbelegschaft. Somit kann es in Folge zu Schwierigkeiten bei der Vermarktung des fertigen Produktes Kompost kommen.

Die Feuchtigkeit sollte an jeder Stelle der Miete im Bereich 45 – 60 % Wassergehalt liegen, um einen guten Abbau der organischen Stoffe zu gewährleisten. Aufgrund der schlechten Homogenisierung gibt es aber feuchtere und wenig feuchtere Stellen in der Miete. Wobei der mikrobielle Metabolismus nur in wässriger Umgebung möglich ist. Es ging sogar in Zonen mit stärkerer Belüftung soweit, dass fleshing austrockneten und nicht mehr abgebaut werden konnten.

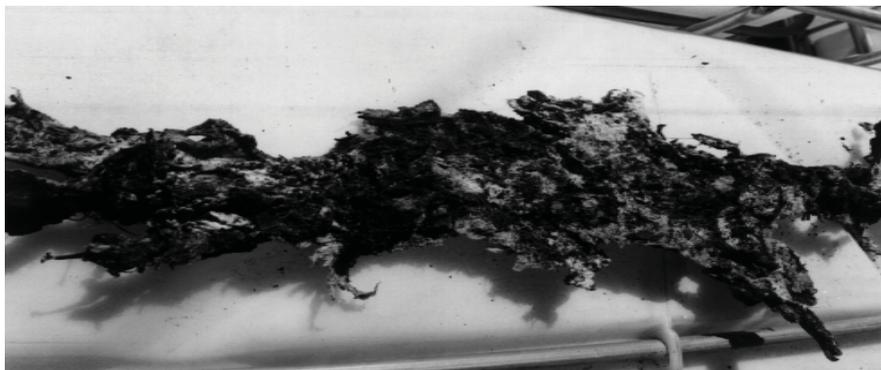


Foto C-2

Ausgetrocknete fleshing

Zu feuchten Stellen können die Poren im Kompost mit Wasser besetzen und somit die Luftzufuhr blockieren, wobei wieder anaerobe Spots entstehen.

Durch die schlechte Homogenisierung war eine reproduzierbare Probenahme unmöglich. Abhängig ob bei der gezogenen Probe der Fleshinganteil höher war oder geringer, schwankten die Analyseergebnisse des Wassergehaltes, Glühverlustes und pH-Wertes.

Die einzelnen Messwerte sind somit nicht sonderlich genau, jedoch ist die Tendenz der gesamten Analysewerte erkennbar.

Eine Abhilfe oben genannter Probleme ist einzig und alleine das Umsetzen der Miete. Dadurch werden die gebildeten Klumpen zerstört, das unterschiedlich feuchte Material erneut durchmischt und die kompaktierte Miete wird zur besseren Belüftung aufgelockert.

Die vier Mieten wurden im Freien ohne Abdeckung und ohne Einhausung errichtet.

Aufgrund dieser baulichen Maßnahmen ergaben sich nun folgende Probleme:

- ◆ sehr witterungsabhängig
- ◆ keine Abluft- und Sickerwasserbehandlung und –reinigung möglich
- ◆ Probleme mit Insekten (und anderen Lebewesen)



Foto C-3 **Maden im Belüftungsrohr**

Der Umgang mit den Mieten erwies sich als besonders witterungsabhängig, was man am besten in den Temperaturkurven erkennen kann.

Als Grund für die starke Witterungsabhängigkeit ist das kleine Mietenvolumen zu sehen.

Resultierend aus den oben genannten Schwierigkeiten, wie Witterungsabhängigkeit, Bildung von trockenen und anaeroben Zonen, kam es vor der Absiebung vermehrt zu Temperaturschwankungen, in denen die zur Hygienisierung notwendige Temperatur über einen bestimmten Zeitraum nicht erreicht wurde. Unhygienisierte Komposte können Krankheitskeime enthalten und sind somit nicht vermarktungsfähig.

Neben der Geruchsbelästigung gab es ein weiteres Akzeptanzproblem, die Maden- und Fliegenplage (siehe auch Foto C-3).

Hauptsächlich wurden die Maden in den Mieten 3 und 4 (mit Pferdeeinstreu) aber auch in der Miete 2 (Marktabfälle) gefunden.

Abhilfe dagegen schaffen nur andere Co-Substrate oder eingehauste Anlagen und hohe Rotttemperaturen um die 70 °C über mehrere Tage.

Ein weiteres altbekanntes Problem der Fleischkompostierung war der Umstand der Anlockung von Hunden und anderen Kleinlebewesen, die fleshing aus der Miete entfernten und zum Teil die Mietenstruktur zerstörten.

Um den Kompost vom Strukturmaterial und anderen diversen Fremdstoffen zu trennen, wurden die Mieten nach der Frischrotte auf drei Korngrößenklassen aufgeteilt. Die Maschenweiten sind in Zoll angegeben.

- ◆ $x < 1/4$ “ Feinfraktion, vorwiegend Kompostanteil und feines Holz vom Strukturmaterial
- ◆ $1/4$ “ $< x < 3/4$ “ Mittelfraktion, hauptsächlich Sägespäne (nur bei Miete 3 und 4), teilweise Fremdstoffe
- ◆ $x > 3/4$ “ Grobfraktion, bestehend aus Rinde, Holzchips und Fremdstoffen (bei Miete 2)

Die Reiferotten bestanden aus den Anteilen mit $x < 1/4$ “, die zu Mieten aufgehäuft und wiederum betreut wurden.

Es zeigte sich, dass durch den alleinigen Feinanteil die Temperatur plötzlich nicht mehr so witterungsabhängig war und sich auch die Wasserspeicherefähigkeit der Mieten erhöhte, sodass es zu keinen unerwarteten trockenen Zonen im Mietenkörper kam. Die Temperatur folgte somit einer Kurve, sodass der Abbau der organischen Bestandteile gut zu erkennen war.

☞ Spezielle Bemerkungen

Miete 1 (Rinde & fleshing)

- ◆ langsamer und schlecht funktionierender Abbauprozess
- ◆ ausgetrocknete fleshing
- ◆ anaerobe Zustände

Miete 2 (Holzchips & Marktabfälle & fleshing)

- ◆ relativ schneller und guter Abbau
- ◆ Maden- und Fliegenbelästigung
- ◆ hoher Anteil an Fremdstoffen von den schlecht separierten Marktabfällen

Miete 3 (Holzchips & Pferdeeinstreu & fleshing)

- ◆ relativ wenig fleshing in der Miete
- ◆ zu geringe Temperaturen
- ◆ unvollständiger Abbau
- ◆ vertrocknete fleshing
- ◆ Hygienisierung nicht erreicht
- ◆ Maden- und Fliegenbelästigung

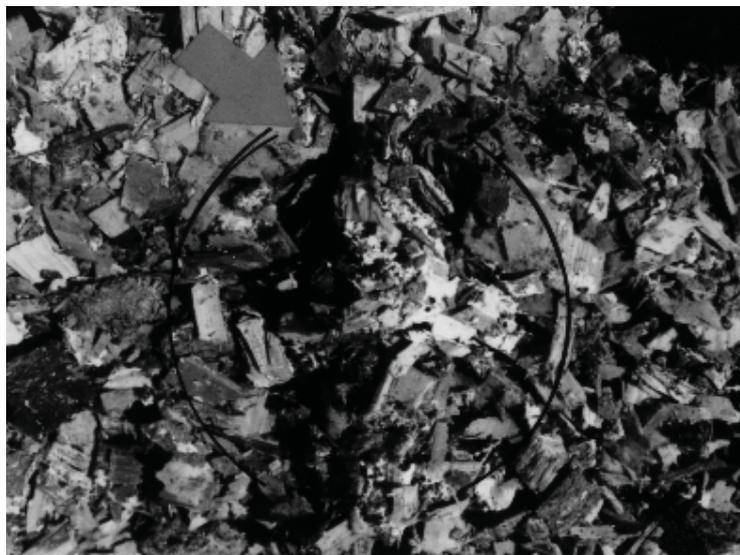


Foto C-4

Unvollständiger Abbau (weißer Brei)

Miete 4 (Pferdeestreu & fleshing)

- ◆ schneller und guter Abbau der fleshing
- ◆ starke Maden- und Fliegenbelästigung
- ◆ neigte zum Austrocknen

☞ Zusammenfassende Bewertung der Kompostqualität

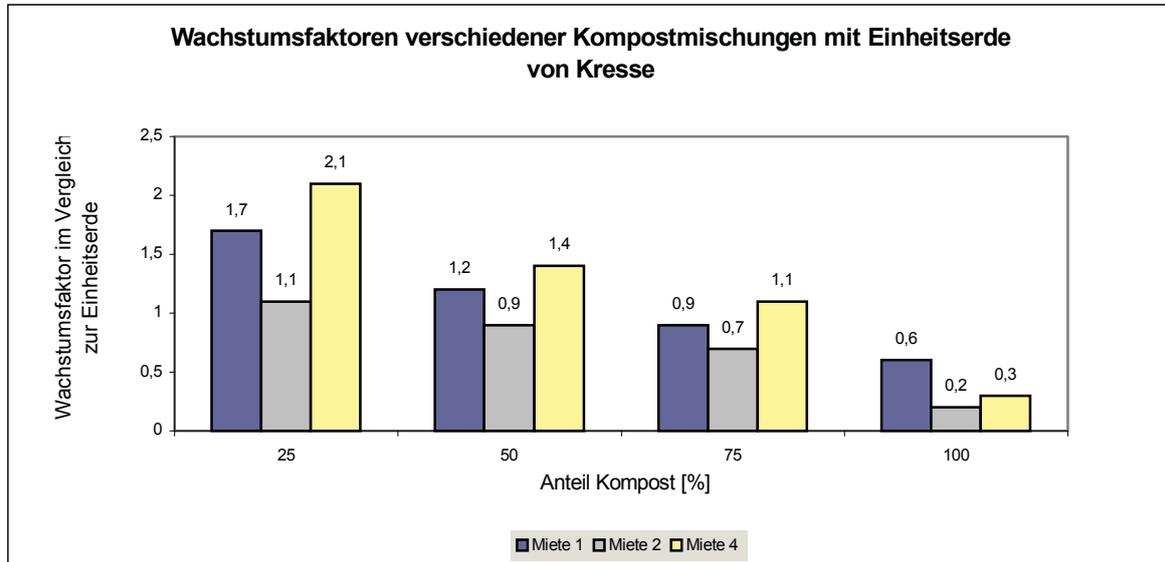


Diagramm C-20 Wachstumsfaktoren verschiedener Kompostmischungen mit Einheitserde von Kresse

Gut erkennbar in Diagramm C-20 ist der gute Düngeeffekt der Kompostmischungen der Miete 4 und der Miete 1. Die Düngewirkung der Kompostmischungen von Miete 2 ist nur im bescheidenem Maße vorhanden.

C.1.3 Reaktorkompostierung br02

C.1.3.1 Versuchsbeschreibung

Die bei der Mietenkompostierung gewonnenen Erkenntnisse und Probleme waren Anlass, eine Kompostierung der fleshing im Reaktor durchzuführen. Dabei sollten die Hauptschwierigkeiten der Freiluftmieten, wie Geruch, Insekten, Witterungsabhängigkeit und langwieriger, schlecht kontrollierbarer bzw. steuerbarer Prozess, verbessert oder sogar beseitigt werden.

C.1.3.1.1 Aufbau des Reaktors

Dieser Reaktor bestand im wesentlichen aus einem 220 l Kunststofffass mit einer Außenisolierung, einem perforierten Luftzufuhrrohr und einem Deckel (ersichtlich in Abbildung C-3).

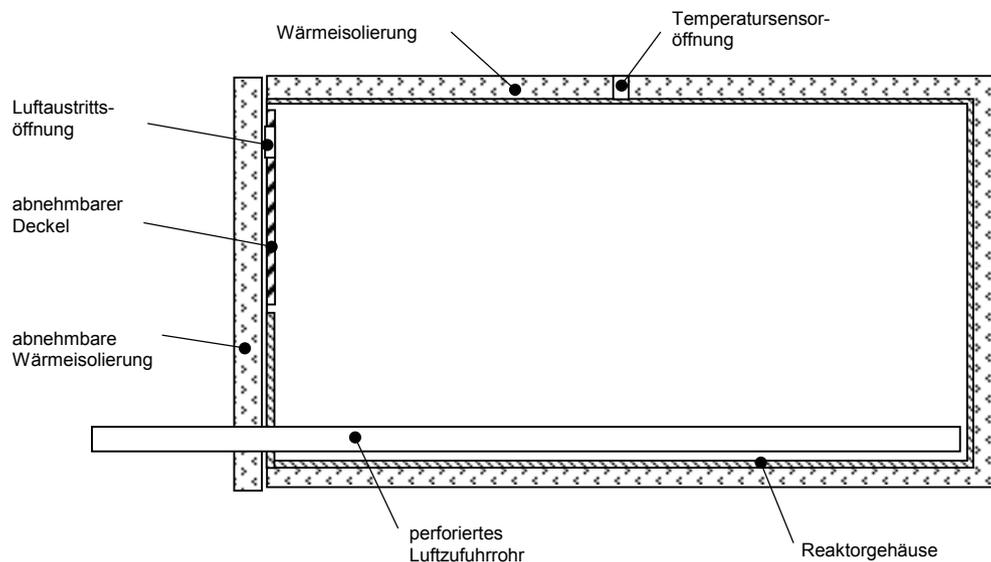


Abbildung C-3 Aufbau des Reaktors br02

Die rund um das Fass angebrachte Wärmeisolierung ist aufgrund des kleinen Volumens des Reaktors unumgänglich. Dadurch kühlt das Rottegut an den Reaktorwänden nicht so stark ab und die Schwankungen der Außentemperaturen haben keinen Einfluss auf das Rottegut. Der Reaktor wurde in horizontaler Lage betrieben (liegendes Fass).

Durch das Luftzufuhrrohr am Reaktorboden, konnte eine dosierte Menge Luft für die Sauerstoffversorgung der Mikroorganismen in den Bodenbereich verteilt eingeblasen werden. Die „verbrauchte“ Luft entwich durch ein Loch im Reaktordeckel.

Der Temperatursensor wurde durch eine kleine Öffnung im Reaktor ins Zentrum der Rotte positioniert.

Das Befüllen und Entleeren erfolgte händisch über den Deckel, der halbkreisförmig und ebenfalls wärmeisoliert war. Die andere Kreishälfte unterhalb des Deckels bildete eine feste Reaktorwand, durch die auch das Luftzufuhrrohr ging.

C.1.3.1.2 Materialien

Der Aufbau der Rotte erfolgte wie bei der Mietenkompostierung schichtweise. Alternierend wurden auf strukturgebendes Material fleshing und Marktabfälle gegeben. Die erste Schicht, die das Luftzufuhrrohr bedeckte, bestand immer aus einem strukturgebenden Material, das von einer Schicht aus fleshing bedeckt wurde. Market waste folgte den fleshing als dritte Lage. Die letzte Schicht bildete auf jeden Fall das strukturgebende Material.

Für die Reaktorkompostierung wurde das selbe Substrat wie für die Mietenkompostierung verwendet. Unterschiedlich war das eingesetzte Strukturmaterial.

In Tabelle C-7 kann man die verschiedenen verwendeten Materialien, deren Einsatzmasse und -volumen (einzeln und in Summe) und die auf fleshing bezogenen Massen- und Volumsverhältnisse pro Versuch nachlesen.

Tabelle C-7 Massen- und Volumsverhältnisse der Reaktorkompostierung br02

Versuch	Einheiten	fleshing	Strukturkompost	Markt-abfälle	Pferde-einstreu	Summe
	mittlere Dichte [kg/m ³]	1000	240	350	240	
Versuch 01	Masse [kg]	15	-	17	21	53
Beginn: 30.11.99	Massenverhältnis [-]	1,0	-	1,1	1,4	1,0 : 2,4
Dauer: 24 Tage	Volumen [dm ³]	15	-	49	88	151
	Volumsverhältnis [-]	1,0	-	3,2	5,8	1,0 : 9,0
Versuch 02	Masse [kg]	36	5,9 *	36	-	78
Beginn: 24.12.99	Massenverhältnis [-]	1,0	0,2	1,0	-	1,0 : 1,2
Dauer: 40 Tage	Volumen [dm ³]	36	20 *	103	-	159
	Volumsverhältnis [-]	1,0	0,6	2,9	-	1,0 : 3,5
Versuch 03	Masse [kg]	60	63+15 **	-	-	123 / 138
Beginn: 02.02.00	Massenverhältnis [-]	1,0	1,1 / 1,3 **	-	-	1,0 : 1,3**
Dauer: 28 Tage	Volumen [dm ³]	60	140+80 **	-	-	200 / 280
	Volumsverhältnis [-]	1,0	2,3 / 3,7 **	-	-	1,0 : 3,7**

*) am 3. Tag anaerob, daher 20 l Strukturkompost (= 5,9 kg) zugemischt

***) am 2. Tag 80 l Strukturkompost (=15 kg) zugemischt, da Anzeichen von anaerob

Bei Versuch 02 wurde als Strukturkompost das abgesiebte Verrottungsprodukt vom Versuch 01 mit der Korngröße $\frac{1}{4}'' < x < \frac{3}{4}''$ genommen.

Der anfängliche Strukturkompost bei Versuch 03 war das abgesiebte Verrottungsprodukt der Miete 2 mit je 70 Liter der Korngröße $x < \frac{1}{4}''$ und der Korngröße $\frac{1}{4}'' < x < \frac{3}{4}''$.

Am zweiten Tag wurden aufgrund der anaeroben Anzeichen, als Strukturkompost 80 l des abgesiebten Verrottungsproduktes von Miete 4 der Korngröße $\frac{1}{4}'' < x < \frac{3}{4}''$ zugegeben. Diese Fraktion bestand vorwiegend aus Sägespänen, die für die bessere Luftverteilung und Wasserregulierung gut geeignet erschien und konnte aufgrund der Volumsreduktion des Rottegutes in den Reaktor eingemischt werden.

Im Anhang sind Analyseergebnisse der verwendeten Materialien angeführt.

C.1.3.2 Ergebnisse

C.1.3.2.1 Versuch 01

Tabelle C-8 Daten – br02 / Versuch 01

Materialien	Pferdeeinstreu – Marktabfälle – fleshing
Massenverhältnis	1,4 : 1,1 : 1,0
Volumsverhältnis	5,8 : 3,2 : 1,0
Frischrottedauer	24 Tage
Fleshingabbau	guter Abbau
Hygienisierung	erreicht
Anmerkungen	geringe Menge an fleshing

Die Erfahrungen der Mietenkompostierung zeigten, dass die Materialien Pferdeeinstreu (sorgt für hohe Temperaturen und Struktur) und Marktabfälle gut als Co-Substrate zur Fleshingkompostierung geeignet sind.

☞ Temperatur

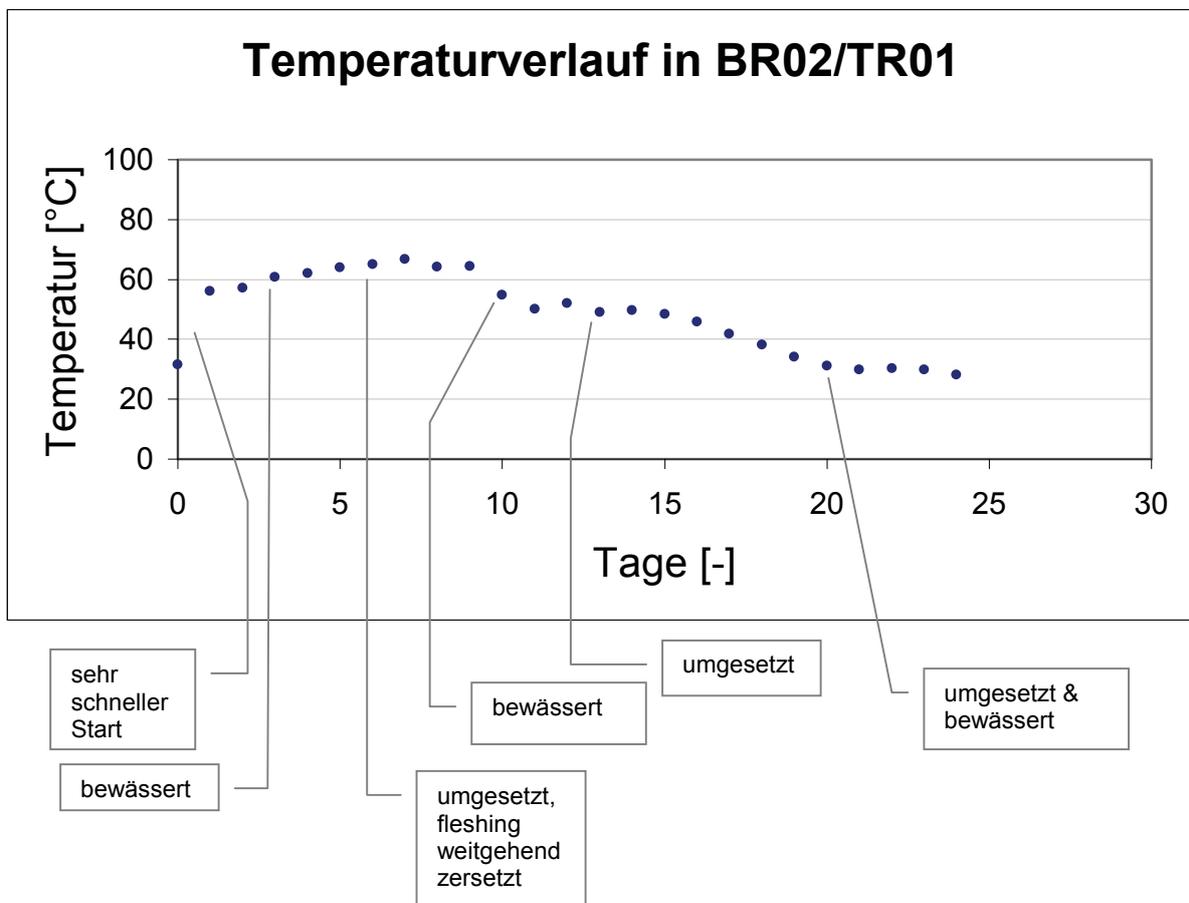


Diagramm C-21 Temperaturverlauf in Reaktor br02 / Versuch 01

Durch die geringe Menge an fleshing konnten diese relativ rasch abgebaut werden.

C.1.3.2.2 Versuch 02

Tabelle C-9 Daten – br02 / Versuch 02

Materialien	Strukturkompost – Marktabfälle – fleshing
Massenverhältnis	0,2 : 1,0 : 1,0
Volumsverhältnis	0,6 : 2,9 : 1,0
Frischrottedauer	40 Tage
Fleshingabbau	guter Abbau
Hygienisierung	erreicht
Anmerkungen	wurde anaerob, große Menge an fleshing

Die ursprüngliche Rotte aus Marktabfällen (Co-Substrat) und fleshing, wurde am Tag 3 anaerob. Darum wurden 20 Liter Strukturkompost (abgeseiebtes Verrottungsprodukt vom Versuch 01 mit der Korngröße $\frac{1}{4}'' < x < \frac{3}{4}''$ (Holzchips mit Kompostanhaftung)) zugemischt.

