



Ökoeffizienzpotenziale bei der Behandlung von Bioabfällen in Bayern

Thorsten Pitschke
René Peche
Dr. Dieter Tronecker
Dr. Siegfried Kreibe

Finanziert durch



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
René Peche
Dr. Dieter Tronecker
Dr. Siegfried Kreibe

Finanziert durch
Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Gesundheit

Druck
Klicks GmbH

1. Auflage 2013
© bifa Umweltinstitut GmbH

Ökoeffizienzpotenziale bei der Behandlung von Bioabfällen in Bayern

Thorsten Pitschke
René Peche
Dr. Dieter Tronecker
Dr. Siegfried Kreibe

Finanziert durch



Bayerisches Staatsministerium für
Umwelt und Gesundheit



INHALTSVERZEICHNIS

1	Kurzfassung	1
2	Projekthintergrund und Aufgabenstellung.....	3
3	Methodische Grundlagen der Bewertung	4
4	Untersuchungsrahmen.....	6
5	Ökoeffizienzanalyse Behandlungsverfahren.....	8
6	Variationen und Sensitivitäten zum durchschnittlichen Betrieb.....	21
7	Optimierungsansätze	31
8	Fazit und Handlungsempfehlungen	44
9	Literatur	54
10	Anhang: Methodische Grundlagen.....	56

1 Kurzfassung

Im Mittelpunkt dieser Untersuchung, die im Auftrag des Bayerischen Staatsministeriums für Umwelt und Gesundheit durchgeführt wurde, steht die Analyse des Ökoeffizienzpotenzials von Kompostierung und Vergärung über die gesamte Prozesskette. Die Untersuchung wurde fachlich durch einen Beirat begleitet, dem Vertreter der interessierten Kreise und des Auftraggebers angehörten.

Verwertung von Bio-/Grüngut schafft Umweltvorteile

Die Verfahren zur Behandlung von Bio- und Grüngutabfällen entlasten über die Bereitstellung von Energie, Nährstoffen und organischer Substanz die Umwelt. Die Ergebnisse der Studie bestätigen aus umweltbezogener Sicht grundsätzlich den Vorrang der Verwertung getrennt erfassten Bioguts vor dessen Sammlung über die Restmülltonne und der anschließenden Entsorgung in einer thermischen Behandlungsanlage. Voraussetzung dafür ist, dass die Verwertungsverfahren auf eine möglichst umfassende Nutzung der organischen Substanz, der Nährstoffe und des Energieinhalts abzielen. Zusätzlich müssen durch einen Anlagenbetrieb nach guter fachlicher Praxis bzw. durch entsprechende technische Maßnahmen luftseitige Emissionen minimiert werden. Sind diese Aspekte in Einzelfällen oder unter speziellen Rahmenbedingungen, nicht gegeben, dann ist der ökologische Vorrang der Verwertung anhand der spezifischen Situation zu prüfen.

Aus Sicht der umweltbezogenen Bewertung sind die Grenzen zwischen den Verwertungswegen fließend. Sowohl die stoffliche Verwertung von Kompostprodukten als auch die energetische Verwertung geeigneter Bioabfall-Anteile liefern einen Beitrag zur Umweltentlastung und zur Schonung von Ressourcen. Entscheidend für eine ökoeffiziente Verwertung ist, dass im Sinne einer Kaskadennutzung eine Kombination von stofflicher und energetischer Verwertung angestrebt wird. Die umweltbezogenen Unterschiede zwischen geschlossener bzw. teilgeschlossener Kompostierung einerseits und Nass- bzw. Propfenstromvergärung andererseits sind gering. Mit entsprechender Technik bzw. Betriebsführung nach guter fachlicher Praxis kann bei Kompostierung und Vergärung ein ähnlich positives Umweltergebnis erreicht werden. Bei der Verwertung von Grüngut trägt besonders die energetische Verwertung von holzigen Anteilen, die vor der offenen Kompostierung abgetrennt werden, zur Entlastung der Umwelt bei.

Zu allen untersuchten Behandlungsverfahren gibt es relevante Variationen des Anlagenbetriebs. Außerdem besitzen alle Verfahren das Potenzial, durch die Realisierung geeigneter Maßnahmen ihre Umweltwirkungen zu verbessern. Die Ökoeffizienzpotenziale der Vergärung liegen dabei primär in der Steigerung der Umweltentlastung durch technische Lösungen zur Emissionsreduzierung und dem Ausbau der Erzeugung bzw. Abgabe von Strom und Wärme. Die Ökoeffizienzpotenziale der Kompostierungsverfahren fallen geringer aus. Eine Steigerung der Umweltentlastung ist bei den Kompostierungsverfahren hauptsächlich prozesseitig durch eine gute fachliche Praxis, eine optimierte Betriebsführung der Rotte sowie produktseitig durch den Ausbau des Einsatzes organischer Substanz zur Torfsubstitution zu erreichen.

