



Ökoeffiziente Verwertung von Bioabfällen und Grüngut in Bayern

Thorsten Pitschke
Dr. Siegfried Kreibe
Dr. Jochen Cantner
Dr. Dieter Tronecker

Auftraggeber



Bayerisches Staatsministerium für
Umwelt und Gesundheit



Impressum

Alle Rechte (insbesondere das Recht der Vervielfältigung und Verbreitung sowie der Übersetzung) sind vorbehalten. Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Kein Teil der bifa-Texte darf in irgendeiner Form ohne Genehmigung der Herausgeber reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme gespeichert, verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

Herausgeber
bifa Umweltinstitut GmbH
Am Mittleren Moos 46
86167 Augsburg

Verfasser
Thorsten Pitschke
Dr. Siegfried Kreibe
Dr. Jochen Cantner
Dr. Dieter Tronecker

Auftraggeber
Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Gesundheit

Gestaltung
Sonja Grazia D'Introno

Druck
Klicks GmbH

1. Auflage 2010
© bifa Umweltinstitut

Ökoeffiziente Verwertung von Bioabfällen und Grüngut in Bayern

Thorsten Pitschke
Dr. Siegfried Kreibe
Dr. Jochen Cantner
Dr. Dieter Tronecker

Auftraggeber



Bayerisches Staatsministerium für
Umwelt und Gesundheit



INHALTSVERZEICHNIS

1	Kurzfassung	1
2	Projekthintergrund und Aufgabenstellung	4
3	Methodische Grundlagen	4
4	Untersuchungsrahmen	6
5	Verfahrensvergleich	7
5.1	Intention und Aufbau	7
5.2	Annahmenübersicht	8
5.3	Zusatznutzen aus der Behandlung von Bioabfällen und Grüngut	11
5.4	Umweltwirkungen und Ökologie-Index	13
5.5	Entsorgungskosten	25
5.6	Ökoeffizienzanalyse	26
6	Verfahrensvariationen	30
6.1	Energetische Verwertung der kompostierten Gärrückstände	30
6.2	Netzeinspeisung von Biogas aus der Vergärung	31
6.3	Nutzung der Abwärme	32
6.4	Bioabfalltrocknung zur Erzeugung einer Brennstofffraktion	33
7	Potenziale der Entsorgungsverfahren	34
7.1	Umfeldchancen und -risiken	34
7.2	Kompostierung	35
7.3	Vergärung	38
7.4	Mitbehandlung als Teil des Restabfalls in der MVA	40
7.5	Häckselgut	41
7.6	Energetische Verwertung heizwertreicher Fraktion	41
8	Szenarien zur Bioabfall-/Grüngutentsorgung	42

8.1	Ist-Situation der Entsorgung biogener Abfälle in Bayern	42
8.2	Charakterisierung der Zukunftsszenarien.....	43
8.3	Quantifizierung der Zukunftsszenarien.....	44
8.4	Ökoeffizienzvergleich der Szenarien	46
8.5	Umweltwirkungen und Ökologie-Index	47
9	Fazit	51
10	Literatur.....	53
11	Anhang: Methodische Grundlagen	55
11.1	Ökobilanzielle Betrachtung	55
11.2	Ökoeffizienzanalyse.....	60

1 Kurzfassung

Ziel des Vorhabens war die Identifikation von Optimierungspotenzialen bei der Entsorgung von Bioabfall und Grüngut aus Haushalten in Bayern mit Blick auf ausgewählte ökologische und ökonomische Wirkungen.

Verfahrensvergleich – Potenziale auf Prozessebene

Der Verfahrensvergleich stellt für folgende Verfahren, die aktuell zur Entsorgung von Bioabfällen und Grüngut in Bayern eingesetzt werden, die Umweltwirkungen und Entsorgungskosten gegenüber:

- offene, geschlossene und teilgeschlossene Kompostierung von Bioabfällen und Grüngut,
- kontinuierliche Vergärung von Bioabfällen mit Kompostierung der festen Gärrückstände,
- thermische Behandlung von Bioabfällen als Teil des Restabfalls in Müllverbrennungsanlagen,
- Ausbringung von Grüngut als Häckselgut und
- energetische Verwertung von heizwertreichen Grüngutfractionen in Biomasseheizkraftwerken.

Der Vergleich dieser Verfahren soll helfen, Optimierungsansätze und mögliche Stellschrauben zu ermitteln. Es wurden kein Best-Practise Verfahren identifiziert, da die Umweltwirkungen, über den Prozess hinaus, erheblich von den behandelten Abfällen, dem Anlagenbetrieb vor Ort und den lokalen Randbedingungen abhängen.

Komposte, Gärprodukte und Häckselgut substituieren unter anderem mineralische P-Dünger, die ansonsten aus Rohphosphaten hergestellt würden. Dieser Effekt wird in der Wirkungskategorie Ressourcenbeanspruchung berücksichtigt. Die ökologische Bewertung der Ressourcenbeanspruchung im Vergleich zu anderen Umweltwirkungen ist methodisch jedoch noch wenig belastbar. Aus diesem Grunde werden die aggregierten Ergebnisse für den Ökologie-Index sowohl mit als auch ohne die Wirkungskategorie Ressourcenbeanspruchung dargestellt.

Kompostierverfahren stellen von allen Verfahren die größte Menge von Phosphaten für eine stoffliche Nutzung bereit. Bei Berücksichtigung der Ressourcenbeanspruchung sind die Kompostierverfahren mit den deutlichsten Umweltentlastungen verbunden. Die Sensitivitätsbetrachtung der Emissionen zeigt, dass sich bei schlechter Führung der Kompostierung das ökologische Gesamtergebnis deutlich verschlechtert.

Auch die Vergärung führt bei Berücksichtigung der Ressourcenbeanspruchung zu einer Umweltentlastung. Ohne Berücksichtigung der Ressourcenbeanspruchung ergibt sich für die Vergärung ebenso wie für die offene Kompostierung in Summe eine Umweltbelastung, die vor allem durch erhebliche Emissionen an CH_4 , NH_3 und NMVOC verursacht ist¹. Die im Vergleich zur teil-/geschlossenen Kompostierung größere erzeugte Energiemenge wiegt diesen Nachteil der Vergärung nicht auf. Die Sensitivitätsbetrachtungen für Emissionen, Energienutzung und Produktverwertung zeigen, dass der bilanzierte durchschnittliche Anlagenbetrieb Potenziale zur Verbesserung aufweist. Die im Vergleich

¹ Bei der Interpretation der Ergebnisse für die Vergärung ist jedoch zu berücksichtigen, dass die zugrundeliegenden Emissionswerte nach [Cuhls 2008] an fünf Vergärungsanlagen – im Voll- beziehungsweise Teilstrombetrieb – ermittelt wurden und eine verhältnismäßig hohe Streubreite aufweisen.

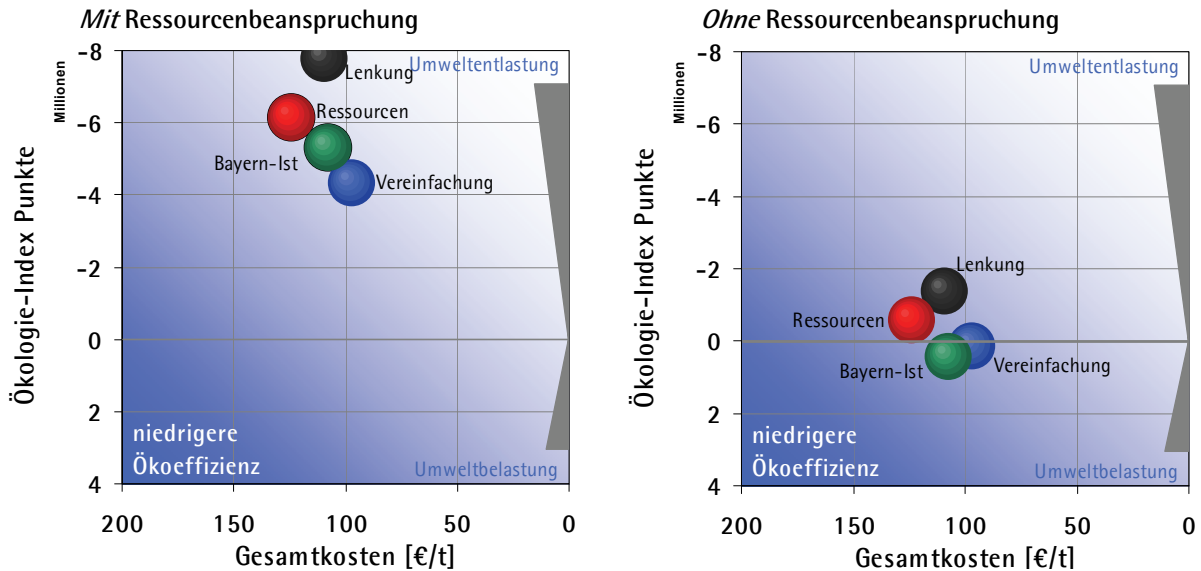
zur Kompostierung tendenziell höheren Kosten der Vergärung führen in Konsequenz zu einer geringeren Ökoeffizienz.

Die Mitbehandlung von Bioabfällen in Müllverbrennungsanlagen als Teil des Restabfalls ist mit einer geringen Umweltentlastung verbunden. Die grundsätzlich denkbare Rückgewinnung von Phosphaten aus den MVA-Schlacken ist nicht Stand der Technik und deshalb nicht in der Bilanzierung berücksichtigt. Die Optimierung der Energienutzung bietet auch bei der Müllverbrennung Potenziale zur Verbesserung des ökologischen Gesamtergebnisses.

Der bedeutendste Entsorgungsweg für Grüngut ist die offene Kompostierung. Für die heizwertreichen Grüngutanteile ist die energetische Verwertung eine Alternative. Die Bewertung des Ausbringens als Häckselgut fällt aufgrund der wenig spezifischen Datengrundlage besonders mit Blick auf die N-Emissionen beim Ausbringen und die Nährstoffgehalte schwer. Nicht Bestandteil der Betrachtungen sind mögliche phytotoxische Wirkungen des Häckselguts. Die Kosten der untersuchten Verfahren zur Grüngutentsorgung liegen innerhalb eines engen Intervalls unter den Kosten der Bioabfallentsorgung.

Zukunftsszenarien – Potenziale auf struktureller Ebene

Der aktuellen Entsorgungssituation in Bayern wurden drei Zukunftsszenarien gegenübergestellt. Das folgende Portfolio zeigt die Ökoeffizienz der Zukunftsszenarien im Vergleich zur aktuellen Entsorgungssituation.



- ca. 411.000 t BA werden als Restabfall erfasst
- BA: 66% Kompostierung, 33% Vergärung
- GG: 80% Kompostierung, 17% Häckselgut, 3% energetische Verwertung
- Genutzte Abwärme: 25%

- Ausbau BA-Getrenntsammlung
- BA: 33% Kompostierung, 66% Vergärung
- GG: 75% Kompostierung, 25% energetische Verwertung, kein Häckselgut
- Verbesserte Abwärmenutzung
- Verteuerung Erfassung

- Einschränkung Getrenntsammlung
- BA: Analog BY-Ist
- GG: 40% Kompostierung, 50% Häckselgut und 10% energetische Verwertung
- Bessere Abwärmenutzung
- Entsorgungskosten: -10%

- Maximale BA-Getrenntsammlung
- BA: 33% Kompostierung, 66% Vergärung
- GG: 75% Kompostierung, 25% energetische Verwertung
- Emissionsminderung bei Kompostierung und Vergärung
- Verbesserte Abwärmenutzung

Abbildung 1.1: Ökoeffizienz-Portfolios der Zukunftsszenarien. Ökologie-Index < 0 bedeutet Umweltentlastung, Ökologie-Index > 0 bedeutet Umweltbelastung. BA: Bioabfall. GG: Grüngut.

Die Entsorgung von Bioabfällen leistet in Bayern schon heute einen wichtigen Beitrag zu einer öko-effizienten Abfallwirtschaft. Die Ökoeffizienz der aktuellen Entsorgungsstruktur erweist sich als robust gegen die in den Szenarien angenommenen Entwicklungen, die als Folge etwa einer massiven Preissteigerung von Energieträgern und Rohstoffen oder des Zwangs zur Kostenreduktion auftreten könnten. Im Szenario Ressourcenverknappung ändert sich die Ökoeffizienz verglichen zur aktuellen Situation nur wenig. Die größten ökologischen Verbesserungen der aktuellen Entsorgungsstruktur werden durch Intensivierung der stofflichen Nutzung im Szenario „Lenkung“ erzielt. Aus den Ergebnissen des Vorhabens werden konkrete Handlungsempfehlungen für die Akteure abgeleitet, die wesentlichen Einfluss auf die Verwertung von Bioabfall und Grüngut haben.

2 Projekthintergrund und Aufgabenstellung

Die Verwertung von Bioabfällen und Grüngut ist nach der Restabfallbehandlung der bedeutendste Bereich der bayerischen Entsorgungsstruktur. Ca. 30 % aller aus Haushalten erfassten Abfälle gehen als getrennt erfasste, biogene Abfälle der Verwertung zu. Die Vielzahl an technischen Verfahrensalternativen und die Möglichkeiten zur Gestaltung der zugehörigen Erfassungssysteme führen zu einer großen Bandbreite von Strategien zur Behandlung biogener Abfälle in den entsorgungspflichtigen Gebietskörperschaften Bayerns. Angesichts ihrer mengenmäßig großen Bedeutung leistet das Mobilisieren von Ökoeffizienzreserven im Umgang mit Bioabfällen und Grüngut einen wichtigen Beitrag zu einer nachhaltigen Entwicklung der gesamten bayerischen Abfallwirtschaft. Ziel des Vorhabens ist die Identifikation von Optimierungspotenzialen bei der Entsorgung von Bioabfall und Grüngut in Bayern mit Blick auf ökologische und ökonomische Wirkungen. Dabei kommt die Methodik der Ökoeffizienzanalyse zum Einsatz, die eine ökobilanzielle Analyse und Kostenbetrachtung gegenüberstellt. Mit Hilfe der Ökoeffizienzanalyse werden zunächst die Stärken und Schwächen aktueller Verwertungsverfahren für Bioabfälle und Grüngut identifiziert. Daran schließt sich ein Ökoeffizienzvergleich der aktuellen Bioabfall-/Grüngutentsorgung in Bayern im Vergleich zu drei Zukunftsszenarien an.

Diese Untersuchung wurde von einem Beirat begleitet. Der Beirat setzte sich zusammen aus Vertretern des Auftraggebers, des Landesamts für Umwelt (LfU), der Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL), den entsorgungspflichtigen Gebietskörperschaften, der Bundesgütegemeinschaft Kompost (BGK) und Experten aus den Bereichen Landwirtschaft und thermische Abfallbehandlung.

3 Methodische Grundlagen

Die Bausteine der durchzuführenden Ökoeffizienzanalysen sowohl für die verschiedenen Entsorgungsverfahren als auch für den Vergleich der Zukunftsszenarien sind eine ökobilanzielle Betrachtung der Umweltwirkungen sowie eine Kostenbetrachtung und deren Zusammenführung im Rahmen einer Ökoeffizienzanalyse. Abbildung 3.1 fasst die Schritte zur Ermittlung beziehungsweise gemeinsamen Betrachtung der ökologischen und ökonomischen Wirkungen zusammen.

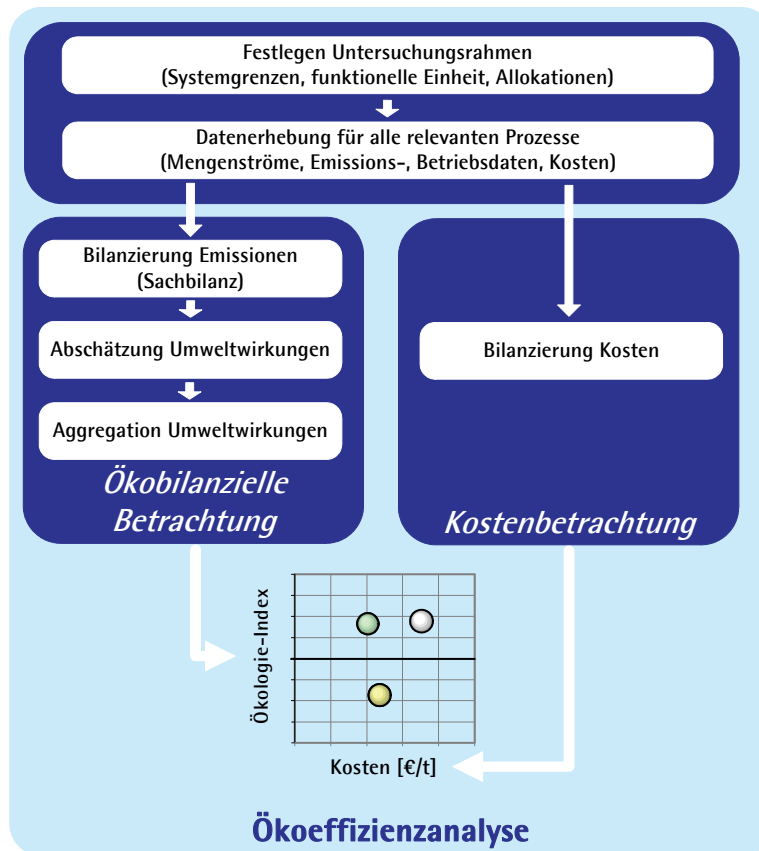


Abbildung 3.1: Schritte zur gemeinsamen Betrachtung der ökologischen und ökonomischen Auswirkungen im Rahmen der Ökoeffizienzanalyse.

Die ökobilanzielle Betrachtung orientiert sich an den Vorgaben der Normen zur Ökobilanz und liefert als Ergebnis eine Vielzahl von Einzelwerten, welche die Umweltwirkungen der Verfahren oder Szenarien charakterisieren. Die Umweltwirkungen werden mit Hilfe einer von bifa entwickelten Methode aggregiert. Die Prinzipien dieser Methode sind, dass sich die Vorgehensweise soweit möglich an den Vorgaben des Umweltbundesamtes (UBA) zur Bewertung in Ökobilanzen orientiert und die Methode an sich transparent und nachvollziehbar ist und als Ergebnis einen numerischen Gesamtwert pro Szenario ergibt.

Bei der Kostenbetrachtung werden die Entsorgungskosten für die untersuchten Verfahren beziehungsweise Szenarien ermittelt. Dabei stützen sich die bilanzierten Kosten auf Werte aus dem Projektbeirat, auf Abschätzungen und Erhebungen von bifa oder auf repräsentative Literaturwerte.

Die Ökoeffizienzanalyse stellt schließlich für jedes der untersuchten Szenarien das Ergebnis der ökobilanziellen Betrachtung den mit der Entsorgung verbundenen spezifischen Kosten gegenüber. Eine ausführliche Beschreibung der Bausteine für eine Ökoeffizienzanalyse findet sich in Kapitel 11.

4 Untersuchungsrahmen

Bestandteil der ökobilanziellen Betrachtung ist die Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens. Beide Aspekte sind in der folgenden Tabelle dargestellt.

Tabelle 4.1: Untersuchungsrahmen der ökobilanziellen Betrachtung für Verfahrens- und Szenarienvergleich.

Bestandteile der öko-bilanziellen Betrachtung	Erläuterung
Ziel der Studie: Erkenntnisinteresse	Quantifizierung der ökologischen und ökonomischen Wirkungen der Bioabfall- /Grüngutentsorgung in Bayern und verschiedener Szenarien zur Identifikation von Optimierungsansätzen und deren Stellschrauben.
Ziel der Studie: Nutzer und Zielgruppe	Das StMUG als Auftraggeber, die Anlagenbetreiber und die entsorgungspflichtigen Gebietskörperschaften Bayerns
Untersuchungsrahmen: Untersuchungsgegenstand	Entsorgung von Bioabfall und Grüngut in Verfahren, die aktuell Bestandteil der bayerischen Entsorgungsstruktur sind und Vergleich der aktuellen Situation zur Bioabfall-/Grüngutentsorgung mit Zukunftsszenarien, die mögliche Entwicklungen der Rahmenbedingungen abbilden.
Untersuchungsrahmen: Funktionelle Einheit	Verfahrensvergleich: Entsorgung einer Tonne Bioabfall beziehungsweise Grüngut, angedient über die Erfassungssysteme der Träger der öffentlich-rechtlichen Entsorgung (örE). Szenarienvergleich: Gesamtmenge der aus den Haushalten im Jahr 2007 erfassten Bioabfall- und Grüngutmenge. Biogene Abfälle, die nicht über die Systeme der örE erfasst werden (z.B. aus Landschaftsbau, -pflege, Eigenverwertung.) sind nicht Gegenstand der Betrachtungen im Rahmen dieses Vorhabens.
Untersuchungsrahmen: Systemgrenzen	Für einen methodisch korrekten Verfahrens- beziehungsweise Szenarienvergleich sind konsistente Systemgrenzen hinsichtlich der bilanzierten Abfallströme, der Entsorgungs- und Äquivalenzprozesse erforderlich. Inputseitig: Im Verfahrensvergleich die für den jeweiligen Entsorgungsprozess bereitgestellte Abfallmenge ab Werkstor. Im Szenarienvergleich wird zusätzlich die Erfassung der Bioabfälle und des Grünguts berücksichtigt. Alle Schritte für die Bereitstellung von Energie, Betriebsmitteln bis zum Abbau der jeweiligen Rohstoffe. Outputseitig: Entsorgung der Rückstände aus den Entsorgungsprozessen beziehungsweise die Bereitstellung und Nutzung/Verwertung eines markt-gängigen Produkts
Allokationen auf Systemebene	Alle Entsorgungsprozesse stellen markt-gängige Sekundärprodukte bereit, wie z.B. Strom oder Nährstoffe aus den Komposten. Als Folge müssen die entsprechenden Energie- oder Nährstoffmengen nicht auf konventionellem Weg aus Primärrohstoffen hergestellt werden. Die Umweltauswirkungen, die mit der konventionellen Herstellung jedes einzelnen Zusatznutzens verbunden sind, werden somit „eingespart“ bzw. „vermieden“. Um den Vergleich der Entsorgungssysteme zu vervollständigen, werden diese „vermiedenen“ Umweltauswirkungen als Äquivalenzsysteme bilanziert und den Umweltauswirkungen des Entsorgungssystems zu 100% gutgeschrieben.

Wirkungskategorien

Die Analyse der Umweltwirkungen erfolgt anhand der in folgender Tabelle dargestellten Wirkungskategorien.

Tabelle 4.2: Auswahl der Wirkungskategorien, Zuordnung der Sachbilanzparameter zu den einzelnen Wirkungskategorien und Einheit der Wirkungsindikatorergebnisse.

Wirkungskategorie	Wirkung	Sachbilanzparameter
Treibhauseffekt [kg CO ₂ -Äq.]	Erwärmung der Erdatmosphäre	CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O
Versauerung [kg SO ₂ -Äq.]	Emission säurebildender Substanzen	NO _x als NO ₂ , SO ₂ , NH ₃ , (HCl, HF)
Terrestrische Eutrophierung [kg PO _{4,3} -Äq.]	Nährstoffzufuhr in Böden im Übermaß	NO _x als NO ₂ , NH ₃
Photochemische Oxidantienbildung [kg C ₂ H ₄ -Äq.]	Bildung von bodennahem Ozon (Sommersmog)	CH ₄ , NMVOC, VOC unspez. (Benzol, Formaldehyd)
Humantoxizität	Toxische Schädigung des Menschen und von Organismen	SO ₂
Ökotoxizität	Toxische Schädigung von Organismen und Ökosystemen	NH ₃ , NO _x als NO ₂
Ressourcenbeanspruchung	Verbrauch des Energieinhalts fossiler Primärenergieträger Verbrauch von Rohphosphat aus Lagerstätten	KEA fossil Rohphosphat aus Lagerstätten

5 Verfahrensvergleich

5.1 Intention und Aufbau

Im Vergleich der Verfahren zur Behandlung von Bioabfällen und Grüngut werden die betrachteten Umweltwirkungen einzeln und aggregiert gegenübergestellt. Grundlage ist dabei ein durchschnittlicher Entsorgungsbetrieb. Durch diesen Vergleich beziehungsweise die zugehörigen Sensitivitätsbetrachtungen ausgewählter, ergebnisrelevanter Parameter werden die Stellschrauben und damit die Potenziale zur Optimierung der betrachteten Verfahren identifiziert. Der Verfahrensvergleich beantwortet also die Frage, wie die Verfahren zur Behandlung von Bioabfällen und Grüngut mit Blick auf die Vergleichsverfahren verbessert werden können und wo Ökoeffizienzrisiken liegen.

Ziel des Verfahrensvergleiches ist es dagegen nicht, ein Vorzugsverfahren zu identifizieren. Um die Frage zu beantworten, welche Behandlungsstrategie für den konkreten Entsorgungsfall in einer Stadt, einem Landkreis oder einen Zweckverband die ökoeffizienteste ist, ist die Abbildung des durchschnittlichen Anlagenbetriebs mit zu großen Unschärfen verbunden. Dazu müsste die tatsächliche Situation vor Ort beispielsweise mit Blick auf das bereitgestellte Material, die vorhandene Anlageninfrastruktur, die konkrete Prozesstechnik, die Absatzsituation für die stofflichen Produkte und der konkrete ökonomische Rahmen bilanziert werden.