☞ Temperatur

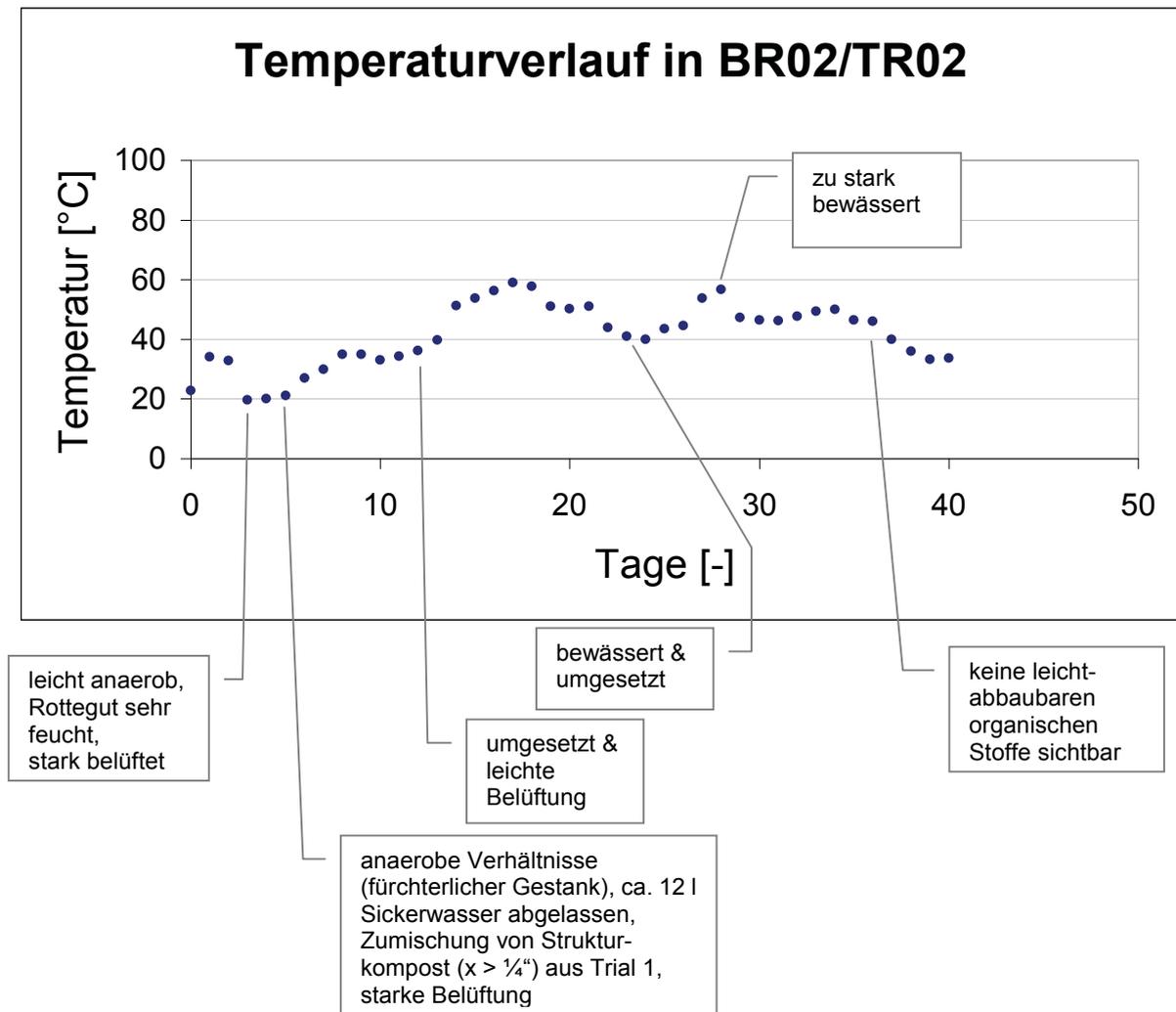


Diagramm C-22

Temperaturverlauf in Reaktor br02 / Versuch 02

Mit Versuch br02/tr02 sollte die Obergrenze der zu behandelnden fleshing, bei gegebenen Rahmenbedingungen (Reaktordesign, Belüftung, etc...), ermittelt werden. Das anfängliche Massenverhältnis von Co-Substrat: fleshing war 1 : 1.

Nach der Volumsreduktion und Kompaktierung der eingesetzten Marktäfte und der hohen Produktion von Sickerwasser wurde der Prozess anaerob. Es wurde zunächst versucht mittels starker Belüftung in den aeroben Bereich zurückzukehren, was allerdings nicht gelang. So wurde am Tag 5 des Versuches der Reaktor geöffnet, und das, bereits auf 12 l angesammelte Sickerwasser, abgelassen. Danach wurde das Rottegut mit 20 l Strukturkompost (abgesiebtes Verrottungsprodukt von br03/tr01 mit der Korngröße $\frac{1}{4}'' < x < \frac{3}{4}''$) durchmischt und erneut befüllt.

Durch ein zu geringes C/N – Verhältnis (zu viel Stickstoffgeber) kam es zu keinen optimalen Abbaubedingungen, was aus dem Temperaturverlauf zu ersehen ist (siehe Diagramm C-22). Eine Hygienisierung der Rotte konnte, aufgrund der ausreichenden Temperaturen über einen längeren Zeitraum (ca. 10 Tage) gerade noch erreicht werden.

Die fleshing wurden soweit abgebaut, dass nach dem Entleeren keine Anzeichen mehr zu finden waren.

C.1.3.2.3 Versuch 03

Tabelle C-10 Daten – br02 / Versuch 03

Materialien	Strukturkompost – fleshing
Massenverhältnis	1,1 / 1,3 : 1,0
Volumsverhältnis	2,3 / 3,7 : 1,0
Frischrottedauer	28 Tage
Fleshingabbau	guter Abbau
Hygienisierung	erreicht
Anmerkungen	anaerobe Anzeichen, hohe Menge an fleshing

☞ Temperatur

Dieser fast ideale Kurvenverlauf in Diagramm C-23 einer Kompostierung ist mitunter auf Grund der adaptierten Mikroorganismen im beigemengten Strukturkompost und der optimalen Rahmenbedingungen (Mischungsverhältnis, Belüftung, Wassergehalt, etc...) erreicht worden. Der eingesetzte Strukturkompost war das abgesiebte Verrottungsprodukt von Miete 2 mit 70 l der Korngröße $x < \frac{1}{4}''$ und 70 l der Korngröße $\frac{1}{4}'' < x < \frac{3}{4}''$, der für eine gute Feuchtigkeitsregulierung sorgte.

Die adaptierten Mikroorganismen sorgten trotz des hohen Mengeneinsatzes von fleshing für einen schnellen Start des Kompostierprozesses. Das Rottegut wurde somit schon am Tag 2 beachtlich kompaktiert, wobei das gebildete Sickerwasser zu einer leichten Anaerobität führte. Durch das Zumischen von 80 l Strukturkompost (abgesiebtes Verrottungsprodukt der Miete 4 mit einer Korngröße $\frac{1}{4}'' < x < \frac{3}{4}''$ – hoher Sägespäneanteil, der zur besseren Belüftung diente) konnte ein aerober Abbau gesichert werden.

Hohe Temperaturen sorgten für einen schnellen Abbau und ein hygienisiertes Produkt.

Die fleshing wurden gut abgebaut.

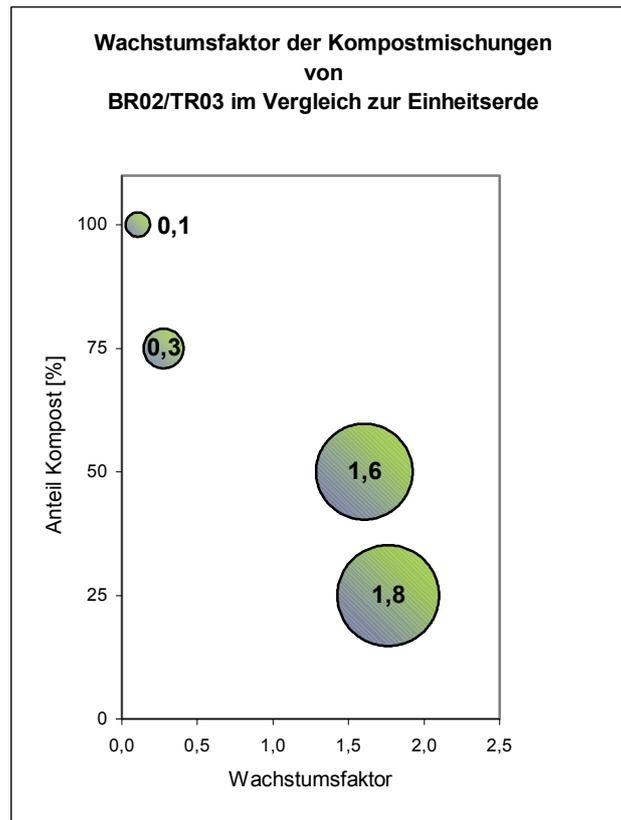


Diagramm C-24 Wachstumsfaktor der Kompostmischungen von br02 / Versuch 03 im Vergleich zur Einheitserde

C.1.3.3 Diskussion

Aus den Temperaturkurven kann man bereits erkennen, dass sie fast kontinuierlich verlaufen und diese Art der Kompostierung, gegenüber den Freiluftmieten, leichter handzuhaben ist und wesentlich schneller abläuft.

Vorteile gegenüber Freiluftmieten:

- ♦ keine Witterungsabhängigkeit, damit
 - keine sprunghaften Temperaturen
 - bessere Feuchtigkeitsregulierung
- ♦ keine Probleme mit Insekten oder anderen Lebewesen
- ♦ dosiertere Belüftung möglich
- ♦ schnellerer und besserer Fleshingabbau
- ♦ sauberes Umfeld

Durch das geschlossene und wärmeisolierte System konnte das Rottegut durch die Temperaturschwankungen nicht so schnell auskühlen. Die Feuchtigkeit in der Rotte konnte durch Fremdwärme (Sonne) nicht so schnell verdunsten, was sich wieder positiv auf den Temperaturverlauf und den Abbau der fleshing auswirkte.

Insekten und andere Kleintiere waren gehindert zum Rottegut vorzudringen (außer zu Zeiten der Reaktoröffnung) und das Rottegut war von außen nicht mehr optisch wahrzunehmen. Durch die Verbesserung der Ästhetik wurden auch die Akzeptanzprobleme geringer.

Ein weiteres Akzeptanzplus bei der Verwendung eines Reaktors ist das saubere Umfeld. Bei Freilandmieten können vor allem leichte Fremddanteile (Kunststoffe, Papier,...) durch den Wind ausgetragen und im Umfeld verteilt werden.

Der Reaktor benötigt nur wenig Grundfläche und kann ohne große Probleme inner- und außerhalb einer z.B. Betriebshalle installiert werden.

Nachteile gegenüber den Freilandmieten:

- ◆ schwierigeres Handling beim Befüllen, Entleeren und Wenden
- ◆ höhere Investitionskosten
- ◆ Belüftung obligatorisch

Das Handling des Rottegutes war in diesem Reaktor deutlich komplizierter und schwieriger. Um dieses umzusetzen, musste zuerst der Reaktor entleert, falls nötig während des Wendens bewässert und danach wieder händisch befüllt werden. Für das Ziehen einer Probe, war es ebenso notwendig den Deckel zu entfernen, wie beim oberflächlichen Bewässern.



Foto C-5 **Befüllung von br02 mit fleshing**

☞ **Spezielle Bemerkungen**

Versuch 01 (PferdeEinstreu & Marktabfälle & fleshing)

- ◆ schneller Temperaturanstieg (durch breites Bakterienspektrum an den Co-Substraten)
- ◆ hohe Temperaturen, vollständiger und schneller Fleshingabbau
- ◆ relativ geringer Anteil an fleshing (28 Gew.%)

Gut funktionierender Versuch mit hohen Temperaturen, stetigem Kurvenverlauf und ohne Problemen.

Versuch 02 (Strukturkompost & Marktabfälle & fleshing)

- ◆ am Tag 3 anaerob, deswegen 20 l Strukturkompost (Verrottungsprodukt von Versuch 01, $x > \frac{1}{4}$) beigemischt
- ◆ langsamer Temperaturanstieg, nie 60 °C überschritten, langsamer Fleshingabbau
- ◆ Hygienisierung gerade noch erreicht
- ◆ relativ hoher Anteil an fleshing (46 Gew.%)

Schlecht funktionierende Rotte mit anaeroben Bedingungen, die wegen hoch wasserhältiger Materialien (fleshing: 80 % WG, Marktabfälle 65 % WG) und der starken Kompaktierung der Marktabfälle entstand.

Nach dem Entleeren von 12 l Sickerwasser, wurden 20 l Strukturkompost zur Rotte hinzugemischt, der die Aufgabe hatte, einerseits als Feuchtigkeitsregulator (Wasserspeicher), andererseits als Strukturmaterial und Bakterienlieferant zu dienen. Diese recht bescheidene Menge konnte den Prozess in den aeroben Zustand versetzen.

Versuch 03 (Strukturkompost & fleshing)

- ♦ stetiger Temperaturanstieg, am Tag 2 anaerobe Anzeichen, Strukturkompost (Verrottungsprodukt von Miete 4 der Korngröße $\frac{1}{4}'' < x < \frac{3}{4}''$) zugemischt
- ♦ hohe Temperaturen, vollständiger und schneller Fleshingabbau
- ♦ relativ hoher Anteil an fleshing (43 Gew.%)
- ♦ gute Düngewirkung

Nach der Kompaktierung des Rottegutes und Anzeichen anaerober Bakterien, wurden 80 l Strukturkompost (Verrottungsprodukt der Miete 4 der Korngröße $\frac{1}{4}'' < x < \frac{3}{4}''$ – hoher Sägespäneanteil) zugemischt. Der Prozess konnte im aeroben Bereich mit einem raschen Ansteigen auf hohe Temperaturen und schnellem, vollständigen Abbau fortgesetzt werden. Eine Qualitätsprüfung des 6 Wochen alten Kompostes ergab eine gute Düngewirkung im Mischbereich bis 50 Vol.% Kompost. Weiters war der Kompost frei von keimfähigen Samen und austriebfähigen Pflanzenteilen.

C.1.3.4 Ausblick

Ausgehend von diesen Versuchen mit Reaktor br-02 konnte festgestellt werden, dass eine Kompostierung im Reaktor, im Vergleich zur Mietenkompostierung, sauberer, schneller und vollständiger abläuft.

Die dabei entstandenen Probleme, wie das des aufgestauten Sickerwassers, des komplizierteren Handlings, sind vorwiegend verfahrenstechnische, die aber durch bauliche Änderungen behoben werden können.

notwendige bauliche Änderungen für eine leichteres Handling des Reaktorprozesses:

- ♦ Sickerwasserablass
- ♦ Sickerwasserbehälter
- ♦ Austragsorgan (z.B. Schnecke)
- ♦ Befüllung muss über den gesamten Kreisquerschnitt möglich sein
- ♦ Belüftung über den gesamten Querschnitt
- ♦ dichteres System, damit Ablufferfassung und –behandlung möglich
- ♦ Bewässerungsvorrichtung für das Rottegut
- ♦ Probenahmeöffnung

Mit diesen Erkenntnissen und Überlegungen wurde daran gegangen einen größeren Reaktor zu konstruieren, der den oben genannten Anforderungen gerecht wird.

C.1.4 Reaktorkompostierung br03

C.1.4.1 Versuchsbeschreibung

Der schnelle und vollständige Fleshingabbau, die Witterungsunabhängigkeit und gut erreichbare Hygienisierung des Verrottungsproduktes, sowie die größere Akzeptanz aufgrund des abgeschlossenen Prozesses und den damit nicht mehr auftretenden Geruchs- und Insektenproblemen, gaben Ausschlag zur Fortführung und Verbesserung der Reaktorkompostierung.

Auf Grundlage der Erkenntnisse der Reaktor br02 wurde ein größerer Versuchsreaktor geplant, der den gewünschten Anforderungen entsprach.

Die Idee war es, den Reaktor so zu konzipieren, dass in ihm die temperaturintensive, aber zeitlich kürzere Frischrotte abläuft. Die langandauernde, volumenmäßig kleinere Reiferotte, die einen geringeren Pflegeaufwand bedarf, sollte danach außerhalb dieses Reaktors (in Freiluftmiete oder anderem Reaktor) bis zum fertigen Kompost heranreifen.

Die problematischere Frischrotte kann somit gut gesteuert und der Prozess hinsichtlich Verweilzeit und Aufgabemenge von fleshing optimiert werden.

C.1.4.1.1 Aufbau des Reaktors

Die Zielvorgaben für den Bau eines Reaktors waren folgende:

- ◆ wärmeisolierter Behälter für die Frischrotte
- ◆ Austragsschnecke für das Rottegut
- ◆ wassergesättigter, regelbarer Lufteintritt im Gegenstrom
- ◆ Ablufferfassung und -behandlung
- ◆ Bewässerungsvorrichtung
- ◆ Sickerwassererfassung
- ◆ kontinuierliche Temperaturmessung
- ◆ Probenahmeöffnung
- ◆ leichte Befüllbarkeit

Um diesen Forderungen gerecht zu werden, musste neben dem Herzstück, dem eigentlichen Reaktor, noch ein Sickerwasserbehälter und ein Biofilter mitgeplant werden.

Der Bioreaktor (br03), der Sickerwasserbehälter (wb01) und der Biofilter (bf01) wurden so konzipiert, dass sie in eine bereits bestehende Stahlkonstruktion eingefügt werden konnten.

Für den Bioreaktor wurde ein, ca. 600 l fassender, ausgedienter alter Wasserboiler genommen und auf Basis der angefertigten Pläne auf die gewünschten Anforderungen umgearbeitet (siehe Anhang).

☞ Bioreaktor br03

In diesem isolierten, zylindrischen Behälter (Verhältnis Höhe/Durchmesser = 2,5 : 1) befindet sich das Rottegut, das durch eine Öffnung an der Oberseite schichtweise eingefüllt wird. Die Grundidee ist es, den temperaturintensiven und prozessaufwendigeren Frischrotteprozess in einer möglichst kurzen Zeit unter kontrollierten Bedingungen ablaufen zu lassen.

Etwas unterhalb der Befüllöffnung, die im Betrieb mit einem Deckel verschlossen ist, befindet sich eine Öffnung, durch die die Abluft aus dem Behälter zum Biofilter weitergeleitet wird. Am Beginn dieses Abluftrohres befindet sich ein Temperatursensor. Mit Hilfe dieses Temperaturwertes kann man den Feuchtigkeitsgehalt der gesättigten Abluft ermitteln, den man für eine Wasserbilanz des gesamten Prozesses benötigt.

Fast auf gleicher Höhe befindet sich eine Öffnung, durch die das gesammelte Sickerwasser für die Bewässerung der Rotte, gepumpt werden kann.

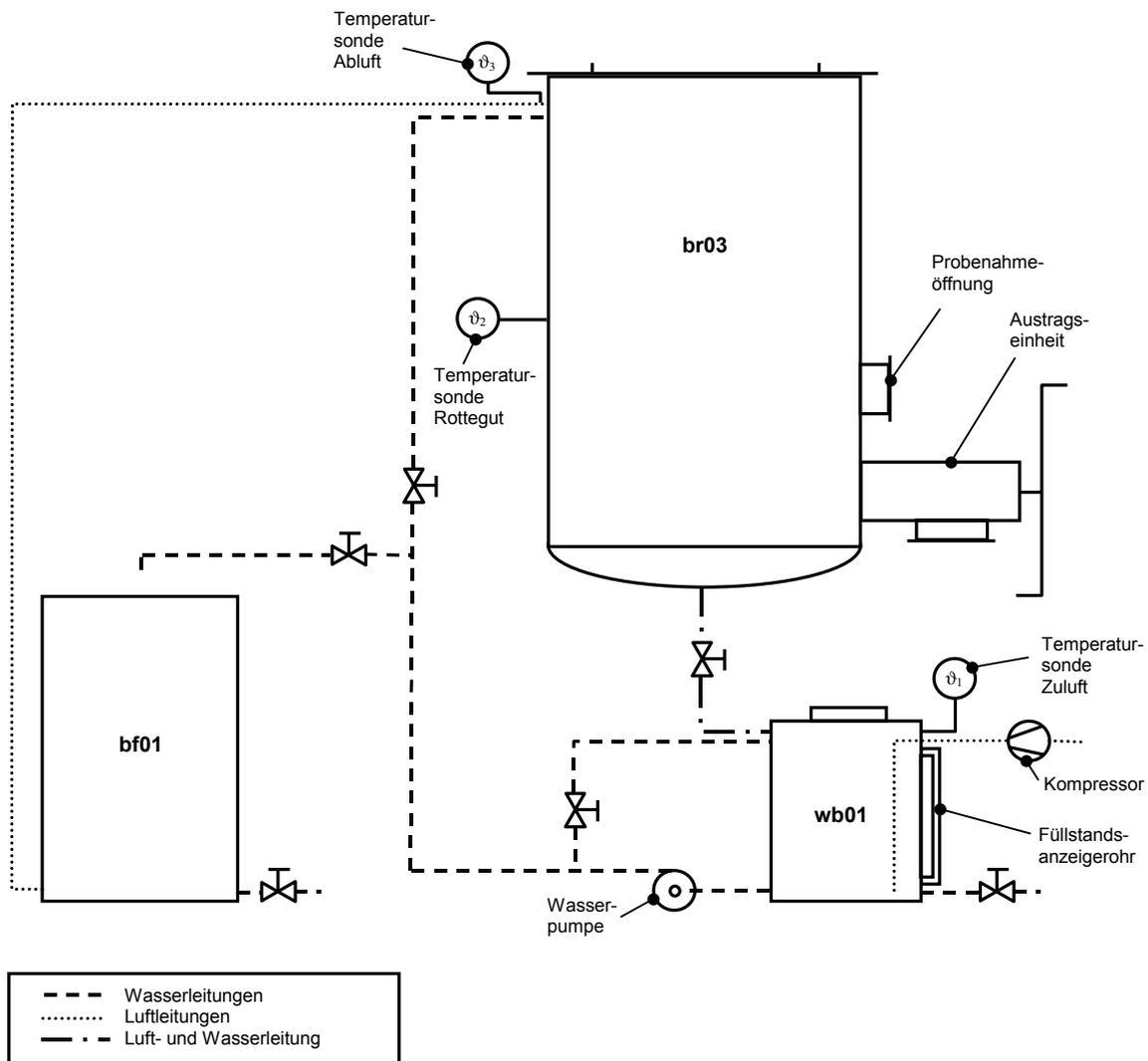


Abbildung C-4 Aufbau der Kompostieranlage br03

Etwa in der Mitte des im Reaktor befindlichen Rottegutes ist ein Temperatursensor positioniert, der die Prozesstemperatur der Rotte misst.

Die große Probenahmeöffnung darunter erleichtert auch das Hantieren bei Austragsschwierigkeiten des Rottegutes.

Am Ende des zylindrischen Teiles ist die Austragsvorrichtung angebracht. Eine Schnecke soll den Frischkompost aus br03 austragen. Diese Austrageeinrichtung soll die Entleerung des Reaktors erleichtern.

Ein Siebboden, der den Konturen der Schnecke angepasst ist, sorgt für einen vollständigeren und besseren Austrag des Rottegutes. Weiters dient er auch mit seinen ca. 3 mm großen Löchern als Luftverteiler der Belüftung und lässt das Sickerwasser nach unten abrinnen. Er ist somit eine physische Barriere für das Rottegut, das so nicht weiter nach unten wandern kann und ein Durchgangsmittel für Wasser und Luft.

An der tiefsten Stelle des Klörperbodens ist ein Rohr angebracht, das einerseits das entstehende Sickerwasser in den darunter liegenden Wasserbehälter fließen lässt, andererseits für die Luftzufuhr des Rottegutes sorgt.

☞ Wasserbehälter wb01

Dieser ist unterhalb des Reaktors br03 angebracht, sodass das Sickerwasser alleine durch die Schwerkraft in den Wasserbehälter abrinnen kann.

Der wb01 dient nicht nur als Speichergefäß zur Sickerwassererfassung, sondern auch als Entnahmegefäß für die Bewässerung der Rotte und des Biofilters bf01. Außerdem findet in wb01 die Befeuchtung der Prozessluft statt.

Zur Befüllung mit Klarwasser oder zu Reinigungszwecken, ist ein verschraubbarer Deckel an der höchsten Stelle angebracht.

Von der tiefsten Stelle des Klörperbodens des br03 führt ein Rohr, das zur Belüftung des Rottegutes und als Sickerwasserablass gleichzeitig dient, an den oberen Rand des Wasserbehälters. Damit soll sichergestellt werden, dass bei Wasserhöchststand im Behälter, dieses Rohr noch nicht überflutet ist und die Belüftung des Rottegutes einwandfrei funktionieren kann.



Foto C-6 **Wasserbehälter wb01**

An gleicher Höhe führt das Belüftungsrohr, das vom Kompressor kommt, in den Wasserbehälter. Um die in den Behälter einströmende Luft mit Wasser zu sättigen, wurde das Einlassrohr innerhalb des wb01 so weit nach unten gekrümmt, bis dessen kleine Luftaustrittsöffnungen immer vollständig mit Wasser bedeckt sind. Die eintretende Luft muss somit durch das Wasser strömen und wird damit gesättigt.

Um nun den Feuchtigkeitsgehalt in der Austrittsluft zu messen, wurde ein Thermometer, ebenfalls auf dem Niveau der Luftaustrittsöffnung, in den Wasserbehälter eingebracht.