Handlungsempfehlungen für einen ökoeffizienten Anlagenbetrieb

Vergärung

- Emissionen reduzieren durch eine Betriebsführung nach guter fachlicher Praxis und die Etablierung von Maßnahmen zur Emissionsminderung:
 - Optimierte Betriebsführung bei der Behandlung fester Gärprodukte
 - Saure Wäsche der Abluft aus der Behandlung der festen Gärprodukte
 - Verbrennung der Abluft aus dem Lager der flüssigen Gärprodukte
 - Emissionsseitigen Herausforderungen der Batchvergärung (Erfassung der Fermenterabluf und Nachbehandlung des Gärprodukts) Rechnung tragen
- Energieeffizienz steigern und Wärmenutzung ausbauen

Die Einspeisung des Biogases in das Erdgasnetz ist aus umweltbezogener Sicht eine Alternative bei nicht vollständiger externer Wärmenutzung am Standort.

Kompostierung

- Emissionen reduzieren durch eine Betriebsführung nach guter fachlicher Praxis und die Etablierung von Maßnahmen zur Emissionsminderung wie optimierte Betriebsführung der Rotte und Optimierung des Materialinputs.
- Abtrennung heizwertreicher, schwer abbaubarer Anteile zur Erzeugung von Strom und Wärme. Dabei muss sichergestellt bleiben, dass die Rottekörper weiterhin ausreichend Strukturmaterial enthalten.

Handlungsempfehlungen für eine nachhaltige Bioabfallverwertung

- Möglichst umfassende Erschließung der rohstofflichen und energetischen Nutzwerte des Bioabfalls. In der Regel ist die getrennte Sammlung und Verwertung dabei die ökoeffizienteste Lösung.
- Stoffstromlenkung und Einsatz von differenzierten Verwertungssystemen, so dass in Kaskadennutzung stoffliche und energetische Nutzen des Bioabfalls unter den Randbedingungen vor Ort optimal genutzt werden.
- Mögliche Synergieeffekte durch Anlagenverbunde nutzen. Mit der Vorschaltung einer Vergärungsstufe kann bei bestehenden Kompostieranlagen in Form einer Kaskadennutzung die stoffliche und energetische Nutzung ausgebaut werden. An geeigneten Standorten bieten die Integration von Vergärungsanlagen in die Infrastruktur bestehender thermischer Abfallverwertungsanlagen interessante Perspektiven.
- Vorgeben und Durchsetzen von hohen, insbesondere emissionsmindernden Anlagen- und Betriebsstandards und Sicherung der bestehenden Qualitätsanforderungen an die stofflichen Produkte.
- Innovations- und Investitionsbereitschaft durch verlässliche Randbedingungen sichern.
- Bei Ausschreibung und bei Eigenbetrieb ökologische Aspekte verstärkt berücksichtigen. Verfahren, die ökoeffizient arbeiten, sind Lösungen, die ausschließlich eine kostengünstige Entsorgung bieten, vorzuziehen.

2 Projekthintergrund und Aufgabenstellung

Mit Blick auf die behandelte Menge ist die Verwertung von Bioabfällen (Bio- und Grüngut) neben der Restabfallbehandlung der bedeutendste Bereich der Entsorgung haushaltsnah erfasster Abfälle. Das Kreislaufwirtschaftsgesetz, mit der Vorgabe zur getrennten Sammlung von Bioabfällen ab 2015, ist Impulsgeber für die Erfassung von zusätzlichen Mengen an biogenen Wertstoffen, die bisher im Restmüll bleiben. Die Vielzahl an technischen Verfahrensalternativen und die Möglichkeiten zur Gestaltung der zugehörigen Erfassungssysteme führen zu einer großen Bandbreite von Strategien und Konzepten zur Behandlung biogener Abfälle in den Städten und Landkreisen. Dabei bestehen erhebliche Potenziale, die Verfahren von der Behandlung der Abfälle bis hin zur Ausbringung von Komposten und Gärprodukten noch weiter zu verbessern. Im Mittelpunkt dieser Untersuchung, die im Auftrag des Bayerischen Staatsministeriums für Umwelt und Gesundheit (StMUG) durchgeführt wurde, stand die Analyse des Ökoeffizienzpotenzials von Kompostierung und Vergärung durch Konzeption und Modellierung optimaler Konfigurationen über die gesamte Prozesskette. Die Identifizierung und Nutzung von Ökoeffizienzreserven im Zusammenspiel stofflicher und energetischer Verwertung leistet dabei einen wichtigen Beitrag zu einer weiteren Verbesserung der Ökoeffizienz der gesamten Abfallwirtschaft. Die Berücksichtigung aktueller Untersuchungen und Daten ermöglicht dieser Untersuchung im Vergleich zur Basisstudie aus dem Jahr 2010 [bifa 2010] einen weiter vertieften Blick auf die Behandlungsverfahren.