Darüber hinaus sind die Entsorgungsstrategien nicht beliebig gegeneinander austauschbar, obwohl stets Bioabfälle beziehungsweise Grüngut entsorgt werden. So sind sowohl Kompostier- als auch Ver-

gärungsverfahren auf bestimmte strukturelle Eigenschaften der zu verwertenden Abfälle angewiesen. Die thermische Behandlung in einer MVA bezieht sich auf biogenes Material, das über die Restmülltonne erfasst wird. Dieses Material ist nicht unmittelbar für eine stoffliche Verwertung geeignet, da Kompostierung und Vergärung getrennt erfasste Fraktionen mit geringen Störstoffanteilen benötigen.

Im Bereich der Grüngutentsorgung wird das Ausbringen als Häckselgut aus seuchenhygienischen Gründen seine Bedeutung als Entsorgungsweg wohl verlieren. Die energetische Verwertung von heizwertreichen Fraktionen ist nur für die Holzige Teilmenge relevant. Die offene Grüngutkompostierung kann dagegen die Entsorgung der gesamten Grüngutmenge übernehmen.

Der Verfahrensvergleich erfolgt anhand der Sachbilanz, die auf Annahmen zum durchschnittlichen Anlagenbetrieb beruht. Die Auswertung der Sachbilanz erfolgt auf mehreren Ebenen:

- Zusatznutzen aus der energetischen und/oder stofflichen Verwertung
- Umweltwirkungen (differenziert nach Wirkungskategorien und aggregiert zum Ökologie-Index)
- Sensitivitätsbetrachtung ergebnisrelevanter Einflüsse
- Kosten / Preise
- Ökoeffizienz

5.2 Annahmenübersicht

Der Verfahrensvergleich stellt für die Verfahren, die aktuell zur Entsorgungsstruktur von Bioabfällen und Grüngut eingesetzt werden, die Umweltwirkungen und Entsorgungskosten gegenüber. Diese Verfahren sind:

- Offene, geschlossene und teilgeschlossene Kompostierung von Bioabfällen und Grüngut
- Kontinuierliche Vergärung von Bioabfällen mit Kompostierung der festen Gärrückstände
- Thermische Behandlung von Bioabfällen als Teil des Restabfalls in Müllverbrennungsanlagen
- Ausbringung von Grüngut als Häckselgut
- Energetische Verwertung von heizwertreichen Grüngutfraktionen in Biomasseheizkraftwerken

Das Ausbringen von Grüngut als Häckselgut wird im Verfahrensvergleich berücksichtigt, da aktuell noch erhebliche Mengen diesem preisgünstigen Entsorgungsweg zugehen. Der Projektbeirat geht davon aus, dass dieser Entsorgungsweg wegen der seuchenhygienischen und phytotoxischen Bedenklichkeit des ausgebrachten Produktes zukünftig seine Bedeutung verlieren wird.

Für jedes der Verfahren ist eine Vielzahl von Variationen hinsichtlich der konkreten verfahrenstechnischen Ausgestaltung oder der Verwertungswege für die Produkte möglich. Die folgenden Übersichten fassen die Annahmen zusammen, auf denen der Verfahrensvergleich beruht. **Die Annahmen bilden soweit als möglich eine typische Anlagenkonfiguration beziehungsweise einen typischen Anlagenbetrieb ab.**

Tabelle 5.1: Bioabfallentsorgung. Konkretisierung Verfahrensvergleich. FW: Fernwärme, PD: Prozessdampf.

Anmerkungen	Kompostierung, offen	Kompostierung, geschlossen	Kompostierung, teilgeschlossen	Vergärung inkl. Nachrotte	Behandlung als Restabfall in MVA
Emissions-situation	Offene Mieten, ohne Abluftreinigung	Vollständig geschlossene Rotte, mit Abluftreinigung	Geschlossene Intensivrotte mit Abluftreinigung, Nachrotte offen bzw. überdacht	Kont. Vergärung (TS-Gehalt >ca.30%), Nachrotte eingehaust, Abluftreinigung	Abluftfassung und -reinigung
C-/N- Emissionen Behandlung	[Cuhls 2008]: (Trocken-)Vergärung > geschlossene Kompostierung: CH ₄ (x5), NH ₃ (x3), N ₂ O (x2), NMVOC (x15)				Anlagenwerte
Stoffliche Produkte	74% Fertig-, 26% Frischkompost			Kompostiertes und flüssiges Gärprodukt	Keines
Menge Produkt [kg/t Input]	430	440	440	330 / 165 l ¹⁾	0
N-Emissionen Lagern, Ausbringen	Gleiche Größenordnung wie Emissionen aus der Behandlung flüssiges Gärprodukt > Frischkompost > Fertigkompost [Cuhls 2008]				Keine
Energiegewinnung /-abgabe	Heizwertreiche Fraktionen (12% des Inputs) zur energetischen Verwertung.			Strom (190 kWh/t) FW: 84 kWh/t)	10% Strom, 26% FW 7 % PD (Heizwert: 5,1 MJ/kg)
Entsorgungskosten [€/t]	35	65	48	72	100

¹⁾ die angegebenen 165 l quantifizieren näherungsweise die landwirtschaftlich verwertete Menge. Die im Anlagenbetrieb insgesamt anfallende Menge an flüssigem Gärrest ist mindestens um den Faktor 2 höher.

Die kontinuierliche Vergärung anhand der in [Cuhls 2008] untersuchten kontinuierlich betriebenen Trockenfermentationsanlagen zu bewerten, ist wenig repräsentativ. Dennoch bilden die in [Cuhls 2008] veröffentlichten Werte die einzige geschlossene Datenbasis zur Beschreibung der Vergärung. Mitglieder des Projektbeirates vermuten für die Nassvergärung geringere Emissionen. Zusätzlich ist die Behandlungszeit von 2 Wochen in den untersuchten Anlagen recht kurz. Nach Aussagen des LfU vergären bayerische Anlagen eher 4 Wochen. Längere Verweilzeiten in der Vergärung verringern die Emissionen aus den Gärrückständen. In Bayern erfolgt die Bioabfallvergärung derzeit in 9 Nassvergärungsanlagen, 4 (kontinuierlich betriebenen) Trockenvergärungsanlagen und 4 (diskontinuierlich betriebenen) Feststoffvergärungsanlagen. In den Nass- und Trockenvergärungsanlagen werden insgesamt jeweils ca. 40 – 45 % und in den Feststoffvergärungsanlagen ca. 10 – 15 % des einer Vergärung zugeführten bayerischen Bioabfalls behandelt. Prinzipiell ist auch bei der Vergärung von der Ausschleusung holziger, heizwertreicher Fraktionen beispielsweise im Rahmen der Aufbreitung des festen Gärrestes auszugehen. Allerdings ist die Abtrennung nicht durch Daten aus der Praxis zu quantifizieren, so dass sie für die Betrachtung der Vergärung nicht berücksichtigt wird.

Tabelle 5.2: Grüngutentsorgung. Konkretisierung Verfahrensvergleich. FW: Fernwärme.

	Kompostierung, offen	Häckseln	energetische Verwertung heizwertreicher Fraktionen
Abluftreinigung	Offene Rotte, ohne Abluft- reinigung	Keine	Ablufferfassung und - reinigung
C-/N- Emission- nen Behandlung	[Cuhls 2008]	Keine	[Fritsche 2001]
Stoffliches Pro- dukt	74% Fertig-, 26% Frisch- kompost	Grünguthäcksel	Keines
Menge Produkt [kg/t Input]	430	1.000	0
N-Emissionen Lagern, Aus- bringen	Gleiche Größenordnung wie Emissionen aus der Be- handlung [Cuhls 2008]	Näherung: 5% N-Gesamt als NH ₃	Keine
Energie- gewinnung /- abgabe	Abscheidung heizwertreicher Fraktionen (3,3% des Inputs)	Keine	Strom (29%), FW (12,75%) (Heizwert: 10 MJ/kg)
Entsorgung- kosten [€/t]	30	18	11

In den folgenden Tabellen sind die für die Bewertung der Umweltwirkungen bedeutenden Emissionen aus der Behandlung und dem Lagern beziehungsweise Ausbringen nach [Cuhls 2008] zusammengefasst:

Tabelle 5.3: Übersicht C-/N -Emissionen bei Kompostierung und Vergärung von Bioabfällen und Bioabfällen nach [Cuhls 2008]. MW: Mittelwert, EW: Einzelwert; WG: Wirkungsgrad.

	Kompostie- rung ge- schlossen	Kompostie- rung teil- geschlossen	Kompostie- rung offen	GG- Kompostie- rung offen	Vergärung inkl. Nach- rotte ¹⁾
Verfahrens- beschreibung	Eingehauste Verfahren mit Abluft- erfassung und -reinigung	Geschlossene Intensivrotte und über- dachte, offene Nachrotte	Offene Mieten oder überdacht, mit Wänden; ohne Abluft- behandlung		Kontinuierliche Vergärung mit Kompostierung des festen Gärrests
Reingaswerte CH₄ [g/t Input]					
Spanne	300 bis 1.500	300 bis 1.500	470 bis 2.000	400 bis 2.000	3.200 bis 4.600
Wert	710	710	1.000	850	3.700
Reingaswerte NMVOC [g/t Input]					
Spanne	14 bis 90	14 bis 90	190 bis 690	200 bis 500	390 bis 1.700
Bilanzierter Wert	57	57	370	490	900
Reingaswerte NH₃ [g/t Input]					
Spanne	15 bis 110	15 bis 110	230 bis 920	200 bis 800	25 bis 320
Wert	63	63	470	350	200
Reingaswerte N₂O [g/t Input]					
Spanne	49 bis 120	49 bis 120	49 bis 210	40 bis 150	38 bis 190
Wert	68	68	110	72	120

¹⁾ Emissionsdaten [Cuhls 2008] wurden ermittelt an 5 kontinuierlich betriebenen Trockenvergärungsanlagen (Voll- und Teilstrombetrieb)

Tabelle 5.4: Emissionen von C-/N-haltigen Verbindungen bei der Anwendung / Lagerung. Quelle: [Cuhls 2008]

Parameter [g/t Kompost]	BA/GG-Fertigkompost	BA/GG-Frischkompost	GG-Fertigkompost	GG-Frischkompost	Gärprodukt kompostiert	Gärprodukt flüssig
CH ₄	<1	<1	<1	<1	1	8
NH ₃	89	389	34	211	117	866
N ₂ O	46	77	32	49	41	61

Neben der Entsorgung der Bioabfälle und des Grünguts resultieren aus den Entsorgungsverfahren zusätzliche Nutzen, wie z.B. Mineral-, Wirtschaftsdünger oder Energie. Tabelle 5.5 benennt die resultierenden energetischen und stofflichen Zusatznutzen und die dadurch substituierten Materialien und Energien aus Primärrohstoffen. Es wird angenommen, dass zwischen Sekundär- und Primärrohstoffen eine funktionelle Gleichwertigkeit gegeben ist.

Tabelle 5.5: Zusatznutzen, die mit den Entsorgungsverfahren verbunden sind und entsprechendes Äquivalenzsystem. Substitutionsfaktor: SF.

Zusatznutzen	Äquivalenzsystem	SF
Elektrische Energie	Elektrische Energie aus dem Strommix Deutschlands	1
Fernwärme, Prozessdampf	Fernwärme, Prozessdampf aus einem repräsentativen Erzeugungsmix	1
Nährstoffgehalt der Komposte bzw. Gär-rückstände (N-/P-/K-/Ca-/Mg-Gehalt)	Herstellung N-, P-, K- Ca- und Mg-Dünger	1
Organische Substanz zur Substitution von Torf / Rindenhumus	Substrat aus der organische Masse von Torf und Rindenhumus	1
Organische Substanz zur Reproduktion von Humus	Humus-C aus der organischen Substanz von Ackergras, bereitgestellt durch landwirtschaftliche Produktion	1

Einer besonders detaillierten Betrachtung bedürfen die vielfältigen stofflichen Nutzen aus den Komposten und Gärprodukten. Die Nährstoffgehalte und die Nutzung der organischen Substanz als Torf- und Humus-Lieferant werden als Gutschriften aus den Äquivalenzsystemen berücksichtigt. Daneben werden aber auch noch weitere Nutzen wie die Schonung der endlichen, mineralischen Ressource Phosphor oder in gewissen Fällen die Sequestrierung von Kohlenstoff berücksichtigt.

5.3 Zusatznutzen aus der Behandlung von Bioabfällen und Grüngut

Neben der Entsorgungsleistung zielen die Verfahren zur Behandlung von Bioabfällen und Grüngut auf die Bereitstellung eines hochwertigen, stofflichen Produkts und auf die Nutzung des Energieinhaltes. Diesen Zusatznutzen kommt im Rahmen der Bilanzierung der Umweltwirkungen eine besondere Bedeutung zu. Durch die Vermeidung der Belastungen aus den konventionellen Herstellungsprozessen reduzieren die Zusatznutzen die Umweltbelastungen bei der Behandlung von Bioabfällen beziehungsweise Grüngut. Der Quantifizierung der Gutschriften liegen für alle Vergleichsverfahren dieselben kon-

ventionellen Herstellungsprozesse zugrunde. Die Höhe der Gutschrift für einen Zusatznutzen ist damit direkt proportional zur bereitgestellten Menge.

In den folgenden Tabellen ist dargestellt, welche Zusatznutzen die Vergleichsverfahren bereitstellen. Die Zusatznutzen sind in 3 Klassen differenziert: Bereitstellung von Energie, Düngenährstoffen und organischer Substanz.

Tabelle 5.6: Zusatznutzen aus der Entsorgung von 1.000 kg Bioabfällen. GR: Gärrückstand. Seq. Kohlenstoff: sequestrierter, das heißt im Boden gespeicherter Kohlenstoff.

Zusatznutzen		Kompostierung offen	Kompostierung ge- schlossen	Kompostierung teil- geschlosse n	Vergärung (kompost. & flüss. GR)	Be- handlung in MVA
Energie	Elektrische Energie [kWh]	126	127	129	197	137
	Fernwärme [kWh]	57	59	64	105	370
	Prozessdampf [kWh]	--	--	--	--	92
Dünger	Stickstoff-Dünger [kg]	1,7	1,8	1,8	1,3	--
	Kalium-Dünger [kg]	3,9	4,0	4,0	2,7	--
	Phosphat-Dünger [kg]	2,5	2,5	2,5	1,7	--
	Kalk-Dünger [kg]	18,2	18,7	18,7	13,1	--
	Magnesium-Dünger [kg]	3,1	3,2	3,2	1,9	--
Org. Substanz	Torf/Rindenhumus [kg]	46	47	47	30	--
	Humus-C [kg]	16	16	16	11	--
	seq. Kohlenstoff [kg]	4,1	4,2	4,2	3,8	--

Tabelle 5.7: Zusatznutzen aus der Entsorgung von 1.000 kg Grüngut. Seq. Kohlenstoff: sequestrierter, das heißt im Boden gespeicherter Kohlenstoff.

Zusatznutzen		Kompostierung, offen	Häckseln	energetische Verwertung heizwertreicher Fraktionen
Energie	Elektrische Energie [kW]	35	--	806
	Fernwärme [kW]	17	--	354
	Prozessdampf [kW]	--	--	--
Dünger	Stickstoff-Dünger [kg]	1,5	0,7	--
	Kalium-Dünger [kg]	3,3	6,0	--
	Phosphat-Dünger [kg]	1,7	2,1	--
	Kalk-Dünger [kg]	12,7	17,7	--
	Magnesium-Dünger [kg]	3,2	1,9	--
Org. Substanz	Torf/Rindenhumus [kg]	40	--	--
	Humus-C [kg]	15	--	--
	seq. Kohlenstoff [kg]	3,7	--	--

Zwei grundlegend verschiedene Nutzungsansätze sind offensichtlich: Auf der einen Seite befinden sich Verfahren, die sich auf die Nutzung des Energieinhaltes fokussieren – Bioabfallbehandlung als Teil des

Restabfalls in MVA und energetische Verwertung heizwertreicher Grüngutfraktionen. Während auf der anderen Seite Vergärung und Kompostierung zusätzlich Düngernährstoffe und organische Substanz bereitstellen. Dazu sei angemerkt, dass die bayerischen Kompostieranlagen Kompost- und Energieerzeugung, über das Ausschleusen einer heizwertreichen Fraktion aus der Kompostaufbereitung, kombinieren.

Die Mitbehandlung in der MVA macht ca. 42 %² des gesamten Energiegehaltes des Bioabfalls verfügbar. Die Verwertung des Biogases aus der Vergärung nutzt mit 21 % nur die Hälfte davon (vergleiche dazu Angaben aus Tabelle 5.6). Die aus der Kompostierung, über die Nutzung in Biomasseheizkraftwerken, bereitgestellte Elektrizitäts- /Wärmemenge beträgt bis ca. 2/3 der aus der Vergärung erzeugten Energie.

Das stoffliche Produkt der Kompostierung von Bioabfällen, ein über alle bayerischen Anlagen repräsentativer Mix aus Fertigkompost (74 %) und Frischkompost (26 %), ist den stofflichen Produkten der Vergärung in allen bereitgestellten Nutzen als Dünger oder organischer Substanz überlegen. Grundlage für dieses Ergebnis bilden die Untersuchungen der BGK zur Qualität der stofflichen Produkte. Sie weisen für die Produkte der Kompostierung durchweg höhere Nährstoffgehalte im Vergleich zu den kompostierten Gärprodukten aus. Ein Erklärungsansatz sind die Nährstoff-Verluste bei der Vergärung durch Austrag mit dem Prozessabwasser. Die im Vergleich betrachteten Bioabfall-Kompostierverfahren unterschieden sich in den Zusatznutzen nicht signifikant.

Die Datengrundlage zur Beschreibung der Vergärung weist die folgenden Lücken auf:

- Die Emissionssituation wird aufgrund der Messungen an nur fünf kontinuierlich betriebenen Trockenvergärungsanlagen betrachtet (Nassvergärung evtl. emissionsärmer)
- In welchem Umfang eine energetische Verwertung abgetrennter heizwertreicher Fraktion erfolgt, ist im Gegensatz zur Kompostierung nicht bekannt
- Der Anlagen-Output wird im Vergleich zu den Kompostierungsprodukten als ärmer an Nährstoffen und Organik angenommen, da Nährstoffe zum Teil als Prozessabwasser verloren gehen. In welchem Umfang Prozesswasser – entgegen dieser Annahme – auf landwirtschaftlichen Flächen ausgebracht wird, kann nicht belastbar ermittelt werden.

Diese Wissenslücken können zu nachteiligen Effekten bei der Ermittlung der Umweltwirkungen für die Vergärung führen. Der ungenügenden Datenlage zur Beschreibung der Emissionssituation von Vergärungsanlagen trägt das Umweltbundesamt im Umweltforschungsplan 2009 Rechnung. Dort ist das Forschungsvorhaben „Ermittlung der Emissionssituation bei der Vergärung von Bioabfällen und Ableitung von Vorschlägen zur Verbesserung der Klimabilanz und des Emissionsverhaltens bei Bioabfallvergärungsanlagen“ ausgeschrieben.

5.4 Umweltwirkungen und Ökologie-Index

5.4.1 Normierte Umweltwirkungen

Die Ermittlung der Umweltwirkungen für jedes der Verfahren erfolgt anhand der in Kapitel 11.1 beschriebenen Methodik. Die folgenden Tabellen fassen die Umweltwirkungen der ausgewählten Verfahren unter den beschriebenen Randbedingungen zusammen. Tabelle 5.8 und Tabelle 5.9 zeigen die

² durchschnittlicher MVA-Wirkungsgrad.

Be- und Entlastungen jedes Verfahrens normiert als Einwohnerwerte. Die Einwohnerwerte setzen die Ergebnisse für jeden Wirkungsindikator in Relationen zu den zugehörigen Gesamtemissionen in Deutschland. Diese Normierung macht deutlich welche quantitative Bedeutung die verschiedenen Umweltkategorien im Vergleich miteinander haben.

Die Ergebnisse sind differenziert nach:

- Belastungen aus dem eigentlich Prozess, dem Ausbringen und Lagern der stofflichen Produkte und der Entsorgung der Rückstände
- Gutschriften aus bereitgestellten Zusatznutzen für Energie, Dünger und organischer Substanz. – (Gutschriften repräsentieren Umweltentlastungen und werden deshalb als negative Werte angegeben)
- Summe aus Belastungen und Gutschriften

Die Bezugseinheit für die dargestellten Umweltwirkungen ist die Entsorgung von 1.000 kg Bioabfall beziehungsweise Grüngut. Zusätzlich zeigen die Tabellen die projektunabhängige Gewichtung der Wirkungskategorien anhand der Kriterien Ökologische Gefährdung und Distance-to-Target und als Ergebnis der ökologischen Bewertung, den Ökologie-Index für jedes Verfahren. Er errechnet sich für jedes Verfahren aus dem angegebenen Summenwert für eine Wirkungskategorie multipliziert mit der Summe aus Ökologische Gefährdung und Distance-to-Target und anschließender Summation über alle Wirkungskategorien. Aufgrund des extremen Einflusses der Ressourcenbeanspruchung Phosphat auf das ökologische Gesamtergebnis bei gleichzeitiger methodischer Unsicherheit bei der Berücksichtigung der Ressourcenbeanspruchung (siehe Kapitel 11.1.4), wird der Ökologie-Index jeweils mit und ohne Einbeziehung der Wirkungskategorie Ressourcenbeanspruchung dargestellt. Die Wirkungskategorie Ressourcenbeanspruchung vereinigt die Parameter KEA fossil und Rohphosphat. Aufgrund des hohen Beitrages des Parameters Rohphosphat ist die Wirkungskategorie nahezu ausschließlich durch diesen Beitrag bestimmt. Dies gilt für alle weiteren quantitativen Angaben zur Ressourcenbeanspruchung.

Tabelle 5.8: Bioabfallentsorgung. Wirkungsindikatorergebnisse der Verfahren quantifiziert als Einwohnerwerte (EW). Angabe in 10^{-3} Einwohnerwerten. Entsorgte Menge: 1 t Bioabfall bzw. Grüngut. Positive Einwohnerwerte repräsentieren Umweltbelastungen, negative Einwohnerwerte repräsentieren Umweltentlastungen. Die Werte von Belastung, Gutschrift und Summe sind gerundet angegeben.

Wirkungskategorien [10^{-3} EW/1 t Bioabfall]		Kompos- tierung offen	Kompos- tierung ge- schlos- sen	Kompos- tierung teilge- schlos- sen	Ver- gärung inkl. Nach- rotte	Behand- lung in MVA	Ökologische Gefährdung	Distance to Target
Treib- hauspot.	Belastung	5	7	5	10	1	10	10
	Gutschrift	-16	-16	-16	-19	-20		
	Summe	-11	-9	-12	-9	-19		
Photo- chemische Oxidantien- bildung	Belastung	18	4	4	45	1	4	8
	Gutschrift	-2	-3	-3	-2	-2		
	Summe	16	1	1	43	-1		
Versäue- rungspot.	Belastung	27	11	10	22	4	8	8
	Gutschrift	-16	-17	-17	-15	-9		
	Summe	11	-6	-7	7	-5		
Eutrophie- rungspot.	Belastung	39	14	14	31	5	8	8
	Gutschrift	-19	-20	-20	-16	-6		
	Summe	19	-6	-6	15	-2		
Human- toxizität (SO ₂)	Belastung	2	4	2	2	4	8	8
	Gutschrift	-12	-12	-12	-14	-19		
	Summe	-10	-8	-10	-12	-15		
Ökotoxizität (NH ₃ , NO _x)	Belastung	39	14	14	31	5	8	8
	Gutschrift	-20	-20	-20	-16	-7		
	Summe	19	-6	-6	15	-2		
Ressourcen- beanspru- chung (Roh- phosphat, KEA fossil) ¹⁾	Belastung	0	2	1	0	0	6	8
	Gutschrift	-306	-313	-313	-215	-9		
	Summe	-305	-311	-312	-215	-9		
Ökologie-Index ohne Ressourcenbeanspruchung		0,6	-0,6	-0,7	0,7	-0,8		
Ökologie-Index mit Res- ourcenbeanspruchung		-3,7	-4,9	-5,1	-2,3	-0,9		

¹⁾ Die Einwohnerwerte für die Ressourcenbeanspruchung ergeben sich rechnerisch als Mittelwert der beiden Parameter KEA fossil und Rohphosphat. Für KEA fossil werden die Werte für Ökologische Gefährdung (mittel bzw. 6 Punkte) und Distance-to-Target (hoch = 8 Punkte) aus [UBA 1999] übernommen. Für den Parameter Phosphor gibt es keine vorgegebene Einordnung in die genannten Kriterien (vergleiche Tabelle 11.3). Näherungsweise nimmt bifa deshalb eine Bedeutung analog dem KEA fossil an.

Tabelle 5.9: Grüngutentsorgung. Wirkungsindikatorergebnisse der Verfahren quantifiziert als Einwohnerwerte (EW). Angabe in 10^{-3} Einwohnerwerten. Positive Einwohnerwerte repräsentieren Umweltbelastungen, negative Einwohnerwerte repräsentieren Umweltentlastungen. Die Werte von Belastung, Gutschrift und Summe sind gerundet angegeben.