Etwas unterhalb befindet sich eine Öffnung, durch die vom wb01 abgepumpte Flüssigkeit, wieder in den Behälter zurückgeführt werden kann. Das mit einem Ventil absperbare Rohr hat einerseits den Zweck, den Druck und die Durchflussmenge der anderen Pumpenabgänge zu reduzieren (wenn man es öffnet). Es kann somit die durch die Pumpe bedingte relativ hohe Durchflussmenge, z.B. für die Bewässerung der Rotte, minimiert und besser dosiert werden.

Andererseits kann das aufgefangene Sickerwasser mittels der Pumpe umgewälzt und durchmischt werden, bevor es zur Bewässerung herangezogen wird.

Am unteren Rand des Wasserbehälters ist das Saugrohr der Pumpe installiert.

Dieses führt über die Pumpe und teilt sich danach in 3 Zweige auf:

- ◆ Zweig 1: führt zum oberen Rand des br03 und dient zur Bewässerung des Rottegutes
- ◆ Zweig 2: führt zum bf01, der mittels Sprühvorrichtung von oben bewässert werden kann
- ◆ Zweig 3: führt an den oberen Rand des wb01 und dient zur Umwälzung, sowie Druck- und Durchflussminimierung

An der tiefsten Stelle des wb01 ist ein Ablassrohr zum Entleeren des Behälters angebracht. Eine Füllstandsanzeige ermöglicht die Messung des anfallenden Sickerwassers.

☞ Biofilter bf01

Dieser besteht aus einem 200 l Fass, das mit Kompost und Strukturmaterial der Korngröße $x < \frac{3}{4}$ gefüllt ist. Er hat die Aufgabe, die geruchsbelasteten Abgase vom br03 zur Geruchsneutralität zu reinigen.

Am unteren Rand befindet sich die Eintrittsöffnung der Abluft und auch eine Öffnung zum Ablassen des gesammelten Sickerwassers. *Dieses kann folgendermaßen entstehen:*

- ◆ durch Kondensation der gesättigten Abluft
- ◆ durch von oben eindringendes Wasser aus Bewässerung oder Regen



Foto C-7 Biofilter bf01

Das Kompost-Strukturmaterialgemisch, des im oben offenen Biofilters, kann mit dem im wb01 gesammelten Wasser befeuchtet werden.

C.1.4.1.2 Materialien

Strukturkompost zeigte bei der Reaktorkompostierung im br02 sehr gute Ergebnisse. Die leichte Verfügbarkeit und die Kenntnis der Inhaltsstoffe waren ebenso ausschlaggebend für die Verwendung dieses Strukturmaterials. Somit wurden bei diesen Versuchen Strukturkompost im Korngrößenbereich von $\frac{1}{4} < x < \frac{3}{4}$ als Bakterienlieferant und Strukturmaterial verwendet.

Tabelle C-11 Massen- und Volumsverhältnisse der Reaktorkompostierung br03

Versuch		Einheiten	fleshing	Strukturkompost	Pferde-einstreu	Summe
	mittlere Dichte	[kg/m ³]	1000	450	240	
Versuch 01	Masse	[kg]	146	187	-	333
Beginn: 16.02.00	Massenverhältnis	[-]	1,0	1,3	-	1,0 : 1,3
ohne Umsetzen	Volumen	[dm ³]	146	423	-	569
Dauer: 21 Tage	Volumsverhältnis	[-]	1,0	2,9	-	1,0 : 2,9
Versuch 02	Masse	[kg]	142	154	-	296
Beginn: 08.03.00	Massenverhältnis	[-]	1,0	1,1	-	1,0 : 1,1
2x Umsetzen	Volumen	[dm ³]	142	415	-	557
Dauer: 14 Tage	Volumsverhältnis	[-]	1,0	2,9	-	1,0 : 2,9
Versuch 03	Masse	[kg]	146	127	33	306
Beginn: 22.03.00	Massenverhältnis	[-]	1,0	0,9	0,2	1,0 : 1,1
2x Umsetzen	Volumen	[dm ³]	146	280	165	591
Dauer: 14 Tage	Volumsverhältnis	[-]	1,0	1,9	1,1	1,0 : 3,0

Um die Startphase zu verkürzen, wurde in Versuch 03 Pferdeinstreu verwendet. Aufgrund des unzerkleinerten Substrates, konnten im br03 ebenfalls keine homogenen Mischungen eingesetzt werden. Der Rotteaufbau erfolgte in abwechselnden Schichtungen, wobei die erste und letzte Schicht immer aus Strukturkompost bestand.

C.1.4.1.3 Handling der Anlage

☞ br03

Der leere Reaktor wird zunächst von oben mit soviel Strukturmaterial gefüllt, bis die Austragsschnecke komplett damit abgedeckt ist. Danach erfolgt die abwechselnde Schichtung mit den verwendeten Materialien, wobei als letzte Schicht wieder Strukturmaterial verwendet wird.

Nach der Befüllung wird der Reaktordeckel dicht abgeschossen. Gleichzeitig sollten alle Öffnungen auf Dichtheit überprüft werden (vor allem die Öffnungen der Probenahme und der Austragsschnecke).

Nun kann die im Gegenstrom basierende Druckbelüftung eingeschaltet werden, wobei sich für dieses Reaktorvolumen von ca. $0,6 \text{ m}^3$ ein Luftstrom von $0,3 \text{ m}^3/\text{h}$ bewährte. Die Luft wird im wb01 angefeuchtet, am Lochboden des br03 verteilt und für den aeroben Abbau von organischem Material zur Verfügung gestellt.

Die Abgase setzen sich neben Stickstoff (N_2) vorwiegend aus CO_2 - und ammoniakhaltigen Gasen zusammen. Das Kohlendioxid entsteht bei der Umsetzung (Oxidation) des organischen Materials. Ammoniak und stickstoffhaltige Verbindungen treten auf, wenn Stickstoffüberschuss vorhanden ist, den die Bakterien nicht in den Kompost binden können.

Während des Betriebes kann die Rottetemperatur wie auch die Abgastemperatur online gemessen werden. Die zu analysierenden Proben werden über die Probenahmeöffnung gezogen.

Die Volumsreduzierung des Rottegutes kann man durch die Reduktion der Schütthöhe des Substrates ermitteln.

Die Entleerung erfolgt über die Austragsschnecke, die das Verrottungsprodukt in ein darunter stehenden Behälter fördert. Dazu ist die Abdeckplatte, die zur Abdichtung des Reaktorsystems dient, abzunehmen. Bei Brückenbildung des Inhalts kann diese über die Probenahme- oder Befüllöffnung manuell zerstört werden.

Masse und Volumen des abgezogenen Frischkompostes sind zu ermitteln.

Es empfiehlt sich, während des Befüll- und Entleervorganges, den Temperatursensor der Rotte zu entfernen, sowie sämtliche Fluidströmungen auszuschalten.

☞ wb01

Der Behälter wird zunächst bis zu einer definierten Menge (z.B. 10 l) mit Wasser gefüllt. Sind die Öffnungen dicht verschlossen und ist die Druckbelüftung eingeschaltet, wird die Luft durch das im wb01 befindliche Wasser angefeuchtet und gelangt gesättigt in den br03.

Nach dem Ansteigen der Temperatur im br03 kann Sickerwasser in den wb01 rinnen, wobei dieses in Menge und pH – Wert (an der Einlaufstelle) zu messen ist.

Bei Bedarf kann der Reaktorinhalt oder der Biofilter mit dem Sickerwasser befeuchtet und dieses somit recycelt werden.

Eine online Temperaturmessung der austretenden gesättigten Luft kann zur Ermittlung des Wassergehaltes dieser Luft herangezogen werden.

Das gesammelte Sickerwasser kann bei Bedarf abgelassen und weiterverwendet oder behandelt werden.

☞ bf01

Das Handling des Biofilters beschränkte sich auf die einmalige Befüllung mit Kompost und Strukturmaterial der Korngröße $x < \frac{3}{4}$ ", dem etwaigen Befeuchten mit dem Sickerwasser von wb01 und periodischen Ablassen des entstandenen Sickerwassers im bf01.

C.1.4.2 Ergebnisse

C.1.4.2.1 Versuch 01

Mit diesem 1. Versuch sollte die Funktionsfähigkeit des Reaktors überprüft werden. Um den mechanischen Aufwand für den Gerber zu minimieren, wurde ein Prozess ohne Umsetzung, jedoch mit vier maliger Bewässerung simuliert.

Tabelle C-12 Daten – br03 / Versuch 01

Materialien	Strukturkompost – fleshing
Massenverhältnis	1,3 : 1,0
Volumsverhältnis	2,9 : 1,0
Frischrottendauer	21 Tage
Belüftung	bis Tag 5: 2,1 m ³ /h, Tag 5 - 14: 0,9 m ³ /h, Tag 14 – 21: 0,3 m ³ /h
Umsetzung	keine
Bewässerung	Tag 5 (2 l), Tag 9 (7 l), Tag 12 (5 l), Tag 16 (4 l)
Fleshingabbau	nicht vollständig
Hygienisierung	teilweise erreicht
Anmerkungen	Probleme mit der Dichtheit des Reaktors

Der anfängliche Luftstrom lag durchschnittlich bei 32 l/min, wurde nach Installation eines Durchflussmessers zunächst auf 15 l/min und schlussendlich auf den Wert von 5 l/min gesenkt.

☞ Temperatur

Die angelieferten fleshing haben durch die Prozessführung in der Gerberei einen sehr hohen pH-Wert von 13 bis 14 und können somit als bakterienfrei angesehen werden.

Die lange Startphase rührt von der langsamen Adaptionszeit der umgebenden Bakterien an das fast „sterile“ Substrat. Dies geschieht durch das CO₂, das durch den Oxidationsprozess gebildet wird.

Die ersten 14 Tage war die Belüftung aufgrund des Fehlens einer Messeinrichtung um ein vielfaches zu hoch eingestellt. Dies führte eher zu einer Kühlung des Prozesses, so dass die Temperaturen nicht über die 70 °C gekommen sind.

Gut erkennbar in Diagramm C-25 sind auch die Temperaturabfälle, die nach der Bewässerung der Rotte auftreten.

Dieser Versuch wurde ohne Umsetzen durchgeführt. Die in Diagramm C-25 dargestellten Temperaturen sind jedoch diejenigen, die im Zentrum der Rotte aufgezeichnet wurden. Es gibt Zonen in der Rotte, vor allem die Randbereiche, die nie diesen hohen Temperaturen von ca. 70 °C ausgesetzt waren. Nach 21 Tagen fanden sich daher nicht vollständig zersetzte fleshing im trockenen Bodenbereich.

Man muss daher annehmen, dass aufgrund der geringen Temperaturen in solchen Bereichen mit unzersetzten fleshing keine Hygienisierung stattfinden konnte.

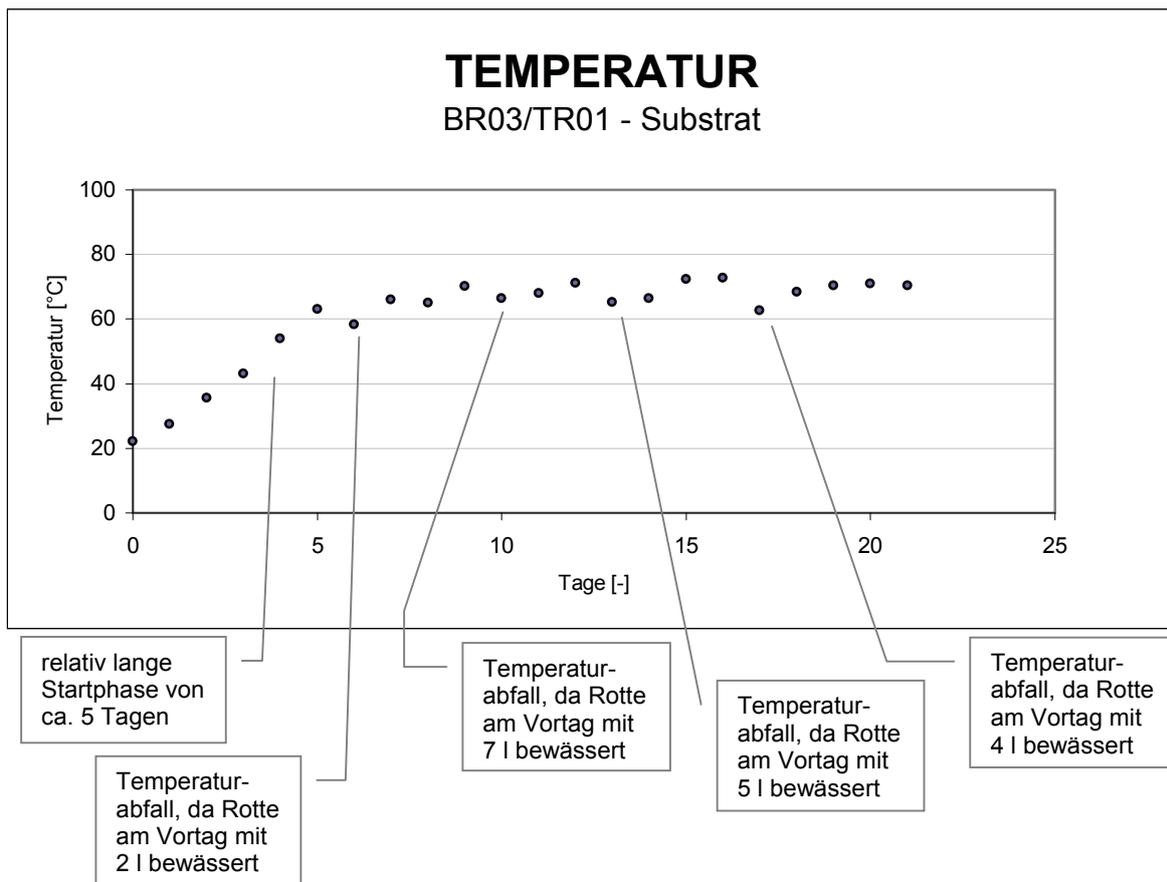


Diagramm C-25 Temperaturverlauf der Rotte in Reaktor br03 / Versuch 01

☞ Wassergehalt

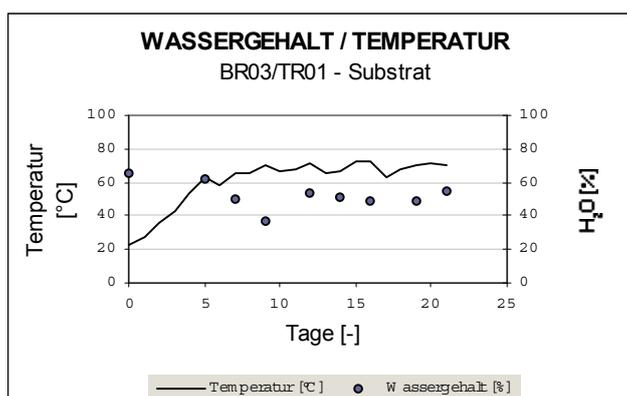


Diagramm C-26 Zeitlicher Verlauf des Wassergehaltes neben der Temperatur in br03 / Versuch 01

Während der 21 Tage Versuchszeit wurde die Rotte am Tag 5 (2 l), Tag 9 (7 l), Tag 12 (5 l) und Tag 16 (4 l) bewässert.

Merkliche Auswirkungen der Bewässerung kann man allerdings nur nach dem Tag 9 feststellen.

Prinzipiell muss gesagt werden, dass ein Großteil des oben im br03 aufgegebenen Wassers kurze Zeit später im Sickerwasserbehälter wb01 zu finden war. Das bedeutet, dass das Rottegut das angebotene Wasser durch sein komprimiertes Porenvolumen (vor allem zu Versuchsende) nicht aufnehmen und so nicht gleichmäßig befeuchtet werden konnte.

In der Praxis sah man dieses Phänomen deutlich bei der Probenahme. Während die obere Schicht einen hohen Wassergehalt aufwies (durch das Auskondensieren der Abgase), war die Zone im Bereich des Reaktorbodens zu trocken.
Das Resultat war, dass in der Zone im Bereich des Reaktorbodens noch nach 21 Tagen nicht vollständig abgebaute fleshing zu finden waren.
Aufgrund des unterschiedlichen Wassergehaltes in den einzelnen Zonen des Rottegutes, war eine reproduzierbare Probenahme nicht möglich.

☞ pH-Wert

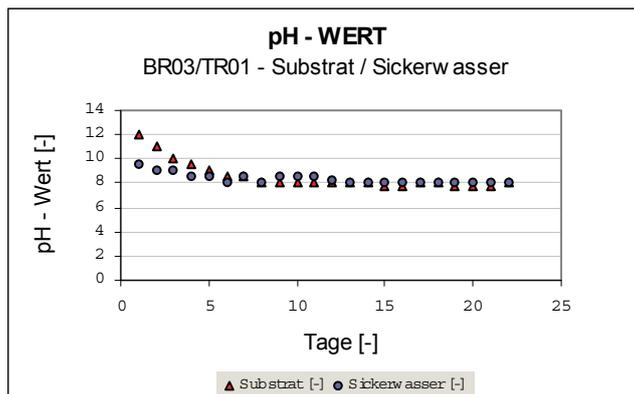


Diagramm C-27 Zeitlicher Verlauf der pH - Werte des Substrates und des Sickerwassers in br03 / Versuch 01

Die pH-Werte des Substrates sanken relativ rasch auf einen leicht basischen Wert ab und haben bereits ab dem Tag 8 einen Wert von 8,0 erreicht. Grund für das schnelle Abnehmen ist das Vorhandensein von CO₂, das die Mikroorganismen bei der Verbrennung der organischen Rottebestandteile produzieren.
Das Sickerwasser wies zum Beginn des Versuches bereits geringere pH – Werte auf, als das Substrat.

☞ Glühverlust

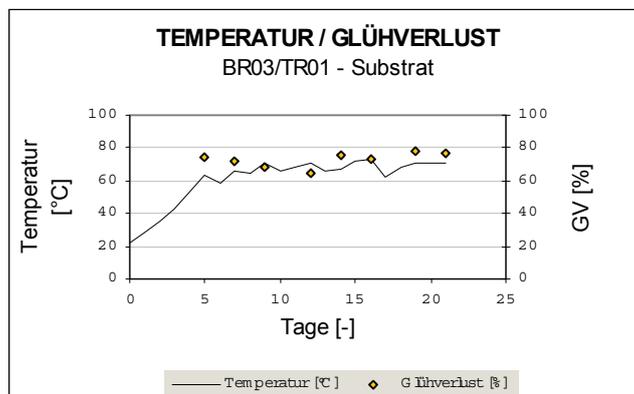


Diagramm C-28 Zeitlicher Verlauf des Glühverlustes neben der Temperatur in br03 / Versuch 01

Das Problem in diesem Versuch lag im inhomogenen Abbau der Rottebestandteile und somit bei der Probenahme. Abhängig von der Probenahme schwankt deswegen der Glühverlust und folgt nicht der zeitlich sinkenden Trendkurve (siehe Diagramm C-28).

☞ Volumenreduktion und Sickerwasseranfall

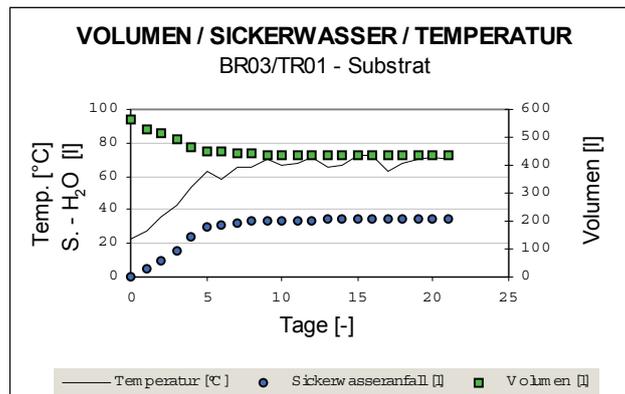


Diagramm C-29 Zeitlicher Verlauf der Volumenreduktion und des Sickerwasseranfalls neben der Temperatur in br03 / Versuch 01

Gut ersichtlich ist die rapide Volumsabnahme und der Sickerwasseranfall während des Temperaturanstieges bis zum Tag 5 (siehe Diagramm C-29). Am Versuchsende konnte eine totale Abnahme des Volumens um 23 % und ein Sickerwasseranfall von 34 l festgestellt werden.

C.1.4.2.2 Versuch 02

Tabelle C-13 Daten – br03 / Versuch 02

Materialien	Strukturkompost – fleshing
Massenverhältnis	1,1 : 1,0
Volumsverhältnis	2,9 : 1,0
Frischrottendauer	14 Tage
Belüftung	durchgehend: 0,3 m ³ /h
Umsetzung	Tag 5, Tag 9
Bewässerung	keine
Fleshingabbau	vollständig
Hygienisierung	erreicht
Anmerkungen	keine

Aus dem Versuch 01 konnte man sehen, dass eine Bewässerung der Rotte nicht unbedingt notwendig, jedoch eine Umsetzung unabdingbar ist.

Unterschiede zu Versuch 01:

- ◆ 2 malige Umsetzung
- ◆ keine Bewässerung
- ◆ konstante Belüftung von 5 l/min

Die Umsetzung erfolgte, indem man den Reaktor br03 mittels Austragsschnecke entleerte und ihn danach erneut mit dem ausgetragenen Rottegut von oben befüllte.

Durch diese Durchmischung und Homogenisierung ergaben sich bedeutende Vorteile:

- ◆ einheitlicher Wassergehalt über gesamten Rottegutquerschnitt
- ◆ einheitliche Temperaturverteilung über gesamten Rottequerschnitt
- ◆ Auflockerung des Rottegutes und Zerstörung der anaeroben Bereiche
- ◆ mechanische Zerkleinerung der fleshing durch die Austragsschnecke

☞ Temperatur

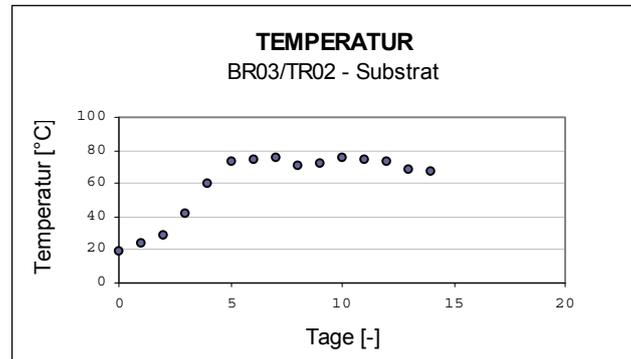


Diagramm C-30 Temperaturverlauf der Rotte in Reaktor br03 / Versuch 02

Der anfängliche exponentielle Temperaturverlauf beginnt bei Umgebungstemperatur und überschreitet bereits nach vier Tagen die 60 °C Linie (siehe Diagramm C-30). Im Vergleich zu br03/tr01 bedeutet dies einen Temperaturvorsprung von einem Tag.

Nach einem weiteren Tag wurde die 70 °C Linie überschritten, was beim br03/tr01 immerhin vier Tage länger dauerte. Dies lag unter anderem daran, dass beim ersten Versuch während der ersten fünf Tage ein sechsmal höherer Belüftungsstrom eingestellt wurde. Dieser sorgte nicht nur für eine kühlere Atmosphäre im Reaktor, sondern verzögerte auch den Anfahrprozess.

Gut ersichtlich in Diagramm C-30 ist vor allem die etwas geringere Temperatur am Tag 9, wo das Rottegut das zweite Mal umgesetzt wurde. Aufgrund der Homogenisierung des Rottegrundes und somit besserer Verteilung der leicht abbaubaren organischen Substanzen, der besseren Feuchtigkeitsverteilung und Aktivierung der mikrobiellen Tätigkeit stieg die Temperatur am nächsten Tag wieder an.

Den ersten Zeitpunkt der Umsetzung (Tag 5) kann man aus diesem Diagramm nicht erkennen, da zu diesem Zeitpunkt an jeder Stelle in der Rotte genügend abzubauenendes Substrat vorhanden war.