Die Untersuchung wurde fachlich durch einen Beirat begleitet, in dem Vertreter der interessierten Kreise und des Auftraggebers vertreten waren. Der Beirat setzte sich zusammen aus Vertretern des Auftraggebers, des Landesamts für Umwelt (LfU), der Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL), der entsorgungspflichtigen Gebietskörperschaften, der Bundesgütegemeinschaft Kompost (BGK), des Fachverbandes Biogas, der Fachvereinigung bayerischer Komposthersteller FBK e.V., der Arbeitsgemeinschaft der Betreiber thermischer Abfallbehandlungsanlagen in Bayern (ATAB) und Anlagenbetreibern.

3 Methodische Grundlagen der Bewertung

Die Bausteine der Untersuchung der verschiedenen Behandlungsverfahren sind eine ökobilanzielle Betrachtung der Umweltwirkungen sowie eine Kostenbetrachtung und deren Zusammenführung im Rahmen einer Ökoeffizienzanalyse. *Abbildung 1* fasst die Schritte zur Ermittlung und gemeinsamen Betrachtung der ökologischen und ökonomischen Wirkungen zusammen.

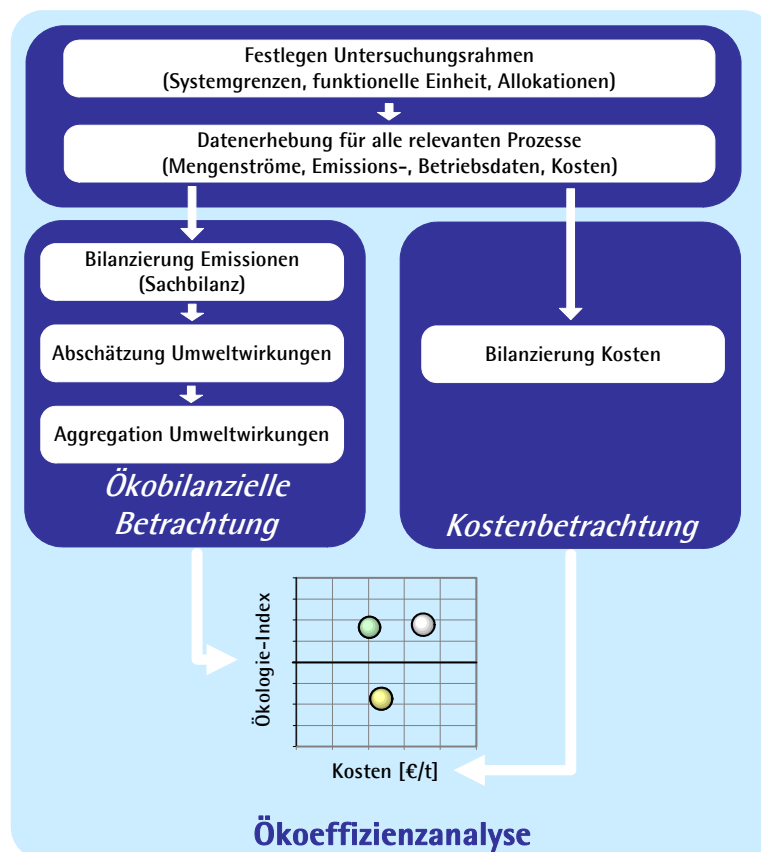


Abbildung 1: Schritte zur gemeinsamen Betrachtung der ökologischen und ökonomischen Auswirkungen im Rahmen der Ökoeffizienzanalyse

Die ökobilanzielle Betrachtung orientiert sich an den Vorgaben der Normen zur Ökobilanz und liefert als Ergebnis Einzelwerte, welche die Umweltwirkungen der Verfahren charakterisieren. Die Analyse der Umweltwirkungen erfolgt anhand der in folgender Tabelle dargestellten Wirkungskategorien.

Tabelle 1: Auswahl der Wirkungskategorien, Zuordnung der Sachbilanzparameter zu den 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 un spez. (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
Ressourcennutzung	Verbrauch fossiler Primärenergieträger und von Rohphosphat aus Lagerstätten	Erdöl, Erdgas, Stein- und Braunkohle und Phosphat

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. Eine ausführliche Beschreibung der Methodik dieser Ökoeffizienzanalyse findet sich im Anhang.

Der dafür von bifa entwickelte Indikator Ressourcenschonung führt Verbrauch bzw. Schonung fossiler Energieträger und der mineralischen Ressource Phosphor durch die Analyse von Knappheit, Substituierbarkeit und Art der Nutzung dieser Rohstoffe zusammen. Die Vorgehensweise zur Berücksichtigung stofflicher und energetischer Ressourcen in der Wirkungskategorie Ressourcenbeanspruchung findet sich in im Anhang. Die Ökoeffizienzanalyse stellt schließlich das Ergebnis der ökobilanziellen Betrachtung den mit der Entsorgung verbundenen spezifischen Kosten gegenüber.