Wirkungskategorien [10^{-3} EW/1 t Grüngut]		Kompos- tierung, offen	Häckseln	Energetische Verwertung heizwert- reicher Fraktionen	Ökologische Gefährdung	Distance to Target
Treibhauspot.	Belastung	4	1	5	10	10
	Gutschrift	-9	-2	-52		
	Summe	-5	-1	-47		
Photo- chemische Oxidantien- bildung	Belastung	23	1	1	4	8
	Gutschrift	-2	0	-4		
	Summe	22	1	-2		
Versäue- rungspot.	Belastung	19	15	13	8	8
	Gutschrift	-13	-2	-21		
	Summe	7	13	-8		
Eutrophie- rungspot.	Belastung	27	21	18	8	8
	Gutschrift	-16	-1	-16		
	Summe	11	20	2		
Human- toxizität (SO ₂)	Belastung	2	1	5	8	8
	Gutschrift	-6	-3	-41		
	Summe	-4	-2	-37		
Ökotoxizität (NH ₃ , NO _x)	Belastung	27	21	18	8	8
	Gutschrift	-16	-1	-16		
	Summe	11	20	2		
Ressourcen- beanspru- chung (Roh- phosphat, KEA fossil) ¹⁾	Belastung	0	1	1	6	8
	Gutschrift	-211	-255	-20		
	Summe	-211	-254	-19		
Ökologie-Index ohne Ressourcen- beanspruchung		0,5	0,8	-1,6		
Ökologie-Index mit Ressourcen- beanspruchung		-2,4	-2,8	-1,9		

¹⁾ Die Einwohnerwerte für die Ressourcenbeanspruchung ergeben sich rechnerisch als Mittelwert der beiden Parameter KEA fossil und Rohphosphat. Für KEA fossil werden die Werte für Ökologische Gefährdung (mittel bzw. 6 Punkte) und Distance-to-Target (hoch = 8 Punkte) aus [UBA 1999] übernommen. Für den Parameter Phosphor gibt es keine vorgegebene Einordnung in die genannten Kriterien (vergleiche Tabelle 11.3). Näherungsweise nimmt bifa deshalb eine Bedeutung analog dem KEA fossil an.

5.4.2 Aggregation der Umweltwirkungen zum Ökologie-Index

Abbildung 5.1 und Abbildung 5.2 zeigen für die jeweiligen Verfahren den Ökologie-Index, das heißt den aggregierten Gesamtwert zur Beschreibung der Umweltwirkungen, differenziert nach den Beiträgern der Wirkungskategorien.

Der Ökologie-Index ergibt sich durch Verrechnung der in Tabelle 5.8 beziehungsweise Tabelle 5.9 abgebildeten Einwohnerwerte mit den projektunabhängigen Größen Ökologische Gefährdung und Distance-to-Target. Je höher der Ökologie-Index eines Verfahrens ist, desto höher sind die mit der Ent-

sorgung verbundenen Umweltwirkungen. Negative Ökologie-Indizes stehen für Umweltbelastungen bei Betrachtung der Entsorgungsverfahren und Äquivalenzsysteme.

Bioabfallentsorgung

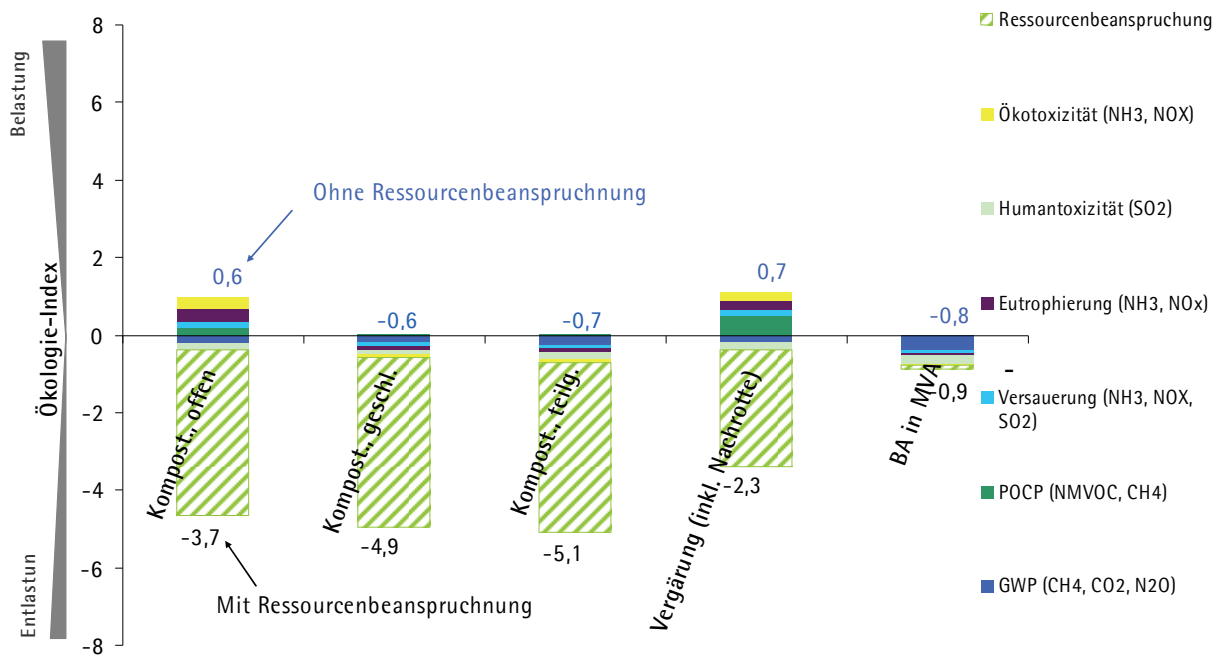


Abbildung 5.1: Bioabfallentsorgung. Beiträge der Wirkungskategorien zum Ökologie-Index der Vergleichsszenarien. Für jedes Verfahren sind zwei Ökologie-Indizes angegeben: Mit Berücksichtigung der Wirkungskategorie Ressourcenbeanspruchung (schwarz) bzw. ohne deren Berücksichtigung (blau). Für jede Wirkungskategorie ist dargestellt, welche Verbindungen signifikanten Einfluss haben. GWP: Global Warming Potential. POCP: Photochemical Ozone Creation Potential.

Betrachtet man den Ökologie-Index ohne Berücksichtigung der Wirkungskategorie Ressourcenbeanspruchung, dann zeigt sich, dass die thermische Behandlung in einer MVA, die geschlossene und die teilgeschlossene Kompostierung zu Umweltentlastungen führen. Vergärung inklusive Nachrotte und offene Kompostierung führen dagegen zu Umweltbelastungen. Bei der Interpretation der Ergebnisse für die Vergärung ist zu berücksichtigen, dass die zugrundeliegenden Emissionsdaten nach [Cuhls 2008] an nur fünf Vergärungsanlagen ermittelt wurden und eine verhältnismäßig große Streubreite aufweisen.

Bei Berücksichtigung der Ressourcenbeanspruchung im Ökologie-Index sind alle Verfahren mit Umweltentlastungen verbunden. Für Kompostierung und Vergärung sind die Änderungen deutlich, während sich bei der Mitbehandlung in der MVA das ökologische Gesamtergebnis kaum verbessert.

Mit Ausnahme der Ressourcenbeanspruchung liefern alle weiteren Wirkungskategorien in der Größenordnung ähnliche Beträge zum ökologischen Gesamtergebnis. Von der Ressourcenbeanspruchung abgesehen, stammen die bedeutendsten Beiträge zum Ökologie-Index für alle Verfahren vom Treibhaus-

potenzial. Bei Vergärung beziehungsweise offener Kompostierung ist zusätzlich der Beitrag der photochemischen Oxidantienbildung relevant. Die Beiträge der Ressourcenbeanspruchung und des Treibhauspotenzials sind für alle Verfahren Entlastungen. Unter den betrachteten Rahmenbedingungen sind die Verfahren der Bioabfallentsorgung mit Klimaentlastungen verbunden.

Bei der thermischen Behandlung der Bioabfälle als Restabfallbestandteil führen neben dem Treibhauspotenzial und der Ressourcenbeanspruchung auch die Beiträge aller weiteren Wirkungskategorien zu Entlastungen. Dies gilt auch für offene und teilgeschlossene Kompostierung, mit Ausnahme von minimalen Belastungen bei der photochemischen Oxidantienbildung.

Dagegen zeigt sich für Vergärung und offene Kompostierung ein anderes Bild. Abgesehen von Treibhauspotenzial und Ressourcenbeanspruchung liefert nur noch die Wirkungskategorie Humantoxizität eine Entlastung. Die Beiträge aller weiteren Wirkungskategorien sind in der Summe belastend für die Umwelt. Diese Wirkungskategorien sind photochemische Oxidantienbildung, Versauerung, Euthrophierung und Ökotoxizität. Ursache für Belastungen sind die hohen Emissionen an NMVOC beziehungsweise NH_3 aus dem eigentlichen Prozess und dem Lagern und Ausbringen der Produkte.

Während die thermische Behandlung der Bioabfälle als Restabfallbestandteil ausschließlich auf die Nutzung des Energiegehaltes zielt, sind die Nutzungsmöglichkeiten bei den aeroben und anaeroben Verfahren vielfältiger: Nutzung der Nährstoffgehalte zur Substitution konventionell erzeugter Mineraldünger, Nutzung der organischen Substanz zur Substitution von Torf und zur Humusproduktion.

Grüngutentsorgung

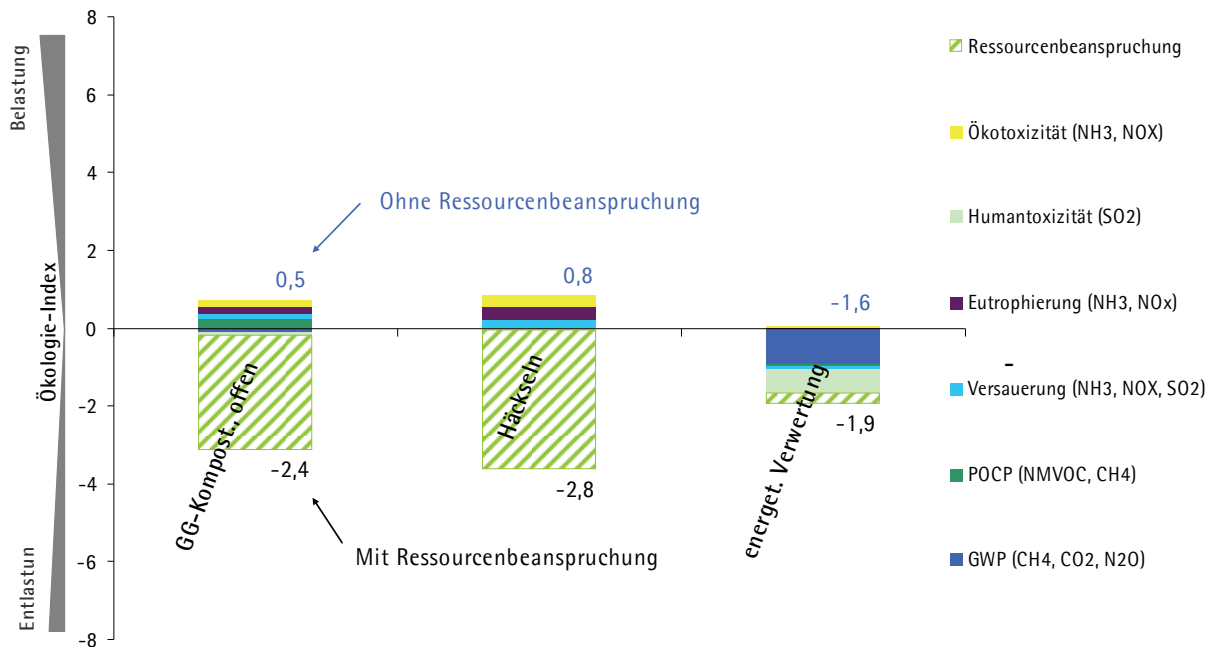


Abbildung 5.2: Grüngutentsorgung. Beiträge der Wirkungskategorien zum Ökologie-Index der Vergleichsszenarien. Für jedes Verfahren sind zwei Ökologie-Indizes angegeben: Mit Berücksichtigung der Wirkungskategorie Ressourcenbeanspruchung (schwarz) bzw. ohne deren Berücksichtigung (blau). Für jede Wirkungskategorie ist dargestellt, welche Verbindungen signifikanten Einfluss haben. GWP: Global Warming Potential. POCP: Photochemical Ozone Creation Potential.

Betrachtet man das ökologische Gesamtergebnis ohne Berücksichtigung der Wirkungskategorie Ressourcenbeanspruchung, dann führt nur die energetische Verwertung von heizwertreichen Fraktionen zu einer Umweltentlastung. Kompostierung und Ausbringen als Häckselgut sind dagegen umweltbelastend. Bei Berücksichtigung der Ressourcenbeanspruchung im ökologischen Ergebnis sind alle Verfahren mit Umweltentlastungen verbunden. Für Kompostierung und Ausbringen als Häckselgut stellt sich eine deutliche Umweltentlastung ein, während sich bei der energetischen Verwertung das ökologische Gesamtergebnis kaum verbessert.

Die Beiträge der Ressourcenbeanspruchung, der Humantoxizität und des Treibhauspotenzials sind für alle Verfahren Entlastungen. Die Verfahren der Grüngutentsorgung wirken klimaentlastend.

Die Entlastungen durch Ressourcenschonung bei der Kompostierung und dem Ausbringen als Häckselgut beziehungsweise die Klimaentlastung bei der energetischen Behandlung heizwertreicher Fraktionen sind die Beiträge mit der größten Relevanz für das ökologische Gesamtergebnis.

Neben den erwähnten Entlastungen bei Treibhauspotenzial beziehungsweise Humantoxizität und Ressourcenbeanspruchung sind bei Kompostierung und dem Ausbringen als Häckselgut alle weiteren Wirkungskategorien mit Belastungen verbunden. Bei der energetischen Behandlung ergeben sich nur

bei Eutrophierung und Ökotoxizität Umweltbelastungen, während alle weiteren Wirkungskategorien umweltentlastend sind.

5.4.3 Sensitivitätsanalysen für den Ökologie-Index

Das folgende Kapitel beschreibt den Einfluss der Variation wesentlicher Parameter auf die ökologische Gesamtwirkung der folgenden Entsorgungsverfahren für Bioabfall: teilgeschlossene Kompostierung³, Vergärung und Mitbehandlung als Teil des Restabfalls in einer MVA. Für die betrachteten Parameter und für jedes der ausgewählten Verfahren wird ein Good- und ein Worse-Case angenommen und der zugehörige Ökologie-Index berechnet. Der Good-Case führt zu kleineren beziehungsweise der Worse-Case zu größeren Ökologie-Indizes. Dies bedeutet der Good-Case bildet eine Verbesserung des ökologischen Gesamtergebnisses ab, der Worse-Case dagegen eine Verschlechterung. Die durchschnittliche Anlagensituation ist zwischen diesen beiden Polen zu finden.

Tabelle 5.10: Sensitivitätsanalysen zum Ökologie-Index. Bewertung relevanter Einflüsse in der Betrachtung ausgewählter Entsorgungsverfahren. GC: Good-Case; WC: Worse-Case

Parameter / Einfluss	Kompostierung (teilgeschlossen)	Vergärung inkl. Nachrotte	Mitbehandlung in MVA
(C-/N-)Emissionen aus der Behandlung	GC: Minimalwerte aus den Spannweite in [Cuhls 2008] und Berücksichtigung weiterer Quellen ¹⁾ WC: Maximalwerte aus den Spannweite in [Cuhls 2008] und Berücksichtigung weiterer Quellen ²⁾	GC/WC: Minimalwerte aus den Spannweiten in [Cuhls 2008] mit der zusätzlichen Annahme einer umfassenden Emissionsminderung bei der Abluft aus dem Prozess ³⁾ WC: Maximalwerte aus den Spannweiten in [Cuhls 2008] ⁴⁾	GC: Halbierung der Emissionsfrachten für Luftschadstoffe (u.a. SO ₂ , NO _x , NH ₃) WC: Verdopplung der Emissionsfrachten für Luftschadstoffe
Energieerzeugung	GC: 20% des Inputs werden im Rahmen der Kompostaufbereitung zur energetischen Verwertung abgetrennt WC: es wird keine Fraktion zur energetischen Verwertung abgetrennt die stofflich verwertete Kompostmenge bleibt in GC/WC unverändert	GC: Die erzeugte Biogasmenge beträgt 170Nm ³ /t ⁵⁾ . Die Abwärme (56% der Biogasenergie) wird komplett als Fernwärme genutzt. Ca. 36% der Biogasenergie werden als Strom genutzt WC: Keine externe energetische Nutzung des Biogas	GC: 79% des Energieinhaltes wird als Prozessdampf genutzt WC: 9,7% des Energieinhaltes wird als Strom genutzt
Kompostanwendung	GC: Anwendung aller Komposte nur in der Landwirtschaft WC: Ausschließliche	GC: Anwendung der kompostierten Gärreste nur in der Landwirtschaft. Die erzeugte	Keine Variationsmöglichkeit, da keine Kompostprodukte erzeugt werden

³ Aufgrund der geringen bilanzierten Unterschiede zwischen geschlossener und teilgeschlossener Kompostierung werden die Sensitivitätsanalysen stellvertretend für die teilgeschlossene Kompostierung durchgeführt. Für die geschlossene Kompostierung bestehen die gleichen Sensitivitäten.

Parameter / Einfluss	Kompostierung (teilgeschlossen)	Vergärung inkl. Nachrotte	Mitbehandlung in MVA
	Erzeugung von Fertigkomposten für den Hobbygartenbau	Kompostmenge beträgt 400 kg/t Input. ⁶⁾ P-Verluste sind minimiert. Es wird eine P-Menge anlog zur Kompostierung als Nutzen bereitgestellt. WC: Energetische Verwertung der kompostierten Gärreste	

¹⁾ BC: CH₄ 300 g/t, NMVOC 14 g/t, NH₃ 15 g/t, N₂O 49g/t

²⁾ WC: CH₄ 11 kg/t, NMVOC 1,13 kg/t, NH₃ 153 g/t, N₂O 653 g/t

³⁾ Für die gemessenen Minimalwerte aus [Cuhls 2008] (CH₄ 3,2 kg/t, NMVOC 390 g/t, NH₃ 25 g/t, N₂O 38g/t) wird zusätzlich angenommen, dass die Emissionsminderungspotenziale aus dem eigentlichen Prozess (d.h. Fermenter, Abpressung Gärrückstände, Bereitstellung festen Gärprodukte, Zwischenlagerung flüssige Gärprodukte) vollständig ausgeschöpft werden. Diese Prozess-Emissionsminderungspotenziale sind nach [Cuhls 2008]: CH₄: 68%, N₂O: 13%, NH₃: 45%, NMVOC: 90%.

⁴⁾ WC: CH₄ 4,6 kg/t, NMVOC 1,7 kg/t, NH₃ 320 g/t, N₂O 190 g/t

⁵⁾ [Witzenhausen 2008]

⁶⁾ obere Grenze des in [Witzenhausen 2008] angegebenen Intervalls

Wie beschrieben können die Wissenslücken zu nachteiligen Effekten bei der Ermittlung der Umweltwirkungen für die Vergärung führen. Deshalb sind die angenommenen Best-Cases der Vergärung in den Sensitivitäten C/N-Emissionen (umfassende Emissionsminderung in der Prozessführung) und Kompostanwendung (Minimierung der P-Verluste) optimistisch gewählt. Damit werden besonders die Wirkungen von Verbesserungsansätzen verdeutlicht.

Sensitivität Emissionen aus der Behandlung

Die folgende Abbildung zeigt, wie die beschriebene Sensitivität „Emissionen aus der Behandlung“ die Ökologie-Indizes beeinflusst.

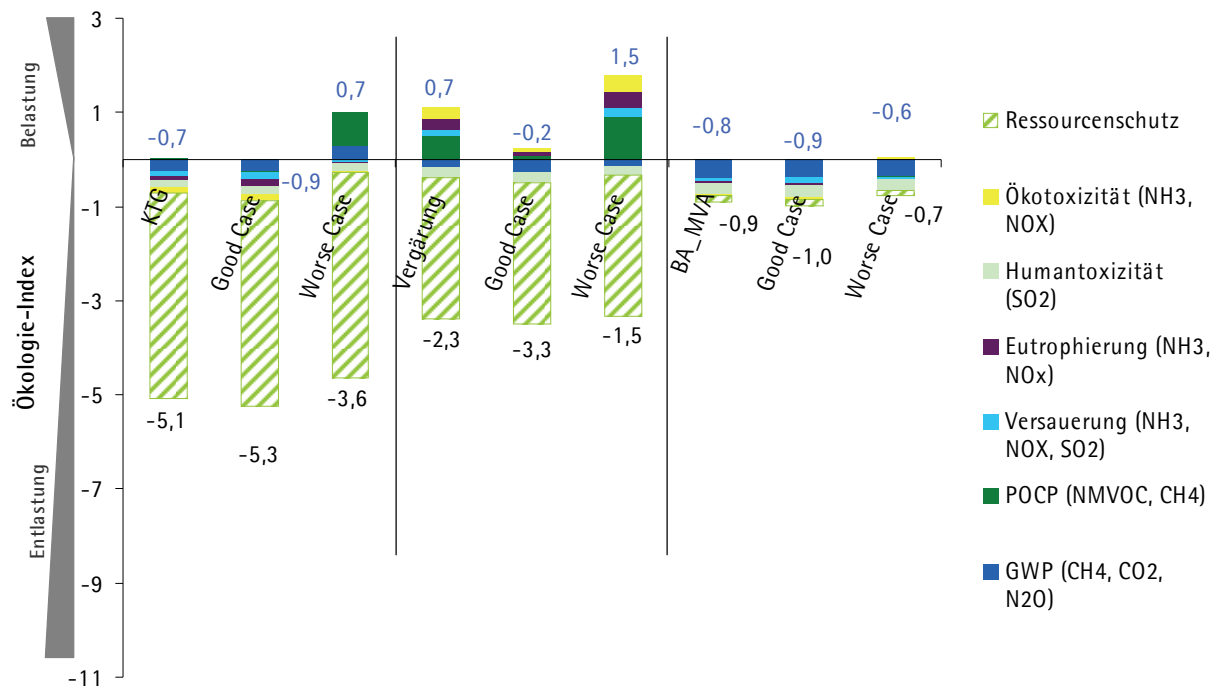


Abbildung 5.3: Sensitivität „Emissionen aus der Behandlung“. Beiträge der Wirkungskategorien zum Ökologie-Index der Vergleichsszenarien. Für jedes Verfahren sind zwei Ökologie-Indizes angegeben: Mit Berücksichtigung der Wirkungskategorie Ressourcenbeanspruchung (schwarz) bzw. ohne deren Berücksichtigung (blau). KTG: Kompostierung, teilgeschlossen. GWP: Global Warming Potential. POCP: Photochemical Ozone Creation Potential.

Für die teilgeschlossene Kompostierung fällt die Verringerung der Umweltbelastungen im Good-Case nur gering aus, die Verschlechterung im Worse-Case dagegen deutlich. Geringe oder hohe Emissionen an C- und N-haltigen Verbindungen sind in erster Linie das Resultat der Betriebsführung der jeweiligen Anlage (vergleiche Kapitel 7.2.1.1). Die bei einer unzureichenden Steuerung des Rotteprozesses entstehenden Emissionen führen zu einer erheblichen Verschlechterung der Gesamtumweltwirkung. Die Kompostierung kann bei sehr schlechter Betriebsführung im Vergleich zur Vergärung zu höheren Umweltbelastungen führen. Die zur Betrachtung der durchschnittlichen Kompostierung bilanzierten Emissionswerte unterscheiden sich nur geringfügig vom Good-Case. Es ist deshalb davon auszugehen, dass die in [Cuhls 2008] dazu angegebenen Werte bereits eine sehr gute Betriebsführung abbilden.

Bei der Vergärung verbessert eine emissionsarme Betriebsführung das ökologische Gesamtergebnis signifikant, während eine schlechte Betriebsführung das Potenzial hat, die Umweltbelastungen deutlich zu steigern. Die zur Abbildung der durchschnittlichen Vergärung bilanzierten Werte bilden einen Anlagenbetrieb ab, der in der Mitte von Good- und Worse-Case liegt. Auch bei emissionsarmen Betrieb

der eigentlichen Vergärung verursachen die nachgelagerten Prozessschritte Umweltbelastungen besonders durch NH₃-Emissionen aus der Nachkompostierung der festen Gärreste und dem Ausbringen der flüssigen Gärreste.

Bei der thermischen Mitbehandlung von Bioabfällen ist der Einfluss der Emissionen von untergeordneter Bedeutung für das ökologische Gesamtergebnis. Nicht die Belastungen aus den Emissionen, sondern Gutschriften für die Substitution konventioneller Energieerzeugungsprozesse bestimmen den Ökologie-Index.

Sensitivität Energieerzeugung

Die folgende Abbildung zeigt, wie die Sensitivität „Energieerzeugung“ die Ökologie-Indizes beeinflusst.