☞ Wassergehalt

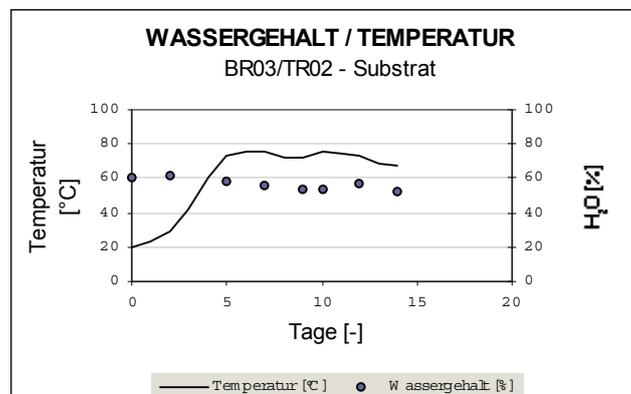


Diagramm C-31 Zeitlicher Verlauf des Wassergehaltes neben der Temperatur in br03 / Versuch 02

Der Anfangswassergehalt der Rotte lag bei etwa 60 Massenprozent und sank dann im Laufe der Kompostierung um ca. 10 Prozentpunkte (siehe Diagramm C-31).

Während dieser Zeit wurde die Rotte kein einziges Mal bewässert.
Durch die zweimalige Umsetzung der Rotte war eine annähernd reproduzierbare Probenahme möglich, was sich auch im stetigen Kurvenverlauf widerspiegelt.

☞ pH-Wert

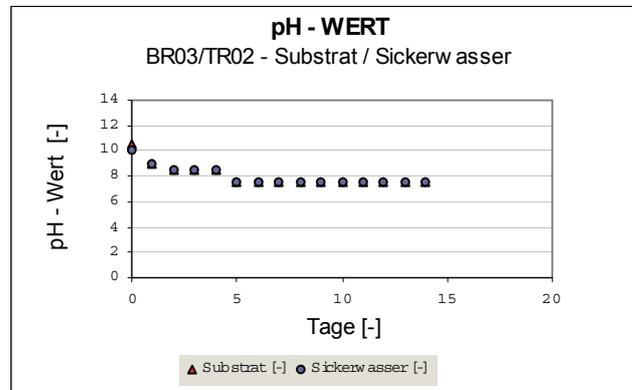


Diagramm C-32 Zeitlicher Verlauf der pH - Werte des Substrates und des Sickerwassers in br03 / Versuch 02

In Diagramm C-32 folgt der pH-Wert vom Sickerwasser exakt dem des Substrates nach. Dieser Kurvenverlauf unterscheidet sich somit von den Versuchen von br03/tr01, wo anfangs eine Abweichung vorhanden war.

Auffällig ist auch, dass in diesem Versuch der pH-Wert des Substrates leicht über 10 beginnt. Dies ist von der Behandlung der fleshing in der Gerberei und sonstigen Faktoren abhängig, die unabhängig vom Kompostierprozess sind.

☞ Glühverlust

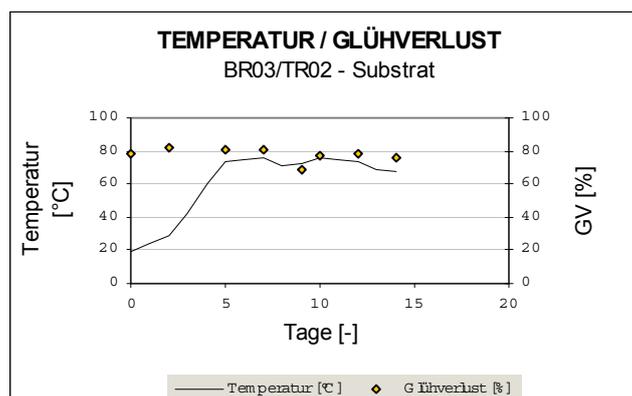


Diagramm C-33 Zeitlicher Verlauf des Glühverlustes neben der Temperatur in br03 / Versuch 02

Erkennbar aus dem Kurvenverlauf in Diagramm C-33 ist die Tendenz, dass der Glühverlust im Laufe der Kompostierung abnimmt. Ein Ausreißer ist am Tag 9 sichtbar, der auf die Probenahme zurückzuführen ist.

☞ Volumenreduktion und Sickerwasseranfall

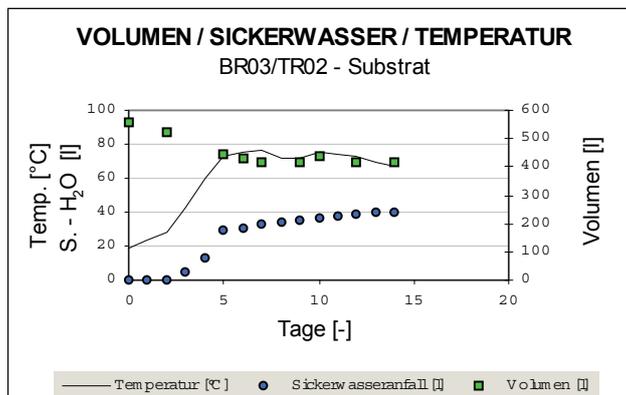


Diagramm C-34 Zeitlicher Verlauf der Volumenreduktion und des Sickerwasseranfalls neben der Temperatur in br03 / Versuch 02

Das Volumen wurde beginnend von ca. 560 l während der 14 Tage in der Heißrotte um 25 % auf etwa 420 l reduziert.

Ein leichter Anstieg des Volumens am Tag 10 ist auf die Auflockerung des Rottegutes, wegen der Umsetzung vom vorhergehenden Tag, zurückzuführen (siehe Diagramm C-34). Dieses Phänomen kann nach dem ersten Umsetzen, am Tag 6, nicht erkannt werden

Der Sickerwasseranfall entsteht erst am Tag 3, wo die Temperaturkurve plötzlich eine Änderung in ihrem Anstieg nach oben macht. Fast parallel zum Temperaturanstieg ist auch der des Sickerwassers, der innerhalb von drei Tagen um das sechsfache zunimmt.

Am Versuchsende konnte ein Sickerwasseranfall von 40 l festgestellt werden.

C.1.4.2.3 Versuch 03

Tabelle C-14 Daten – br03 / Versuch 03

Materialien	Strukturkompost – Pferdeeinstreu - fleshing
Massenverhältnis	0,9 : 0,2 : 1,0
Volumsverhältnis	1,9 : 1,1 : 1,0
Frischrottedauer	14 Tage
Belüftung	durchgehend: 0,3 m ³ /h
Umsetzung	Tag 5, Tag 9
Bewässerung	keine
Fleshingabbau	vollständig
Hygienisierung	erreicht
Anmerkungen	sehr hohe Temperaturen

Die Überlegungen zu diesem Versuch resultierten aus der relativ langsamen Startphase. Aus Versuch 01 und Versuch 02 kann man erkennen, dass die 70 °C bestenfalls nach mehr als 1/3 der Gesamtzeit im Reaktor erreicht wurden. Diese Temperatur ist, wie aus den vorhergehenden Versuchen gezeigt, ein Indiz für den vollständigen Abbau.

Das Bestreben war nun, die Startphase der Frischrotte im Reaktor zu verkürzen.

Eine Möglichkeit bestand in der Veränderung der Rottenzusammensetzung, indem man andere Materialien beimengt.

Die Erfahrungen aus der Mietenkompostierung (Miete 4) zeigten, dass ein mit Pferdeeinstreu vermischtes Substrat einen steilen Temperaturanstieg und hohe Rottetemperaturen bringen.

Pferdeeinstreu bestand aus Sägespänen und ca. 30 %igem Anteil an Pferdeexkrementen und sorgte für hohe Temperaturen in der Rotte.

Somit wurden für diesen Versuch im Vergleich zu br03/tr02 ca. 20 Massenprozent des Strukturmaterials gegen Pferdeeinstreu eingetauscht. Insgesamt blieb das Massen- und Volumsverhältnis gleich dem von Versuch 02.

☞ Temperatur

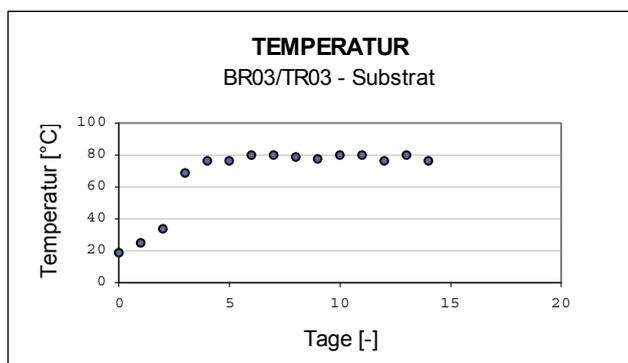


Diagramm C-35 Temperaturverlauf der Rotte in Reaktor br03 / Versuch 03

Der Kurvenverlauf in Diagramm C-35 steigt zu Beginn stark exponentiell an. Bereits am Tag 3 hat die Rotte die Temperatur von 70 °C erreicht und ändert am Tag 4 seine Form zu einer annähernd Horizontalen.

Maximaltemperaturen von 80,6 °C wurden am Tag 10 gemessen.

Diese könnte die Auswirkung auf die am Vortag durchgeführte Umsetzung der Rotte und somit Homogenisierung der leicht abbaubaren organischen Bestandteile sein.

☞ Wassergehalt

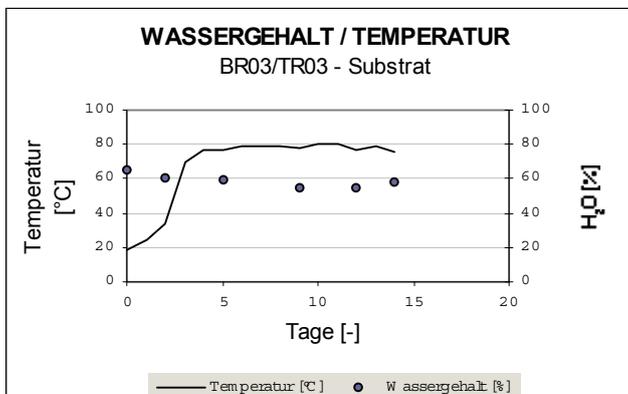


Diagramm C-36 Zeitlicher Verlauf des Wassergehaltes neben der Temperatur in br03 / Versuch 03

Der Anfangswassergehalt der gesamten Rotte betrug um die 65 % und sank während der Kompostierung auf unter 60 % ab.

☞ pH – Wert

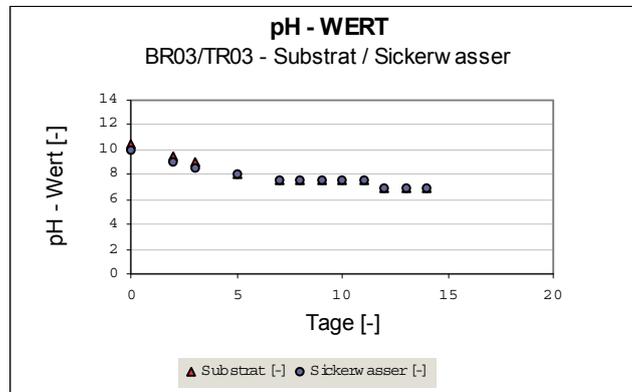


Diagramm C-37 Zeitlicher Verlauf der pH - Werte des Substrates und des Sickerwassers in br03 / Versuch 03

Während am Beginn der Kompostierung der pH – Wert des Substrates noch um fünf Zehntel höher ist als der des Sickerwassers, so verlaufen beide Werte nach dem Tag 5 gleich. Ab dem Tag 12 erreichen beide das neutrale Milieu von pH = 7,0.

☞ Glühverlust

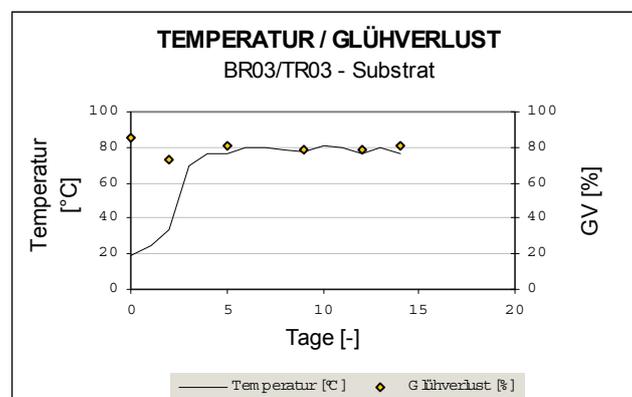


Diagramm C-38 Zeitlicher Verlauf des Glühverlustes neben der Temperatur in br03 / Versuch 03

Im Diagramm C-38 kann man gut erkennen, dass die Umwandlung in die mineralische Phase innerhalb so kurzen Zeit nur beschränkt möglich ist. Diese findet erst in der längeren Reifephase der Rotte statt.

☞ Volumenreduktion und Sickerwasseranfall

Mit annähernd 590 l Volumen startete die Heißrotte und wurde innerhalb der 14 Tage Rottezeit um 28 % auf etwa 425 l reduziert (siehe Diagramm C-39).

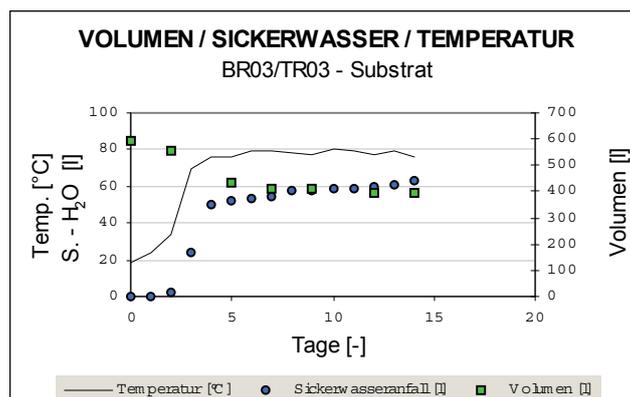


Diagramm C-39 **Zeitlicher Verlauf der Volumenreduktion und des Sickerwasseranfalls neben der Temperatur in br03 / Versuch 03**

Der Sickerwasseranfall entsteht bereits am Tag 2 und schnell dann mit einer sehr steilen Kurve nach oben, wobei er innerhalb von drei Tagen um das 25-fache zunimmt.

Am Versuchsende konnte ein Sickerwasseranfall von 63 l festgestellt werden.

Bei diesem Versuch wurden aufgrund der hohen anfallenden Menge an Sickerwasser die Grenzen des wb01 überschritten.

C.1.4.3 Diskussion

Der Bioreaktor br03 brachte eine wesentliche Erleichterung der Arbeitsweise, aber auch ein sauberes, geruchsneutrales Umfeld mit sich. Der nach außen abgeschlossene und somit witterungsunabhängige Prozess wurde lediglich während der Umsetzung (bei tr02 und tr03) unterbrochen, wobei jedoch kein Abbruch der mikrobiellen Tätigkeit und Senkung der Temperatur erfolgte.

Im Vergleich zur Mietenkompostierung war der Kompostierprozess der Frischrotte beim br03 etwa 3,5 mal schneller, wobei er während ca. 2/3 dieser Zeit kontinuierliche Temperaturen von über 70 °C aufwies. Somit wurde in diesen Zonen eine Hygienisierung des Frischkompostes auf jeden Fall erreicht.

Dank des Biofilters bf01, durch den die Abgase von br03 geleitet wurden, kam es zu keinen Geruchsbelastungen.

Aufgrund des sehr feuchten Abgases brauchte der bf01 nicht bewässert, sondern musste täglich vom Kondenswasser der Abluft entleert werden.

Der Stickstoffgehalt in der Rotte war zu hoch (geringes C/N – Verhältnis), sodass dieser im Kompost nicht gebunden werden konnte.

Der überschüssige Stickstoff wurde über die Abluft in Form von Ammoniakverbindungen aus dem Reaktor ausgetragen. Im Biofilter wurden diese wieder abgebaut, so dass es zu keiner Geruchsbelastung der Umgebung kam.

Abhilfe kann Zumischen von kohlenstoffreichen, leichtabbaubaren Zusätzen, z.B. sehr feine Sägespäne, bringen. Somit kann der Stickstoff von den Bakterien metabolisiert und im Kompost gebunden werden.

Eine andere Möglichkeit den im Abgas entweichenden Stickstoff als Dünger für den Kompost zu bekommen, ist der Bordas Prozess [15]. Dabei wird das Abgas mit Superphosphat behandelt, so dass das entstehende Ammoniak-Phosphat später dem Kompost beigemischt werden kann.

Betrachtet man die Temperaturkurven im Diagramm C-40 stellt man fest, dass im Reaktor während 2/3 der Verweilzeit die Temperaturen um die 70 °C liegen. Dies ist zurückzuführen auf den relativ hohen Anteil von Fett (ca. 10 %) in den fleshing. Während des Kompostierprozesses werden zuerst die leicht abbaubaren Proteine zersetzt. Die Fettverbindungen zählen zu den schwer abbaubaren Stoffen und werden erst bei hohen Temperaturen gekrackt und langsam zersetzt, was zu den langen Verweilzeiten bei sehr hohen Temperaturen führt.

Temperatursenkung kann durch die Erhöhung der „kalten“ zugeführten Luftmenge erreicht werden.

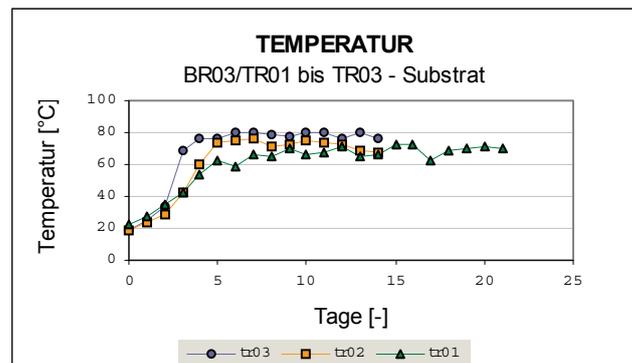


Diagramm C-40 Temperaturverlauf der Rotte in Reaktor br03 / Versuch 01 bis 03

Ein Vergleich der Temperaturen von br03/tr01, br03/tr02 und br03/tr03 im Diagramm C-40 zeigt, dass die Zugabe von gewissen Co-Substraten (Pferdeestreu im Versuch 03) eine Beschleunigung (2 Tage) der Startphase mit sich bringt. Dies resultiert aus der schnelleren Senkung des pH - Wertes durch das produzierte CO₂ auf den neutralen Bereich. Durch eine Reaktorkaskade (siehe Abbildung C-5) kann das im Abgas vorhandene CO₂ eines Reaktors zur Neutralisation der eingesetzten fleshing und somit einer Verkürzung der Startphase genutzt werden.

Folgende Vorteile konnten mit dieser Reaktorkompostierung erzielt werden:

- ◆ sehr kurze Verweilzeit der Frischrotte
- ◆ hohe Temperaturen erreicht (80 °C)
- ◆ gute Hygienisierung
- ◆ witterungsunabhängig
- ◆ geschlossener, sauberer Prozess ohne Akzeptanzprobleme
- ◆ leicht zu steuern und somit Arbeitserleichterung
- ◆ geruchsneutral da Abluftreinigung
- ◆ befeuchtete, regelbare Luftzufuhr
- ◆ Sickerwassererfassung

Während der Kompostierung ergaben sich folgende Probleme:

- ◆ Brückenbildung beim Schneckenaustrag
- ◆ unvollständiger Abbau, falls keine Umsetzung des Rottegutes stattfindet
- ◆ Dichtheitsprobleme
- ◆ Korrosionsprobleme
- ◆ Verstopfung der Abwasserrohre durch abgeschiedenes Fett
- ◆ zu kleiner und unhandlicher wb01

Die Austragung von Materialien aus Behältern mittels Schnecke ist generell eine sehr heikle Verfahrensweise. Aufgrund vieler unbekannter Parameter während der Planung des Reaktors, aber auch wegen zum Teil technisch schwer durchführbarer Ausführungen, konnte auf das Brückenbildungsphänomen keine Rücksicht genommen werden.

In der Praxis erwies sich der Kompost als äußerst brückenbildend und kompakt. Die gebildeten Brücken wurden manuell zerstört, so dass das nach unten fallende Material ausgetragen werden konnte.

Die Vermischung des in Schichten aufgebauten Rottegutes ist eine Notwendigkeit für einen funktionierenden Prozess. Das Rottegut wurde im Versuch 01 während seiner 21 Tage Kompostierzeit nie durchmischt oder gewendet. Dies führte zu anaeroben Spots, ungleichmäßiger Wärme- und Feuchtigkeitsverteilung, sowie unvollständigem Abbau. Während der anderen zwei Versuche wurde das Rottegut durch zweimaliges Umsetzen (Austrag und erneutes Befüllen) homogenisiert. Wie die Versuche zeigten würde eine einmalige Umsetzung bzw. Homogenisierung des Rottegutes während dieser Zeit ausreichen, damit ein vollständiger Abbau gewährt wäre.

Eine automatische Wende- und Auflockerungseinrichtung im Reaktor ist denkbar, jedoch kompliziert diese den mechanischen Reaktoraufbau und lässt die Investitionskosten in die Höhe schnellen.

Dichtheitsprobleme ergaben sich im Bereich der verschraubbaren Deckeln, wegen schlecht sitzender Dichtungen.

Das entstehende Sickerwasser, wie auch das Rottegut selber, sind stark korrosiv und können die Lebensdauer eines Reaktors wesentlich beeinflussen. Deshalb sollte bei der Planung bzw. Anschaffung eines Reaktors über das auszuführende Material nachgedacht werden. Edelstahl, Innengummierung oder glasfaserverstärkter Kunststoff sind mögliche Varianten für den Bau eines Kompostierreaktors.

Ein entscheidender Faktor für den Bau oder die Anschaffung eines solchen Reaktors ist dessen Wirtschaftlichkeit.

Die Versuche zeigten, dass pro eingesetzten m³ fleshing das ca. 3 fache Volumen an Strukturmaterial bzw. Co-Substrat notwendig ist. Man benötigt daher für diese Art der Kompostierung große Volumina, was wiederum die Investitionskosten in die Höhe treibt.

Mit dem zunehmenden Volumen einhergehend sind die Reaktoreinbauten. Je größer das Reaktorvolumen, desto schwieriger und aufwendiger ist es, das Material zu handeln.

Abhilfe schaffen Einbauten wie Auflockerungs- und Homogenisierereinrichtungen, die auch beim Austrag die gebildeten Brücken zerstören. Sie ersparen Personalkosten, schlagen sich jedoch bei der Erstinvestition zu Buche. Nachteilig dabei ist auch die größere Anfälligkeit und aufwendigere Wartung der Anlagenteile.

Die Betriebskosten sind im Vergleich dazu sehr gering. Für den aeroben Abbau müssen pro m³ Rottematerial 0,5 m³/h Luft aufgewandt werden. Elektrisch betriebene Motoren wie die Sickerwasserpumpe, eventuell Motoren für den Austrag oder für Homogenisierereinbauten, werden nur kurzfristig benötigt und verbrauchen somit wenig el. Energie. Registrier- und Messgeräte wie Temperatursonde und –aufzeichnung werden nur kurze Zeit am Tag mit relativ wenig Energie versorgt.

Zu berücksichtigen sind noch Personalkosten, die jedoch mit zunehmender Automatisierung der Anlage kleiner werden, sowie Kosten die für den verbrauchten Platz der Anlage entstehen.

Anreize, die zum Bau einer solchen Anlage führen, findet man einerseits in der Ersparnis der Entsorgungskosten, andererseits kann man den produzierten Kompost als Bodenverbesserungsmittel und Dünger verkaufen.

Erhöhtes Umweltbewusstsein sowie gesetzliche Richtlinien sind für nachhaltige Behandlung von Abfällen, in Industriestaaten, Stand der Technik. In vielen anderen Ländern der Welt, wie auch in Chile, fehlen diese Rahmenbedingungen bzw. sind diese erst im Entstehen.

C.1.4.4 Ausblick

Wie in den letzten Kapiteln gezeigt wurde, ist die Kompostierung von fleshing nur mit einem Reaktor sinnvoll. Was allerdings noch nicht untersucht werden konnte, ist die Optimierung des Prozesses hinsichtlich maximaler Einsatzmenge von fleshing, Veränderung der Prozessparameter usw..