4 Untersuchungsrahmen

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

Tabelle 2: *Untersuchungsrahmen des ökobilanziellen Vergleichs der Behandlungsverfahren für Bio- und Grüngut*

Bestandteile der ökobilanziellen Betrachtung	Erläuterung
Ziel der Studie: Erkenntnisinteresse	Quantifizierung der ökologischen und ökonomischen Wirkungen relevanter Verfahren zur Bio-/Grüngutbehandlung in Bayern. Ausgehend von einem auf aktueller Datengrundlage modellierten durchschnittlichen Anlagenbetrieb werden Optimierungsansätze und Verfahrensvariationen analysiert.
Untersuchungsrahmen: Untersuchungsgegenstand	Behandlung von Bio- und Grüngut in Verfahren, die Bestandteil der bayerischen Entsorgungsstruktur sind. Landwirtschaftliche Biogasanlagen sind nicht Teil der Untersuchung.
Untersuchungsrahmen: Funktionelle Einheit	Entsorgung einer Tonne Bio- beziehungsweise Grüngut, angedient über die Erfassungssysteme der Träger der öffentlich-rechtlichen Entsorgung (örE). Biogene Abfälle, die nicht über die Systeme der örE erfasst werden (z.B. aus Landschaftsbau, -pflege, Eigenverwertung) oder in der Landwirtschaft übliche Substrate sind nicht Gegenstand dieses Vorhabens.
Untersuchungsrahmen: Systemgrenzen	Inputseitig: Im Verfahrensvergleich die für den jeweiligen Behandlungsprozess bereitgestellte Abfallmenge ab Werkstor der Behandlungsanlage. Outputseitig: Entsorgung der Rückstände aus den Behandlungsprozessen beziehungsweise die Bereitstellung und Nutzung der marktgängigen stofflichen und energetischen Produkte aus den Verwertungsprozessen. 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.

Anmerkung Untersuchungsgegenstand

Das direkte Ausbringen von unbehandeltem Grüngut als Häckselgut auf landwirtschaftlichen Flächen (Flächenkompostierung) ist mit der Novelle der BioAbfV grundsätzlich nicht mehr als Entsorgungsweg vorgesehen. Die zuständige Behörde kann unter bestimmten Voraussetzungen nach § 10 Abs. 2 BioAbfV eine Ausnahmegenehmigung zur direkten Ausbringung von unbehandeltem Häckselgut erteilen. Darüber hinaus ist die Ausbringung von unbehandeltem Grüngut im Rahmen der Eigenverwertung möglich. Eigenverwertung liegt dann vor, wenn auf selbst bewirtschafteten Flächen anfallende pflanzliche Bioabfälle wieder auf ebenfalls selbst bewirtschafteten Flächen aufgebracht werden. Nach § 2 Nr. 6 BioAbfV gilt auch die Aufbringung von bei gärtnerischen Dienstleistungen auf fremden Flächen

angefallenen pflanzlichen Bioabfällen auf selbst bewirtschaftete Flächen des Dienstleistungsbetriebes als Eigenverwertung.

Anmerkungen funktionelle Einheit

Die im Rahmen dieser Untersuchung durchgeführte Ökoeffizienzanalyse der Behandlungswege bezieht sich auf Bio-/Grüngut aus haushaltsnaher Erfassung. Eine Übertragung der Untersuchungsergebnisse auf die im landwirtschaftlichen Bereich üblichen Substrate bzw. landwirtschaftliche Biogasanlagen ist nicht möglich. Biogut ist dabei im engeren Verständnis der Inhalt einer durchschnittlichen Biotonne aus der haushaltsnahen Erfassung¹. Für die Gegenüberstellung der Verfahren im Rahmen der Ökoeffizienzanalyse wird jeweils die gleiche Zusammensetzung des Bioguts angenommen. In der Regel ist als Inhalt der Biotonne eine Mischung aus strukturarmen Küchenabfällen bzw. Speiseresten und strukturreicherem, pflanzlichem Material zu erwarten. Die Zusammensetzung des erfassten Bioguts unterliegt jahreszeitlichen Schwankungen.

Grüngut ist hinsichtlich Menge und Zusammensetzung ebenso starken jahreszeitlichen Schwankungen unterworfen. Beispielsweise bestehen die Grünabfälle im Sommer fast ausschließlich aus Grasschnitt, während im Winter vornehmlich Äste und Zweige anfallen. Näherungsweise geht bifa anlog zu [DBU 2002] davon aus, dass Grüngut im Mittel jeweils zur Hälfte aus Weichgut und holzig-strauchigen Anteilen besteht.

Anmerkung Systemgrenze

Der Kompostierung bzw. der Vergärung gehen die haushaltsnahe Erfassung der Abfälle im Hol- oder Bringsystem und der Transport zur Verwertungsanlage voraus. Diese Erfassungs-Schritte sind allen Verfahren gleichermaßen vorangestellt. Sie werden daher für den Vergleich der Verwertungsverfahren nicht berücksichtigt. Untersuchungen des bifa zu umweltbezogenen Bewertung von Entsorgungswegen zeigen, dass der Einfluss der Erfassung auf die gesamten Umweltwirkungen einer Entsorgungskette in der Regel gering ausfällt. Dagegen sind aus ökonomischer Sicht die Kosten für die Erfassung insbesondere bei Holsystemen ein maßgeblicher Faktor, der bei Gestaltung kommunaler Entsorgungsstrukturen nicht außer Acht gelassen werden darf.