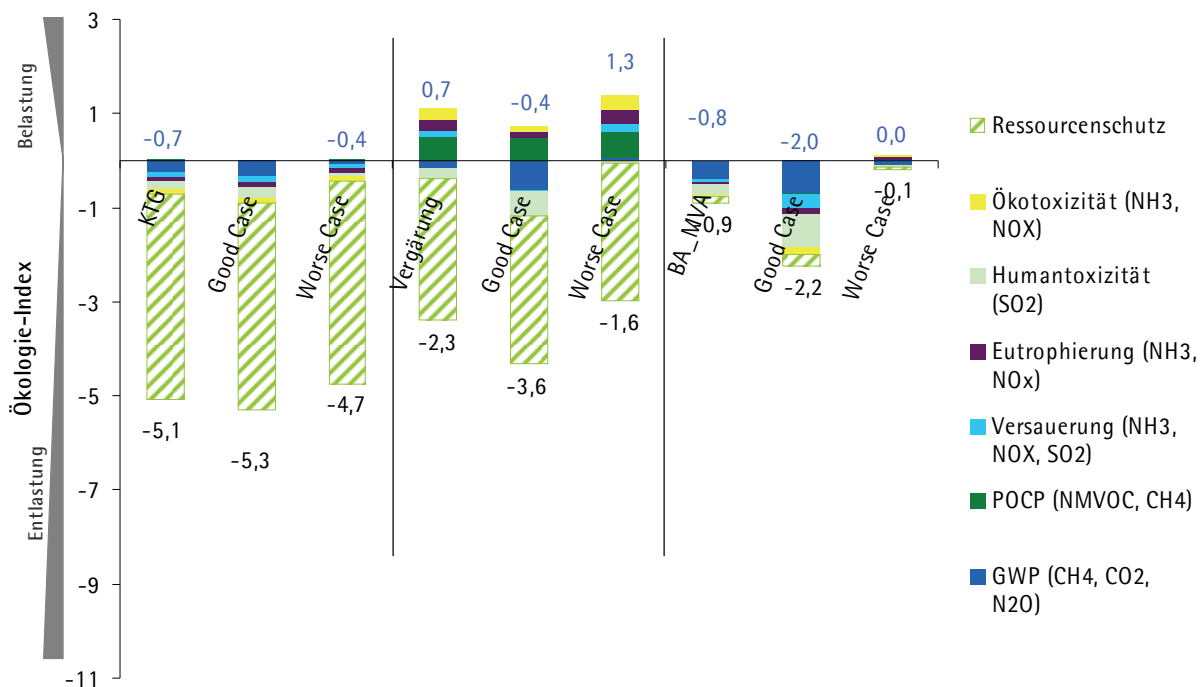


Abbildung 5.4: Sensitivität „Energieerzeugung“. Beiträge der Wirkungskategorien zum Ökologie-Index der Vergleichsszenarien. Für jedes Verfahren sind zwei Ökologie-Indizes angegeben: Mit Berücksichtigung der Wirkungskategorie Ressourcenbeanspruchung (schwarz) bzw. ohne deren Berücksichtigung (blau). KTG: Kompostierung, teilgeschlossen. GWP: Global Warming Potential. POCP: Photochemical Ozone Creation Potential.

Der Einfluss der Ausschleusung heizwertreicher Fraktionen aus der teilgeschlossenen Kompostierung auf das ökologische Gesamtergebnis ist sichtbar, aber nicht erheblich. Die Änderung des Ökologie-Index wird wesentlich über die Beträge aus dem Treibhauspotenzial bestimmt. Je größer die Menge an heizwertreicher Fraktion, desto größer ist die Gutschrift für die Substitution der Energieerzeugung aus fossilen Energieträgern. Voraussetzung für die Betrachtung der Sensitivität Energieerzeugung ist, dass die ausgeschleuste Menge nur aus Siebüberläufen besteht, die nicht für die stoffliche Verwertung als

Kompost geeignet sind. Die genutzte Kompostmenge wird in dieser Sensitivitätsanalyse als unabhängig von der ausgeschleusten Brennstoffmenge betrachtet.

Sowohl bei der Vergärung, als auch bei der Mitbehandlung in der MVA hat der Umfang der Energieerzeugung deutlichen Einfluss auf die ökologische Gesamtwirkung. Die Optimierung der Energienutzung, das heißt insbesondere die konsequente Abwärmenutzung, bietet erhebliche Potenziale zur Verbesserung der Gesamtumweltwirkung. Direkt proportional zum Umfang der energetischen Nutzung entlasten die Gutschriften aus der Substitution der fossilen Energieerzeugung Vergärung und energetische Verwertung.

Ein hoher Gesamtwirkungsgrad der Energieerzeugung, den die MVA Nürnberg beispielsweise durch ausschließliche Prozessdampferzeugung erzielt, steigert erheblich die im durchschnittlichen Anlagenbetrieb erzielte Umweltentlastung.

Sensitivität Kompostanwendung

Die folgende Abbildung zeigt, wie die Sensitivität „Kompostanwendung“ die Ökologie-Indizes beeinflusst.

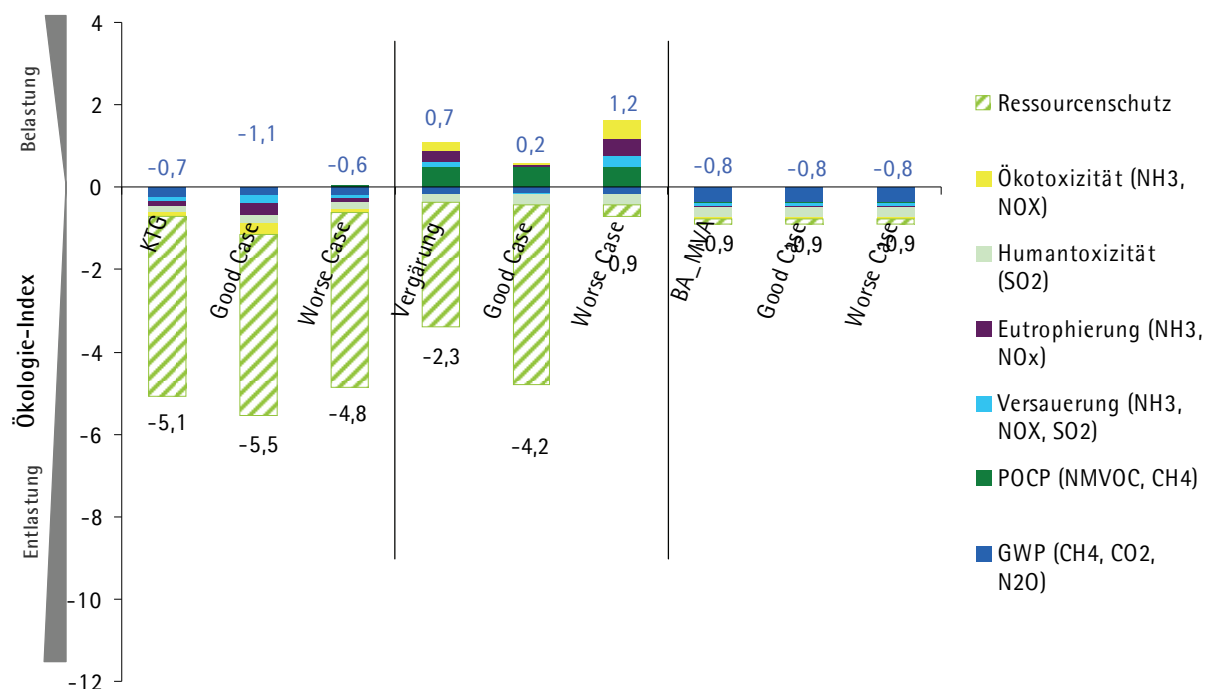


Abbildung 5.5: Sensitivität „Kompostanwendung“. Beiträge der Wirkungskategorien zum Ökologie-Index der Vergleichsszenarien. Für jedes Verfahren sind zwei Ökologie-Indizes angegeben: Mit Berücksichtigung der Wirkungskategorie Ressourcenbeanspruchung (schwarz) bzw. ohne deren Berücksichtigung (blau). KTG: Kompostierung, teilgeschlossen. GWP: Global Warming Potential. POCP: Photochemical Ozone Creation Potential.

Bei Kompostanwendung nur in der Landwirtschaft (Good-Case) lässt sich die Umweltentlastung der teilgeschlossenen Kompostierung steigern, während sich bei Einsatz der Komposte nur im Hobbygartenbau (Worse-Case) eine geringere Umweltentlastung einstellt. Der Unterschied zwischen den beiden genannten Anwendungsgebieten besteht in der Nutzung der organischen Substanz. Die ausschließliche Nutzung der organischen Substanz zur Humus-C Reproduktion in der Landwirtschaft erweist sich als effizienter als der Nutzungssplit (Humus-C Reproduktion, C-Sequestrierung und Torfsubstitution), der im Hobbygartenbau angenommen wird. Die Ursache dafür ist, dass die Gutschriften aus der Substitution des Ackergrasanbaus bei der Humus-C Reproduktion die Gutschriften bei Nutzung der organischen Substanz als Torfersatz oder zur C-Speicherung überwiegen.

Analog verbessert die ausschließliche Anwendung der kompostierten Gärprodukte in der Landwirtschaft die Gesamtumweltwirkung der Vergärung im Good-Case. Zusätzlich führen die größere angenommene Menge an erzeugten kompostierten Gärprodukten und die angenommene Minimierung der P-Verluste zu größeren Entlastungen bei der Ressourcenbeanspruchung. Der Verzicht auf eine stoffliche Verwertung zugunsten der energetischen Verwertung der kompostierten Gärprodukte erhöht die Umweltbelastungen deutlich.

Zusammenfassung Sensitivitäten

Die folgende Tabelle gibt eine qualitative Zusammenfassung der Sensitivitätsanalysen.

Tabelle 5.11: Sensitivitätsanalysen zum Ökologie-Index. Zusammenfassung: +/-: Verbesserung/Verschlechterung bis 0,5 Punkte ++/--: Verbesserung/Verschlechterung bis 1,0 Punkte +++/---: Verbesserung/Verschlechterung > 1,0 Punkte

Einfluss im Vergleich zum durchschnittlichen Betrieb	C-/N-Emissionen [GC/WC]	Energieerzeugung [GC/WC]	Kompostanwendung [GC/WC]
Teilgeschlossene Kompostierung	+/--	+/-	+/-
Vergärung (inkl. Nachrotte)	++/--	+++/--	+++/--
thermische Mitbehandlung	+/-	+++/--	+/-

5.5 Entsorgungskosten

Die dem Verfahrenvergleich zugrunde liegenden Entsorgungskosten sind in Tabelle 5.1 und Tabelle 5.2 dokumentiert. Die Kosten für die Erfassung der Abfälle sind nicht Bestandteil des Verfahrenvergleichs.

Die thermische Behandlung von Bioabfällen als Teil des Restabfalls ist das kostenintensivste Verfahren. Die aktuellen Angaben des ATAB weisen aber einen geringeren Unterschied der thermischen Behandlung zu Vergärung und Kompostierung aus als bisher angenommen. Die technisch einfache, offene Kompostierung ist die preisgünstigste Möglichkeit zur Bioabfallentsorgung. Die aufwändigeren Verfahren Vergärung und geschlossene Kompostierung liegen mit Blick auf die angenommenen durchschnittlichen Kosten wenig auseinander.

Die Entsorgungskosten für Grüngut sind im Vergleich zu Bioabfall deutlich geringer. Die für heizwertreiche Fraktionen mögliche energetische Verwertung ist dabei die kostengünstigste Alternative.

5.6 Ökoeffizienzanalyse

Die Ökoeffizienzanalyse stellt das Ergebnis der ökobilanziellen Betrachtung den mit der Entsorgung verbundenen spezifischen Kosten gegenüber. Die Visualisierung der Ergebnisse zeigen die folgenden Ökoeffizienz-Portfolios (Abbildung 5.6 und Abbildung 5.7).

Aufgrund der hohen Bedeutung für das Untersuchungsthema wird der Aspekt P-Ressourcenschonung gemeinsam mit der Schonung fossiler Energieträger als Wirkungskategorie Ressourcenbeanspruchung in der Aggregation zur ökologischen Gesamtwirkung berücksichtigt. Allerdings ist die dafür notwendige ökologische Bewertung der Ressourcenbeanspruchung im Vergleich zu den anderen Umweltwirkungen methodisch wenig belastbar (siehe Kapitel 11.1.4). Als Konsequenz werden die aggregierten Ergebnisse für den Ökologie-Index sowohl mit als auch ohne die Wirkungskategorie Ressourcenbeanspruchung dargestellt.

Die Ökoeffizienz-Portfolios sind so aufgebaut, dass links unten im Diagramm Verfahren mit hohen Entsorgungskosten und hohen positiven Ökologie-Indizes (→"niedrige Ökoeffizienz") zu finden sind, während Verfahren mit niedrigen Entsorgungskosten und hohen negativen Ökologie-Indizes rechts oben aufgetragen werden (→"hohe Ökoeffizienz").

5.6.1 Bioabfallentsorgung

Die Portfolios zeigen einen durchschnittlichen Betrieb der jeweiligen Verfahren. Viele zur Beschreibung notwendige Parameter wie beispielsweise Emissionsfrachten, Energieauskopplung und Nutzung der stofflichen Produkte variieren von Anlage zu Anlage erheblich. Die Sensitivitätsbetrachtung dieser Einflussgrößen für ausgewählte Verfahren beschreibt Kapitel 5.4.3. Die Ökologie-Indizes für die dort betrachteten Good- und Worse-Cases sind als Endpunkte der Doppelpfeile zusätzlich in den Portfolios dargestellt.

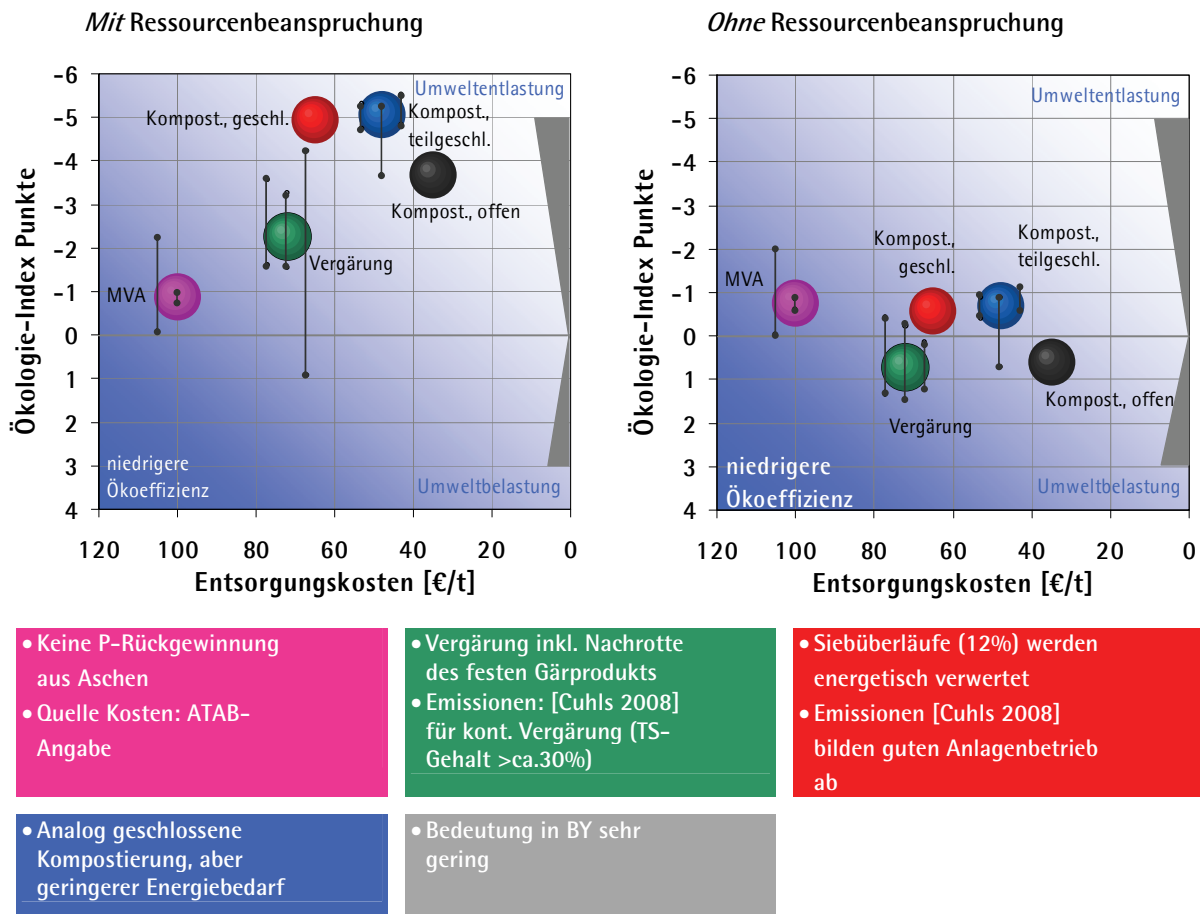


Abbildung 5.6: Ökoeffizienz-Portfolios der Verfahren zur Bioabfallentsorgung. Ökologie-Index < 0 bedeutet Umweltentlastung. Ökologie-Index > 0 bedeutet Umweltbelastung. Ökologie-Indizes für Good- und Worse-Case dargestellt als Linienendpunkte: links: Sensitivität Energienutzung. Mitte: Sensitivität Emissionen. rechts: Sensitivität Art der Kompostanwendung.

Kompostierung

Insbesondere durch die im Verfahrenvergleich größte Menge von zurückgewonnenen Phosphaten, die für eine stoffliche Nutzung zur Verfügung stehen, sind die Kompostierverfahren bei Berücksichtigung der Ressourcenbeanspruchung mit den deutlichsten Umweltentlastungen verbunden. Ohne Berücksichtigung der Wirkungskategorie Ressourcenbeanspruchung sind teilgeschlossene und geschlossene Kompostierung in geringem Maße umweltentlastend. Die offene Kompostierung dagegen führt zu einer Umweltbelastung.

Der bilanzierte Unterschied zwischen geschlossener und teilgeschlossener Kompostierung liegt nur im Eigenenergiebedarf. Eine Unterscheidung hinsichtlich der Emissionen ist auf Basis der zugrunde liegenden Daten aus [Cuhls 2008] nicht möglich, da dort teilgeschlossene und geschlossene als eine Anlagengruppe betrachtet werden. Dementsprechend sind die Unterschiede im Ökologieindex zwischen beiden Alternativen sehr gering. Mit Blick auf die Entsorgungskosten schneidet die teilgeschlossene Kompostierung etwas besser ab, so dass sich eine etwas höhere Ökoeffizienz im Vergleich zur geschlossenen Kompostierung ergibt.

Die offene Kompostierung ist als Behandlungsverfahren von Bioabfällen kaum noch von Bedeutung und wird mit Blick auf die Novellierung der TA-Luft noch weiter an Bedeutung verlieren. Im Vergleich zu den baulich und technisch aufwändigeren teil-/geschlossenen Varianten führen die höheren luftseitigen Emissionen zu einem schlechteren ökologischen Gesamtergebnis. Durch die vergleichsweise geringen Entsorgungskosten der offenen Kompostierung nähern sich allerdings die Kompostierungsverfahren in der Ökoeffizienz an.

Die Sensitivitätsbetrachtung zu den Emissionen zeigt, dass bei schlechter Führung der Kompostierung auch geschlossene Anlagen mit Abluftreinigung erhebliche Mengen emittieren und sich damit im ökologischen Gesamtergebnis deutlich verschlechtern. Der Good-Case bei der Sensitivitätsbetrachtung der Emissionen bringt nur eine geringe Verbesserung. Dies lässt schließen, dass die nach [Cuhls 2008] abgebildeten Emissionswerte bereits einem sehr guten Anlagenbetrieb entsprechen.

Vergärung (inklusive Nachrotte der festen Gärrückstände)

Analog zur Kompostierung führt auch die Vergärung bei Berücksichtigung der Ressourcenbeanspruchung zu einer Umweltentlastung. Ohne diese Wirkungskategorie ergibt sich aber, ebenso wie für die offene Kompostierung in Summe eine Umweltbelastung. Im Vergleich zur geschlossenen und teilgeschlossenen Kompostierung ist die bereitgestellte Menge an Phosphat aus den stofflich verwerteten Produkten geringer. Die zugehörigen Gutschriften fallen damit deutlich geringer aus. Umweltbelastend wirken die erheblichen Emissionen an CH₄, NH₃ und NMVOC, die nach [Cuhls 2008] eine kontinuierliche Trockenvergärung beschreiben. Eine höhere erzeugte Energiemenge im Vergleich zur teil-/geschlossenen Kompostierung wiegt diese Nachteile nicht auf. Bei der Interpretation der Ergebnisse für die Vergärung ist zu berücksichtigen, dass die zugrundeliegenden Emissionswerte nach [Cuhls 2008] an fünf Vergärungsanlagen – im Voll- beziehungsweise Teilstrombetrieb – ermittelt wurden und eine verhältnismäßig hohe Streubreite aufweisen.

Die Sensitivitätsbetrachtungen für Emissionen, Energie und Rückstandsverwertung zeigen, dass der bilanzierte durchschnittliche Anlagenbetrieb für Vergärungsanlagen Potenziale zur Verbesserung aufweist. Auch die im Vergleich zur Kompostierung tendenziell höheren Kosten führen in Konsequenz zu einer geringeren Ökoeffizienz

Mitbehandlung in der MVA als Teil des Restabfalls

Die Mitbehandlung von Bioabfällen in der MVA als Teil des Restabfalls ist mit einer geringen Umweltentlastung verbunden. Die grundsätzlich mögliche Rückgewinnung von Phosphaten ist nicht Stand der Technik und deshalb nicht in der Bilanzierung berücksichtigt. Das ökologische Gesamtergebnis ist deshalb im Gegensatz zu den stofflichen Verwertungswegen im Wesentlichen unabhängig von der Berücksichtigung der Ressourcenbeanspruchung. Die Optimierung der Energienutzung bietet jedoch deutliche Potenziale zur Verbesserung des ökologischen Gesamtergebnisses.

Die Mitbehandlung in der MVA ist die teuerste Verfahrensvariante und fällt damit im Ökoeffizienzvergleich zur teil-/geschlossenen Kompostierung ab.

5.6.2 Grüngutentsorgung

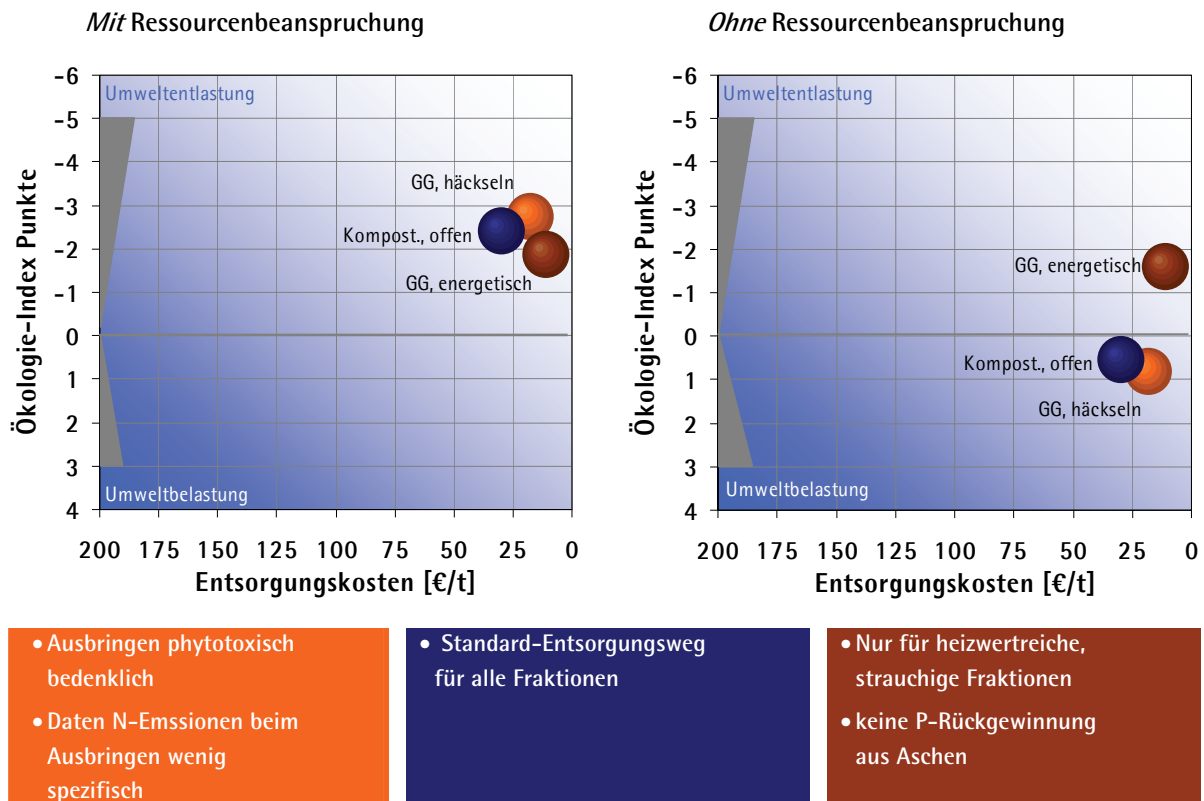


Abbildung 5.7: Ökoeffizienz-Portfolio der Verfahren zur Grüngutentsorgung. Ökologie-Index < 0 bedeutet Umweltentlastung. Ökologie-Index > 0 bedeutet Umweltbelastung.

Die offene Kompostierung, die in Bayern zu etwa 60% in Anlagen mit einer Kapazität kleiner 10.000 t/a, stattfindet, ist der bedeutendste Entsorgungsweg für Grüngut. Für die heizwertreichen Grüngutanteile ist die energetische Verwertung eine Alternative. Bei der energetischen Verwertung stellen sich durch den Verzicht auf ein stofflich verwertbares Produkt zugunsten einer ausschließlichen Energiebereitstellung, bei Berücksichtigung der Ressourcenbeanspruchung geringere Umweltentlastungen im Vergleich zur offenen Kompostierung ein. Schließt man aber die Ressourcenbeanspruchung aus der Betrachtung aus, ergibt sich für die energetische Verwertung eine deutliche Umweltentlastung, während die Kompostierung ihren ökologischen Vorteil verliert. Aus Sicht der Kosten ist die energetische Verwertung das preisgünstigere Verfahren.