Zusammenfassend einige interessante Möglichkeiten für die Prozessoptimierung:

- ◆ Belüftung im Gleichstrom von oben
- ◆ Intervallbelüftung
- ◆ Fleshingvorbehandlung (thermisch, mechanisch)
- ◆ Abwasserbehandlung
- ◆ kontinuierlicher Rohrreaktor
- ◆ Reaktorkaskade

Beim ersten angeführten Punkt soll der erhöhte verfahrenstechnische und wirtschaftliche Aufwand eines Lochbodens über den gesamten Querschnitt mit diversen Konturen vermieden werden. Die Eintrittsluft soll von oben gleichmäßig verteilt auf das Rottegut gelangen, ohne dass zur Luftverteilung ein Medium benötigt wird. Die Abluft wird dann gemeinsam mit dem Sickerwasser durch eine relativ kleine Öffnung im Reaktorboden abgeführt. Ein verhältnismäßig kleines planes Sieb verhindert den Austrag von festem Material, lässt aber Gas- und Flüssigphase passieren.

Mit einer Intervallbelüftung soll untersucht werden, ob dadurch die Temperatur schneller in der Rotte ansteigen kann. Es soll somit die Startphase verkürzt werden, wenn für eine gewisse Zeit die relativ kalte Eintrittsluft ausbleibt.

Unter der schon angesprochenen Fleshingvorbehandlung könnte man einerseits den biologischen Abbau leichter zu machen (z.B. mit thermischer Vorbehandlung Fett reduzieren), andererseits die fleshing für eine bessere Homogenisierung aufzubereiten (Zerkleinerung deren Form).

Der Abwasserbehandlung sollte eine Fettabscheidung vorgeschaltet werden, um ein fettfreies Sickerwasser zu erhalten. Das gewonnene Fett könnte bei entsprechender Qualität zur Aufbereitung und Weiterverarbeitung verkauft werden.

Das gesammelte Sickerwasser soll für die Bewässerung der Frisch-, der Reiferotten und des Biofilters dienen. Reiferotten können in Form einer Miete oder in einem separaten Reaktor zum Kompost reifen. Im offenen Zustand ist jedoch wesentlich mehr Bewässerung notwendig.

Sollte nun doch noch Sickerwasser übrig bleiben, so kann dieses in einer Wurzelraumanlage oder Kläranlage behandelt werden.

Berücksichtigt man die oben genannten Vorschläge und vereint diese zu einem Gesamtkonzept, so kommt man auf eine mögliche Behandlungsmethode der unbehandelten fleshing mittels kontinuierlichem Rohrreaktor. Dieser bringt den Vorteil, dass das Rottegut so wenig als möglich gehandelt werden muss (das zu kompostierende Material wird aufgegeben und nach Ablauf der Rottezeit kann das Produkt entnommen werden). Dies erspart viel Arbeit und vor allem Kosten während des Kompostierbetriebes. Durch z.B. Rotationsbewegung des Rohrreaktors kann eine Durchmischung und Homogenisierung des Rottegutes stattfinden. Der geschlossene Reaktor kann gezielt belüftet und die Abluft gesammelt in einem Biofilter behandelt werden.

Der verhältnismäßig einfach aufgebaute Reaktor hat aber einen entscheidenden Nachteil. Aufgrund der relativ langen Verweilzeiten im Reaktor, müsste dieser eine sehr große Längenabmessung vorweisen, das die Errichtung unrentabel macht.

Eine nicht so ideale, jedoch machbare Version des Rohrreaktors ist die Reaktorkaskade (siehe Abbildung C-5).

Diese hat den entscheidenden Nachteil, dass das Rottegut viel öfters gehandelt werden muss und der Aufbau des Reaktors etwas komplizierter ist, jedoch ist er leichter zu realisieren.

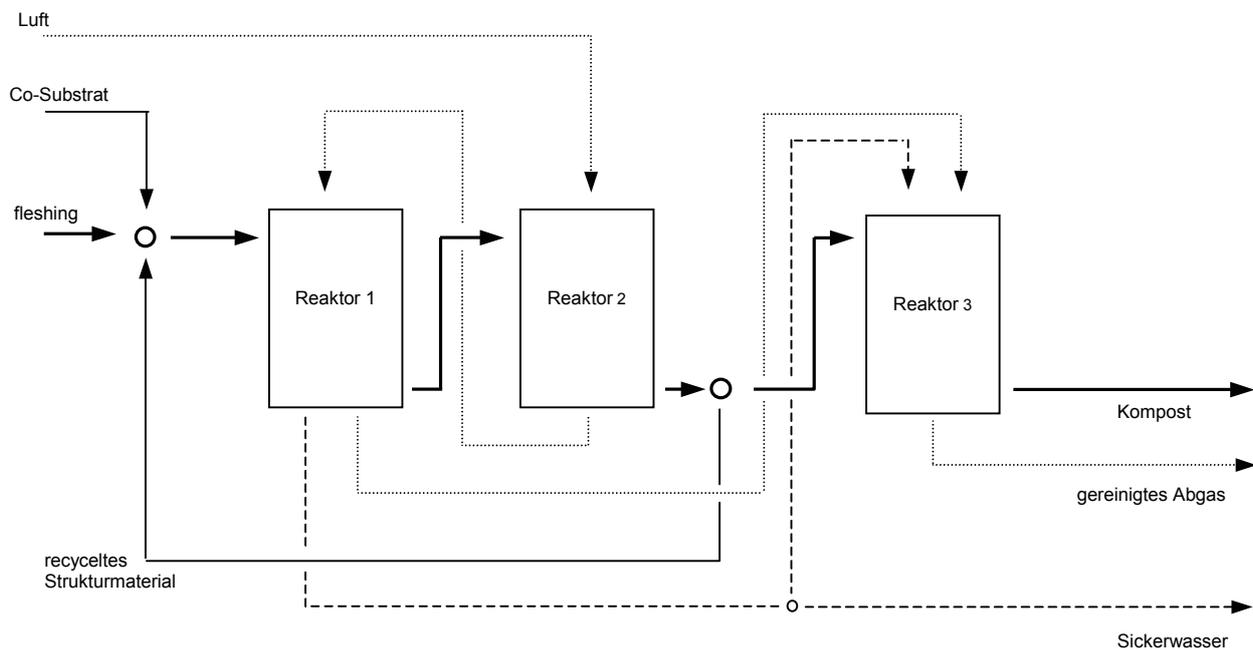


Abbildung C-5 Reaktorkaskade eines möglichen Kompostierprozesses

Fleshing werden mit recyceltem Strukturmaterial (mit Bakterien angereicherte Holzchips) und Co-Substraten gemischt. Das Volumsverhältnis von Strukturmaterial und Co-Substraten zu fleshing soll ca. 2,5 - 3 : 1 betragen. Die Verweilzeit dieses Rottegutes sollte nun kleiner als 5 Tage sein. Tatsächlich hängt sie von der Neutralisierung der fleshing und der damit mehr oder weniger kürzeren Startphase ab. Mit dem Abgas von Reaktor 2 wird das Rottegut im Reaktor 1 belüftet. Es dient nicht nur zur Neutralisierung der fleshing mit dem CO₂, sondern auch zur Erwärmung des Rottegutes.

In dieser Zeit wird das Volumen um ca. 1/3 reduziert und das meiste Sickerwasser fällt an.

Der Reaktor 1 wird nach Erreichen dieser Bedingungen (hohe Temperatur, neutrale fleshing, Volumenreduktion, Entwässerung) entleert, wobei das Rottematerial in den Reaktor 2 gelangt. Während des Entleer- und Befüllvorganges wird das Substrat homogenisiert und aufgelockert. In diesem Reaktor 2 findet nun ein Abbauvorgang mit mesophilen Temperaturen statt, der ca. 10 bis 14 Tage dauert und nicht bewässert wird. Dieser Prozess wird mit frischer Luft versorgt, wobei dessen heiße und CO₂ reiche Abluft dann in den ersten Reaktor geleitet wird.

Ist das Material trocken genug, wird es aus dem Reaktor 2 genommen, das Strukturmaterial vom Frischkompost getrennt und der Frischkompost in den Reaktor 3 überführt. Hier kann nun die Reifephase vor sich gehen.

In diesem Reaktor herrschen Temperaturen um die 30 - 40 °C, wobei zur Belüftung das Abgas vom Reaktor 1 verwendet wird. Der Reaktor 3 mit seinem Reifekompost wirkt als Biofilter, wobei die Bakterien das mit Geruchsstoffen beladene Abgas reinigen.

Das abgesiebte Strukturmaterial ist bereits mit Bakterien angereichert und kann wieder zur weiteren Verwendung in den Reaktor 1 eingesetzt werden.

Das angefallene Sickerwasser kann zur Bewässerung der Reiferotte dienen und somit recycelt werden. Die Verweilzeit im Reifereaktor beträgt ca. ein Monat.

C.2 Mikrobieller Abbau – Chromlederabfall

C.2.1 Einleitung

Chromlederabfälle sind Abfälle, die bei der Ledererzeugung nach der Chromgerbung (als Chromfalzspäne, Chromschleifstaub und Lederreste beim Zurichten) entstehen. Leder besteht aus ca. 70 % organischem (Proteine, Keratin, Kollagen und Lipide) und ca. 15 % anorganischem Anteil, sowie ca. 2-3 % Chromoxid. Aufgabe des Leders ist es eine hohe Beständigkeit gegenüber seiner Umwelt aufzuweisen. Es ist somit biologisch schwer abbaubar.

Zur Zeit wird der Grossteil der Chromfalzspäne durch Deponierung entsorgt.

Aufgrund des hohen organischen Anteils liegt die Entsorgung mittels mikrobiellem Abbau nahe.

Ziel für ein biologisches Entsorgungsverfahren ist es daher, Mikroorganismen mit einem hohen Abbaupotential anzureichern, geeignete Verfahrensstufen für einen effizienten Lederabbau zu entwickeln und geeignete Entsorgungsmöglichkeiten für die verbleibenden Reststoffe zu finden.

Die Idee war es daher aus den gezogenen Proben chromresistente Bakterien zu isolieren, diese zu identifizieren und zu vermehren. In einem Bioreaktor sollen diese Bakterienstämme dann unter kontrollierten Bedingungen chromhaltige Lederabfälle (in wässriger Suspension) abbauen und somit das Abfallvolumen reduzieren. Das Leder dient diesen Bakterien als Kohlenstoff-, Energie- und Stickstoffquelle. Zu untersuchen ist, ob dieses Nahrungsangebot des Leders alleine genügt oder weitere organische Substrate (z.B. Sägespäne) eingesetzt werden müssen.

Im anfallenden anorganischen Reststoff sollen die Chromverbindungen angereichert werden. Dieser verbleibende Feststoff kann bei hoher Chromanreicherung möglicherweise zur Chromstahlproduktion im Elektrostahlwerk eingesetzt werden

C.2.2 Versuchsbeschreibung

C.2.2.1 Proben der Gerberei GACEL S.A. / Concepción

C.2.2.1.1 Probenahme

Ziel der Probenahme war es, möglichst viele Mikroorganismen zu finden, die chromresistent sind und chromhaltiges Leder abbauen können.

Daraus resultierend wurden die Proben vorwiegend im Abwasserbereich dieser Gerberei gezogen. Das Abwasser fließt unbehandelt und unreguliert in den danebenliegenden Fluss Bio-Bio.

Chromresistente Mikroorganismen benötigen für ihre Adaption Zeit. Demnach befinden sie sich in der Nähe von chromhaltigen Stoffen, die schon längere Zeit auf die umgebende Atmosphäre einwirken. Diese adaptierten Mikroorganismen kann man vor allem in den Bereichen von chromhaltigem Abwasser einer länger bestehenden Gerberei oder in der Nähe von alten, deponierten Chromfalzspänen finden.

Tabelle C-15 **Probenahme bei Gerberei GACEL S.A. / Concepción**

Nr.°	Bezeichnung	Beschreibung und Herkunft
1	MSB-051199-001	Erde von Oberfläche ca. 3 m nach Zusammenführung der zwei Abwasserströme
2	MSB-051199-002	Schlamm von Zyklon-Schleifstaubabscheidung
3	MSB-051199-003	Erde von Oberfläche vor Zusammenführung der zwei Abwasserströme der Gerberei
4	MLB-051199-004	Abwasser, das mit Schleifstaub von der Zyklonabscheidung beladen ist (nach Nr.° 2)
5	MSB-051199-004	oranger Pilz von einem rotierenden Versuchsgerbfass

Wichtig für die Auffindung und Isolierung der richtigen Bakterienstämme ist das Arbeiten mit „sterilen“ Geräten.

C.2.2.1.2 Kultivierung von Bakterien

Zunächst wurden die Proben mit sterilem Wasser soweit aufgefüllt, dass die Feststoffanteile vollständig benetzt waren. Danach wurden die Bakterien mit einem Ultraschallgerät von der festen Phase (Bakterien haften am Trägermaterial in Form eines Biofilms) in die Flüssigkeit gerüttelt (10 min).

Nun wurden von jeder Probe je 100 µl dieser Bakterienflüssigkeit gleichmäßig mit einem sterilen „Rechen“ auf jeweils drei Nährböden verteilt. Diese 12 Petrischalen wurden nun zur Kultivierung für 48 Stunden, bei 30 °C, in den Wärmeschrank gegeben.

Die Pilzkultur benötigte nur zwei Nährböden, die nach Beimpfung bei 25 °C für eine Zeitdauer von 48 Stunden in den Wärmeschrank kamen.

Tabelle C-16 **Verwendete Nährböden in Petrischalen**

Bezeichnung	Verwendung	Beschreibung
MAC.C, Cr	Pilze, Gram-negative Bakterien	Mac Conkey in Agar-Agar & 0,5 mMol CrO ₄ ²⁻
MAC.C	Gram-negative Bakterien	Mac Conkey in Agar-Agar
PCA	Gram-positive und negative Bakterien	Plate counte agar
A.SAB	Pilze	Nährboden für Pilzkultur

Agar-Agar ist ein fester Nährboden, ein Algenprodukt, das sich bei 95 °C verflüssigt und beim Abkühlen verfestigt. Beim Kultivieren ist weiter zu achten, dass Temperatur und pH-Wert für das Wachstum optimal eingestellt sind, und dass die atmosphärischen Umweltbedingungen stimmen. Aerobe Bakterien sind leicht handzuhaben, denn sie wachsen ganz normal unter Luftsauerstoff.

Bei allen Kulturverfahren ist bei den verwendeten Geräten und Medien Keimfreiheit verpflichtend, was durch Einsatz von „sterilen“ Geräten erreicht wird.

C.2.2.1.3 Isolierung von interessanten Bakterien und Vermehrung

29 interessante Bakterienstämme, von den Proben Nr.° 1 bis 3, wurden isoliert und in Reagenzgläser mit künstlichen Nährstoffen bei 30 °C und 24 Stunden vermehrt.

C.2.2.1.4 Prüfung auf Chromresistenz

Diese isolierten Stämme der Mikroorganismen wurden nun mit einem Replikator auf PCA-Nährböden mit unterschiedlichen Chromkonzentrationen (0 bis 10 mMol/l) aufgetragen.

Der Replikator ermöglicht eine schnelle und genaue Arbeitsweise. Es wurde immer die gleiche Menge an Flüssigkeit mit den Bakterien entnommen und diese auf eine bestimmte Position auf den Nährboden aufgebracht.

Der untere Teil des Replikators besteht aus einer Metallplatte mit 32 Löchern, die mit den verschiedenen Bakterienstämmen, die sich in wässriger Lösung befinden, befüllt wurde. Der obere Teil, eine mit 32 Nadeln versehene Gegenplatte, wurde auf den unteren abgesenkt, wobei eine bestimmte Menge an Flüssigkeit mit den unterschiedlichen Bakterienstämmen entnommen wurde. Diese wurden auf die jeweilige Petrischale (mit einer Markierung zur Positionierung versehen) übertragen. Anhand der Markierung und der definierten Positionen konnte jeder Bakterienstamm rückverfolgt werden.

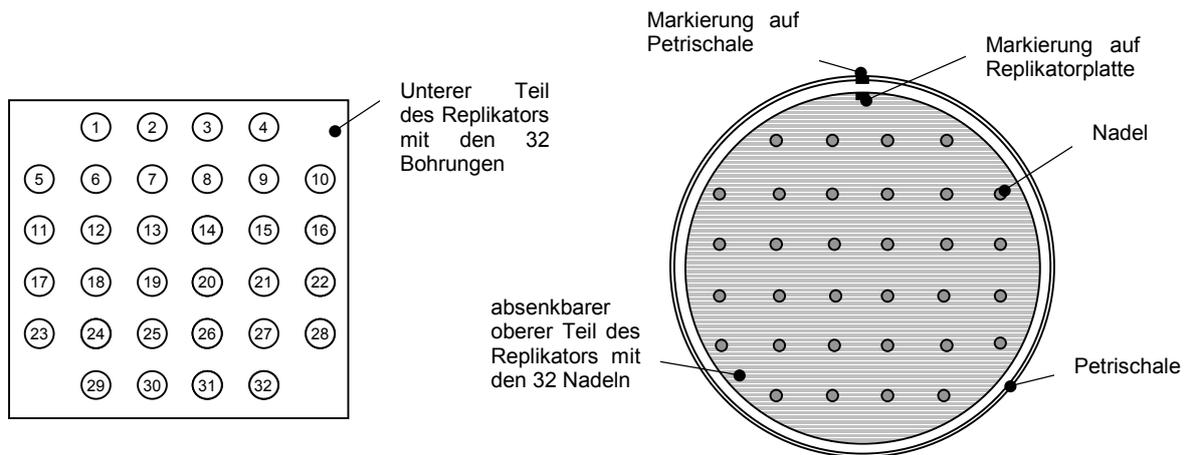


Abbildung C-6 Replikator

Die Petrischalen waren mit Nährböden PCA und verschiedenen Chromatkonzentrationen von K_2CrO_4 gefüllt. Zwei Petrischalen dienen zur Kontrolle und beinhalten kein Chromat (siehe Tabelle C-16).

Tabelle C-17 Chromkonzentrationen der PCA - Nährböden

Petrischale	CrO_4^{2-} [mMol/l]	K_2CrO_4 [mg/l]	Cr [mg/l]
1	0	0	0
2	0	0	0
3	0,3	58,3	15,6
4	0,6	116,5	31,2
5	1,25	242,8	65,0
6	2,5	485,5	130,0
7	5	971,0	260,0
8	10	1942,0	520,0

C.2.2.1.5 Wachstum und Abbauleistung der ausgewählten Bakterienstämme

Es soll gezeigt werden, dass sich chromresistente Bakterien bei Anwesenheit von Lederschleifstaub vermehren können. Die Bakterien sollen das chromgegerbte Leder als einzige Kohlenstoff-, Energie- und Stickstoffquelle nutzen und es dadurch abbauen.

Zur Kontrolle des Wachstums wurde parallel dazu ein Versuch mit künstlichem Nährstoff und Chromat, anstatt des Leders, durchgeführt. Für die Nährstofflösung wurde annähernd das gleiche C/N – Verhältnis wie von Lederschleifstaub, das bei C/N = 4,3 lag, eingestellt.

In der Praxis wurde der Bakterienstamm mit sterilem Wasser von ca. 10^9 Bakterien/ml auf 10^6 verdünnt. Das ist ein Verdünnungsfaktor von 10^{-3} . Dieser verdünnte Bakterienstamm wurde nun einerseits mit einer Suspension aus Lederstaub, andererseits mit der gleichen Menge an verdünnter, chromatisierter Nährstofflösung vermischt. Die etwaige Anzahl der Bakterien in diesen zwei Gläsern betrug um die 10^5 .

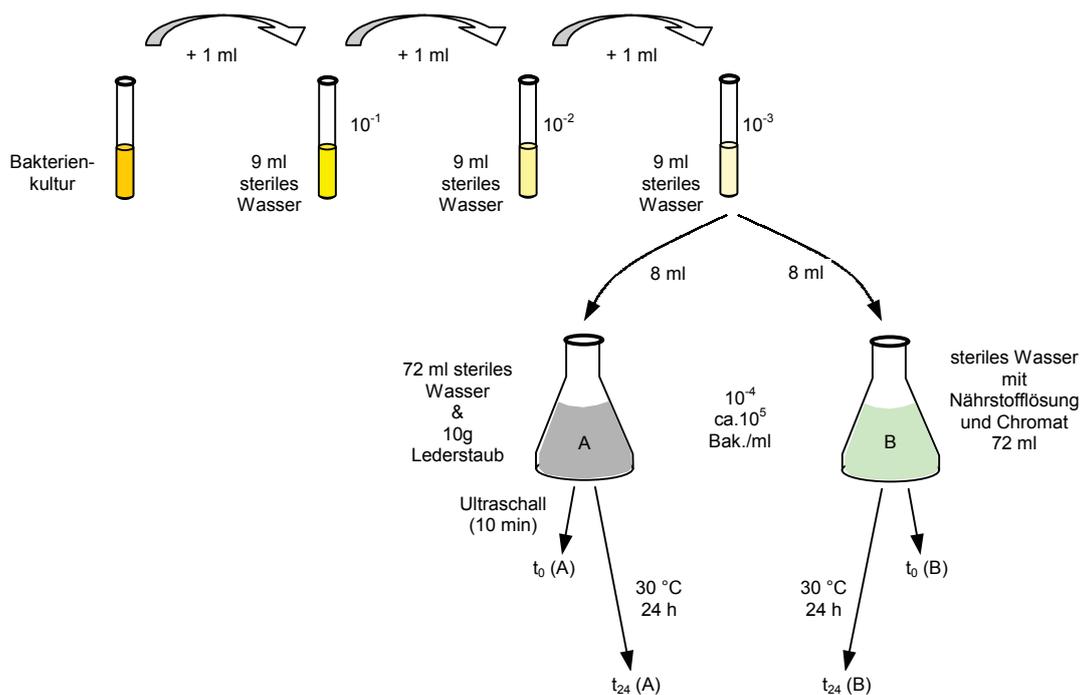


Abbildung C-7 Schema zur Vermehrung der Bakterienkultur in Ledersuspension

Um nun die Ausgangszahl dieser Bakterien zu bestimmen wurde die Auszählmethode zum Zeitpunkt t_0 durchgeführt. Sollten die gewachsenen Bakterienkolonien gezählt werden, muss man die Zahl der Bakterien im Reagenzglas deutlich herunter verdünnen. Vernünftig auszählen kann man etwa bis um 100, also 10^2 Kolonien.

Die Auszählmethode zum Zeitpunkt t_0 lief folgendermaßen ab. Zuerst wurden beide Gläser gut homogenisiert und jenes mit der Ledersuspension in das Ultraschallgerät gestellt, damit die am Leder anhaftenden Bakterien in die Flüssigkeit „gerüttelt“ werden. Nun wurde von jedem Glas eine Menge (0,5 ml) der Flüssigkeit mit Bakterien entnommen und mit sterilem Wasser auf 10^{-2} , sowie 10^{-3} verdünnt.

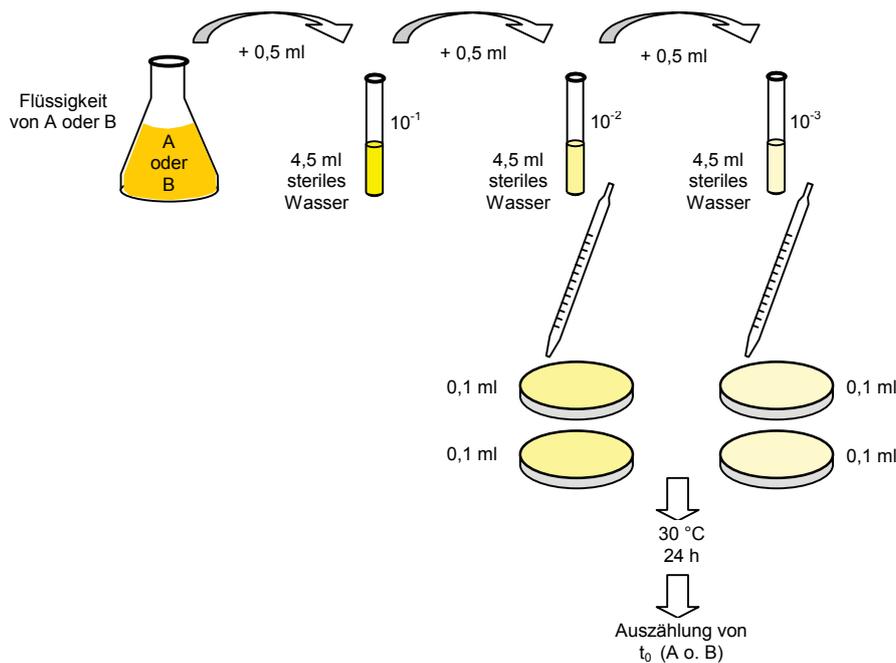


Abbildung C-8 Schema für Auszählmethode zum Zeitpunkt t_0

Mit einem sterilen „Rechen“ wurden davon je 100 µl gleichmäßig auf einen Nährboden verstrichen, wobei zur Kontrolle immer zwei Nährböden verwendet wurden.