¹ Oftmals wird für die über die Biotonne erfassten Abfälle der Begriff Bioabfall verwendet. Um Fehldeutungen zur Definition des Begriffes Bioabfall nach KrWG zu vermeiden, wird in dieser Untersuchung der Begriff Biogut verwendet.

5 Ökoeffizienzanalyse Behandlungsverfahren

5.1 Vorbemerkungen

Ausgangspunkt für die Analyse der Ökoeffizienz ist zunächst ein durchschnittlicher Anlagenbetrieb des jeweiligen Verfahrens. Die Formulierung des durchschnittlichen Anlagenbetriebs (Basisszenario) für die genannten Behandlungsverfahren steht stellvertretend für bestehende Anlagen und typische Betriebsweisen. Der durchschnittliche Anlagenbetrieb bildet damit den Ausgangspunkt für die Evaluierung von Optimierungsansätzen. Er ist deshalb nicht im Sinne einer best-practise formuliert. Die konkrete Anlagensituation vor Ort kann erheblich davon abweichen. Bei der Übertragung der Ergebnisse auf die Einzelanlage, sind deshalb die jeweiligen Rahmenbedingungen vor Ort zu berücksichtigen. Ziel des Verfahrensvergleichs ist es nicht, pauschal ein Vorzugsverfahren zu identifizieren. Um die Frage zu beantworten, welche Behandlungsstrategie für einen konkreten Entsorgungsfall in einer Stadt, einem Landkreis oder einem Zweckverband die ökoeffizienteste ist, muss die tatsächliche Situation vor Ort beispielsweise mit Blick auf das bereitgestellte Material, die vorhandene Anlageninfrastruktur, die konkrete Prozesstechnik, die Absatzsituation für die stofflichen Produkte sowie die erzeugte Wärme und dem konkreten ökonomischen Rahmen bilanziert werden.

5.2 Annahmen für durchschnittlichen Anlagenbetrieb

Der Verfahrensvergleich stellt für die Verfahren, die aktuell typischerweise zur Entsorgungsstruktur von Bio- und Grüngut eingesetzt werden, die Umweltwirkungen und Behandlungskosten gegenüber. Die Verfahren sind:

- Offene Kompostierung von Biogut (Szenario KO)
- Teilgeschlossene Kompostierung von Biogut (Szenario KTG)
- Geschlossene Kompostierung von Biogut (Szenario KG)
- Diskontinuierliche Trockenvergärung von Biogut mit anschließender Kompostierung der festen Gärrückstände (Szenario Batchverfahren)
- Kontinuierliche Trockenvergärung von Biogut mit anschließender Kompostierung der festen Gärrückstände (Szenario Pfropfenstromverfahren)
- Kontinuierliche Nassvergärung von Biogut mit anschließender Kompostierung der festen Gärrückstände (Szenario Nassvergärung)
- Thermische Behandlung von Biogut als Teil des Restabfalls in Müllverbrennungsanlagen (Szenario MVA)
- Offene Kompostierung von Grüngut inkl. der energetischen Verwertung einer holzigen heizwertreichen Teilmenge (Szenario GG_KO/eV)

Die Behandlungsstrategien sind nicht beliebig gegeneinander austauschbar, obwohl stets Bio- bzw. Grüngut entsorgt werden. So sind sowohl Kompostier- als auch Vergärungsverfahren auf bestimmte strukturelle Eigenschaften der zu verwertende Abfälle angewiesen. Ligninhaltige Anteile im Biogut sind

anaerob schwer abbaubar und daher für die Vergärung wenig geeignet. Kontinuierliche Vergärungsverfahren bevorzugen eher Substrate mit geringeren Strukturanteilen, geringeren Trockensubstanzgehalten und hohen Gehalten an organischer Substanz für einen günstigen Biogasertrag.

Die thermische Behandlung in einer MVA bezieht sich auf biogenes Material, das über die Restmülltonne erfasst wird. In dieser Form ist das Material nicht unmittelbar für eine stoffliche Verwertung geeignet, da Kompostierung und Vergärung getrennt erfasste Fraktionen mit geringen Störstoffanteilen benötigen.

Nach der Abtrennung einer holzigen heizwertreichen Teilmenge, die der energetischen Verwertung in einem Biomasseheizkraftwerk zugeführt wird, gehen der offenen Grüngutkompostierung die verbliebenen Grüngutanteile zu. Mit der Novelle der Bioabfallverordnung ist, abgesehen von der Eigenverwertung, das Ausbringen von unbehandeltem Grüngut als Häckselgut auf landwirtschaftliche Flächen (Flächenkompostierung) in aller Regel nicht mehr als Behandlungsweg vorgesehen. Deswegen ist dieser Behandlungsweg nicht Bestandteil des im Rahmen dieses Vorhabens durchgeführten Vergleichs.