Die Bewertung des Ausbringens als Häckselgut fällt aufgrund der verfügbaren, wenig spezifischen verfügbaren Datengrundlage besonders mit Blick auf die N-Emissionen bei der Feldanwendung und der Nährstoffgehalte schwer. Unter den gewählten Annahmen führen offene Kompostierung und Häckseln zu vergleichbaren ökologischen Gesamtwirkungen. Nicht Bestandteil der Betrachtungen sind dabei allerdings mögliche phytotoxische Wirkungen des Häckselguts auf die ausgebrachten Flächen.

Mit Blick auf die Entsorgungskosten liegen die Verfahren zur Grüngutentsorgung innerhalb eines engen Intervalls deutlich unter den Kosten der Bioabfallentsorgung.

6 Verfahrensvariationen

Kapitel 6 beschreibt im Überblick die ökonomischen und näherungsweise die ökonomischen Wirkungen verschiedener Verfahrens- beziehungsweise Parametervariationen. Der gemeinsame Nenner der Variationen ist die Strategie, den Anteil an erzeugter elektrischer und thermischer Energie aus den Verfahren zur Behandlung von Bioabfällen und Grüngut zu steigern. Folgende Verfahrensvariationen werden im Vergleich zu den korrespondierenden, bereits betrachteten Verfahren diskutiert:

- Energetische Verwertung der kompostierten Gärrückstände
- Netzeinspeisung von Biogas aus der Vergärung
- Nutzung der Abwärme
- Bioabfalltrocknung zur Erzeugung einer Brennstofffraktion

Im Folgenden sind die Wirkungen der Verfahrensvariationen auf den Ökologie-Index dargestellt.

6.1 Energetische Verwertung der kompostierten Gärrückstände

Die folgende Abbildung zeigt die ökologische Gesamtwirkung der energetischen Gärrückstandsverwertung auf Ökologie-Index und Ökoeffizienz im Vergleich zur stofflichen Verwertung der Gärrückstände.

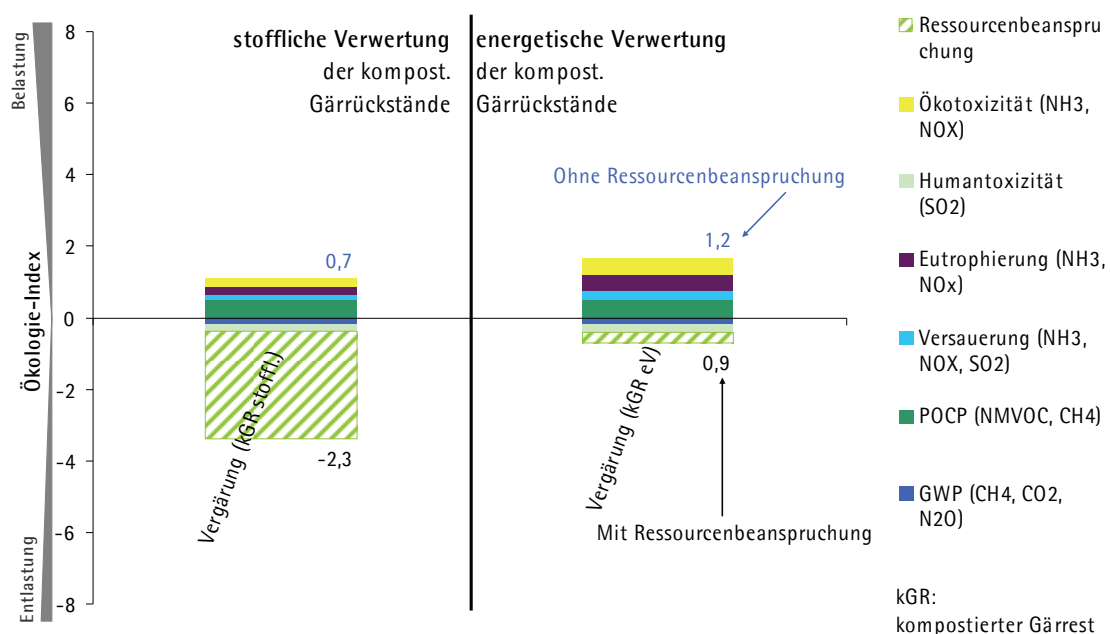


Abbildung 6.1: Vergärung mit stofflicher beziehungsweise energetischer Verwertung der kompostieren Gärrückstände. Beiträge der Wirkungskategorien zum Ökologie-Index. Für jedes Verfahren sind zwei Ökologie-Indizes angegeben: Mit Berücksichtigung der Wirkungskategorie Ressourcenbeanspruchung (schwarz) bzw. ohne deren Berücksichtigung (blau). GWP: Global Warming Potential. POCP: Photochemical Ozone Creation Potential.

Die energetische Verwertung der Gärprodukte ist im Vergleich zu deren stofflicher Verwertung insgesamt mit einer höheren Umweltbelastung und daran gekoppelt einer Verschlechterung der Ökoeffizienz verbunden. Verantwortlich dafür sind die deutlich geringeren Entlastungen in der Wirkungskategorie Ressourcenbeanspruchung. Der Verzicht auf die Nutzung der im Kompost enthaltenen Phosphate wird nicht durch die Steigerung der Energieausbeute und damit die Schonung fossiler Energieträger ausgeglichen. Auch ohne Berücksichtigung der Ressourcenbeanspruchung ist die energetische Gärückstandsverwertung umweltbelastender. Durch den geringen Heizwert des kompostierten Gärrests reichen die Gutschriften nicht aus, um die Belastungen beispielsweise durch NO_x bei der Gärrestverbrennung auszugleichen.

6.2 Netzeinspeisung von Biogas aus der Vergärung

Die folgende Abbildung zeigt die ökologische Gesamtwirkung der Netzeinspeisung von Biogas im Vergleich zur Nutzung des Biogases im eigenen BHKW.

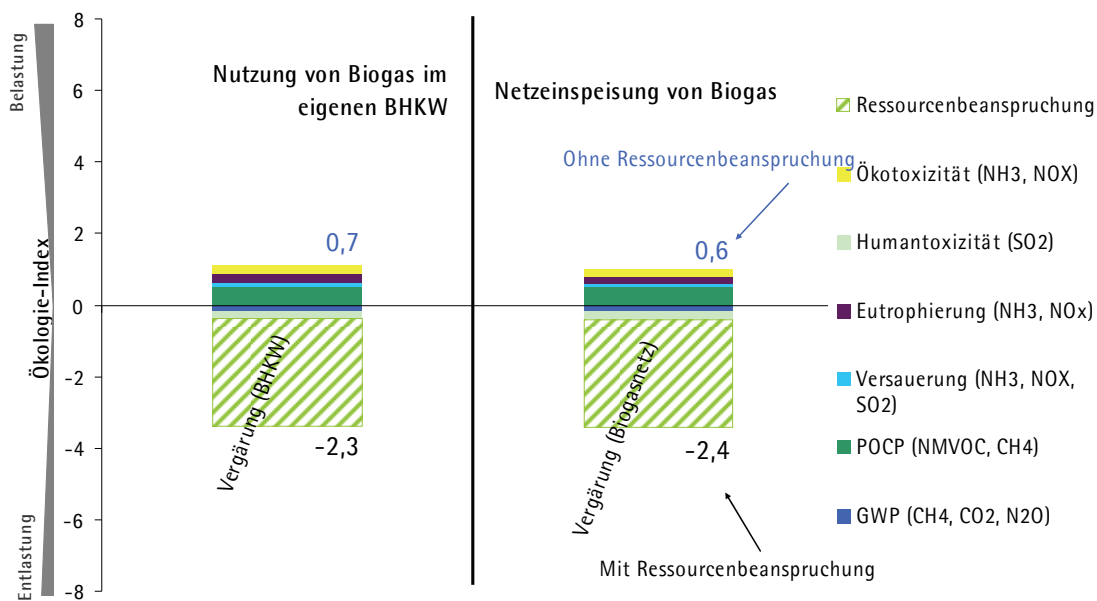


Abbildung 6.2: Netzeinspeisung von Biogas. Beiträge der Wirkungskategorien zum Ökologie-Index. Für jedes Verfahren sind zwei Ökologie-Indizes angegeben: Mit Berücksichtigung der Wirkungskategorie Ressourcenbeanspruchung (schwarz) bzw. ohne deren Berücksichtigung (blau). GWP: Global Warming Potential. POCP: Photochemical Ozone Creation Potential.

Die Einspeisung von Biomethan in das Erdgasnetz und die anschließende energetische Nutzung ist mit geringen ökologischen Vorteilen gegenüber der Nutzung im betriebseigenen BHKW verbunden. Dieser Vorteil ist an die angenommenen Wirkungsgrade geknüpft: Gaskraftwerk (36,6% elektrisch / 18,4% thermisch), BHKW (29% elektrisch / 12,75 % thermisch). Bei besserer Abwärmenutzung im BHKW oder bei höheren Methanverlusten gehen die Vorteile der direkten Einspeisung verloren.

Dies deckt sich mit den Ergebnissen aus [ifeu 2008]. Dort zeigt sich ebenfalls, dass trotz des zusätzlichen Energieaufwandes die Aufbereitung von Biogas zu Biomethan Vorteile in der Energiebilanz aufweist. Man geht davon aus, dass Biomethan vorteilhaft in wärmegeführten Kraftwerken mit sehr hoher Wärmenutzung eingesetzt werden kann, während bei der betriebseigenen Biogasnutzung nur ein kleiner Teil der überschüssigen Wärme eines BHKWs genutzt wird.

6.3 Nutzung der Abwärme

Die folgende Abbildung zeigt für die Vergärung und Mitbehandlung in der MVA den Einfluss der maximalen und minimalen Abwärmenutzung auf den Ökologie-Index im Vergleich zur bisherigen Berücksichtigung der Abwärmenutzung im durchschnittlichen Anlagenbetrieb.

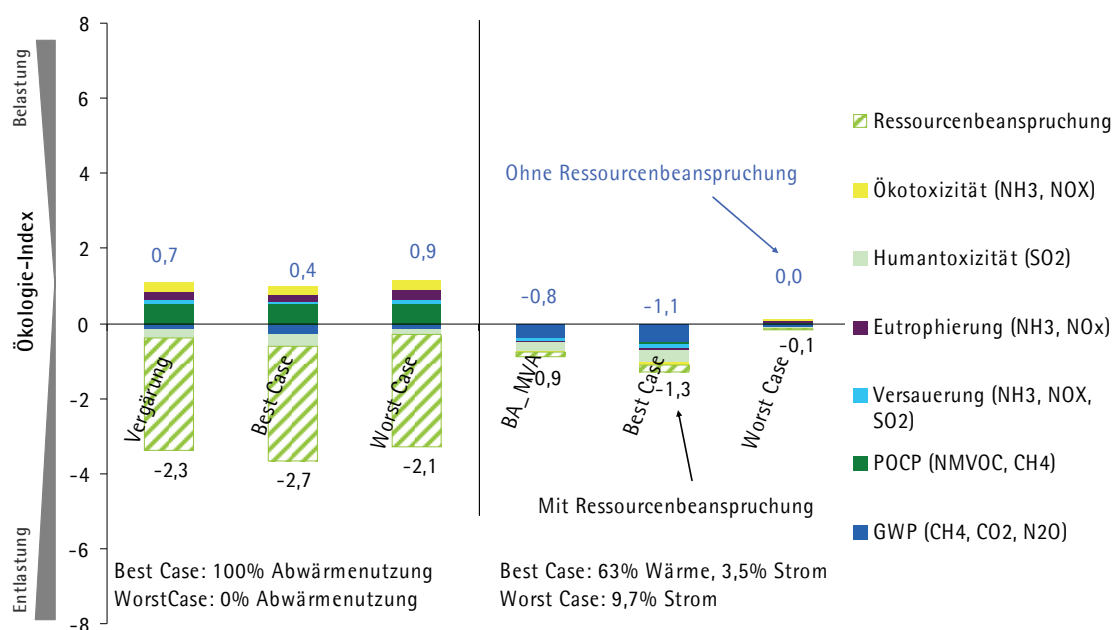


Abbildung 6.3: Variation der Abwärmenutzung für ausgewählte Verfahren. Beiträge der Wirkungskategorien zum Ökologie-Index der Vergleichsszenarien. Für jedes Verfahren sind zwei Ökologie-Indizes angegeben: Mit Berücksichtigung der Wirkungskategorie Ressourcenbeanspruchung (schwarz) bzw. ohne deren Berücksichtigung (blau). GWP: Global Warming Potential. POCP: Photochemical Ozone Creation Potential.

Ein Ausbau der Abwärmenutzung führt zu kleineren Ökologie-Indizes und wirkt damit umweltentlastend. Ein Verzicht auf Abwärmenutzung steigert die Umweltbelastungen. Ursachen sind die zur erzeugten Fernwärmemenge proportionalen Gutschriften aus der Substitution der konventionellen Wärmeerzeugung. Die Wirkungskategorien Treibhauspotenzial und Humantoxizität, quantifiziert durch SO_2 , sind am deutlichsten durch die Variation der Abwärmenutzung betroffen.

6.4 Bioabfalltrocknung zur Erzeugung einer Brennstofffraktion

Die folgende Abbildung zeigt die ökologische Gesamtwirkung der Trocknung unbehandelter Bioabfälle mit anschließender energetischer Verwertung abgetrennter heizwertreicher Fraktionen im Vergleich zu den bisher betrachteten Kompostierverfahren.

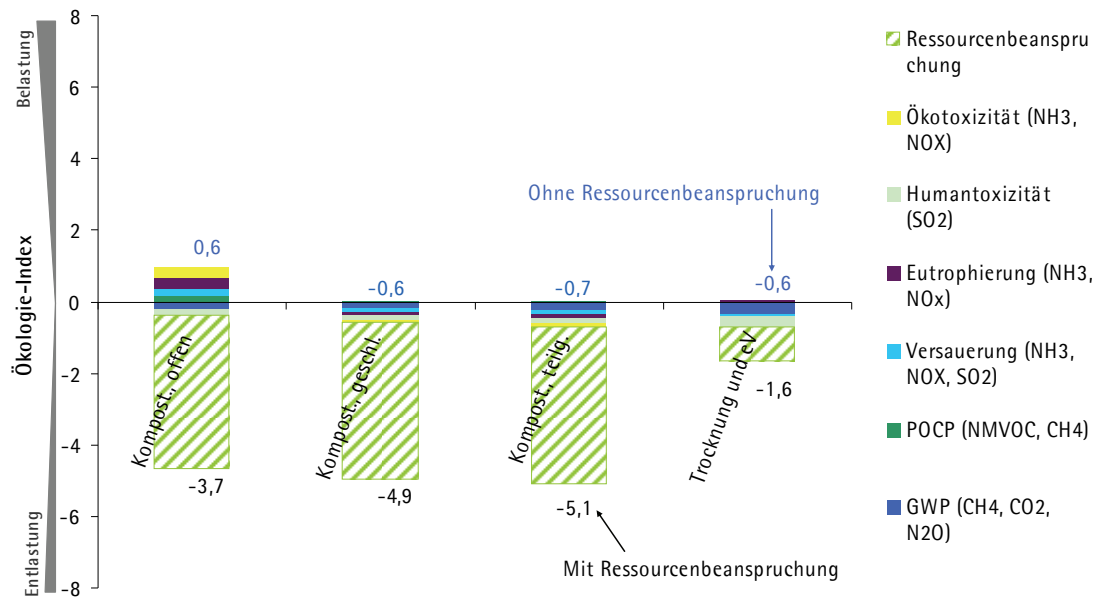


Abbildung 6.4: Trocknung unbehandelter Bioabfälle und energetische Verwertung. Beiträge der Wirkungskategorien zum Ökologie-Index der Vergleichsszenarien. Für jedes Verfahren sind zwei Ökologie-Indizes angegeben: Mit Berücksichtigung der Wirkungskategorie Ressourcenbeanspruchung (schwarz) bzw. ohne deren Berücksichtigung (blau). GWP: Global Warming Potential. POCP: Photochemical Ozone Creation Potential.

Die Trocknung der Bioabfälle zur Ausschleusung einer energetisch verwertbaren Fraktion zielt primär auf die Erzeugung von Energie und verringert damit zwangsläufig die stofflich verwertbare Menge. Dies führt bei Berücksichtigung der Ressourcenbeanspruchung zu einer vergleichsweise geringen Umweltentlastung. Die, aufgrund der vergleichsweise geringen Kompostmenge, erheblich reduzierten Gutschriften aus der stofflichen Nutzung werden nicht durch die Bereitstellung einer größeren Energiemenge aufgewogen. Betrachtet man die Ressourcenbeanspruchung nicht, erweist sich die Verfahrensvariante als Alternative zu teil-/geschlossenen Kompostierverfahren. Der Ökologie-Index weist für alle Verfahren eine sehr ähnliche Umweltentlastung aus.

Im Vergleich zur Mitbehandlung in der MVA (vergleiche Abbildung 5.1) ergibt sich bei der Betrachtung ohne Ressourcenbeanspruchung keine Verbesserung, da die Gutschriften für bereitgestellte Energiemengen, die sich als Produkt aus Heizwert, Mengenanteil der Brennstofffraktion und Wirkungsgrad der Energieerzeugung errechnen, etwas geringer ausfallen.

7 Potenziale der Entsorgungsverfahren

7.1 Umfeldchancen und –risiken

Wie der Vergleich zeigt, haben die betrachteten Verwertungsverfahren rein immanente, kaum beeinflussbare, ökologische Stärken beziehungsweise Schwächen. Außerdem bestehen bezogen auf die erzeugten Produkte grundsätzlich unterschiedliche Intentionen. Zur Beantwortung der Frage nach den Stellschrauben, um die einzelnen Verfahren zu verbessern, liefert deshalb die Gegenüberstellung der Verfahren nur einen Teil der Antworten. Die Beurteilung der Chancen und Risiken, das heißt der Potenziale, der Verwertungsverfahren muss im Kontext des Anlagenumfelds vor Ort stattfinden. Die konkrete Analyse der Umfeldchancen und –risiken wird deshalb Bestandteil der Fallstudien sein. An dieser Stelle der grundsätzlichen Verfahrensbewertung kann nur skizziert werden, welche Leitfragen im Kontext der Umfeldparameter bei der Identifizierung der Chancen und Risiken zu beantworten sind.

Leitfragen Entsorgungsumfeld / Abfallerfassung

- Werden Bioabfälle und/oder Grüngut getrennt, in eigenständiger Sammlung oder als Teil des Hausabfalls in der Restabfallsammlung erfasst?
- Die Verwertungsverfahren eignen sich nur für bestimmte Arten der biogenen Abfälle. Haben die erfassten Bioabfälle einen hohen beziehungsweise geringen Anteil an Küchenabfällen? Ist das bereitgestellte Grüngut strauchtig beziehungsweise strukturarm?
- Ist das Hauptkriterium zur Auswahl des Entsorgungsverfahrens die Gewährleistung einer möglichst preisgünstigen Entsorgung oder tragen, im Zuge der Nachhaltigkeitsdebatte, Kriterien wie Ressourcenbeanspruchung oder Klimaschutz die Entscheidung?

Leitfragen Anlagenbetrieb / Umgang mit den Abfällen

- Erfolgt die Betriebsführung nach dem Stand der Technik beziehungsweise nach guter fachlicher Praxis? Die Höhe der Emissionen hängt nicht in erster Linie vom Verfahren oder der Behandlungstechnik ab. Für die Betriebsführung sind zu berücksichtigen: Bioabfallzusammensetzung, Strukturanteil, Wassergehalt, Belüftung, Umsetzen, Mietengeometrie [Cuhls 2008].
- Erfolgen das Lagern und das Ausbringen der stofflichen Produkte nach dem Stand der Technik, um besonders die Emission N-haltiger Verbindungen zu minimieren?
- Stellt die Qualität der stofflichen Produkte die potenziellen Abnehmer zufrieden?

Leitfragen Produktnachfrage / Nutzungsmöglichkeiten

- Bestehen im lokalen oder regionalen Umfeld hochwertige Absatzmöglichkeiten für die organische Substanz und die Nährstoffe aus den Komposten oder finden sich keine Abnehmer für die stofflichen Produkte?
- Reagiert das Verwertungsverfahren flexibel auf Änderungen in der Nachfragesituation (Energie-, Düngerpreise, Konkurrenzprodukte, Nutzenkonflikte) und stellt es ein qualitativ hochwertiges Produkt bereit?
- Bestehen im lokalen oder regionalen Umfeld Absatzmöglichkeiten für thermische Energie (Prozessdampf oder Fernwärme) beispielsweise durch Abnehmer direkt vor Ort oder durch Einspeisung in vorhandene Leitungsnetze?

Der Verfahrensvergleich zeigt, dass die Ökoeffizienz eines Verfahrens nicht allein durch das ausgewählte Verwertungsverfahren bestimmt ist. Vielmehr ist die Steigerung der Ökoeffizienz eine Aufgabe, die im Zusammenspiel der Anlagenbetreiber, der öRE und der Produktanwender zu lösen ist.

7.2 Kompostierung

7.2.1 Verfahrensstärken / Schwächen

Die geringen Unterschiede zwischen geschlossener beziehungsweise teilgeschlossener Kompostierung weisen keine signifikanten Ökoeffizienz-Vorteile für eine der Varianten aus. Die offene Kompostierung von Bioabfällen, die in der Praxis nur noch geringe Bedeutung hat, ist dagegen mit größeren Umweltbelastungen verbunden.

7.2.1.1 Emissionsminderungspotenziale

Mit dem Kompostierbetrieb sind Umweltbelastungen durch die Emissionen C-/N-haltiger Verbindungen verbunden. Deren Menge ist zu allererst das Ergebnis einer entsprechenden Betriebsführung. Der folgende Abschnitt fasst die Potenziale für einen emissionsarmen Betrieb zusammen.

7.2.1.1.1 Anforderungen an das Inputmaterial

C/N-Verhältnis

Es ist ein C/N-Verhältnis zwischen 25 und 35 sicherzustellen. N-Überschuss im Ausgangsmaterial (z.B. Gärrückstände, Bioabfälle mit hohem Anteil an Küchenabfällen, Küchen- und Speiseabfälle) muss durch Zugabe von Baum- oder Strauchschnitt ausgeglichen werden. Ein zu hoher Anteil an holzreichem Grünschnitt steigert allerdings die N₂O-Emissionen, da in diesem Fall kein Einbau von mineralischem Stickstoff in die Biomasse bzw. Organik möglich ist. NH₃-Emissionen steigen bei geringem C/N-Verhältnis besonders bei hohen Rottetemperaturen und hohen Belüftungsraten. Bei der Grüngutkompostierung sind, aufgrund der Zusammensetzung des Ausgangsmaterials, geringere NH₃-Emissionen zu erwarten.

Strukturmaterial

Der Anteil an strukturbildenden Materialien (Siebüberlauf, Shreddergut) sichert die Luftführung in der Miete und sollte daher einen Volumenanteil von 40 bis 60 % haben.

Wassergehalt

Der Wassergehalt im Ausgangsmaterial sollte maximal 65 bis 70 % betragen. Während der Kompostierung sollten 50 bis 60 % aufrechterhalten werden.

7.2.1.1.2 Emissionsminderung im Betrieb

Die Maßnahmen zur Emissionsminderung wurden aus [Cuhls 2008] und [Lebensministerium 2005] übernommen.

Tabelle 7.1: Emissionsminderungspotenziale bei der Kompostierung. Quellen: [Cuhls 2008], [Lebensministerium 2005].

Emission	Ursache	Emissionsminderung durch Betriebsführung	Möglichkeit zur Abluftreinigung bei geschlossenen Anlagen
CH ₄	Emissionen > 2.000 g/t Input sind das Ergebnis unbefriedigender Prozessführung (z.B. hohe Wassergehalte, unzureichende Sauerstoffversorgung). Maximalwerte bis 12.000 g/t Input weisen auf anaeroben Umsatz hin	Bemischen von Strukturmaterial und häufiges Umsetzen Feuchteoptimierung (kontrollierte Bewässerung bzw. Abdeckungen) zum Vorbeugen von Vernässung Kontinuierliche Sauerstoffversorgung durch: <ul style="list-style-type: none"> ■ Offene Systeme: großes Oberflächen-Volumen-Verhältnis, ausreichend strukturreiches Material, kurze Umsetzintervalle ■ Geschlossene Systeme: aktive Belüftung, Ein-/Ausstragsysteme und Umsetzerbetrieb 	Reduzierung im Biofilter ist sehr gering
NH ₃	Direkt abhängig vom C/N-Verhältnis im Input. NH ₃ -Emissionen steigen bei geringem C/N-Verhältnis besonders bei hohen Rottetemperaturen und hohen Belüftungsraten	C/N-Verhältnis zwischen 25 bis 35 Feuchteoptimierung (kontrollierte Bewässerung bzw. Abdeckungen) zum Vorbeugen von Vernässung	Bei vorhandener Einhausung mit Biofilter wird NH ₃ im Wäscher oder am Biofiltermaterial sorbiert und abgeschieden. Die Minderungsgrade im Biofilter können bis ca. 90 % betragen. Allerdings führt die NH ₃ -Abscheidung im Biofilter stets zur Bildung von N ₂ O und NO. Vorschaltung eines sauren Wäschers zur Ammoniakabsorption ist daher bei hohen Konzentrationen im Rohgas empfehlenswert.
N ₂ O	N ₂ O-Bildung erfolgt entweder in späten Rottephasen bei Temperaturen unter 40°C oder durch Umbau von NH ₃ im Biofilter. Höhere Umsetzhäufigkeit und Belüftung fördert bei sinkenden Temperaturen die	C/N-Verhältnis zwischen 25 und 35, gute Homogenisierung Feuchteoptimierung zum Vorbeugen von Vernässung Für geschlossenen Anlage mit Biofilter: <ul style="list-style-type: none"> ■ NH₃-Strippen zu Beginn der thermophilen Rottephase¹⁾ 	Keine Reduktion im Biofilter

Emission	Ursache	Emissionsminderung durch Betriebsführung	Möglichkeit zur Abluftreinigung bei geschlossenen Anlagen
	Bildung als Zwischenprodukt der Nitrifikation bzw. Denitrifikation	<ul style="list-style-type: none"> ■ Prozesstemperatur von über 40°C bis zu 55/65°C zu Rottebeginn²⁾ ■ In der Nachrotte sind die Umsetzintervalle und die damit im Zusammenhang stehenden Wärmeverluste zu reduzieren³⁾ 	

¹⁾ Durch den damit verbundenen Stickstoffverlust weitet sich das C/N-Verhältnis auf. Die Folge eines weiten C/N-Verhältnisses ist, dass die potentielle N₂O-Bildung in der Nachrotte minimiert wird.