Für eine Bakterienkultur erhielt man also zur Auszählung pro Verdünnung 2 Petrischalen (insgesamt also vier), die dann alle in den Wärmeschrank mit 30 °C für 24 Stunden gestellt wurden.

Die verdünnten, gemischten Bakterienstämme (in der Abbildung C-8 als Flüssigkeit von A (Lederstaub) oder B (künstlich chromatisierter Nährstofflösung) gekennzeichnet), werden für das Bakterienwachstum, in den Wärmeschrank mit 30 °C für eine Zeitdauer von 24 Stunden, gestellt.

Um das Bakterienwachstum sehen zu können folgte nach Ablauf dieser Zeit die Auszählmethode zum Zeitpunkt t_{24} . Diese Methode läuft ähnlich der von t_0 ab. Zuerst wurden die Bakterien mit dem Ultraschallgerät aus der Ledersuspension in die Flüssigkeit gerüttelt. Dann wurden beiden Gläsern je eine Flüssigkeitsmenge von 1 ml entnommen. Um die Bakterienkolonien vernünftig zählen zu können, wurde diesmal bis 10^{-4} sowie 10^{-5} verdünnt, da sich die Bakterien mittlerweile vermehrt haben sollten.

Die mit je 100 µl beimpften und gleichmäßig bestrichenen Nährböden (2 Stück pro Verdünnung) wurden zum Wachstum 24 Stunden in den Wärmeschrank, bei 30 °C, gestellt.

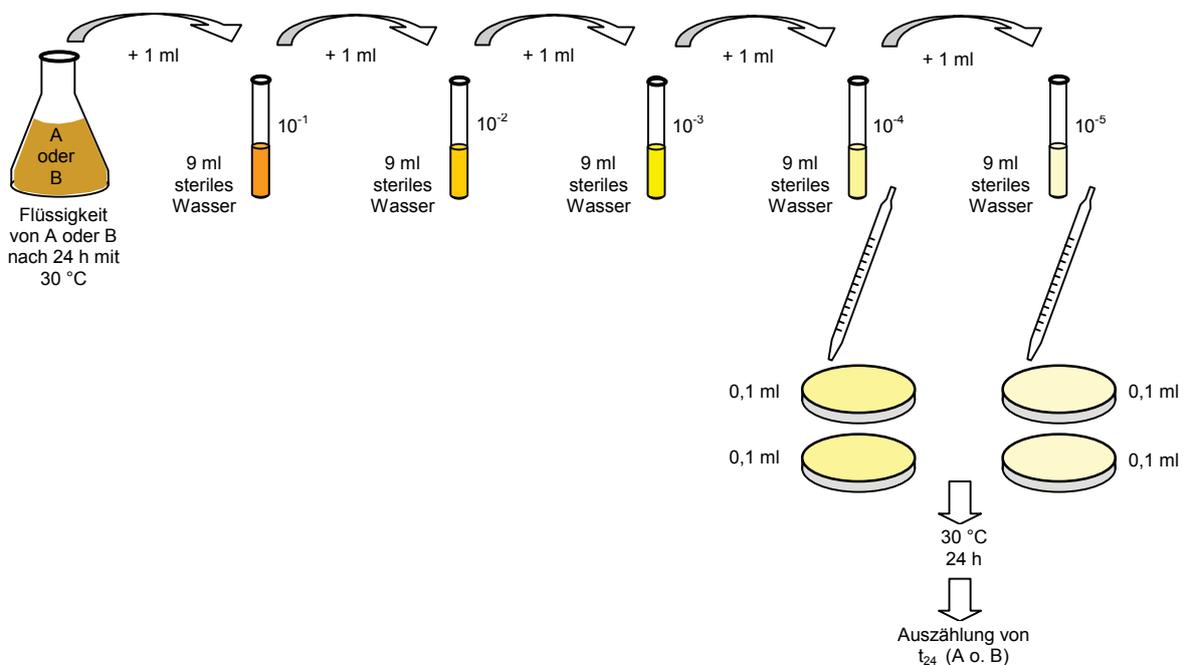


Abbildung C-9 Schema für Auszählmethode zum Zeitpunkt t_{24}

C.2.2.1.6 Elektronenmikroskopische Untersuchungen

Leder kann nur dann abgebaut werden, wenn die Bakterien einen Biofilm auf den Lederteilchen bilden. Um dieses Phänomen kontrollieren zu können, wurden elektromikroskopische Untersuchungen durchgeführt.

Folgende Substrate wurden untersucht:

- ♦ Struktur und Oberfläche von sterilem Lederschleifstaub (vor Beaufschlagung mit Bakterien)
- ♦ Bakterienstamm Nr.° 4, Pseudomonas (Gram-negativ, aerobes Stäbchen) mit Lederschleifstaub
- ♦ Bakterienstamm Nr.°10, Serratia (Gram-negativ, fakultativ anaerobes Stäbchen)
- ♦ Biofilmbildung mit Serratia auf Lederschleifstaub

C.2.2.1.7 Variation des C/N – Verhältnisses des Bakterienstammes Nr. ° 10

Das Ergebnis der vorhergehenden Untersuchungen brachte unter anderem die Entscheidung, dass nun mit dem Bakterienstamm Nr. ° 10, *Serratia*, weitergearbeitet wurde.

Nun lag es daran die optimalen Bedingungen für das Wachstum der Bakterien und somit den Abbau des Leders zu finden.

Es wurde davon ausgegangen zunächst nur einen Parameter (C/N – Verhältnis) zu verändern und die anderen (Temperatur, pH – Wert) gleich zu lassen.

Wird dann das optimale C/N – Verhältnis unter diesen Bedingungen gefunden, so stellt man dieses ein und verändert den nächsten Parameter, bis man an sein Optimum gelangt.

Erkennbar ist das Optimum eines Parameters anhand des Wachstums der Bakterien innerhalb 24 Stunden.

Tabelle C-18 Analyse von sterilem Lederschleifstaub und Sägespäne

Material	Wassergehalt [%]	TOC [%]	N [%]	Cr [%]	C/N [%]
Lederschleifstaub	90	49,8	11,6	2	4,3
Sägespäne	10,0	57,8	0,35	0	165

Die verschiedenen C/N – Verhältnisse wurden dadurch erreicht, indem man Lederschleifstaub mit unterschiedlichen Mengen an Sägespänen (Kohlenstoffquelle) mischte (siehe Tabelle C-18 und C-19).

Tabelle C-19 Mengenverhältnisse für verschiedene C/N - Verhältnisse

C/N [-]	m _{Leder} feucht [g]	m _{Späne} feucht [g]	m _{Leder} trocken [g]	m _{Späne} trocken [g]	V _{H₂O steril} [ml]	Cr [mg/ml]	TOC [mg/ml]	N [mg/ml]
4,3	10,0	0,0	1,0	0,0	80	0,25	6,2	1,5
10	10,0	1,3	1,0	1,2	80	0,25	14,9	1,5
20	10,0	3,9	1,0	3,6	200	0,1	12,9	0,6
30	10,0	6,9	1,0	6,3	200	0,1	20,7	0,7

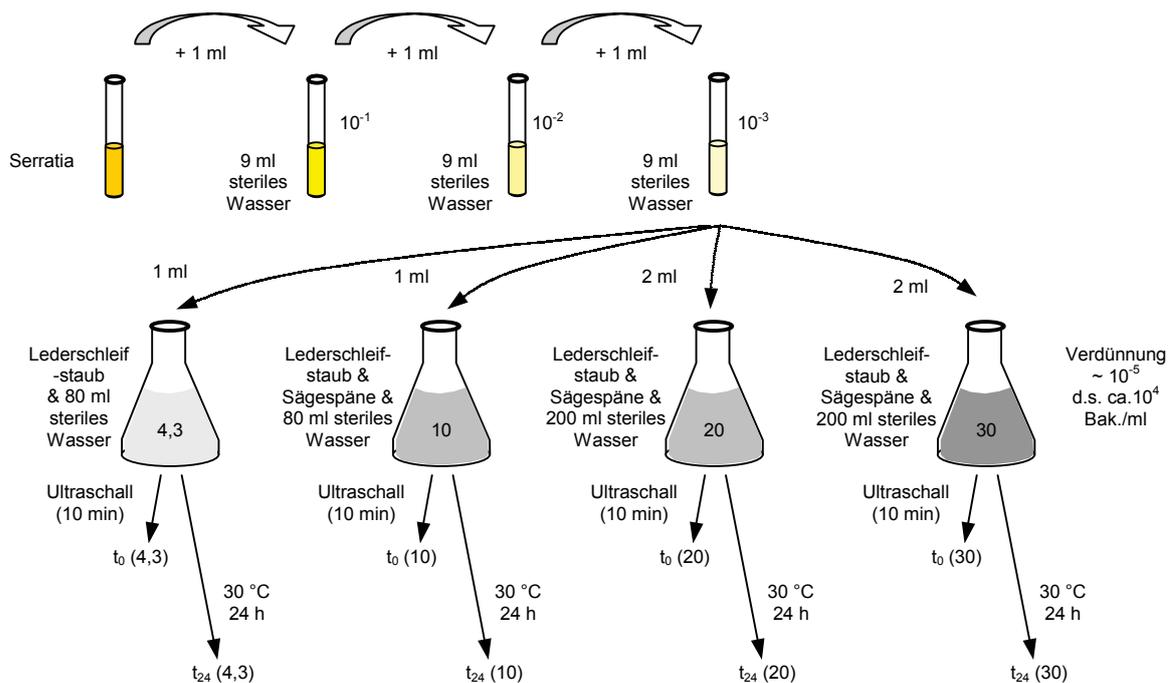


Abbildung C-10 Schema zur Optimierung des C/N – Verhältnisses

Die Petrischalen für die Auszählung zum Zeitpunkt t_0 erhielt man, wie im Schema in Abbildung C-8, dargestellt. Das gleiche galt für den Zeitpunkt t_{24} mit dem Schema in Abbildung C-9.

Selbstverständlich wurde immer unter sterilen Bedingungen gearbeitet, was auch bedeutet, dass die Lederschleifstäube und die Sägespäne für die Verwendung keimfrei sein müssen.

C.2.2.2 Proben der Gerberei STOLZENBACH / Valdivia

C.2.2.2.1 Probennahme

Die in Valdivia ansässige Gerberei wurde durch ein starkes Erdbeben im Jahre 1960 zerstört. Dies war auch der Zeitpunkt, in dem sämtliche Abfälle, Reste und Schutt in der unmittelbaren Umgebung im Erdreich vergraben wurden. Heute findet man an diesen Stellen unter anderem teilweise abgebaute Chromfalzspäne und Lederreste.

Ein jüngerer deponierter Haufen von Chromfalzspänen (ca. 6 Jahre), der der Witterung ausgesetzt ist, diente ebenfalls als Proben - Entnahmequelle. Die dort abgelagerten Lederreste sind noch in Form und Farbe gut erkenntlich und nur wenig zersetzt.

Tabelle C-20 Probenahme bei Gerberei STOLZENBACH / Valdivia

Nr.°	Bezeichnung	Beschreibung und Herkunft
6	MSB-131299-001	ca. 40 jährige, in Erde vergrabene Chromfalzspäne
7	MSB-131299-002	ca. 40 jährige, in Erde vergrabene Chromfalzspäne mit umgebender Erde
8	MSB-131299-003	Chromfalzspäne aus Deponie, ca. 6 Jahre
9	MSB-131299-004	Chromfalzspäne aus Deponie mit umgebender Erde, ca. 6 Jahre

C.2.2.2.2 Kultivierung von Bakterien

Das Schema lief hier gleich ab, wie schon bei der Kultivierung der Bakterien der Gerberei GACEL S.A. / Concepción. Wichtige Voraussetzung ist das Arbeiten mit „sterilen“ Geräten.

Tabelle C-21 Verwendete Nährböden in Petrischalen

Bezeichnung	Verwendung	Beschreibung
AN	Gram-positive und negative Bakterien	Agar Nutritivo
AN + Cr	Gram-positive und negative Bakterien	Agar Nutritivo & 0,5 mMol CrO_4^{2-}
MAC.C, Cr	Pilze, Gram-negative Bakterien	Mac Conkey in Agar-Agar & 0,5 mMol CrO_4^{2-}

C.2.2.2.3 Isolierung von interessanten Bakterien und Vermehrung

Es wurden 24 interessante Bakterienkolonien ausgewählt und in künstlichen Nährmedien vermehrt.

C.2.2.2.4 Prüfung auf Chromresistenz

Die vermehrten Bakterienkolonien wurden mit dem Replikator auf PCA – Nährböden, die verschiedenen Chromkonzentrationen hatten, aufgetragen. Wie schon bei den Proben Nr.° 1 bis 3 wurden ebenfalls zwei Nährböden, ohne Chromat, zur Kontrolle angesetzt. Die verwendeten Chromatkonzentrationen und Massen kann man aus Tabelle C-16 ersehen.

C.2.2.3 Bioreaktor

Der Bioreaktor diente als Behälter, in dem die folgenden Abbauversuche durchgeführt wurden. Dieser Glasbehälter hatte ein Fassungsvermögen von ca. 1 l und war mit diversen Öffnungen versehen. Diese 5 Öffnungen hatten unterschiedlichen Durchmesser und konnten für verschiedene Zwecke (z.B. Einfüllöffnung, Öffnung für Thermometer, Öffnung für Belüftungsschlauch, Ablassöffnung,...) verwendet werden (siehe Abbildung C-11).

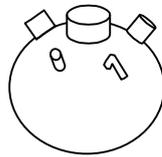


Abbildung C-11 Bioreaktor

Die Überlegung zu den folgenden Versuchen bestand darin, die gesamte Bandbreite der Mikroorganismen, die sich in der gezogenen Probe befinden, für den Lederabbau zur Verfügung zu stellen. Der Unterschied zu den vorherigen Versuchen lag nun darin, dass kein besonderer Bakterienstamm isoliert wurde, der alleinig den Lederabbau übernehmen soll, sondern eine Bakteriengemeinschaft.

Ein Vorversuch über 24 Stunden sollte zeigen, ob es mit dieser Methode zu einem Bakterienwachstum kommt. In den Bioreaktor wurden 5 g trockener Lederschleifstaub eingewogen, dieser mit 500 ml sterilem Wasser und 10 ml Bakterienflüssigkeit mittels Rührknochen vermischt. Die Bakterien in der Bakterienflüssigkeit stammten aus der Probe Nr.° 7, der Gerberei STOLZENBACH / Valdivia. Die Temperatur lag bei 20 °C und der pH – Wert bei 7,0.

Die beiden Bakterienauszählmethoden zum Zeitpunkt t_0 und t_{24} brachten jeweils gewachsene Bakterienkolonien als positives Ergebnis.

Durch diese Tatsache konnten nun die folgenden Versuche (alle mit Mikroorganismen aus Probe Nr.° 7) durchgeführt werden (siehe Tabelle C-22).

Tabelle C-22 Versuche mit dem Bioreaktor

Variation von	Abstufung	unveränderte Parameter	Bemerkungen
C/N - Verhältnis	4,3 / 10 / 20	Temperatur, Zeit	5 und 10 g Leder tr., 20 °C, 7 Tage
Temperatur	20 / 45 / 60 / 70 °C	C/N, Zeit, Menge	5 g Leder tr., 7 Tage, C/N = 4,3
Zeit	7 / 14 Tage	Temperatur, C/N, Menge	5 g Leder tr., 20 °C, C/N = 4,3

Die Menge der eingesetzten Bakterien (je 10 ml) und die Menge des verwendeten sterilen Wassers (je 500 ml) war bei allen Versuchen die gleiche.

C.2.2.3.1 Veränderung des C/N – Verhältnisses

Um die optimalen Nährstoffbedingungen für die Mikroorganismen zu finden, wurde das C/N – Verhältnis in 3 Abstufungen (C/N = 4,3 / 10 / 20) variiert. Das C/N - Verhältnis des verwendeten Lederschleifstaubes beträgt 4,3. Die anderen Verhältnisse wurden durch verschiedene Mischungen mit Sägespäne und Lederschleifstaub hergestellt (siehe Tabelle C-19)

Eine weitere Prüfung zur Optimierung lag im Einsatz von verschiedenen Ledermengen. Der Bioreaktor wurde dabei entweder mit 5 g oder 10 g trockener Lederschleifstäube gefüllt und das C/N – Verhältnis variiert.

Ein Versuch dauerte genau 7 Tage, wobei die Temperatur bei 20 °C lag. Während jedes Versuches wurde der Reaktorinhalt mit einer Membranpumpe belüftet und mit einem Rührknochen in Bewegung gehalten.

C.2.2.3.2 Veränderung der Prozesstemperatur

Bei diesen Versuchen kam die gesamte Bandbreite der von Probe Nr.° 7 gezogenen Mikroorganismen zum Einsatz. Herauszufinden war nun der optimale Temperaturbereich der „lederfressenden“ Mikroorganismen.

Prinzipiell werden drei Wachstumstemperaturzonen der Mikroorganismen unterschieden:

- ♦ psychrophil 20 – 30 °C
- ♦ mesophil 30 – 45 °C
- ♦ thermophil 50 – 70 °C

Pro Versuch wurden die Prozesstemperaturen im Bioreaktor von 20 auf 45, 60 und schließlich auf 70 °C gesteigert.

Die Einsatzmenge der trockenen Lederschleifstäube lag bei 5 g. Das C/N – Verhältnis betrug 4,3. Der Reaktorinhalt wurde während der Versuchszeit belüftet und gerührt.

C.2.2.3.3 Veränderung der Prozesszeit

Durch eine Verlängerung der Prozesszeit sollte den Bakterien die Möglichkeit gegeben werden, sich besser an das umgebende Milieu anzupassen und somit besser Leder abzubauen.

Für diese zwei Versuche wurde die Anzahl der Bakterien zum Zeitpunkt t_0 und zum jeweiligen Endzeitpunkt (t_{7d} , t_{14d}) gezählt.

Eine elektronenmikroskopische Betrachtung der Lederschleifstäube zum jeweiligen Endzeitpunkt sollte Klarheit über die Bildung von Biofilmen bringen.

Der Reaktorinhalt wurde belüftet und mit einem Rührknochen gerührt, wobei die Prozesstemperatur bei 20 °C lag. Es wurden 5 g trockene Lederschleifspäne zum Abbauen zugeführt, somit war das C/N – Verhältnis gleich 4,3. Die Einsatzmenge von sterilem Wasser betrug 500 ml und die der Bakterien 10 ml.

C.2.3 Ergebnisse

C.2.3.1 Proben der Gerberei GACEL S.A. / Concepción

C.2.3.1.1 Kultivierung von Bakterien

Die Auswertung der nach 24 Stunden gewachsenen Bakterienkolonien erfolgte qualitativ (siehe Tabelle C-23).

Interessant bei diesem Ergebnis sind vor allem jene Bakterienkolonien, die am Nährboden mit Chromat gewachsen sind.

Tabelle C-23 Wachstum der Bakterienkolonien auf verschiedenen Nährböden

Nährboden	Probe Nr.° 1	Probe Nr.° 2	Probe Nr.° 3	Probe Nr.° 4	Probe Nr.° 5
MAC.C, Cr	dicht	mittel	wenig	nichts	nichts
MAC.C	dicht	mittel	mittel	wenig	-
PCA	mittel	dicht	dicht	mittel	-
A.SAB	-	-	-	-	dicht

C.2.3.1.2 Prüfung auf Chromresistenz

Aus den ausgewählten 29 Bakterienkolonien wuchsen, ausgenommen 2 Kolonien bei der höchsten Chromatkonzentration (10 mMol/l), alle.

C.2.3.1.3 Auswahl und Charakterisierung der interessanten Bakterienstämme

Die Auswertung der beimpften Nährböden ergab bei fast allen Bakterien eine sehr gute Resistenz gegenüber Chrom (>10 mMol).

Tabelle C-24 Auswahl und Charakterisierung der zwei Bakterienstämme I

Bakterienstamm Nr.°	Charakterisierung	Beschreibung
4	Pseudomonas	Gram-negativ, aerobe Stäbchen
10	Serratia	Gram-negativ, fakultativ anaerobe Stäbchen

C.2.3.1.4 Wachstum und Abbauleistung der Bakterienstämme

Die Überprüfung der Abbauleistung wurde mit den zwei Bakterienstämmen (Pseudomonas – Nr.° 4, Serratia – Nr.° 10) durchgeführt.

Dabei wurde Lederstaub mit sterilem Wasser und je einer Bakterienkultur vermischt. Als Kenngröße diene die Anzahl der Bakterien zu Beginn des Abbaus (t_0) und nach 24 Stunden (t_{24}). Eine Nährlösung mit dem gleichen C/N – Verhältnis von 4,3 diene als Vergleich (siehe Tabelle C-25).

Tabelle C-25 Auswertung der Bakterienanzahl (N) von 2 Stämmen bei t_0 und t_{24}

Bakterienstamm	Nährmedium	N (t_0) [Bakterien]	N (t_{24}) [Bakterien]
Nr.° 4	Ledersuspension (A)	$4,5 \cdot 10^4$	$1,2 \cdot 10^7$
Pseudomonas	Nährlösung mit Chromat (B)	$9,8 \cdot 10^4$	$1,0 \cdot 10^9$
Nr.° 10	Ledersuspension (A)	$8,9 \cdot 10^4$	$9,1 \cdot 10^7$
Serratia	Nährlösung mit Chromat (B)	$1,6 \cdot 10^5$	$1,4 \cdot 10^9$

Es konnte gezeigt werden, dass die verwendeten Bakterienstämme unter gegebenen Bedingungen lebensfähig und duplizierfähig sind.

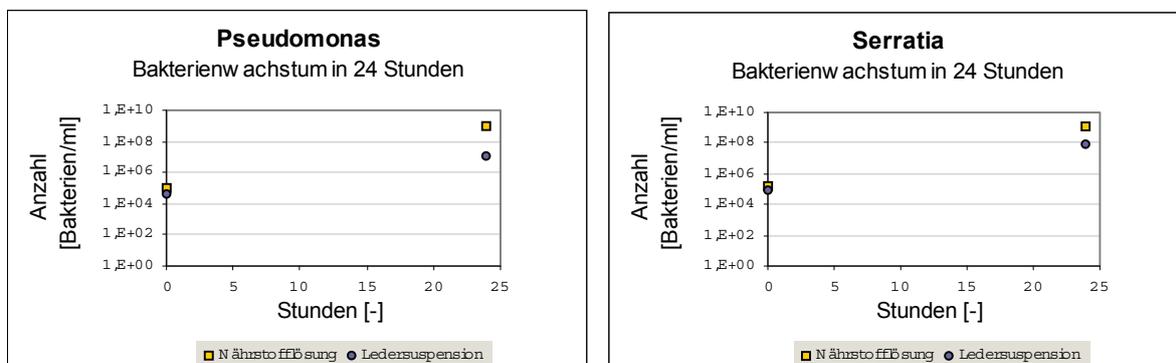


Diagramm C-41 Bakterienwachstum von Pseudomonas und Serratia in Nährmedien

Zu beachten in Diagramm C-41 ist das etwas geringere Wachstum der Bakterienstämme *Pseudomonas* sowie *Serratia* im Nährmedium der Ledersuspension (A), als in den optimalen Bedingungen von der Nährstofflösung (B). Das Wachstum ist aber ausreichend und lässt darauf schließen, dass die Bakterien das vorhandene Leder als Nahrungsquelle nutzen können und es dadurch auch abbauen.

Gleichzeitig mit der Bestimmung des Bakterienwachstums wurden Proben des Lederschleifstaubes zum Zeitpunkt t_0 (Zustand wie in Gerberei) und t_{24} (den Bakterienstämmen ausgesetzt) gezogen und analysiert.