Für jedes Verfahren ist eine Vielzahl von Variationen hinsichtlich der konkreten verfahrenstechnischen Ausgestaltung oder der Verwertungswege für die Produkte möglich. Die folgenden Tabellen fassen die Annahmen zusammen, auf denen der Verfahrensvergleich beruht.

Tabelle 3: Konkretisierung der Kompostierungsverfahren für Biogut

Parameter	Kompostierung, offen	Kompostierung, teilgeschlossen	Kompostierung, geschlossen
Emissionssituation	Offene Miete, ohne Abluftreinigung	Geschlossene Intensivrotte, mit Abluftreinigung; offene bzw. überdachte Nachrotte	Vollständig geschlossene Rotte, mit Abluftreinigung
C-/N-Emissionen Behandlung	Siehe <i>Tabelle 7</i>		
Menge zur energetischen Verwertung	12% des Inputs als heizwertreiche Fraktion (Heizwert: 13 MJ/kg) → hauptsächlich Siebreste aus der Konfektionierung der Endprodukte		
Stoffliche Produkte	Fertigkompost: 77%; Frischkompost: 23%		
N-Emissionen Lagern, Ausbringen der Produkte	NH ₃ -Emissionen ¹ : Fertigkompost: 20% des applizierten NH ₄ -N zzgl. 1/6 aus Lagerung Frischkompost: 20% des applizierten NH ₄ -N und 2% von N _{ges} zzgl. 1/6 aus Lagerung N ₂ O-Emissionen ² : vernachlässigbar		

¹ Cuhls 2012, ² LfL 2012

Tabelle 4: Konkretisierung der Vergärungsverfahren für Biogut

	Batchvergärung	Propfenstromvergärung	Nassvergärung
Geeigneter Input	TS-Gehalte > 30 bis 40%, daher nur für strukturhaltiges Material geeignet	TS-Gehalte 20 bis 30%, keine Probleme bei strukturhaltigen Materialien	TS-Gehalte <15%, Probleme bei strukturhaltigen Materialien
Emissionssituation	Geschlossene Ausführung der Fermenter; Nachbehandlung der festen Gärprodukte mit geschlossener Ausführung der emissionsrelevanten Bereiche; Abluftreinigung mit Biofilter; Lager der flüssigen Gärprodukte ohne gasdichte Abdeckung und Restgasnutzung		
C-/N-Emissionen Behandlung	Siehe <i>Tabelle 7</i>		
Gasertrag (mittlerer Methangehalt)	80 m ³ /t _{input} (55 Vol.% CH ₄)	125 m ³ /t _{input} (60 Vol.% CH ₄)	125 m ³ /t _{input} (60 Vol.% CH ₄)
Menge zur energetischen Verwertung	5% des Inputs als heizwertreiche Fraktion (Heizwert: 11 MJ/kg ³) → Siebüberläufe aus der Zerkleinerung und Klassierung bzw. Siebreste aus der Konfektionierung der Endprodukte		
Separation Fermenter-Output	Ohne fest-flüssig Trennung	Häufig mit fest-flüssig Trennung	Überwiegend mit fest-flüssig Trennung
Stoffliche Produkte	Kompostiertes Gärprodukt	Kompostiertes / flüssiges Gärprodukt	Kompostiertes / flüssiges Gärprodukt
N-Emissionen Lagern, Ausbringen der Produkte	NH ₃ -Emissionen ¹ : Kompostiertes Gärprodukt ¹ : 20% des applizierten NH ₄ -N Flüssiges Gärprodukt ² : 15% des applizierten NH ₄ -N N ₂ O-Emissionen: Kompostiertes Gärprodukt ² : vernachlässigbar Flüssiges Gärprodukt ² : 2% von N _{ges}		
¹ Cuhls 2012; ² LfL 2012; ³ Kern 2010			

Tabelle 5: Konkretisierung der thermischen Behandlung von Biogut als Teil des Restabfalls in Müllverbrennungsanlagen (MVA)

Parameter	Thermischen Behandlung von Biogut als Teil des Restabfalls in MVA
Emissionssituation	Ablufterfassung und Reinigung
Emissionen Behandlung	[Jungbluth 2007] und Anlagenwerte
Stoffliche Produkte	Keine Produkte zur Bereitstellung von Nährstoffen bzw. org. Substanz