²⁾ Trägt grundsätzlich dazu bei, das Abfallmaterial zu hygienisieren und die Nitrifikationsprozesse zu unterdrücken. Im Sinne der Qualitätsbildung (Ligninabbau, Huminstoffaufbau) aber auch zur Reduktion von Geruchsemissionen sollten Temperaturen über 55 bzw. 65 °C möglichst nur für die Dauer der erforderlichen Hygienisierung aufrechterhalten werden.

³⁾ Um einer Lachgasbildung vorzubeugen, sollten in der Rotte Temperaturen von 40°C nicht unterschritten werden.

Geschlossene Anlagen mit Biofilter

In erster Linie bestimmen betriebliche Ursachen das Emissionsgeschehen. Geschlossene Systeme bringen im Fall von ungünstigen Standortverhältnissen den Vorteil einer hohen NH₃-, NMVOC-, Geruchs-, Keim-, und Staubabscheidung mit sich. Für die Reduktion von CH₄ und N₂O sind Filter nahezu ohne Wirkung beziehungsweise begünstigen sie die N₂O-Bildung.

Offene Systeme

Da sich CH₄ und N₂O im Biofilter nicht reduzieren lassen, sind offene Systeme bezüglich der Klimagasemissionen pauschal zunächst nicht schlechter einzustufen als geschlossene Systeme. Die Emissionen von NH₃ sind bei Bio- und Grünabfall im Vergleich zu geschlossenen Systemen mit Biofilter höher. Optimal betriebene Verfahren können zwar sehr geringe Emissionsfaktoren erreichen, sie reagieren aber sehr empfindlich auf äußere Einflüsse. Die in verschiedenen Anlagen vorgefundenen Bedingungen sind bzgl. der Sauerstoffversorgung in folgenden Punkten verbesserungswürdig:

- Zu große Mietenquerschnitte: reduziertes Oberflächen-Volumen-Verhältnis
- Fehlendes Strukturmaterial; geringe Porosität
- Lange Umsetzintervalle: Inhomogenität, Verdichtung

7.2.2 Ausschleusen heizwertreicher Fraktionen

Das Ausschleusen der Siebüberläufe aus der Kompostaufbereitung zur energetischen Verwertung bietet interessante Perspektiven:

- Verbesserung der Erlössituation und höhere Flexibilität im Produktabsatz durch Bereitstellung einer Brennstofffraktion
- Reduzierung der Umweltbelastungen durch Gutschriften aus der Substitution fossiler Energieträger. Besonders entlastend wirken die Gutschriften durch die Substitution von CO₂ und SO₂ in den Wirkungskategorien Treibhauspotenzial und Humantoxizität.

Die betriebliche Praxis der Kompostierung erfordert Strukturmaterial, für das der Siebüberlauf ebenfalls eingesetzt wird. Die Menge der Fraktionen zur energetischen Verwertung ist daher begrenzt.

7.2.3 Umfeldchancen und Risiken

Die Kompostierung benötigt strukturreiches Ausgangsmaterial. Das heißt, bei der Kompostierung von Bioabfällen aus der Sammlung der örE ist bei hohen Anteilen von strukturarmen, nassen Materialien Strukturmaterial zuzugeben.

Das positive, ökologische Gesamtergebnis wird vor allem durch die umfassende und hochwertige Nutzung der Komposte bestimmt. Das bedeutet, in allen weiteren Anwendungsgebieten werden die Kompostnährstoffe zur Substitution mineralischer Dünger eingesetzt. Zusätzlich wird auch die organische Substanz im vollen Umfang genutzt. Neben der Substitution von Torf/Rindenumus im Erdenwerk, führt besonders die angenommene Substitution des Ackergrasanbaus im Rahmen der Humus-C Reproduktion in der Landwirtschaft zu Gutschriften. Sollten beispielsweise durch Marktentwicklungen die Absatzmöglichkeiten für die stofflichen Produkte nicht gegeben sein oder sich die Substitutionssituation in Realität nicht einstellen, führt die hohe Abhängigkeit von der Umfeldsituation zu einer Verringerung der Ökoeffizienz. Auch das Ausschleusen der heizwertreichen Fraktion setzt voraus, dass im Umfeld der Anlage eine entsprechende Nachfragesituation gegeben ist, das bedeutet, es lässt sich ein Biomassekraftwerk finden, das den Brennstoff zu möglichst günstigen Konditionen abnimmt.

Die Produkte aus der Kompostierung sind vielfältig einsetzbar. Neben den Düngernährstoffen wird organische Substanz bereitgestellt, die als Ersatz für Torf/Rindenumus, als Humus-C Lieferant oder als C-Speicher genutzt wird. Durch das Ausschleusen der Siebüberläufe zur energetischen Verwertung erweitert sich der Nutzen aus der Kompostierung um Strom und Wärme. Umweltvorteile ergeben sich bei guter Betriebsführung und einem geeigneten Anlagenumfeld insbesondere durch das Schließen von Stoffkreisläufen, die Schonung von Ressourcen und beim Klimaschutz.

7.3 Vergärung

7.3.1 Verfahrensstärken / Schwächen

Im Vergleich zur teil-/geschlossenen Kompostierung liegt das Emissionsniveau der Vergärung inklusive Nachrotte der festen Gärprodukte höher. Die Erzeugung von Biogas als Produkt des anaeroben Abbaus ist gekoppelt an erhebliche C-/N-Emissionen beim Handling der Gärprodukte. Die Stärke der Vergärung, die umfassende Nutzung des Energieinhaltes der Bioabfälle, tritt dadurch aus ökologischer Sicht in den Hintergrund.

7.3.1.1 Emissionsminderungspotenziale

Nach [Cuhls 2008] sind folgende Behandlungsstufen die Hauptquellen für die Emissionen:

- CH₄: Vergärungsprozess⁴ (68%), Nachrotte Gärprodukte (28%)
- N₂O: Vergärungsprozess (13%), Nachrotte Gärprodukte (74%)

⁴ Der Vergärungsprozess beinhaltet: Fermenter, Abpressung der Gärrückstände, Bereitstellung der festen Gärprodukte und Zwischenlagerung der flüssigen Gärprodukte

- NH_3 : Vergärungsprozess (45%), Nachrotte Gärprodukte (50%)

Ursachen für das hohe Emissionsniveau sind nach [Cuhls 2008]:

- Eine offene Lagerung des flüssigen Gärproduktes begünstigt CH_4 -Emissionen aus der Nachvergärung
- Anhaltend anaerobes Milieu der festen Gärprodukte in der Nachrotte
- Spezifisch erhöhte NH_3 und N_2O -Emissionen aus der Nachrotte

Die im Rahmen dieser Arbeiten verwendeten Angaben zu den Emissionen sind Messwerte aus kontinuierlichen Trockenvergärungsanlagen. Mitglieder des Projektbeirates vermuten geringere Emissionen für die Nassvergärung. Dies scheint nicht unwahrscheinlich, da beim Umgang mit einem pumpfähigen Substrat keine Leckagen an den Schnittstellen der Vergärungsstufe zu erwarten sind. Unabhängig davon sind allerdings die erheblichen Emissionen aus der Nachrotte.

Durch den gewünschten aeroben Abbau von Kohlenstoff und Stickstoff aus dem biogenen Material ist die Entstehung von Methan und Ammoniak verfahrensimmanent. Emissionsminderungspotenziale nach [Cuhls 2008] bestehen deshalb primär beim Umgang mit den flüssigen und festen Gärprodukten:

- Konditionierung der Gärrückstände (z.B. Temperatur)
- Gasdichte Kapselung des Lagertanks für flüssigen Gärrückstand
- Gaspendelleitung des Lagertanks für Biogas aus Nachgärung
- Entlüftung des Lagertanks und Zuführung als Verbrennungsluft zum BHKW
- Aerobisierung der festen Gärrückstände
- Ammoniakabscheidung in saurer Wäsche

7.3.1.2 Energieerzeugung

Mit Blick auf die Umweltwirkungen, insbesondere den Klimaschutz und die Erlössituation ist die Maximierung der erzeugten Biogasmenge und deren Nutzung zur Erzeugung von Strom und Wärme bei möglichst hohen Wirkungsgraden anzustreben.

Im Anlagenbetrieb stehen Maximierung der Biogausbeute und Anlagendurchsatz in Konkurrenz. Die erzeugte Biogasmenge steigt mit längerer Verweilzeit, während bei kürzerer Verweilzeiten die behandelte Menge und die oftmals daran gekoppelten, tonnagebezogenen Erlöse zunehmen.

7.3.1.3 Stoffliche Produkte

Für ein nachhaltiges Verfahren genügt es nicht allein auf die Energieerzeugung abzielen. Ebenso wichtig ist die Bereitstellung möglichst hochwertiger, stofflich verwertbarer Produkte. In der Praxis erfolgt dies durch die Nachbehandlung des Outputs der Vergärungsstufe. In der Regel werden ein flüssiger Gärrest und nach Nachrotte ein Kompostprodukt erzeugt. Bei der Erzeugung dieser Produkte ist der Verlust an Nährstoffen beispielsweise durch Abwässer oder Verzicht auf die stoffliche Nutzung des Gärprodukts zu minimieren.

Aus ökologischer Sicht bietet die energetische Nutzung von Gärrückständen keine wesentliche Perspektive, soweit für die Produkte (Pflanzennährstoffe und organische Substanz) eine Nachfrage besteht. Lenkungsmaßnahmen, die eine thermische Nutzung von Gärrückständen gegenüber deren stofflichen Verwertung begünstigen, sind dahingehend zu beurteilen.

7.3.2 Umfeldchancen und -risiken

Die Vergärung bevorzugt energiereiche und strukturarme Substrate. Bioabfälle mit einem hohen Anteil an Küchenabfällen sind für die Vergärung besonders gut geeignet.

Die Verwertung des Biogases ist über die Einspeisevergütung des EEG sichergestellt. Neben der Möglichkeit Biogas am Standort in einem BHKW zu verwerten, ist, sofern die Infrastruktur vorhanden ist, auch das Einspeisen in ein Erdgasnetz möglich.

Erhebliche Potenziale bestehen besonders hinsichtlich der Nutzung der entstehenden Abwärme. Die im Rahmen dieser Untersuchung durchgeführten Betrachtungen bestätigen, dass eine möglichst umfassende anlagenexterne Nutzung der erzeugten thermischen Energie die Ökoeffizienz der Vergärung deutlich steigern wird. Es bestätigt sich, dass die Effizienzpotenziale ohne Berücksichtigung des Anlagenumfeldes nicht ausgeschöpft werden können.

Die Chancen und Risiken für die kompostierten Gärprodukte ergeben sich analog zu Kapitel 7.2.3. Die Entsorgung der flüssigen Gärreste ist im Vergleich zu Komposten tendenziell schwieriger zu realisieren. Neben der Behandlung in einer externen oder eigenen Kläranlage können sie als Flüssigdünger in der Landwirtschaft verwertet werden. Beim Ausbringen besonders der flüssigen Gärreste sind erhebliche Emissionen N-haltiger Verbindungen möglich, so dass ein Ausbringen nach dem Stand der Technik unbedingt erforderlich ist.

7.4 Mitbehandlung als Teil des Restabfalls in der MVA

7.4.1 Verfahrensstärken / Schwächen

Bei der thermischen Behandlung wird ausschließlich der Energieinhalt der biogenen Stoffe zur Erzeugung von Strom und Wärme bei relativ hohen Wirkungsgraden genutzt. Auf jegliche Nutzung der stofflichen Eigenschaften, beispielsweise Nährstoffe, der Bioabfälle wird aktuell noch verzichtet.

Fokussiert man die Betrachtung auf die Entsorgungssicherheit ist die Mitbehandlung der Bioabfälle als Teil des Restabfalls eine umweltschonende Option. Die mit der thermischen Behandlung verbundenen Belastungen sind in allen Wirkungskategorien, die Umweltschäden beschreiben, im Verfahrensvergleich die geringsten. Ursache für die geringen Belastungen in den Kategorien Versauerung, Eutrophierung und Ökotoxizität ist, dass die Belastungen durch CH_4 , NH_3 und NMVOC bei der Oxidation von Bioabfall und Grüngut im Rahmen der thermischen Behandlung nicht auftreten. Nach Berücksichtigung der Gutschriften ergeben sich für die thermische Behandlung sogar für alle betrachteten Wirkungskategorien Umweltentlastungen.

Möglicherweise könnte künftig die Rückgewinnung von Phosphor aus den Aschen helfen, die Potenziale der thermischen Behandlung auch mit Blick auf die Ressourcenbeanspruchung auszuerschöpfen.

7.4.2 Umfeldchancen und -risiken

Sowohl Umfeldchancen als auch Umfeldrisiken ergeben sich aus der alleinigen Nutzung des Energieinhaltes. Die gesamte Bandbreite der Nutzungspotenziale der Bioabfälle ist damit auf ein Minimum limitiert. Mit Blick auf den Klimaschutz ist die Maximierung der CO_2 -neutralen Energieerzeugung konsequent. Erweitert man allerdings den Kriterienkatalog zur Identifikation eines nachhaltigen Ver-

fahrens um Ressourcenbeanspruchung und das Schließen von Stoffkreisläufen sind die Möglichkeiten der thermischen Behandlung limitiert.

7.5 Häckselgut

7.5.1 Verfahrens Stärken / Schwächen

Das Ausbringen von gehäckseltem Grüngut kann vereinfacht als offene Rotte ohne jegliche gesteuerte Betriebsführung interpretiert werden. Es ist fraglich, auf welche Weise ein Abbau des Grünguts stattfindet. Ein geeigneter Abbau ist die Voraussetzung dafür, dass sich die Nutzenspotenziale aus den Nährstoffen entfalten können.

Untersuchungsbedarf besteht darin, zu klären, welche Emissionen beim Ausbringen des Häckselguts auftreten. Die dazu im Rahmen dieses Vorhabens getroffene Annahme ist nur eine qualifizierte Näherung. Neben den bilanzierten Umweltwirkungen sollte die mögliche phytotoxische Wirkung des Häckselguts beachtet werden.

Unabhängig von der ökologischen Wirkung ist das Ausbringen von Häckselgut eine preisgünstige Strategie zur Grüngutentsorgung.

7.5.2 Umfeldchancen und -risiken

Das Ausbringen als Häckselgut nutzt im Wesentlichen den Nährstoffgehalt des Grünguts. Der Energieinhalt bleibt hingegen ungenutzt, und Umweltvorteile durch die Zufuhr der organischen Substanz sind bei gehäckseltem Grüngut kaum abschätzbar. Mit Blick auf die Nutzung der Ressource Grüngut ist dieser Ansatz wenig vorteilhaft.

7.6 Energetische Verwertung heizwertreicher Fraktion

7.6.1 Verfahrens Stärken / Schwächen

Die energetische Verwertung von Grüngut ist nur für eine spezielle Fraktion, die heizwertreichen Anteile als Entsorgungsweg geeignet. [Kranert 2008] quantifiziert den jahreszeitlich durchschnittlichen Abschöpfungsgrad für einen Einzelbetrieb auf 25 bis 35%. Dies betrifft besonders die holzigen Anteile, die im Rahmen der Grüngutkompostierung ohnehin schlecht abgebaut werden. Die energetische Verwertung ist damit eine Ergänzung zur Grüngutkompostierung und kein Konkurrenzverfahren.

Mit Blick auf die ökologischen Wirkungen ist die energetische Verwertung in allen Wirkungskategorien mit Entlastungen verbunden. Dies ist im Wesentlichen das Resultat der Gutschriften aus der Substitution der Energieerzeugung aus fossilen Quellen.

Mit Blick auf den Klimaschutz ist die Energieerzeugung aus biogenen Quellen optimal. Der Verzicht auf stoffliche Nutzung der Nährstoffe und der organischer Substanz fällt weniger ins Gewicht, da tendenziell schwer abbaubare Fraktionen betroffen sind.

7.6.2 Umfeldchancen und -risiken

Voraussetzung ist, dass sich ein regionaler Abnehmer identifizieren lässt, der Brennstoffe mit schwer zu standardisierender Stückigkeit und Feuchte einsetzt. In Bayern sind derzeit 359 Biomasseheizwerke

beziehungsweise Biomasseheizkraftwerke bekannt, die mit Holzhackschnitzeln betrieben werden [TfZ 2007] und damit als potenzielle Abnehmer in Frage kommen.

8 Szenarien zur Bioabfall-/Grüngutentsorgung

Im Folgenden werden die ökologischen und ökonomischen Wirkungen umfassender Änderungen im Umfeld der Entsorgung biogener Abfälle in Bayern in Form von Szenarien analysiert.

Die Zukunftsszenarien bilden nicht nur jeweils eine konkrete Entwicklung aus dem unmittelbaren Kontext der Entsorgung biogener Abfälle, wie beispielsweise die flächendeckende Einführung der getrennten Bioabfallfassung, ab. Vielmehr ist der Ansatz der betrachteten Szenarien breiter und basiert auf möglichen, übergeordneten gesellschaftlichen und wirtschaftlichen Entwicklungen. Bei den Szenarien handelt es sich nicht um Prognosen, sondern um eine Auswahl möglicher Entwicklungen der Umfeldbedingungen in der Zukunft. Selbstverständlich sind auch andere Entwicklungen denkbar. Die den Szenarien zugrunde liegenden Trends sind massive Preisanstiege bei Energieträgern und Rohstoffen, massiver Druck zur Kostensenkung und politische Maßnahmen in Richtung einer forcierten stofflichen Nutzung. Die Abbildung dieser Trends entfaltet in den jeweiligen Szenarien ein Bündel unterschiedlicher teils aber auch gleichgerichteter Entwicklungen bei der Entsorgung biogener Abfälle. Die betrachteten Szenarien weisen deshalb mit Blick auf die angenommenen Entwicklungen Überschneidungen auf.

Ziel der Szenarioanalyse ist es, die Stabilität der Bioabfall- und Grüngutentsorgung in Bayern gegenüber möglichen Entwicklungen zu prüfen und dabei mögliche Chancen und Risiken zu identifizieren.

8.1 Ist-Situation der Entsorgung biogener Abfälle in Bayern

Abbildung 8.1 zeigt die Mengen an Bioabfällen und Grüngut, die über die Erfassungssysteme der entsorgungspflichtigen Gebietskörperschaften in Bayern 2007 erfasst wurden. Zusätzlich ist die abgeschätzte Menge an Bioabfällen dargestellt, die als Teil des Restabfalls erfasst und der thermischen Behandlung zugeführt wird.

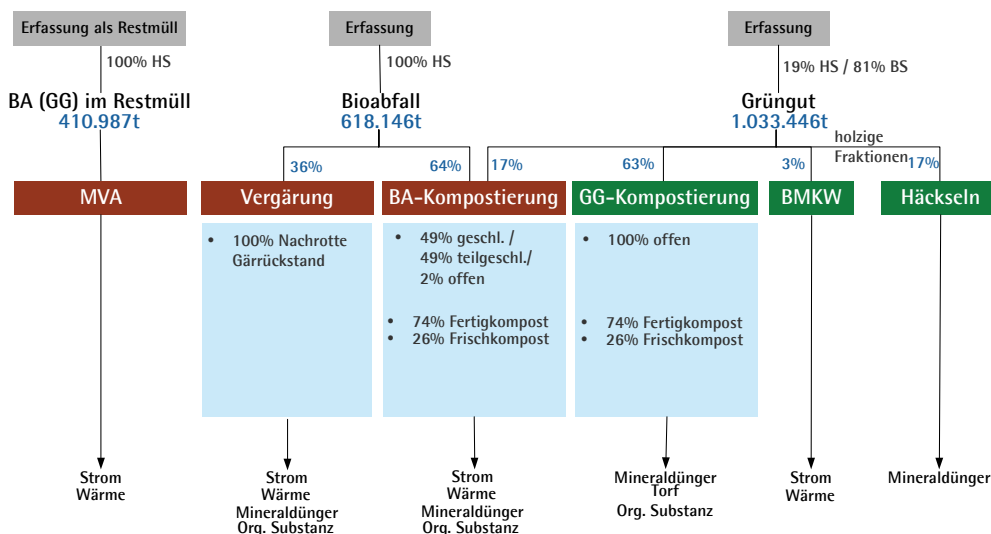


Abbildung 8.1: Ist-Situation Bioabfall-/Grüngutentsorgung in Bayern (BY-Ist). HS: Holsystem. BS: Bringsystem

Nach [LfU 2003] enthält der bayerische Hausmüll ca. 20 % Küchenabfälle und ca. 2 % Grüngut. Bezogen auf die bayerische Hausmüllmenge 2007 (1.842.168 t) entspricht dies einer Menge von ca. 410.987 t Küchenabfälle beziehungsweise Grüngut, die gemeinsam mit dem Hausmüll der thermischen Behandlung zugehen. Vereinfachend wird die Gesamtmenge der biogenen Abfälle im Restabfall als Bioabfall angenommen.

Die Gesamtmenge an Grüngut und Bioabfall einschließlich der Mengen im Restmüll beträgt 2,063 Mio. t und setzt sich zu jeweils 50 % aus Grüngut und Bioabfall zusammen. Ca. 60 % der Bioabfälle werden als eigenständige Fraktion erfasst und entsorgt, während ca. 40 % der Bioabfälle gemeinsam mit dem Hausmüll erfasst werden. Die Gesamtmenge an Bioabfällen und Grüngut liegt der Ermittlung der ökologischen und ökonomischen Wirkungen für das Stoffstromszenario der Ist-Situation der Entsorgung von Bioabfällen und Grüngut in Bayern (BY-Ist) und den Vergleichsszenarien als funktionelle Einheit zugrunde.

8.2 Charakterisierung der Zukunftsszenarien

Ausgehend von der Ist-Situation der Entsorgung kommunal erfasster Bioabfälle und Grüngut in Bayern werden 3 Zukunftsszenarien zur Beschreibung möglicher Entwicklungen skizziert:

- Szenario Ressourcenverknappung
- Szenario Vereinfachung der Entsorgung
- Szenario Stoffstromlenkung durch Politik

Die folgende Tabelle charakterisiert die Zukunftsszenarien anhand angenommener Entwicklungen und der sich unmittelbar daraus ergebenden Folgen.

Tabelle 8.1: Charakterisierung der Zukunftsszenarien.

Szenario	Angenommene Entwicklungen und unmittelbare Folgen
Ressourcenverknappung	Die Knappheit von Energieträgern und Rohstoffen führt zu drastischen Preisanstiegen bei Energie, Dünger und Transport. Die Entsorgungslandschaft wird durch <i>marktgesteuerte</i> Mechanismen bestimmt. Folgen: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Betriebsmittelaufwendungen steigen ▪ Erlössituation für die Bereitstellung von Energie und Komposten verbessert sich, so dass eine möglichst hochwertige Verwertung angestrebt wird ▪ Drastisch gestiegene Transportkosten befördern regionale Kreisläufe
Vereinfachung der Entsorgung	Drastisch wachsender Druck von Bürgern und Politik auf Kostensenkung und Vereinfachung der Entsorgung (ökonomische Optimierung) führt zu: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Schlanker Logistik ▪ Reduktion der Tonnenvielfalt und der Verfahrensvielfalt ▪ Ausbau der Förderung von Eigenkompostierung Folgen: <ul style="list-style-type: none"> ▪ ÖrE reduzieren den Aufwand für Erfassung von BA/GG / Abnahme der getrennten Erfassung ▪ Kostengünstige Verfahren werden vermehrt genutzt

Szenario	Angenommene Entwicklungen und unmittelbare Folgen
	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Anlagenbetreiber werden die Energienutzung im Rahmen der bestehenden Anlagemöglichkeiten optimieren
Stoffstromlenkung	<p>Der Gesetzgeber fördert massiv die stoffliche Nutzung der BA/GG durch folgende Maßnahmen:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Getrennte Bioabfallsammlung für die örE verpflichtend ▪ Neues Bodenschutzgesetz mit dem Fokus die Tragfähigkeit von Böden zu sichern ▪ Gesetzliche Regelungen fordern geschlossene Anlagen und legen strenge Grenzwerte für C-/N-haltige Emissionen fest ▪ Eigenkompostierung wird nicht mehr gefördert ▪ EEG-Förderung steigt deutlich bei Abwärmenutzung / Einspeisung in Erdgasnetz ▪ Mautgebühren steigen drastisch <p>Folgen:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Ausbau der Holsysteme für BA ▪ Rückgang der BA-Mengen die gemeinsam mit Restabfall in MVA verwertet werden ▪ Keine offene Kompostierung von BA/GG

8.3 Quantifizierung der Zukunftsszenarien

Auf Basis der Charakterisierung fassen die folgenden Tabellen zusammen, welche Änderungen im Vergleich zur Ist-Situation zur Quantifizierung der Szenarien vorgenommen werden. Die Quantifizierung wurde in Abstimmung mit dem Projektbeirat abgeschätzt. Die ausführliche Beschreibung der Modellierung findet sich im Anhang.