Tabelle C-26 chemische Analysen des Lederschleifstaubes zum Zeitpunkt t_0 und t_{24}

Entnahmezeitpunkt	vorhandener Bakterienstamm	Proben-Nr.° [-]	TC [%]	TOC [%]	N [%]	C/N [-]	Cr [%]	DCr [%]
t_0	-	0	91,0	52,8	5,91	8,55	1,12	0,0
t_{24}	<i>Pseudomonas</i>	4	88,2	51,2	7,47	6,56	0,99	- 6,0
	<i>Serratia</i>	10	83,1	48,2	10,21	4,52	2,16	92,9

Der aus der Analyse erhaltene totale Kohlenstoffgehalt wurde mit der empirischen Gleichung aus dem Glühverlust (GV)

$$TOC[\%] = GV[\%] \cdot 0,58$$

umgerechnet.

In Probe Nr.° 4 hat der Kohlenstoffgehalt gegenüber Nr.° 0 leicht abgenommen. Dies bedeutet, dass Bakterien C zum Aufbau von Zellmaterial benutzt und einen Teil als CO_2 abgegeben haben.

Der Kohlenstoffgehalt in Probe Nr.° 10 hingegen hat stärker abgenommen. Die Bakterien haben den Kohlenstoff in Form von CO_2 abgegeben.

Der Stickstoffgehalt von Probe Nr.° 4 ist ebenso wie der von Nr.° 10 gegenüber Nr.° 0 gestiegen, was zu erwarten war.

DCr bedeutet die prozentuelle Schwankung des totalen Chromgehaltes (Cr) um den Ausgangswert bei t_0 . Demnach nimmt die Chromkonzentration in der Probe mit dem Bakterienstamm „*Serratia*“ um fast 100 % zu, was etwas zu hoch zu sein scheint. Unlogisch hingegen erscheint die Abnahme des totalen Chromgehaltes um 6 % bei Probe Nr.° 4.

Aus den Wachstumsversuchen und diesen Analysen geht klar hervor, dass mit dem Bakterienstamm „*Serratia*“ weitergearbeitet wird.

C.2.3.1.5 Elektronenmikroskopische Untersuchungen

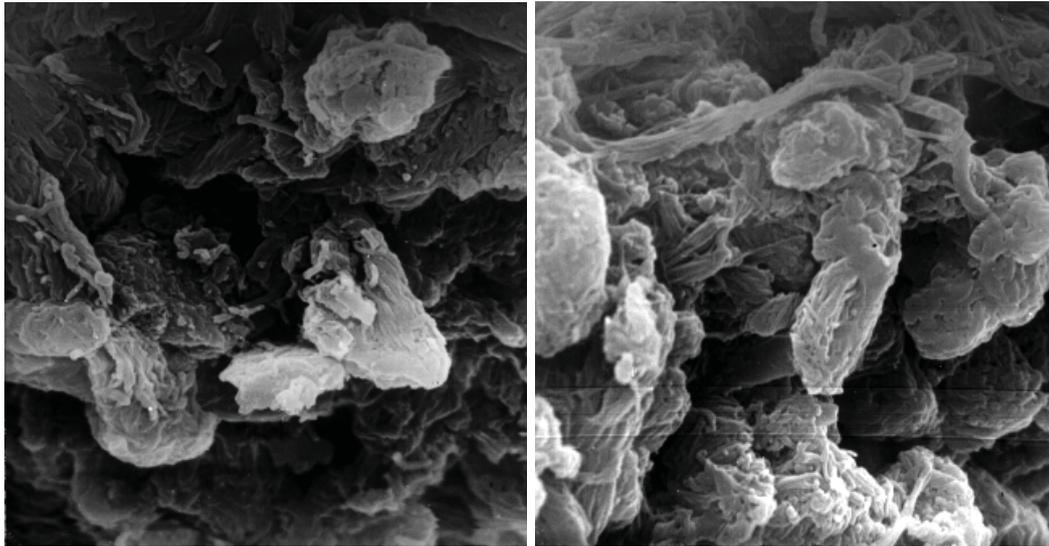


Foto C-8 Lederschleifstaub steril (Vergrößerung: 4000)

Foto C-8 zeigt sowohl auf der linken Seite, als auch auf der rechten Seite das mikroskopische Bild von sterilem Lederschleifstaub

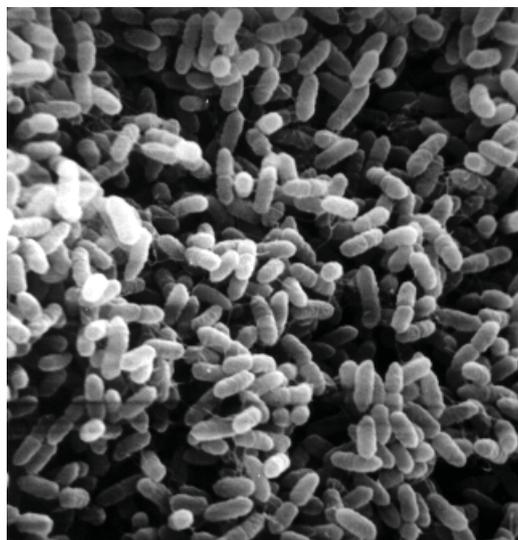


Foto C-9 Serratia, Bakterienstamm Nr.° 10 (Vergrößerung: 4000)

Auf diesem Foto C-9 können die einzelnen Bakterien der Serratia ganz deutlich erkannt werden. Es handelt sich dabei um Gram-negative, fakultativ anaerobe Stäbchen.

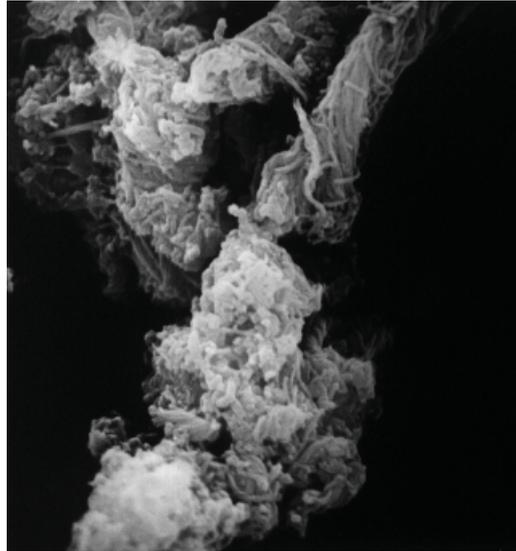


Foto C-10 **Pseudomonas, Nr.° 4 und Lederschleifstaub (Vergrößerung: 4000)**

Beim Foto C-10 sind die Bakterien nicht zu erkennen. Andeutungsweise ist die Ausbildung eines Biofilms erkennbar.

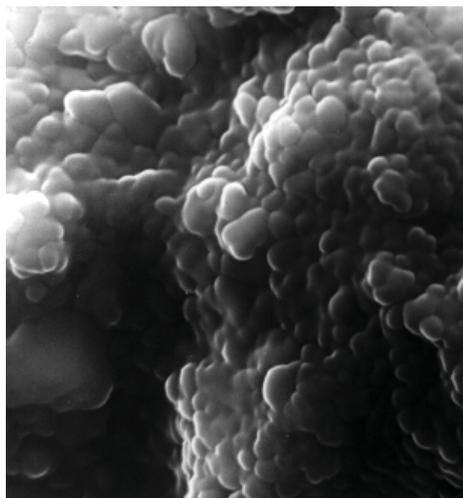


Foto C-11 **Biofilm von Serratia, Nr.° 10, auf Lederschleifstaub (Vergrößerung: 4000)**

Am Foto C-11 kann man keine einzelnen Bakterien mehr erkennen. Diese sind eingebunden in den Biofilm und deren Matrix (EPS = extrazelluläre polymere Substanzen) und sitzen auf der Lederoberfläche. Dadurch können sie das Leder als Nährstoffquelle nutzen und es sogleich abbauen.

C.2.3.1.6 Variation des C/N – Verhältnisses des Bakterienstammes Nr.° 10

Die Wachstumsversuche, die Analysen und die elektromikroskopischen Versuche zeigten deutlich, dass sich der Bakterienstamm „Serratia“ besser als der Bakterienstamm „Pseudomonas“ an die Umgebungssituation anpassen konnte. Deshalb wurden die Variationen des C/N – Verhältnisses mit diesem Bakterienstamm durchgeführt.

Für die Optimierung des C/N – Verhältnisses wurde die Temperatur auf 30 °C eingestellt und der pH – Wert lag bei 7, im neutralen Bereich.

Tabelle C-27 **Bakterienanzahl von Serratia bei t₀ und t₂₄ mit unterschiedlichem C/N**

C/N - Verhältnis	N (t ₀) [Bakterien]	N (t ₂₄) [Bakterien]
4,3	1,3 * 10 ⁵	0
10	7,0 * 10 ³	0
20	6,5 * 10 ⁵	0
30	2,6 * 10 ⁴	0

Aus Tabelle C-27 kann man erkennen, dass sich die Bakterien nach 24 Stunden nicht weitervermehrt haben, sondern abgestorben sind.

Vermutlich ist es bei irgend einem Schritt zu einem Fehler gekommen, der dieses unlogische Ergebnis verursachte.

C.2.3.2 Proben der Gerberei STOLZENBACH / Valdivia

C.2.3.2.1 Kultivierung von Bakterien

Die verschiedenen Nährböden (siehe Tabelle C-21) wurden mit 0,1 ml der Probenflüssigkeit beimpft.

Nach 24 Stunden zeigte sich als Ergebnis, dass auf jedem Nährboden Bakterienkolonien gewachsen sind. Interessant für den vorliegenden Anwendungsfall sind die auf den chromathältigen Nährböden gewachsenen Bakterienkolonien. Eine Auswertung auf einem chromhaltigen Nährboden MAC.C, Cr kann man in Tabelle C-28 ersehen.

Tabelle C-28 **Wachstum von Bakterienkolonien auf MAC.C, Cr**

C/N - Verhältnis	N (t ₂₄) [Bakterien]
6	800
7	1600
8	133
9	85

C.2.3.2.2 Prüfung auf Chromresistenz

Das Ergebnis brachte eine Resistenz der isolierten Bakterienkolonien gegenüber Chromat bis 2,5 mMol.

Damit sind diese Bakterienkolonien (aus den Proben Nr.° 6 bis 9) gegenüber den aus den Proben Nr.° 1 bis 3, weniger resistent gegenüber Chrom.

Interessant für den Lederabbau ist jedoch nicht nur die Chromresistenz, sondern auch die Fähigkeit einen Biofilm zu bilden, um somit Leder abzubauen.

C.2.3.2.3 Auswahl und Charakterisierung der interessanten Bakterienstämme

Aus den Ergebnissen der Chromatresistenzprüfung wurden nun zwei Bakterienstämme ausgesucht, mit denen weitergearbeitet werden sollte. Die ausgewählten Vertreter sind in Tabelle C-29 beschrieben.

Tabelle C-29 Auswahl und Charakterisierung der zwei Bakterienstämme II

Bakterienstamm Nr.°	Charakterisierung	Beschreibung
12	Serratia	Gram-negativ (rot), fakultativ anaerobe Stäbchen
13A	Pseudomonas	Gram-negativ (gelblich), fakultativ aerobe Stäbchen

C.2.3.3 Bioreaktor

Zur Auswertung sei gesagt, dass die Lederschleifstäube trocken eingewogen wurden. Nach Ablauf der Behandlungszeit wurde der verbleibende Lederrest von der Flüssigkeit mit einem Vakuumfilter abgetrennt und bei 105 °C getrocknet.

Der prozentuelle Massenabbau wurde erhalten, indem man die Differenz beider trockenen Massen zur eingesetzten trockenen Ledermasse ins Verhältnis setzt.

$$Massenabbau = \frac{Einwaage(tr) - Auswaage(tr)}{Einwaage(tr)} \cdot 100\%$$

C.2.3.3.1 Veränderung des C/N – Verhältnisses

Die Ergebnisse dieser Versuchsserie sind in Tabelle C-30 festgehalten. Die Abbauleistung ist am besten beim geringsten C/N – Verhältnis (4,3) und sinkt mit steigendem Verhältnis. Der Lederabbau, als prozentueller Massenverlust, ist weitgehend unabhängig von der eingesetzten Lederschleifstaubmenge.

Tabelle C-30 Abbauleistung mit verschiedenen C/N – Verhältnissen im Bioreaktor

C/N - Verhältnis [-]	Massenabbau		Randbedingungen
	5 g Leder [m%]	10 g Leder [m%]	
4,3	18	19	$V_B = 10 \text{ ml}$
10	12	6	$V_{H_2O} = 500 \text{ ml}$
20	5	10	$T = 20 \text{ °C}$
			$t = 7 \text{ Tage}$

Die Tendenz, mit steigendem C/N – Verhältnis sinkt der Lederabbau, kann in Diagramm C-41 verfolgt werden.

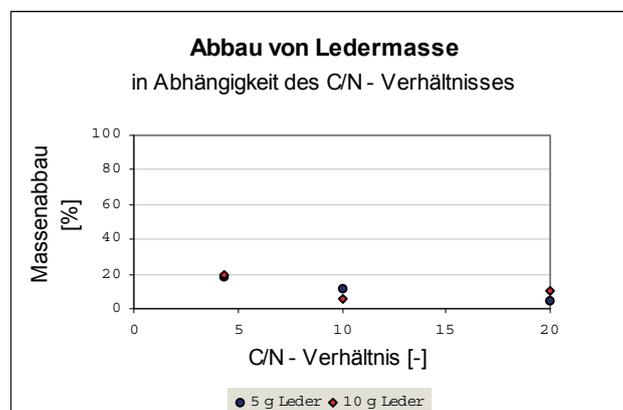


Diagramm C-42 Lederabbau im Bioreaktor mit verschiedenen C/N – Verhältnissen

In Diagramm C-41 ist ebenso der weitgehend von der Ledereinsatzmenge unabhängige Massenabbau ersichtlich. Die leichten Schwankungen können auch durch Messungenauigkeiten hervorgerufen worden sein.

Prinzipiell ist jedoch zu sagen, dass ein etwa 20 %-tiger Massenabbau von Lederschleifstäuben innerhalb 7 Tage etwas gering erscheint.

C.2.3.3.2 Veränderung der Prozesstemperatur

Mit den gewonnenen Erfahrungen der obigen Versuchsreihe, wurde das optimale C/N – Verhältnis von 4,3 (nur Leder – keine Sägespäne) eingestellt. Die eingesetzte Ledermenge wurde auf 5 g trocken belassen.

Tabelle C-31 Abbauleistung mit verschiedenen Temperaturen im Bioreaktor

T [°C]	Massenabbau [m%]	Randbedingungen
20	18	C/N = 4,3
45	16	$m_C = 5 \text{ g}$
60	17	$V_B = 10 \text{ ml}$
70	16	$V_{H_2O} = 500 \text{ ml}$

In Tabelle C-31, sowie in Diagramm C-42 kann man den prozentuellen Massenabbau von Leder bei verschiedenen Temperaturen nachlesen.

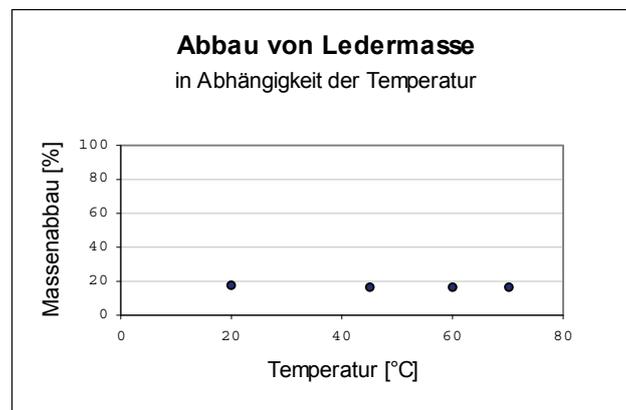


Diagramm C-43 Lederabbau im Bioreaktor mit verschiedenen Temperaturen

Das Ergebnis bringt eine Unabhängigkeit der Abbauleistung von der Temperatur.

Eine Interpretationsmöglichkeit ist das Wirken des breiten Spektrums an Bakterien der eingepflichten Lösung. Somit können sich in jedem Temperaturbereich entweder psychrophile, mesophile oder thermophile Bakterien bilden und jeweils die Abbauleistung übernehmen.

Eine andere Erklärung kann sein, dass in keinem Temperaturbereich ein bakterieller Abbau stattfindet, sondern die Messungenauigkeiten bei ca. 20 % Masseverlust liegen.

C.2.3.3.3 Veränderung der Prozesszeit

Bei dieser Versuchsreihe wurden die Mikroorganismen von Probe Nr.° 7 neu kultiviert, sodass ihre Konzentration $5,5 \cdot 10^8$ Bakterien/ml betrug. Die eingesetzten 10 ml dieser

Bakterienflüssigkeit in den Bioreaktor und das Verdünnen mit 500 ml sterilem Wasser brachte dann das Ergebnis, das in Tabelle C-32 zu sehen ist.

Tabelle C-32 **Abbauleistung nach 7 und 14 Tage im Bioreaktor**

Zeit [Tage]	Massenabbau [m%]	N (t_0) [Bakterien]	N (t_{7d}, t_{14d}) [Bakterien]	Randbedingungen
7	16	$1,4 \cdot 10^4$	$9,0 \cdot 10^5$	C/N = 4,3 $m_C = 5 \text{ g}$
14	23	$1,1 \cdot 10^5$	$1,2 \cdot 10^6$	$V_B = 10 \text{ ml}$ $V_{H_2O} = 500 \text{ ml}$

Aus der Anzahl der Bakterienkolonien nach 7 bzw. 14 Tage (siehe Tabelle C-32) geht eindeutig hervor, dass es zu keinem signifikanten Wachstum der Bakterien gekommen ist. Die geringe Vermehrung der Bakterien um eine Zehnerpotenz, dürfte auch der Grund für die geringe Abbauleistung sein.

C.2.3.3.4 *Elektronenmikroskopische Betrachtungen*

Als wichtigstes Ergebnis ist zu sehen, dass es zu keiner Biofilmbildung kam. Anstatt dessen gruppierten sich die Bakterien und hafteten an Teilen der Lederoberfläche. Die Anzahl der Bakterien war gering.

C.2.4 **Diskussion**

C.2.4.1 Rückschlüsse auf die Ergebnisse

- ♦ Durch das Auftreten von Chrom (in den Abfallströmen einer Gerberei) können sich chromresistente Bakterien ausbilden und wachsen. Bakterien werden als chromresistent angesehen, wenn sie bei einer Chromatmenge von 0,5 mMol wachsen können.
- ♦ Die isolierten Bakterienstämme der Gerberei GACEL S.A. / Concepción weisen eine sehr hohe Chromresistenz (> 10 mMol) auf.
- ♦ Die Bakterienstämme, die noch bei über 10 mMol Chromat gewachsen sind, wurden als „Pseudomonas“ und „Serratia“ (beides Gram-negativ) identifiziert und zur Weiterarbeit ausgewählt.
- ♦ Diese beiden Bakterienstämme konnten Leder als Nahrungsquelle nützen und sich dabei vermehren.
- ♦ In den elektronenmikroskopischen Untersuchungen konnte nachgewiesen werden, dass die beiden isolierten Bakterienstämme Biofilme auf Leder bilden können.
- ♦ Resultierend aus den beiden letzten Punkten sollten diese Bakterienstämme in der Lage sein, feste chromhaltige Lederabfälle biologisch abzubauen. Dazu sind allerdings noch weitere Experimente notwendig.
- ♦ Mit dem Bioreaktor wurde die aus den Proben der Gerberei STOLZENBACH / Valdivia gezogene Bakteriengemeinschaft getestet. Diese zeigte sich als weniger chromresistent, konnte jedoch ebenfalls Leder als Nahrungsquelle nutzen. Die Auszählung nach Versuchsende ergab eine Zunahme der Bakterienanzahl um eine Zehnerpotenz. Die elektronenmikroskopischen Untersuchungen zeigten keine Bildung von Biofilmen am Leder, jedoch eine Bindung von angehäuften Bakterien an das Leder.

- ♦ Für die Untersuchungen der optimalen Bedingungen für diese Bakteriengemeinschaften sind weitere Experimente notwendig.

Die Bakterienstämme Nr.° 4 (*Pseudomonas*) und Nr.° 10 (*Serratia*) erwiesen sich als sehr chromresistent. Ebenfalls konnte ein Abbau des Leder festgestellt werden.

Eine Versuchsreihe bei der das C/N – Verhältnis variiert wurde, brachte jedoch bei der Auszählung nach 24 Stunden (t_{24}) das Ergebnis, dass keine einzige Bakterienkolonie gewachsen ist. Dies widerspricht den vorherigen Analyse- und Versuchsergebnissen, die alle ein positives Ergebnis vorweisen konnten. Es muss deshalb angenommen werden, dass beim Versuch der Variation des C/N – Verhältnisses ein Fehler aufgetreten ist.

Es sollten daher erneute Versuche mit den beiden chromresistenten Bakterienstämme durchgeführt werden.

Die weniger chromresistente Bakteriengemeinschaft, aus den Proben der Gerberei in Valdivia, ergab im Bioreaktor nur sehr bescheiden Abbauleistungen. Ziel der Bakterien soll es sein, Biofilm auf Trägeroberflächen bilden zu können. Diese Fähigkeit sollte durch weitere Optimierungsmaßnahmen untersucht werden.

Findet man die optimalen Bedingungen für das Wachstum der Bakterien in der Lederatmosphäre, so könnte der Prozess in der Praxis angewandt werden.

Für einen industriellen Einsatz drängen sich noch einige Fragen auf:

- ♦ in welcher minimalen Zeit liegt ein stark abgebauter und volumsreduzierter Abfall vor
- ♦ wie hoch belaufen sind die anfallenden Kosten dieser Behandlungsmethode
- ♦ ist das Verfahren für einen mittelständischen Gerbereibetrieb finanziell und arbeitstechnisch durchführbar
- ♦ ist die verbleibende Masse für einen weiteren Einsatz qualitativ ausreichend
- ♦ kann der Reststoff deponiert werden – muss er behandelt werden
- ♦ etc., ...

C.2.5 Ausblick

Die Tendenz, mittels aerober Bakterien Leder abbauen zu können, ist vorhanden und soll durch weitere Versuche verbessert werden.

Es sollen also die optimalen Rahmenbedingungen und die richtigen Bakterien für einen industriellen Prozess gefunden werden.

Geringe Kosten, hohe Lederabbaueffizienz, kurze Behandlungszeit, geringer arbeitstechnischer Aufwand, gute Verwertbarkeit der Reststoffe und frei von Umweltauswirkungen sollten die Rahmenbedingungen dieses Prozesses sein.