Tabelle 6: Konkretisierung des Behandlungsverfahrens für Grüngut

Parameter	Offene Grüngutkompostierung inkl. der energetischen Verwertung einer holzigen heizwertreichen Teilmenge
Emissionssituation	Kompostierung: offene Miete, ohne Abluftreinigung Energetische Verwertung: Ablufferfassung und -reinigung
C-/N-Emissionen Behandlung	Siehe <i>Tabelle 7</i>
Energetische Verwertung	240 kg/t _{Input} - Holzige Teilmenge des Grüngutinputs, abgetrennt bei der Zerkleinerung und Klassierung der Grüngutabfälle (z.B. Fraktion > 40 mm) vor der offenen Kompostierung: 86% (Heizwert: 11 MJ/kg) - Siebreste aus der Konfektionierung der Endprodukte: 14% (Heizwert: 13 MJ/kg)
Stoffliches Produkte	Fertigkompost: 77%; Frischkompost: 23%
N-Emissionen Lagern, Ausbringen der Produkte	Analog Tabelle : NH ₃ -Emissionen ¹ : Fertigkompost: 20% des applizierten NH ₄ -N zzgl. 1/6 aus Lagerung Frischkompost: 20% des applizierten NH ₄ -N und 2% von N _{ges} zzgl. 1/6 aus Lagerung N ₂ O-Emissionen ² : vernachlässigbar

¹ Cuhls 2012; ² LfL 2012

In *Tabelle 7* sind die im Rahmen dieser Untersuchung für die Bewertung der Umweltwirkungen relevanten Emissionen aus der Kompostierung und Vergärung von Bio- und Grüngut nach [Cuhls 2012] zusammengefasst. Grundlage für die Ermittlung der Emissionsfaktoren in [Cuhls 2012] sind Messungen an 19 Kompostieranlagen und 14 Vergärungsanlagen.

Tabelle 7: C-/N –Emissionen bei der Kompostierung und Vergärung von Bio- und Grüngut nach [Cuhls 2012]. Bilanzierte Emissionswerte ergeben sich aus einem Erwartungsbereich für die Emissionsfaktoren definiert als Variabilität innerhalb einer guten fachlichen Praxis nach dem Stand der Technik.

	Offene Kompostierung ¹	Teilgeschlossene Kompostierung ²	Geschlossene Kompostierung ³	Vergärung ⁴	Offene Grüngutkompostierung
Emissionsfrachten CH₄ [g/t Materialinput]					
Bilanzierter Wert	1.900	920	710	3.000	850
Emissionsfrachten NMVOC [g/t Materialinput]					
Bilanzierter Wert	370	74	57	360	490
Emissionsfrachten NH₃ [g/t Materialinput]					
Bilanzierter Wert	470	82	63	130	350
Emissionsfrachten N₂O [g/t Materialinput]					
Bilanzierter Wert	110	88	68	72	72

	Offene Kompostierung ¹	Teilgeschlossene Kompostierung ²	Geschlossene Kompostierung ³	Vergärung ⁴	Offene Grüngutkompostierung
Beschreibung der untersuchten Anlagen [Cuhls 2012]:					
¹ Offene Rottemieten ohne Belüftung und Abgasreinigung					
² Kombination aus geschlossenen und eingehausten Kompostierungsverfahren mit Belüftung und Abgasreinigung sowie nachgeschalteten offenen Kompostierungsverfahren. Keine messtechnische Erfassung der offenen Nachrotte.					
³ Eingehauste Kompostierungsverfahren mit Belüftung und Abgasreinigung					
⁴ Vergärung mit geschlossener Nachrotte					

In [Cuhls 2012] wird auf eine Differenzierung der Emissionen nach Vergärungsverfahren verzichtet. Da keine weiteren Quellen zur Verfügung stehen, die eine belastbare Differenzierung ermöglichen würden, übernimmt bifa die genannten Emissionsfaktoren für alle untersuchten Vergärungsvarianten. Die Batchvergärung weist aus Sicht der mit der Prozessführung verbundenen Emissionen im Vergleich zu den kontinuierlichen Verfahren folgende spezifischen Herausforderungen auf:

- Aufgrund der diskontinuierlichen Betriebsweise entstehen bei der Belüftung der Fermenter bei Wechselvorgängen wie Beschickung und Entleerung u.a. CH₄- und NH₃-haltige Abgase. Zudem wird das Schwachgas während der ersten 24 h der Anfahrphase eines Fermenters häufig über den Biofilter an die Umgebung abgegeben.
- Auf Basis der Erfahrungen der Beiratsmitglieder ist der Fermenter-Output einer Batchvergärung in der Regel stark durchnässt und gleichzeitig nicht abpressbar, so dass im Vergleich zu den festen Gärprodukten der kontinuierlichen Vergärung von potenziell höheren luftseitigen Emissionen insbesondere an CH₄ und NH₃ auszugehen ist.

Diese Herausforderungen können prinzipiell durch Maßnahmen der Emissionsminderung im Rahmen einer guten fachlichen Praxis – z.B. der geschlossenen Ausführung der emissionsrelevanten Bereiche der Gärproduktnachbehandlung, Bereitstellung großer Mengen an strukturgebenden Materialien und der Erfassung möglichst großer Anteile der Fermenterabluft bzw. der Belüftungsabgase – in ihren Wirkungen begrenzt werden. Diese aus Emissionssicht gute fachliche Praxis wird auf den im Rahmen dieser Studie angenommenen durchschnittlichen Betrieb der Batchvergärung übertragen. Dies spiegelt sich auch in den korrespondierenden Behandlungskosten wieder. Für in der Praxis ebenfalls vorhandenen Batch-Anlagen, die mit minimalem Aufwand die Erfassung der Fermenterabluft bzw. Nachbehandlung des Gärproduktes realisieren oder darauf verzichten, würde die Annahme der Emissionen nach [Cuhls 2012] allerdings zu einer zu positiven Bewertung führen.