Tabelle 8.2: Quantifizierung der Zukunftsszenarien. BA: Bioabfall, GG: Grüngut. Ausgangssituation siehe Abbildung 8.1. Angabe der Stoffströme in % der erfassten Menge.

BY-Ist	Ressourcenverknappung	Vereinfachung der Entsorgung	Stoffstromlenkung durch Politik
BA-Kompostierung (66% BA-Menge)	Reduktion auf 33%	Gleichbleibend 66%	Reduktion auf 33% Forcierung Emissionsminderung
BA-Vergärung (33% BA-Menge)	Ausbau auf 66%	Gleichbleibend 33%	Ausbau auf 66% Forcierung Emissionsminderung
BA-Behandlung in MVA (ca. 410.987t)	Reduktion um 25% durch Ausbau Getrenntsammlung	Steigerung um 50% durch Einschränkung Getrenntsammlung	Reduktion um 50% durch Maximierung Getrenntsammlung
GG-Kompostierung (80% GG-Menge)	Geringe Reduktion auf 75% (zur Hälfte offen bzw. geschlossen)	Reduktion auf 40% (100% offen)	Geringe Reduktion auf 75% (100% geschlossen)
GG als Häckselgut (17% GG-Menge)	Verzicht auf Häckselgut	Ausbau auf 50%	Verzicht auf Häckselgut
GG zur energetischen Verwertung (3% GG-Menge)	Ausbau auf 25%	Ausbau auf 10%	Ausbau auf 25%
Abwärmenutzung (25%)	Optimierte Abwärmenutzung (70%)	Verbesserte Abwärmenutzung (40%)	Optimierte Abwärmenutzung (70%)

Die folgende Abbildung zeigt die angenommene, prozentuale Verteilung der erfassten Bioabfall- und Grüngutmengen auf die Entsorgungswege.

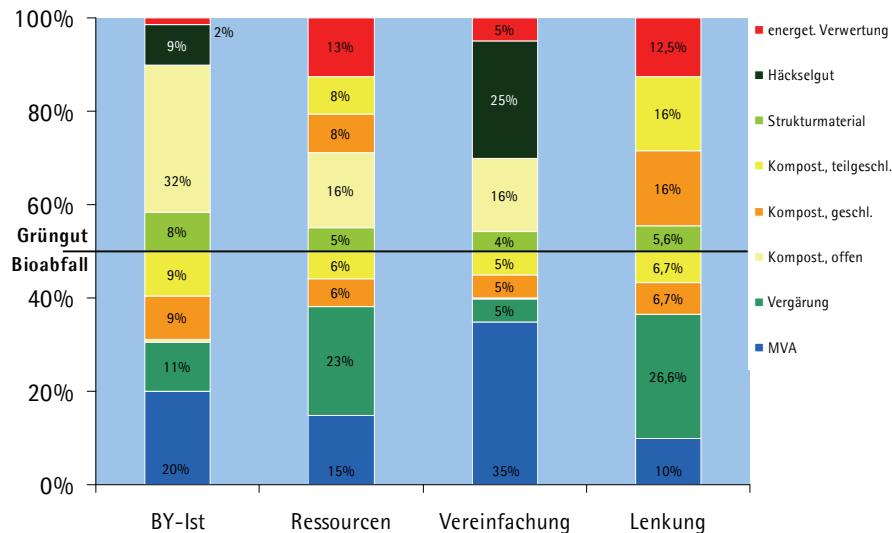


Abbildung 8.2: Modellierung der Zukunftsszenarien. Mengenströme und Entsorgungswege. Strukturmaterial zur BA-Kompostierung. %-Angaben gerundet.

Die folgende Tabelle fasst die angenommenen Änderungen der Entsorgungskosten zusammen. Ergänzende Erläuterungen finden sich im Anhang.

Tabelle 8.3: Modellierung der Zukunftsszenarien. Angenommene Entsorgungskosten. BA: Bioabfall, GG: Grüngut. Rot/grün markierte Zahlen: Kostensteigerung/-senkung im Vergleich zur aktuellen Situation.

Kosten [€/t]	BY-Ist	Ressourcenverknappung	Vereinfachung der Entsorgung	Stoffstromlenkung
Erfassung				
BA als Teil des Restabfalls [€/t]	55	69	55	55
BA Holsystem [€/t]	77	95	84	62
GG Holsystem [€/t]	77	95	77	77
GG Bringsystem [€/t]	29	36	29	29
Entsorgung				
MVA [€/t]	100	100	90	107
BA-Vergärung [€/t]	72	72	65	72
BA-Kompostierung, offen [€/t]	35	35	32	35
BA-Kompostierung, geschlossen / teilgeschlossen [€/t]	65/48	65/48	59/43	65/48
GG-Kompostierung, offen [€/t]	30	30	27	--
GG-Kompostierung, geschlossen / teilgeschlossen [€/t]	--	65/48	--	65/48
Häckselgut [€/t]	18	--	16	--
Energetische Verwertung [€/t]	11	11	10	11

8.4 Ökoeffizienzvergleich der Szenarien

8.4.1 Zusatznutzen aus der Entsorgung

In der folgenden Tabelle ist abgebildet, welche Zusatznutzen die Szenarien über die eigentliche Entsorgungsleistung hinaus bereitstellen. Die Zusatznutzen sind in drei Klassen differenziert: Bereitstellung von Energie, Düngernährstoffen und organischer Substanz.

Tabelle 8.4: Modellierung der Zukunftsszenarien. Entsorgung von 2.062.579 t Bioabfällen und Grüngut. Seq. Kohlenstoff: sequestrierter, das heißt im Boden gespeicherter Kohlenstoff.

		BY-Ist	Ressourcenverknappung	Vereinfachung der Entsorgung	Stoffstromlenkung
Energie	Elektrisch [MWh]	221.527	416.913	251.415	468.287
	Thermisch [MWh]	270.697	764.591	443.907	705.129
Dünger	Stickstoff [t]	2.377	2.326	1.502	2.585
	Kalium [t]	6.086	5.125	5.610	5.682
	Phosphat [t]	3.300	3.109	2.549	3.584
	Kalk [t]	24.961	23.235	20.127	26.755
	Magnesium [t]	4.696	4.162	3.184	4.387
Org. Substanz	Torf/Rindenhumus [t]	59.683	59.857	30.001	65.709
	Humus-C [t]	21.095	21.161	10.593	22.907
	Seq. Kohlenstoff [t]	5.645	5.923	2.828	6.231

Die aktuelle Strategie zur Behandlung von Bioabfällen und Grüngut in Bayern stellte im Jahr 2007 über 480.000 MWh klimaneutral erzeugter Energie als Strom und Wärme zur Verfügung. Die Zukunftsszenarien steigern diese Energiemenge durch verbesserte Abwärmenutzung, Ausbau der energetischen Grüngutverwertung (Szenarien Ressourcenverknappung und Stoffstromlenkung) oder durch Einschränkung der Getrennterfassung im Szenario Vereinfachung.

Im Gegenzug zur aktuellen Entsorgungsstruktur werden allerdings im Szenario Vereinfachung der Entsorgung weniger Produkte zur stofflichen Nutzung als Dünger und organische Substanz erzeugt. Auch im Szenario Ressourcenverknappung wird aufgrund höherer Anteile zur Vergärung und zur energetischen Verwertung zuungunsten der Kompostierung eine etwas geringere Menge an stofflich verwertbaren Produkten bereitgestellt. Obwohl auch im Szenario Stoffstromlenkung die Kompostierung an Bedeutung verliert, sorgt die größere getrennt erfasste Bioabfallmenge dafür, dass die bereitstellte Menge an Dünger und organischer Substanz im Vergleich zur aktuellen Situation etwas gesteigert wird.

8.5 Umweltwirkungen und Ökologie-Index

Die folgende Abbildung zeigt für jedes Szenario den Ökologie-Index, das heißt den aggregierten Gesamtwert zur Beschreibung der Umweltwirkungen, differenziert nach den Beiträgen der Wirkungskategorien.

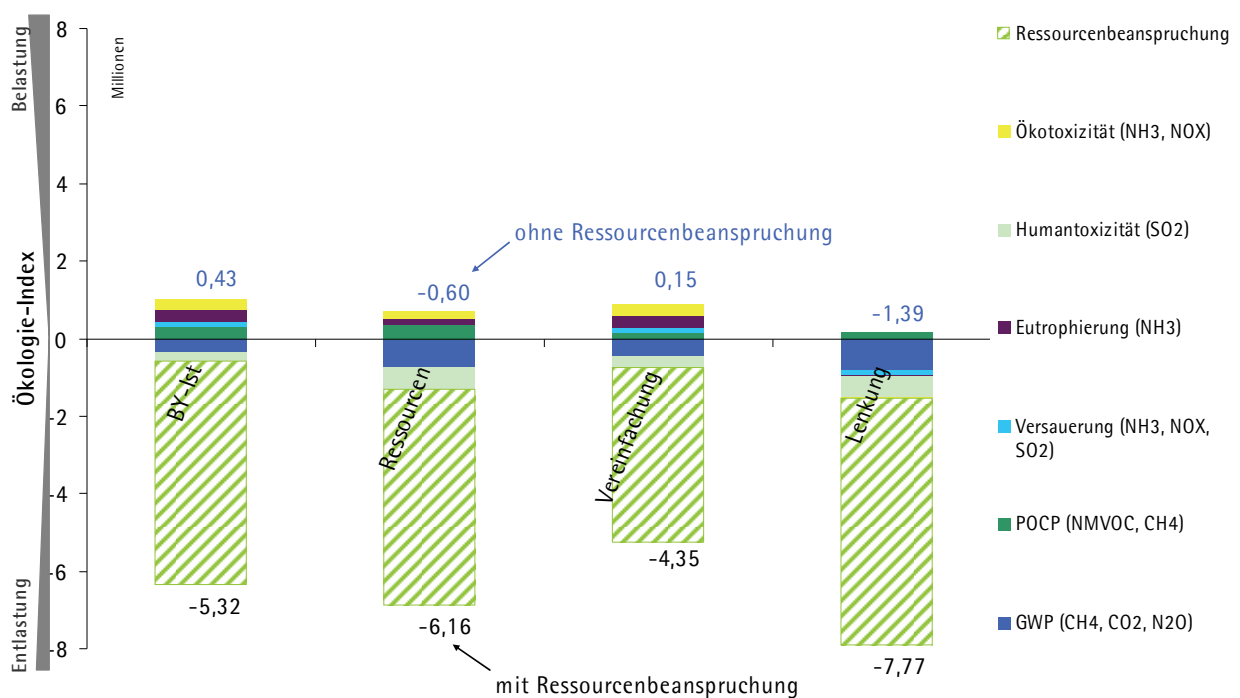


Abbildung 8.3: Szenarien zur Bioabfall-/Grüngutentsorgung. Beiträge der Wirkungskategorien zum Ökologie-Index der Vergleichsszenarien. Für jedes Verfahren sind zwei Ökologie-Indizes angegeben: Mit Berücksichtigung der Wirkungskategorie Ressourcenbeanspruchung (schwarz) bzw. ohne deren Berücksichtigung (blau).

Die aktuelle Situation und alle weiteren Szenarien sind klimaentlastend, das heißt mit Umweltentlastungen in der Wirkungskategorie Treibhauspotenzial (GWP) verbunden. Umweltentlastungen für alle Szenarien ergeben sich auch für die Ressourcenbeanspruchung und die Humantoxizität, quantifiziert durch den Parameter SO_2 .

Das Szenario der Stoffstromlenkung ist mit den größten Umweltentlastungen verbunden. In nahezu allen Wirkungskategorien ergeben sich Umweltentlastungen. Im Szenariovergleich am signifikantesten sind die Entlastungen bei Ressourcenbeanspruchung und Treibhauspotenzial.

Das Szenario der Ressourcenverknappung führt mit Blick auf die Umweltwirkungen ebenfalls, wenn auch im Vergleich zum Szenario Stoffstromlenkung zu geringeren, Entlastungen.

Ohne Berücksichtigung der Ressourcenbeanspruchung sind die Unterschiede der aktuellen Entsorgungssituation und dem Szenario der Vereinfachung nur gering. Der Verzicht auf die stoffliche Verwertung größerer Bioabfallanteile im Szenario Vereinfachung führt allerdings bei Berücksichtigung der Ressourcenbeanspruchung zur geringsten Umweltentlastung aller betrachteten Szenarien.

8.5.1 Entsorgungskosten

Die folgende Abbildung zeigt die Summe der Kosten für die Entsorgung der in Bayern erfassten 2.062.579 t Bioabfälle und Grüngut.

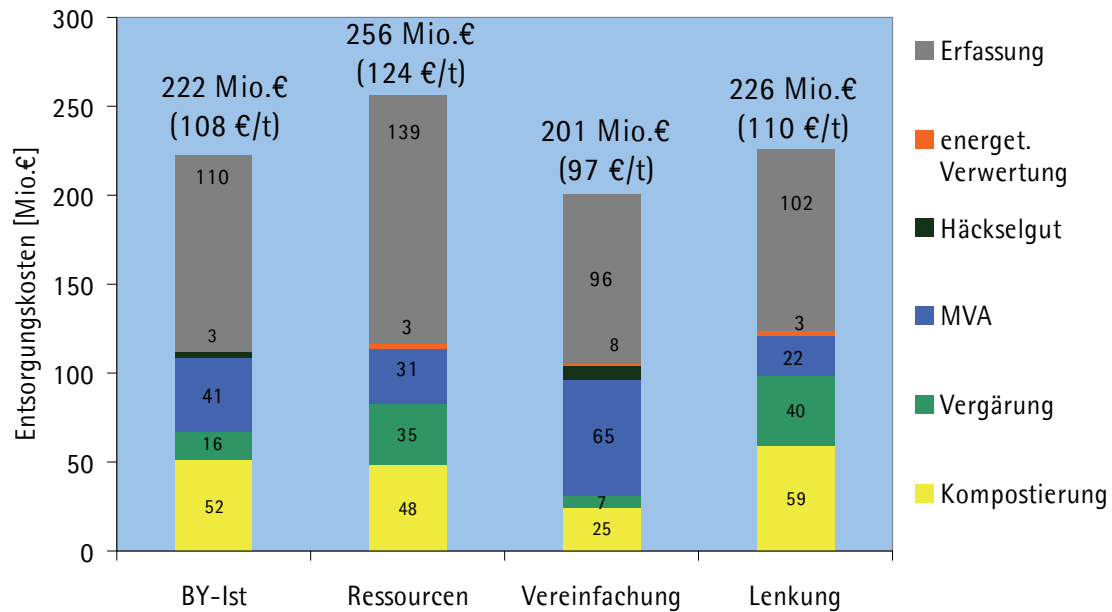


Abbildung 8.4: Szenarien zur Bioabfall-/Grüngutentsorgung. Gesamtkosten der Entsorgung (inklusive Erfassung) von 2.062.579 t Bioabfällen und Grüngut.

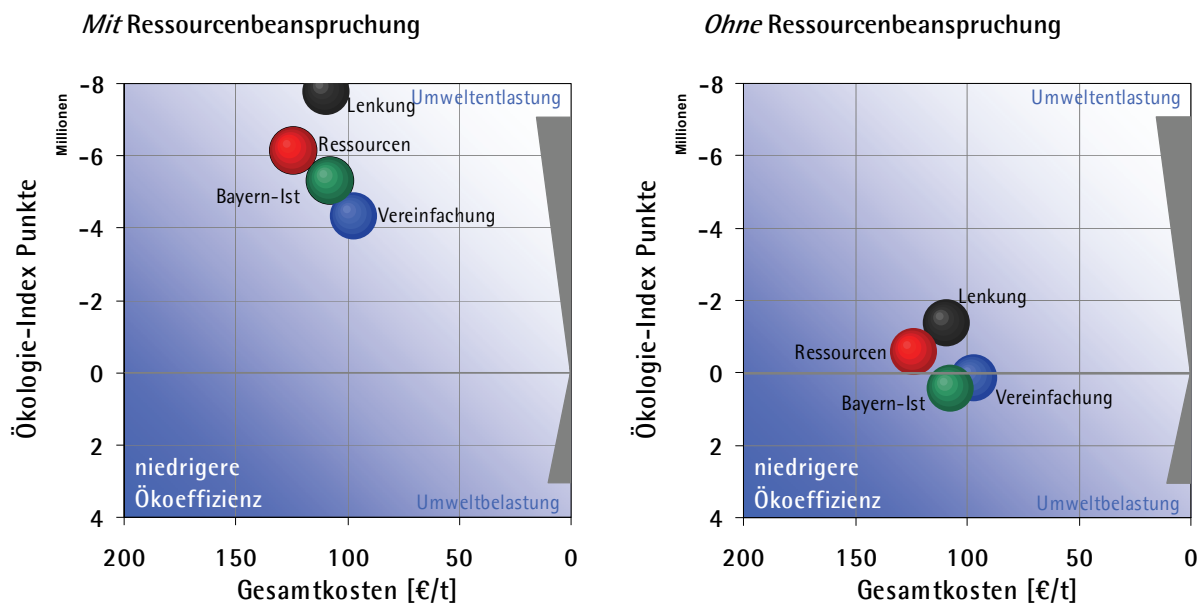
Auf Basis der in Tabelle 8.1 zusammengefassten tonnagebezogenen Kosten und den in Abbildung 8.2 dargestellten Mengenströmen ergeben sich für die **aktuelle Entsorgungssituation in Bayern (BY-Ist)** inklusive Erfassung Gesamtkosten von ca. 222 Mio €. Nahezu 50 % der Kosten fallen dabei auf die Erfassung von Bioabfall und Grüngut. Kompostierung und Mitbehandlung in der MVA sind die absolut kostenintensivsten Entsorgungswege.

Im Szenario **Ressourcenverknappung** liegen die Gesamtkosten ca. 15 % über der aktuellen Situation. Hauptursache ist vor Allem die angenommene Verteuerung der Erfassung aufgrund gestiegener Treibstoffkosten. Die getroffenen Annahmen zum Szenario Vereinfachung reduzieren die Entsorgungskosten nur um ca. 10%. Hauptstellschraube ist dabei die preisgünstigere Erfassung.

Die Gesamtkosten im Szenario **Stoffstromlenkung** sind nahezu identisch mit der aktuellen Situation. Eine günstigere, da optimierte Bioabfall-Erfassung und daran gekoppelt die Minimierung der als Restabfall in thermischen Behandlungsanlagen entsorgten Menge wirken kostensenkend. Die größere vergärende Menge steigert die Kosten im Vergleich zur aktuellen Situation.

8.5.2 Ökoeffizienzanalyse

In der folgenden Abbildung ist die Ökoeffizienz der betrachteten Szenarien im Vergleich zur aktuellen Entsorgungssituation (Bayern-Ist) dargestellt.



- ca. 411.000 t BA werden als Restabfall erfasst
- BA: 66% Kompostierung, 33% Vergärung
- GG: 80% Kompostierung, 17% Häckselgut, 3% energetische Verwertung
- Genutzte Abwärme: 25%

- Ausbau BA-Getrenntsammlung
- BA: 33% Kompostierung, 66% Vergärung
- GG: 75% Kompostierung, 25% energetische Verwertung, kein Häckselgut
- Verbesserte Abwärmenutzung
- Verteuerung Erfassung

- Einschränkung Getrenntsammlung
- BA: Analog BY-Ist
- GG: 40% Kompostierung, 50% Häckselgut und 10% energetische Verwertung
- Bessere Abwärmenutzung
- Entsorgungskosten: -10%

- Maximale BA-Getrenntsammlung
- BA: 33% Kompostierung, 66% Vergärung
- GG: 75% Kompostierung, 25% energetische Verwertung
- Emissionsminderung bei Kompostierung und Vergärung
- Verbesserte Abwärmenutzung

Abbildung 8.5: Ökoeffizienz-Portfolios der Zukunftsszenarien. Ökologie-Index < 0 bedeutet Umweltentlastung. Ökologie-Index > 0 bedeutet Umweltbelastung. BA: Bioabfall. GG: Grünut. eV: energetische Verwertung

Das Szenario **Stoffstromlenkung** steigert die Ökoeffizienz der Entsorgung von Bioabfällen und Grünut. Im Vergleich zur aktuellen Entsorgungsstruktur werden deutlich größere Umweltentlastungen erzielt, die nur mit einer geringen Erhöhung der Gesamtkosten verbunden sind.

Im Szenario **Ressourcenverknappung** ändert sich die Ökoeffizienz verglichen zur aktuellen Situation nur wenig. Aufgrund hoher Treibstoffkosten verteuern sich die Erfassung und in Konsequenz die Gesamtkosten. Der im Zuge der Ressourcenverknappung realisierte Ausbau der Getrenntsammlung und

eine deutlich verbesserte Nutzung der erzeugten thermischen Energie steigern die Umweltentlastungen durch die Bioabfall- und Grüngutentsorgung.

Die Ökoeffizienz im Szenario **Vereinfachung** verschlechtert sich im Vergleich zur aktuellen Situation nicht. Der angenommene Kostendruck führt nicht zwangsläufig zu höheren Umweltbelastungen. Durch die angenommene verbesserte Energienutzung kann die geringere stoffliche Nutzung kompensiert werden.

9 Fazit

Die Entsorgung von Bioabfällen in Bayern leistet schon heute einen wichtigen Beitrag für eine nachhaltige Abfallwirtschaft. Durch die Entsorgung von über 2 Mio.t Bioabfällen und Grüngut werden aktuell beispielsweise:

- ca. 208.000 t CO₂ aus fossiler Energieerzeugung, Düngemittelproduktion, Torfabbau und Ackergrasanbau vermieden,
- mehr als 480.000 MWh klimaneutral erzeugter Energie als Strom und Wärme bereitgestellt und
- ca. 3.300 t Phosphat bereitgestellt

Durch eine vermehrte Nutzung insbesondere der entstehenden Wärme lässt sich die bereitgestellte Energiemenge noch deutlich steigern.

Die Ökoeffizienz der aktuellen Entsorgungsstruktur erweist sich als relativ robust gegen die in verschiedenen Szenarien angenommenen Entwicklungen, die als Folge einer massiven Preissteigerung bei Energieträgern und Rohstoffen oder eines Zwangs zur Kostenreduktion zu erwarten sind.

Eine deutliche Verbesserung der Ökoeffizienz der aktuellen Entsorgungsstruktur kann durch die Vorgabe der politischen Entscheidungsträger zur Intensivierung der stofflichen Nutzung erzielt werden.

Handlungsempfehlungen

Aus den Ergebnissen des Vorhabens ergeben sich:

Handlungsempfehlungen an die Politik

- Stoffstromlenkung an Nachhaltigkeitskriterien insbesondere an den Anforderungen des Ressourcen- und Klimaschutzes ausrichten, das heißt stoffliche Verwertung ebenso fördern wie energetische beziehungsweise eine einseitige Förderung der energetischen Verfahren vermeiden
- Vorgeben und Durchsetzen von hohen, insbesondere emissionsarmen, Anlagen- und Betriebsstandards
- Innovations- und Investitionsbereitschaft durch verlässliche Randbedingungen sichern

Handlungsempfehlungen an die Städte, Landkreise und Zweckverbände

- Bei Ausschreibung und bei Eigenbetrieb ökologische Aspekte verstärkt berücksichtigen. Verfahren, die ökoeffizient arbeiten, sind Lösungen, die ausschließlich eine kostengünstige Entsorgung bieten, vorzuziehen.
- Verwertung entsprechend den jeweiligen Randbedingungen optimal organisieren. Beförderung von differenzierten Verwertungssystemen, welche die stofflichen und energetischen Eigenschaften des jeweiligen biogenen Materials optimal nutzen.

- Möglichst umfassende Erschließung der rohstofflichen und energetischen Nutzwerte von Grüngut und Bioabfall. In der Regel ist die – gemäß Abfallrahmenrichtlinie zu fördernde – getrennte Sammlung und Verwertung die ökoeffizienteste Lösung. Bei spezifischen Randbedingungen können auch andere Lösungen sinnvoll sein.