D Literaturverzeichnis

- [1] K. Fricke, T. Turk, H. Vogtmann, „Grundlagen der Kompostierung“, EF-Verlag für Energie- und Umwelttechnik GmbH, 1990, ISBN 3-924511-45-4
- [2] A. Oberholz, „Kompost“, Friedhelm Merz VerlagKG, ISBN 3-926108-35-5
- [3] J. Mörth, „Simulationsmodelle für die Kompostierung in einer Miete und in einer Rottebox“, Diplomarbeit an TU Graz, 1995
- [4] J. Emberger, „Kompostierung und Vergärung“, Vogel Buchverlag, 1993, ISBN 3-8023-1444-1
- [5] J. Heerenklage, K.U. Heyer, K. Leikam, R. Stegmann, „Restmüllbehandlung Mechanisch-biologische Vorbehandlung“ Economica Verlag GmbH, 1994, ISBN 3-87081-304-0
- [6] K.J. Thomé-Kozmiesky, „Kompostierung von Abfällen 1“, EF-Verlag für Energie- und Umwelttechnik GmbH, 1985, ISBN 3-924511-07-1
- [7] K.J. Thomé-Kozmiesky, „Kompostierung von Abfällen 2“, EF-Verlag für Energie- und Umwelttechnik GmbH, 1985, ISBN 3-924511-07-1
- [8] J.C.G. Ottow, W. Bidlingmaier, „Umweltbiotechnologie“, G. Fischer, 1997, ISBN 3-437-25230-5
- [9] K. Wiemer, M. Kern, „Bioabfallkompostierung – flächendeckende Einführung“, M.C.I. Baezy Verlag, 1991, ISBN 3-88122-633-8
- [10] U. Krogmann, „Kompostierung: Grundlagen zur Einsammlung und Behandlung von Bioabfällen unterschiedlicher Zusammensetzung“ Economica Verlag GmbH, 1994, ISBN 3-87081-004-1
- [11] Gütegemeinschaft Kompost Region Südwest e.V., „Kompost mit Gütezeichen für Ihren Wein- und Obstbau“, Februar 1992
- [12] Gütegemeinschaft Kompost e.V., „Kompost mit Gütezeichen für Ihren Gartenbaubetrieb“, Februar 1994
- [13] Arbeitskreis für die Nutzbarmachung von Siedlungsabfällen e.V., „Heft 25“, E.Kurz & Co. Druckerei, 1993, ISBN 3-924618-24-0
- [14] F. Amlinger, „Handbuch der Kompostierung“, Druck- und Verlagshaus Styria, 1993, ISBN 3-85224-86-7
- [15] „Cornell Composting – Science & Engineering“, <http://www.cfe.cornell.edu/compost>
- [16] G. Behling, „Die Eigenkompostierung - eine Betrachtung unter hygienischen Aspekten“, http://www.bayern.de/STMLU/umwberat/komp_hyg.htm
- [17] Bundesministerium für Umwelt (Gerling Consult, H. Andres), „Branchenkonzept für die Ledererzeugenden Betriebe Österreichs“, Druck: Riegelnik, 1995, ISBN 3-9012271-04-X

-
- [18] R. Schubert, K. Faber, H. Spahrkäs, K. Eitel, F. Schade, H. Träubel, G. Harmening, C. Freudenberg, „Ullmanns Encyklopädie der technischen Chemie - Leder“, Verlag Chemie Weinheim New York, Band 16
- [19] Umweltbundesamt, „Zum Stand der Technik der Ledererzeugung in Österreich“, Juni 1996, ISBN 3-85457-289-0
- [20] G. Braunegg, „Mikrobiologie“, ÖH – Leoben, 1995
- [21] M.A. Mondaca Jara, „Estudio del mecanismo de resistencia a cromo en bacterias gram-negativas y su potencial utilización en sistemas de efluentes“, Doktorarbeit an der Universidad de Concepción / Chile, 1997
- [22] <http://www.infektionen.com>
- [23] „Arbeitstechniken mit Bakterien“,
<http://www.eduvinet.de/mallig/bio/Repetito/Bbgenet.html>
- [24] . D.H. Nies, „sdfa“, <http://www.biologie.uni-halle.de/Microbiology/nies/Paper/JIM.html>
- [25] „Biofilm“, http://www.theochem.uni-duisburg.de/AMB/fg_film.html



E Anhang

E.1 C/N – Verhältnisse von Kompostmaterialien

Stickstoffarm (grobstrukturiert, trocken)	C/N - Verhältnis	Stickstoffreich (strukturarm, feucht)	C/N - Verhältnis
alte, verholzte Gartenabfälle	100 : 1	frische, junge Gartenabfälle	10 – 20 : 1
Nadelstreu	30 – 100 : 1	Rasenschnitt	12 : 1
Weizenstroh	60 – 125 : 1	Küchenabfälle	15 – 23 : 1
Sägespäne oder -mehl	100 – 500 : 1	Obstreste	35 : 1
Rinde	100 – 300 : 1	Marktabfälle	34 – 80 : 1
Gehölzschnitt	100 – 150 : 1	Mist	15 – 25 : 1
Papier / Karton	200 – 500 : 1	Kaffeersatz	20 : 1
Zeitungspapier	560 : 1	Laub	30 – 70 : 1

E.2 Analyseergebnisse verwendeter Materialien

Materialien	pH [-]	H ₂ O [%]	GV [%] tr.	TOC [%] tr.	N _{tot} [%] tr.	C/N [-]	Öl, Fett [%] tr.	Calcium [%] tr.	Sulfid [mg/kg] tr.
Sägespäne	-	7,8	99,6	55,3	0,4	158,1	-	-	-
Rinde	-	44,7	96,2	53,4	0,3	178,1	-	-	-
Holzchips	-	63,5	74,2	41,2	1,3	32,7	-	-	-
fleshing I	-	81,4	87,9	48,8	1,8	26,5	-	-	-
fleshing II	13,0	76,0	93,0	51,7	5,0	10,3	9,8	2,4	132,0
fleshing III	-	64,2	71,9	39,9	3,1	12,9	-	-	-
fleshing thermisch*	11,5	39,6	92,7	51,5	-	-	-	-	-
Chromfalzspäne	-	56,8	85,8	47,7	11,6	4,1	-	-	-
vegetabile Falzspäne	-	53,7	86,2	47,9	6,7	7,1	-	-	-

Anmerkungen:

Es wurden drei unabhängige Proben von fleshing gezogen und analysiert (fleshing I, fleshing II, fleshing III)

fleshing thermisch* mit Heißdampf behandelte fleshing, deren Fettanteile abgespalten wurden; relativ trockenes, fettfreies und krümeliges Material

pH pH – Wert

H₂O Wassergehalt (bezogen auf Trockenmasse)

GV Glühverlust (bezogen auf Trockenmasse)

TOC gesamter organischer Kohlenstoffgehalt (bezogen auf Trockenmasse)

N_{tot} totaler Stickstoffgehalt (bezogen auf Trockenmasse)

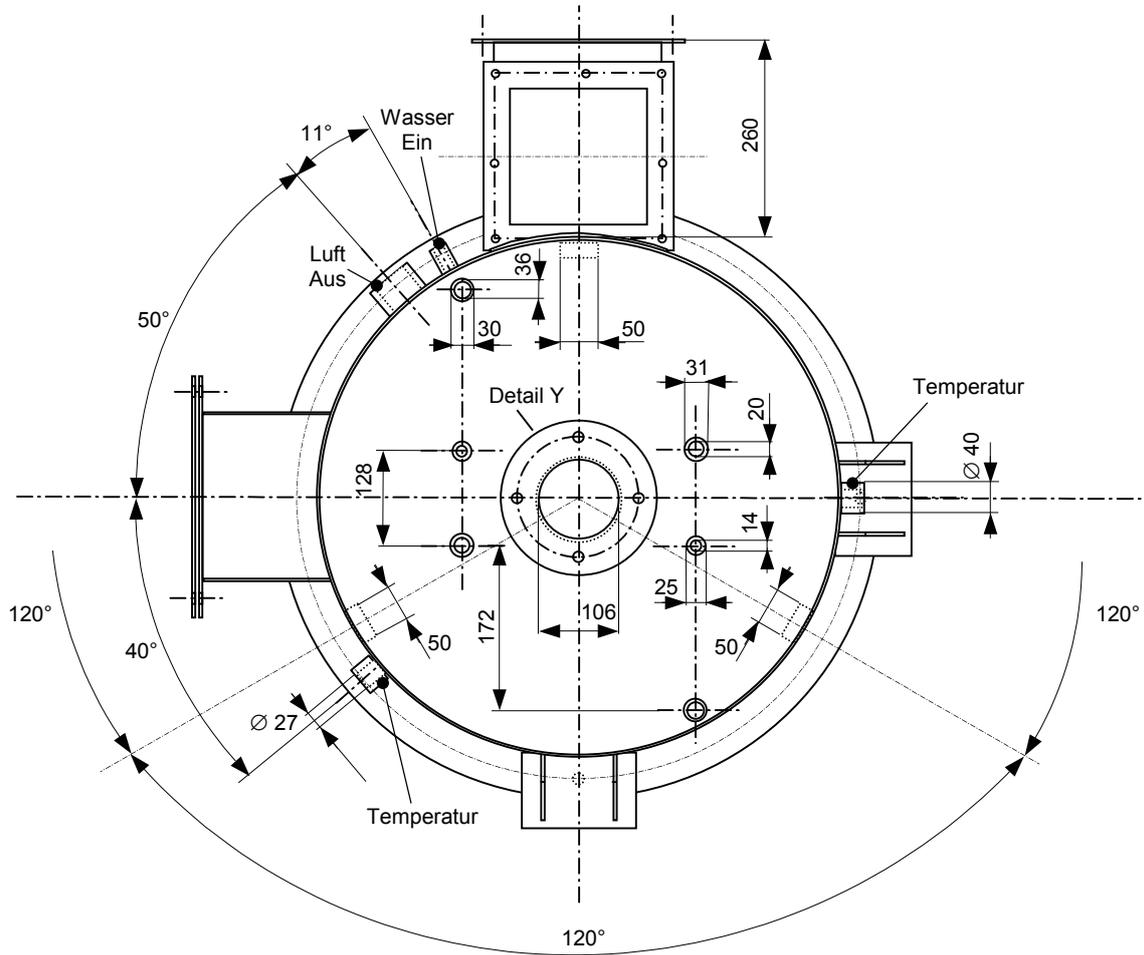
C/N C/N-Verhältnis (gerechnet aus Verhältnis TOC/N_{tot})

Öl, Fett Öl bzw. Fettgehalt (bezogen auf Trockenmasse)

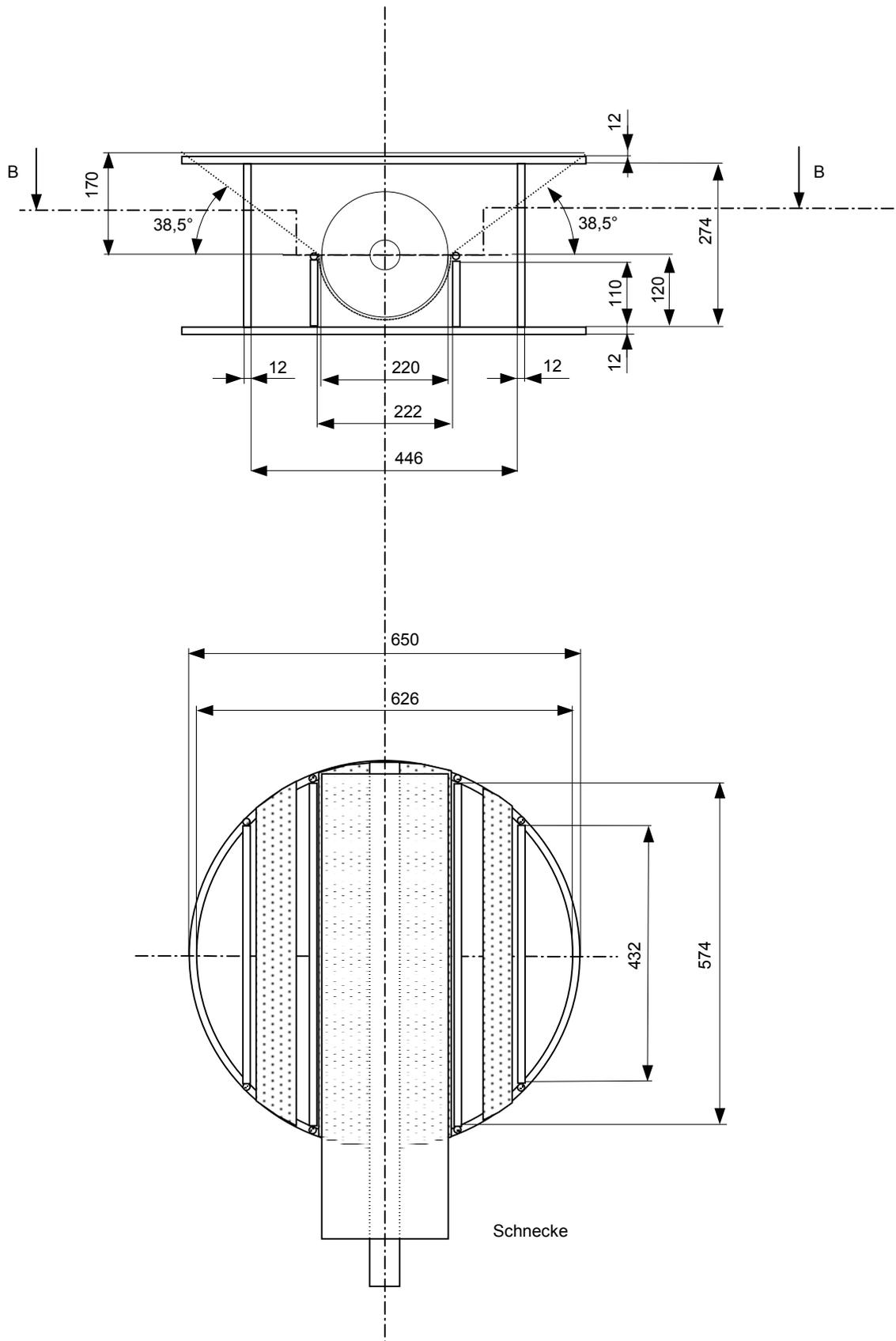
Calcium Gehalt an Calcium (bezogen auf Trockenmasse)

Sulfid Gehalt an Sulfid (bezogen auf Trockenmasse)

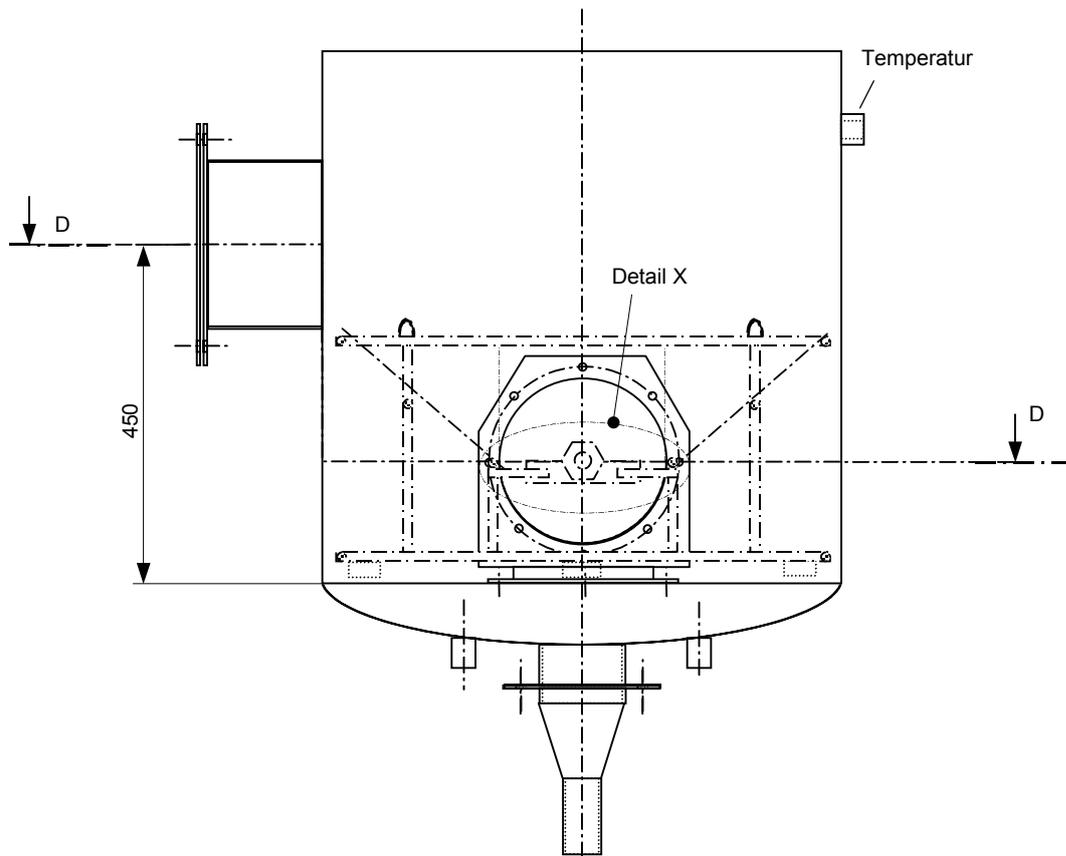
Schnitt A-A:



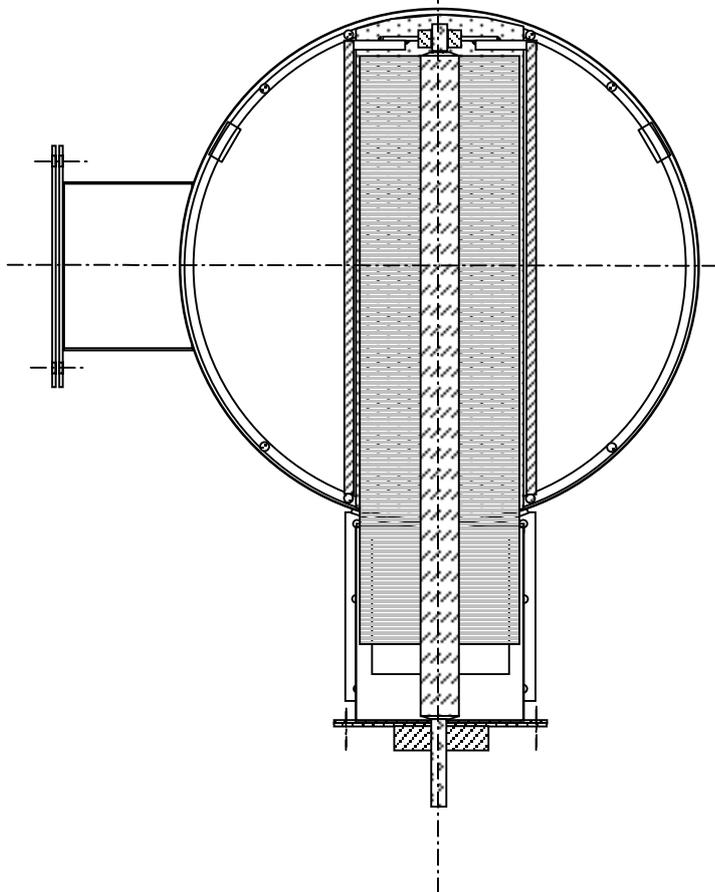
Reaktoreinsatz:



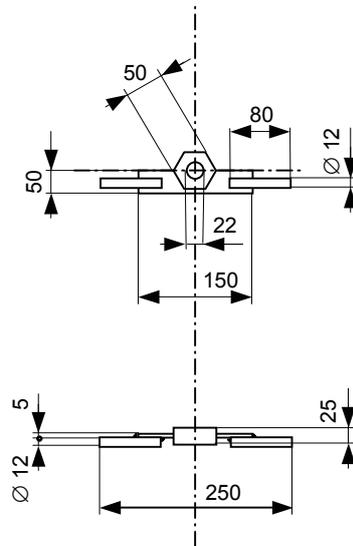
Reaktoreinsatz in br03



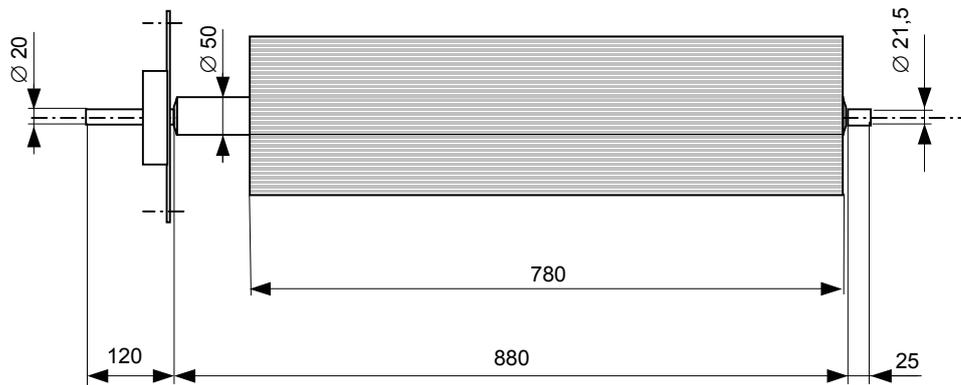
Schnitt D-D:



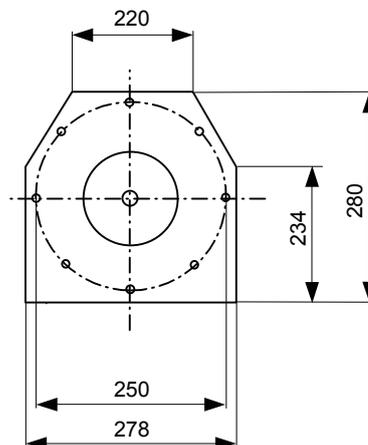
Detail X: Schneckenführung



Detail: Schnecke – Aufriss



Detail: Schnecke – Kreuzriss



E.4 Fotos

Bioreaktor br02



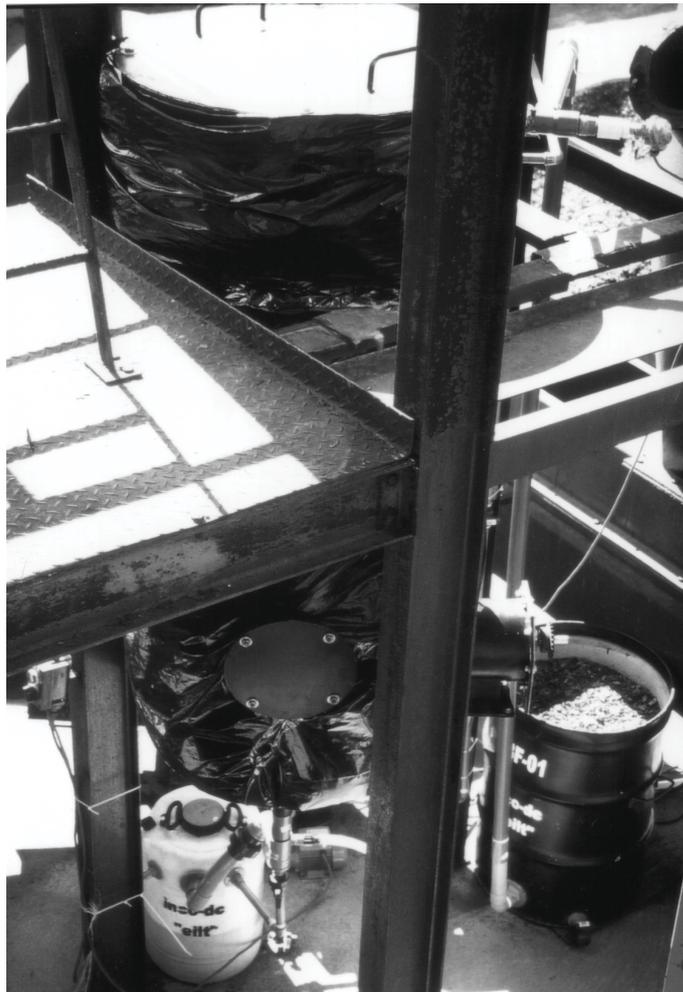
Bioreaktor br03



Einbau von br03



Anlage mit br03, wb01 und bf01



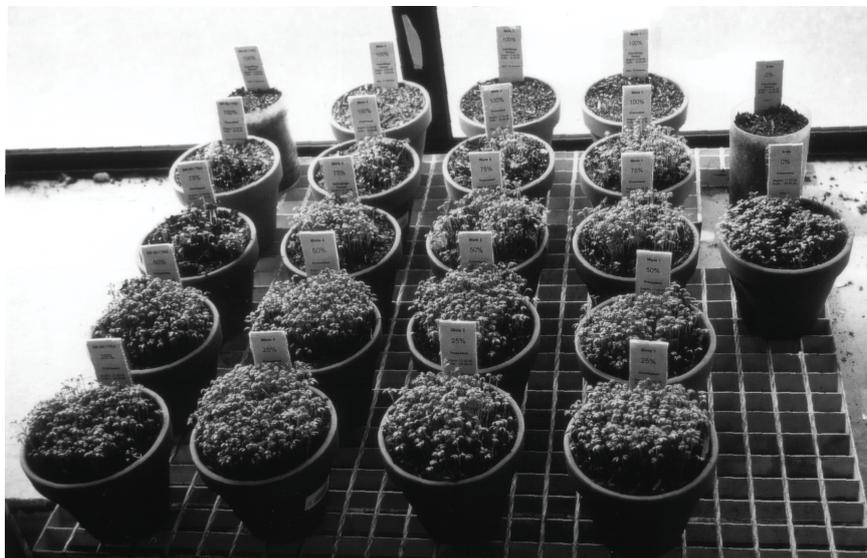
Verrottungsprodukte (Kompost) der Miete 1, Miete 2, Miete 4 und br02/tr03



Herstellung der Kompostmischungen für den Kresstest



Gewachsene Kresse bei verschiedenen Kompostmischungen



Probenahme bei Gerberei GACEL S.A. / Concepción: Probe Nr.° 1



Probenahme bei Gerberei GACEL S.A. / Concepción: Probe Nr.° 2



Probenahme bei Gerberei STOLZENBACH / Valdivia: Probe Nr.° 7



Probenahme bei Gerberei STOLZENBACH / Valdivia: Probe Nr.° 8