Handlungsempfehlungen an die Anlagenbetreiber

- Energieeffizienz steigern und insbesondere Wärmenutzung ausbauen
- Emission von C-/N-haltigen-Verbindungen durch technische Maßnahmen und besonders einer Betriebsführung nach Stand der Technik minimieren.
- Standortbezogene Optimierung durch Stoffstromtrennung und Systemkombinationen; mögliche Synergieeffekte durch Anlagenverbunde identifizieren.
- Qualitativ hochwertige stoffliche Produkte erzeugen, da diese eine höhere Akzeptanz bei potenziellen Abnehmern haben

Handlungsempfehlungen für die Anwender von Erzeugnissen aus Bioabfällen und Grüngut

- Bessere Vermittlung und Kennzeichnung der in den Erzeugnissen enthaltenen stofflichen Nutzwerte (Nährstoffe, organische Substanz) bei der landwirtschaftlichen Verwertung sowie bei Anwendungen im Garten- und Landschaftsbau.
- Absicherung der langfristigen Bodenfruchtbarkeit durch Humusbilanzen in der Fruchtfolge. Integration der Humusbilanz in die gute fachliche Praxis der Düngung

10 Literatur

- [BIFA 2003] Pitschke, T.; Roth, U.; Hottenroth, S.; Rommel, W.: Optimierung von Entsorgungsstrukturen. Bayerisches Institut für Angewandte Umweltforschung und -technik GmbH im Auftrag des Bayerischen Staatsministeriums für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz. Augsburg 2003.
- [BMW 1998a] Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (Hrsg.): Energiedaten 97/'98, BMW-Referat Öffentlichkeitsarbeit. Bonn 1998.
- [BMW 1999] Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (Hrsg.): Energiedaten 1999 – Nationale und Internationale Entwicklung, BMW-Referat Öffentlichkeitsarbeit Bonn, 1999.
- [Cuhls 2008] gewitra mbH - Ingenieurgesellschaft für Wissenstransfer. Emissionsergebnisse und Kohlendioxidäquivalente bei der Verwertung von Bioabfällen. Gefördert durch das Umweltbundesamt. Förderkennzeichen (UFOPLAN) 206 33 326.
- [DIN 1998] Deutsches Institut für Normung DIN e.V.: DIN EN ISO 14041 – Umweltmanagement – Ökobilanz – Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens sowie Sachbilanz. Beuth Verlag: Berlin 1998.
- [DIN 1997] Deutsches Institut für Normung DIN e.V.: DIN EN ISO 14040 – Umweltmanagement – Produkt-Ökobilanz – Prinzipien und allgemeine Anforderungen. Beuth Verlag: Berlin 1997.
- [DIN 2000] Deutsches Institut für Normung DIN e.V.: DIN EN ISO 14042 – Umweltmanagement – Ökobilanz – Wirkungsabschätzung. Beuth Verlag: Berlin 2000.
- [DIN 2000A] Deutsches Institut für Normung DIN e.V.: DIN EN ISO 14043 – Umweltmanagement – Ökobilanz – Auswertung. Beuth Verlag: Berlin 2000.
- [FRITSCH ET AL. 2001] Fritsche U. et al.: Gesamt-Emissions-Modell Integrierter Systeme (GEMIS), Version 4.0.4.1, Internet: <http://www.oeko.de/service/gemis>; Öko-Institut, 01.06.2001.
- [GALLENKEMPER 2005] Gallenkemper, B.: Ökonomische Betrachtungen zu alternativen Erfassungssystemen. Veröffentlicht im Tagungsband zu den 9. Münsteraner Abfalltagen. 1.Auflage. Februar 2005.
- [ifeu 2008] Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH: Optimierungen für einen nachhaltigen Ausbau der Biogaserzeugung und -nutzung in Deutschland. Verbundprojekt gefördert durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU). Heidelberg, Leipzig, Berlin, Darmstadt. Mai 2008.
- [KOLSHORN & FEHRENBACH 2000] Kolshorn, K.-U.; Fehrenbach H.: Ökologische Bilanzierung von Altöl-Verwertungswegen. Ufoplan-Nr. 29792382/01, Umweltbundesamt, Berlin 2000.
- [KRANERT 2008] Gottschall, R., Kranert, M., et al.: Ökologischer und ökonomischer Vergleich der stofflichen und energetischen Verwertung von Grüngut. Veröffentlicht im Tagungsband zum 20. Kassler Abfall- und Bioenergieforum. April 2008.
- [Kupper, Fuchs 2007] Kupper T., Fuchs J.: Kompost und Gärgut in der Schweiz. Studie 1: Organische Schadstoffe in Kompost und Gärgut. Studie 2: Auswirkungen von Kompost und Gärgut auf die Umwelt, die Bodenfruchtbarkeit sowie die Pflanzengesundheit. Umwelt-Wissen Nr. 0743. Bundesamt für Umwelt, Bern. 2007.
- [Lebensministerium 2005] Amlinger et al.: Stand der Technik der Kompostierung – Grundlagenstudie. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft. 2005.

- [LFU 2003] Bayerisches Landesamt für Umwelt: Zusammensetzung und Schadstoffgehalt von Siedlungsabfällen. Bayerisches Landesamt für Umweltschutz. Augsburg 2003.
- [LTZ 2008] Landwirtschaftliches Technologiezentrum Augustenberg: Nachhaltige Kompostanwendung in der Landwirtschaft. Abschlussbericht 2008.
- [TfZ 2007] Widmann, B.: Energie aus Biomasse – Stand der Umsetzung und Beitrag zu Energieversorgung und Klimaschutz Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe. Straubing 2007.
- [UBA 2002] Umweltbundesamt: Umweltdaten Deutschland 2002.
- [UBA 1999] Umweltbundesamt: Bewertung in Ökobilanzen. Methode des Umweltbundesamtes zur Normierung von Wirkungsindikatoren, Ordnung (Rangbildung) von Wirkungskategorien und zur Auswertung nach ISO 14042 und 14043. Version'99. Texte 92/99. Umweltbundesamt: Berlin 1999.
- [VOGT 2002] Vogt, R., et al: Ökobilanz Bioabfallverwertung – Untersuchungen zur Umweltverträglichkeit von Systemen zur Verwertung von biologisch organischen Abfällen. Herausgeber: IFEU-Institut für Energie- und Umweltforschung. Erich Schmidt Verlag, Berlin 2002.
- [Witzenhausen 2008] Witzenhausen Institut für Abfall, Umwelt und Energie GmbH: Optimierung der biologischen Abfallbehandlung in Hessen. Im Auftrag des Hessischen Ministerium für Umwelt, ländlichen Raum und Verbraucherschutz. Witzenhausen März 2008.

11 Anhang: Methodische Grundlagen

11.1 Ökobilanzielle Betrachtung

11.1.1 Wirkungsabschätzung

Im Rahmen der Wirkungsabschätzung werden die umfangreichen, ökologischen Ergebnisse der Sachbilanz in folgenden Schritten komprimiert und für die Auswertung vorbereitet:

- Auswahl der zu betrachtenden Wirkungskategorien
- Zuordnung der Sachbilanzergebnisse zu den Wirkungskategorien (Klassifizierung)
- Modellierung der Sachbilanzdaten innerhalb der Wirkungskategorien (Charakterisierung)

Die Auswahl der im Rahmen der ökobilanziellen Betrachtungen dieses Vorhabens ausgewählten Wirkungskategorien orientiert sich an den aktuellen umweltbezogenen Kenntnissen sowie an projektspezifischen Erkenntnisinteressen.

Den einzelnen Wirkungskategorien sind jeweils Sachbilanzparameter zuzuordnen. Die entsprechenden Sachbilanzergebnisse werden anschließend zu einem beziehungsweise mehreren Wirkungsindikatorergebnissen verrechnet oder direkt als Wirkungsindikatorergebnis verwendet.

Die in der folgenden Tabelle dargestellten Umweltwirkungen der Entsorgung von Bioabfällen und Grünut werden im Rahmen der Wirkungsabschätzung nicht berücksichtigt

Tabelle 11.1: Auswahl der Wirkungskategorien, Zuordnung der Sachbilanzparameter zu den einzelnen Wirkungskategorien und Einheit der Wirkungsindikatorergebnisse.

Umweltwirkung	Erläuterung der Nicht-Berücksichtigung
Schwermetalleintrag in Böden durch das Ausbringen von Komposten	Die Gehalte der gütegesicherten Komposte an unerwünschten Schwermetallen unterschreiten die Grenzwerte der Bioabfall-Verordnung [...] mittlerweile deutlich. Bedingt durch den minimalen Schwermetallentzug durch Ernteprodukte verbleibt stets ein Positivsaldo im Boden, der jedoch absolut gering ausfällt und aus Sicht des Bodenschutzes kalkulierbar bleibt. Die Gehalte an unerwünschten Schwermetallen sind in Feldversuchen nach 9 bzw. 12-jähriger Kompostanwendung nicht angestiegen [LTZ 2008, Seite 15 f.].
Eintrag organischer Schadstoffe in Boden durch das Ausbringen von Komposten	Langjährige regelmäßige Untersuchungen der in den Versuchen eingesetzten Komposte auf persistente PCB und PCDD/F zeigten, dass die Gehalte absolut sehr niedrig ausfallen und sich nahe der Hintergrundbelastung bewegen. Auch für weitere organische Schadstoffe (PAK u.a.) konnte keine Anreicherung im Boden trotz langjähriger Kompostanwendung nachgewiesen werden [LTZ 2008, Seite 16 f.].
Aquatische Eutrophierung	bifa geht davon, dass evtl. entstehende Sickerwässer aus der Kompostierung oder Vergärung nicht ungerneigt in den Untergrund eindringen. Entsprechende Abdichtungs- Behandlungs- und Verwertungssysteme sind bei der Behandlung von Bioabfällen Stand der Technik. Nicht anlagenintern zu verwertende Sickerwässer werden vor der Einleitung gereinigt. Eine mögliche übermäßige Nährstoffzufuhr durch ungerneigte Sickerwässer an aquatische Systeme ist von untergeordneter Bedeutung und wird nicht weiter betrachtet.

Umweltwirkung	Erläuterung der Nicht-Berücksichtigung
Phytotoxizität	Zur Quantifizierung der Schädlichkeit von Komposten gegenüber Kulturpflanzen (Salmonellen, Pflanzenkrankheiten) in Ökobilanzen existieren keine Modelle. Diese Schädwirkung kann daher nicht berücksichtigt werden Hinweise auf eine qualitative Diskussion geben [Kupper, Fuchs 2007].

11.1.2 Auswertung (Vorgehen nach DIN EN ISO 14043)

11.1.2.1 Allgemeines

Am Ende der Ökobilanz steht der Schritt der Auswertung, der gemäß DIN EN ISO 14043 [DIN 2000A] verbal-argumentativ durchzuführen ist. Ausgehend von den Ergebnissen der Sachbilanz und der Wirkungsabschätzung sowie in Übereinstimmung mit dem Ziel und dem Untersuchungsrahmen sind die Ergebnisse der Ökobilanz nachvollziehbar, anschaulich und verständlich darzustellen. Über die graphische Aufbereitung der Ergebnisse und deren Beschreibung und Analyse werden die für die umweltbezogene Beurteilung der untersuchten Systeme signifikanten Parameter identifiziert. Dazu werden die verschiedenen Szenarien anhand ihrer Ergebnisse verglichen, die Herkunft der Ergebnisse untersucht sowie Sektor- und Sensitivitätsanalysen durchgeführt. Zusätzlich wird bei der Auswertung die Vollständigkeit und Konsistenz der relevanten Informationen und der für die Auswertung zur Verfügung stehenden Daten geprüft. Auf dieser Basis werden die untersuchten Systeme hinsichtlich ihrer Umweltrelevanz bewertet und Schwachstellen sowie Optimierungspotenziale aufgezeigt.

Als optionale Bestandteile werden in der Norm weiter die Schritte der Normierung, der Ordnung und der Gewichtung beschrieben. Dabei ist zu beachten, dass bei vollständig normgerechten Vorgehen nach DIN EN ISO 14042 die Gewichtung, also „die Umwandlung der Indikatorergebnisse unter Verwendung numerischer Faktoren, die auf Werthaltungen beruhen“, nicht für vergleichende Ökobilanzen angewendet werden darf, die zur Veröffentlichung vorgesehen sind. Die Modifizierung, die bifa zur Aggregation vornimmt, besteht darin, dass der nicht normkonforme, optionale Schritt der Gewichtung zur Aggregation der ökologischen Einzelergebnisse durchgeführt wird.

Für diese Auswertung ist die Methodik des Umweltbundesamtes hilfreich. Nach dem Vorliegen belastbarer normierter Wirkungsindikatorergebnisse werden die Wirkungskategorien hinsichtlich ihrer Priorität für das konkrete Projekt eingestuft und in eine Rangfolge gebracht. Dabei werden die Wirkungskategorien – über eine allgemeingültige, in der Tabelle 11.3 abgebildeten, Hierarchisierung (Ordnung) hinaus – im Schritt der Normierung auch in ihrer Relevanz bezüglich des konkreten Projektes gewürdigt.

Die Ordnung wird anhand der allgemeinen, also projektunabhängigen Kriterien *Ökologische Gefährdung* und *Distance-to-Target* durchgeführt. Zur Normierung wird jeweils das Verhältnis zwischen Wirkungsindikatorergebnis und einem Referenzwert für die Wirkungskategorien berechnet. Die Referenzwerte sind die mit Charakterisierungsfaktoren aggregierten Jahreswerte der entsprechenden Stoffe in Deutschland. Durch Verknüpfung der allgemeinen Kriterien *Ökologische Gefährdung* und *Distance-to-Target* sowie der projektspezifischen Einwohnerwerte ergibt sich die projektspezifische ökologische Priorität der betrachteten Wirkungskategorien [vgl. KOLSHORN & FEHRENBACH 2000]. Sowohl die Normierung als auch die Ordnung stellen wichtige Vorbereitungsschritte für die abschließende Auswertung der Ökobilanzergebnisse dar. Unterstützt wird diese ferner durch eine systematische Analyse der Ergebnisse hinsichtlich der Signifikanz, Vollständigkeit und Sensitivität.

11.1.2.2 Normierung: Berechnung der Einwohnerwerte

Die im Rahmen der Normierung für jede Wirkungskategorie berechneten Einwohnerwerte erlauben einen größenordnungsbezogenen Vergleich der verschiedenen Wirkungsindikatorergebnisse. Je größer die Anzahl der Einwohnerwerte ist, desto bedeutender ist diese Wirkungskategorie für die ökologieorientierte Beurteilung der betrachteten Verfahren beziehungsweise Szenarien hinsichtlich ihres Beitrages zur Umweltbelastung. Den Einwohnerwert, als Parameter zur Bestimmung der Relevanz eines Wirkungsindikatorergebnisses erhält man über folgenden Ansatz:

$$\text{Einwohnerwert (EW)} = \frac{\text{Wirkungsindikatorergebnis}}{\text{Referenzwert}} \cdot \text{Einwohnerzahl BRD}$$

Die für die Normierung der Ergebnisse dieses Vorhabens verwendeten Referenzwerte sind in Tabelle 11.2 dargestellt.

Tabelle 11.2: Grundlagen zur Ermittlung des spezifischen Beitrags – Gesamtemissionen und -verbräuche in Deutschland und mittlere Belastung durch einen Einwohner pro Jahr.

Wirkungsindikator	Referenzwert (Deutschland)	Quelle	Belastung je Einwohner ⁵
Nicht aggregierte Werte			
Ammoniak	624.000 t/a	[UBA 2002]	7,58 kg/a
Stickoxide (als NO ₂)	1.600.000 t/a	[UBA 2002]	19,44 kg/a
Schwefeldioxid	795.000 t/a	[UBA 2002]	9,66 kg/a
Rohphosphat	1.366.795 t/a	StBA Fachserie 4 Reihe 8.2 und eigene Recherchen	16,06 kg/a
Aggregierte Werte			
KEA fossil	12.722.000 TJ/a	[BMWi 1998 1998a]	154.553 MJ/a
Treibhauspotenzial	970.912.000t CO ₂ -Äq./a	[Vogt 2002]	11,8 t CO ₂ -Äq./a
Versauerungspotenzial	3.348.420 t SO ₂ -Äq./a	[Vogt 2002]	40,7 kg SO ₂ -Äq./a
Eutrophierungspotenzial terrestrisch	428.714 t PO ₄ -Äq./a	[Vogt 2002]	5,21 kg PO ₄ -Äq./a
Photooxidantienbildung	709.713 t Ethen-Äq./a	[Vogt 2002]	8,62 kg Ethen-Äq./a

11.1.2.3 Ordnung: Hierarchisierung der Wirkungskategorien

Tabelle 11.3 zeigt die Beurteilung der einzelnen Kategorien nach den Kriterien „Ökologische Gefährdung“ und „Distance-to-Target“ durch das Umweltbundesamt.

Ökologische Gefährdung: Welche Bedeutung ist den einzelnen Kriterien nach Stand der Wissenschaft wie auch der Sensibilität der Bevölkerung oder der Politik zuzumessen?

Abstand zum Schutzziel („Distance-to-Target“): Wie weit entfernt ist die derzeitige Umweltsituation gegenüber den von umweltpolitischer Seite gesetzten Zielvorgaben (Umweltziele, Umweltqualitätsziele, Reduktionsziele u.ä.)?

⁵ Basis: 82.314.900 Einwohner nach Angabe des statistischen Bundesamtes aus dem Jahr 2006.

Tabelle 11.3: Hierarchisierung von Wirkungskategorien nach „Ökologischer Gefährdung“ und „Distance-to-Target“ durch das Umweltbundesamt [UBA 1999].

Wirkungskategorie	Ökologische Gefährdung	Distance-to-Target
Treibhauseffekt	A	A
Naturraumbeanspruchung	A	B
Stratosphärischer Ozonabbau	A	D
Versauerung	B	B
Terrestrische Eutrophierung	B	B
Aquatische Eutrophierung	B	C
Ressourcenbeanspruchung KEA fossil	C	B
Ressourcenbeanspruchung Phosphat ¹⁾	C	B
Photochemische Oxidantienbildung	D	B
Humantoxizität (Auswertung anhand des Sachbilanzparameters SO ₂) ²⁾	B	B
Öko-Toxizität (Auswertung anhand der Sachbilanzparameter NH ₃ , NO _x) ²⁾	B	B

A = höchste Priorität

D = niedrigste Priorität

¹⁾ ausführliche Erläuterung zur Problematik bei der Hierarchisierung der Ressourcenbeanspruchung Phosphat in Kapitel 11.1.4

²⁾ Keine Vorgaben nach [UBA 1999]. Hierarchisierung deshalb nach [bifa 2003].

11.1.3 Aggregation – Berechnung des Ökologie-Index

11.1.3.1 Schritt 1 – Normierung

Ausgangspunkt für die Aggregation der einzelnen Wirkungsindikator-/Sachbilanzergebnisse sind die Einwohnerwerte (EW), die sich aus den jeweiligen Wirkungsindikator-/Sachbilanzergebnissen und den entsprechenden Gesamtemissionen in der Bundesrepublik errechnen (vgl. Abschnitt 11.1.2). Positive Einwohnerwerte repräsentieren eine Umweltbelastung, während negative Einwohnerwerte Umweltentlastungen bedeuten.

Über den spezifischen Beitrag hinaus gibt es nach der UBA-Methode zur Bewertung in Ökobilanzen für jede Wirkungskategorie zwei weitere, projektunabhängige Kriterien, die für die Rangbildung herangezogen werden. Diese Kriterien sind „ökologische Gefährdung (ÖkG)“ und „Distance-to-Target (DtT)“. Die Ordnung anhand dieser projektunabhängigen Kriterien erfolgt in einer 5-stufigen Skala (vgl. Abschnitt 11.1.2). Im Rahmen dieses Vorhabens werden den Prioritäten der projektunabhängigen Kriterien ebenfalls feste Punktzahlen zugeordnet (vgl. Tabelle 11.4). Dies ermöglicht die anschließend durchzuführende Zusammenführung mit den normierten spezifischen Beiträgen.

Tabelle 11.4: Punktevergabe bei den projektunabhängigen Kriterien ökologische Gefährdung (ÖkG) und Distance-to-Target (DtT).

Priorität ÖkG bzw. DtT	Punktzahl
A	10
B	8
C	6
D	4
E	2

11.1.3.2 Schritt 2 - Zusammenführung

Die Zusammenführung der vom bilanzierten System abhängigen Einwohnerwerte mit den beiden systemunabhängigen Kriterien „ökologische Gefährdung“ (ÖkG) und „Distance-to-Target“ (DtT) für jede Wirkungskategorie erfolgt durch die Multiplikation der ermittelten Einwohnerwerte mit der Summe der festgelegten Punktzahlen von ÖkG und DtT.

11.1.3.3 Schritt 3 - Summation

Durch Summation aller so erhaltenen Teilsummen für jede betrachtete Wirkungskategorie bzw. Sachbilanzparameter eines Verfahrens beziehungsweise Szenarios erhält man den Ökologie-Index. Die Wirkungskategorie Toxische Schädigung von Organismen und Ökosystemen wird näherungsweise durch die Sachbilanzparameter Ammoniak und Stickoxide beschrieben. In die Summation geht anstelle der beiden Teilsummen nur der Mittelwert der beiden Teilsummen für Ammoniak und Stickoxide ein, um eine Doppelgewichtung der Wirkungskategorie zu verhindern. Aus dem gleichen Grund werden auch die Einwohnerwerte für die Ressourcenbeanspruchung rechnerisch als Mittelwert der beiden betrachteten Parameter KEA fossil und Rohphosphat ermittelt.

11.1.4 Methodische Schwierigkeiten zur Bewertung der P-Ressourcenbeanspruchung

Komposte, Gärprodukte und Häckselgut substituieren über ihren Nährstoffgehalt mineralische Dünger, die ansonsten aus Rohphosphaten hergestellt würden. Die stofflichen Produkte aus der Behandlung biogener Abfälle vermindern damit die Ausbeutung der endlichen Phosphatreserven.

Entsprechend der aktuellen Angaben des Statistischen Bundesamtes für das Wirtschaftsjahr 2007/2008 beläuft sich der Inlandsabsatz P-haltiger Düngemittel auf 316.692 t P₂O₅. Zusätzlich werden ca. 20.000 t an Phosphaten in Waschmitteln verarbeitet. Für die Bereitstellung dieser Phosphatmenge wird die 4,062-fache Menge an Rohphosphaten aus den Lagerstätten abgebaut. Der Verbrauch an Rohphosphaten beträgt demnach für Deutschland 1.366.795 t.

Mit Blick auf die nachhaltige Nutzung von Ressourcen kommt Phosphor eine besondere Bedeutung zu. Als Nährstofflieferant ist Phosphat grundsätzlich nicht substituierbar und seine Verfügbarkeit ist begrenzt. Dabei sind allerdings die Einschätzungen über die Reichweite der Phosphorvorräte sehr divergent. Die Prognosen über die verbleibende Nutzungsdauer reichen je nach Quelle von 50 Jahren bis zur Aussage, dass keine Verknappung der Rohphosphat-Vorräte zu erwarten ist⁶.

⁶ Quelle: H.Elsner (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe): Vortrag für die Braunschweiger Nährstofftage 2008.

Aufgrund der erheblichen Bedeutung für das Untersuchungsthema, muss der Aspekt der P-Ressourcenbeanspruchung als Parameter in der Betrachtung der gesamtökologischen Wirkungen berücksichtigt werden. In [Vogt 2002]⁷ wird ein Vorschlag zur Bewertung dieser Wirkung diskutiert, der der Ressourcenbeanspruchung durch Phosphat eine geringe Bedeutung zuweist. Abgesehen von diesem Hinweis existiert für den Parameter Ressourcenbeanspruchung durch Phosphat allerdings keine allgemein anerkannte und mit anderen Ressourcen vergleichbare Hierarchisierung über die Kriterien ökologische Gefährdung (ÖkG) und Distance-to-Target (DtT). Deshalb ist die zur Aggregation der Umweltwirkung zum Gesamtwert Ökologie-Index erforderliche Hierarchisierung für die P-Ressourcenbeanspruchung derzeit nicht belastbar möglich.

Der geschilderte Zwiespalt aus methodischer Lücke und Bedeutung für das Untersuchungsthema kann im Rahmen der aktuellen Beauftragung nicht zur Klärung gebracht werden. bifa wählt deshalb im Rahmen der Bearbeitung das folgende Vorgehen:

- Die Ressourcenbeanspruchung Rohphosphat wird mit der Ressourcenbeanspruchung KEA fossil in der Wirkungskategorie Ressourcenbeanspruchung zusammengeführt, obwohl kein Wirkungsfaktor existiert, der die unterschiedlichen Arten der Ressourcenbeanspruchung ins Verhältnis setzt. Da wie beschrieben keine konsensfähige Hierarchisierung existiert, wird die P-Ressourcenbeanspruchung hinsichtlich der Kriterien ÖkG und DtT gleich behandelt wie KEA fossil. Eine Bevor- oder Benachteiligung einer Art der Ressourcenbeanspruchung wird damit vermieden. So wird beiden Wirkungsfaktoren zur Beschreibung der Ressourcenbeanspruchung dieselbe grundsätzliche Bedeutung zugemessen. Der Mittelwert aus den projektspezifischen Einwohnerwerten für KEA fossil und Phosphat ergibt den Einwohnerwert für die Ressourcenbeanspruchung.
- Die aus der Zusammenführung der Parameter Ressourcenbeanspruchung Phosphat beziehungsweise KEA fossil erhaltene Wirkungskategorie Ressourcenschutz geht in die Berechnung des Ökologie-Index mit ein und wird bei der Auswertung der Ökoeffizienz aller Verfahren und Szenarien dargestellt.
- Aufgrund des extremen Einflusses der Ressourcenbeanspruchung Phosphat auf das ökologische Gesamtergebnis bei gleichzeitiger geringer Belastbarkeit der Hierarchisierung und Zusammenführung mit KEA fossil werden zusätzlich alle aggregierten Ergebnisse der Umweltwirkungen auch ohne die Wirkungskategorie Ressourcenbeanspruchung dargestellt.

11.2 Ökoeffizienzanalyse

Die Ökoeffizienzanalyse stellt für jedes der untersuchten Szenarien das Ergebnis der ökobilanziellen Betrachtung den mit der Entsorgung verbundenen spezifischen Kosten gegenüber.

⁷ Durch effizientere Düngung und Quasi-Wegfall des Phosphatsverbrauchs im Waschmittelsektor sinkt die Beanspruchung der Phosphatreserven. Zudem ist die Phosphatnutzung kein zwingend reversibler Vorgang. Durch die aktuellen Recyclingstrategien lässt sich der Verbrauch der Rohstoffe aus den Lagerstätten eingrenzen.

bifa Umweltinstitut GmbH

Am Mittleren Moos 46

86167 Augsburg

Tel. +49 821 7000-0

Fax. +49 821 7000-100

www.bifa.de