In *Tabelle 8* sind die für die Bewertung der Umweltwirkungen bedeutendsten Emissionen aus der Lagerung und der Ausbringung der stofflichen Produkte zusammengefasst.

Tabelle 8: Emissionen von N-haltigen Verbindungen bei der Anwendung und Lagerung von Gärprodukten und Komposten. Quelle: Empfehlungen der LfL und [Cuhls 2012].

	BG/GG- Fertig- kompost	BG/GG- Frisch- kompost	GG- Fer- tigkom- post	GG- Frisch- kompost	Gär- produkt kompos- tiert	Gär- produkt flüssig
Gesamt [g/t Produkt]						
NH ₃	89	389	34	211	117	505
N ₂ O	0	0	0	0	0	142
CH ₄	<1	<1	<1	<1	<1	8

BG = Biogut; GG = Grüngut

5.3 Zusatznutzen aus der Behandlung von Bio- und Grüngut

Neben der Behandlung von Bio- und Grüngut resultieren aus den Behandlungsverfahren zusätzliche Nutzen, wie die Bereitstellung von Nährstoffen, organischer Substanz sowie Energie. *Tabelle 9* benennt die energetischen und stofflichen Zusatznutzen und die dadurch substituierten Materialien und Energien aus Primärrohstoffen. Dabei wird angenommen, dass zwischen Sekundär- und Primärrohstoffen eine funktionelle Gleichwertigkeit gegeben ist.

Tabelle 9: Zusatznutzen, die mit den Behandlungsverfahren verbunden sind und zugehörige Äquivalenzsysteme

Zusatznutzen	Äquivalenzsystem
Elektrische Energie aus der energetischen Verwertung von Biogas	Elektrische Energie aus einem fossilen Energieträgermix mit Braunkohle, Steinkohle, Erdgas und Mineralöl entsprechend dem Marginalansatz aus [UBA 2009]
Elektrische Energie aus der energetischen Verwertung von heizwertreichem Material sowie der energetischen Verwertung von Biogut in MVA	Elektrische Energie aus einem fossilen Energieträgermix mit Braunkohle, Steinkohle und Erdgas entsprechend dem Marginalansatz aus [UBA 2009]
Elektrische Energie aus der energetischen Verwertung von Störstoffen	Elektrische Energie aus dem Strommix Deutschland entsprechend der Durchschnittsbewertung (fossile und erneuerbare Energieträger)
Fernwärme aus der energetischen Verwertung von Biogas	Wärme aus Steinkohle, Erdgas und Erdöl entsprechend dem Marginalansatz aus [UBA 2009]
Fernwärme und Prozessdampf aus der energetischen Verwertung von Biogut in MVA	Fernwärme und Prozessdampf aus einem repräsentativen deutschen Erzeugungsmix entsprechend dem Marginalansatz aus [UBA 2009]

Zusatznutzen	Äquivalenzsystem
Fernwärme und Prozessdampf aus der energetischen Verwertung von Störstoffen	Fernwärme und Prozessdampf aus einem repräsentativen deutschen Erzeugungsmix entsprechend der Durchschnittsbewertung
Nährstoffgehalt der Komposte bzw. Gärprodukte (N, P, K, Ca, Mg)	Herstellung von Stickstoffdünger, Phosphordünger, Düngerkalk, Kaliumdünger und Magnesiumdünger
Organische Substanz zur Substitution von Torf und/oder Rindenhumus	Substrat aus der organischen Masse von Torf und/oder Rindenhumus
Organische Substanz zur Reproduktion von Humus	Humus-C aus der organischen Substanz von Ackergras, bereitgestellt durch landwirtschaftliche Produktion

Dem 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 Bio- bzw. Grüngut. Der Quantifizierung der Gutschriften liegen für alle Vergleichsverfahren dieselben konventionellen Herstellungsprozesse zugrunde. Die Höhe der Gutschrift für einen Zusatznutzen ist damit direkt proportional zur bereitgestellten Menge. In *Tabelle 10* und *Tabelle 11* ist dargestellt, welche Zusatznutzen – differenziert in die drei Klassen Energie, Nährstoffe und organische Substanz – die Vergleichsverfahren bereitstellen.

Tabelle 10: Energetische Zusatznutzen aus der Behandlung von Bio- und Grüngut

Verfahren	Energie [kWh/t _{Input}]		
	Elektrische Energie	Fernwärme	Prozessdampf
Biogut			
Kompostierung, offen	80,8	69,4	-
Kompostierung, geschlossen bzw. teilgeschlossen	80,8	69,4	-
Vergärung, Batchverfahren	183,6	86,4	-
Vergärung, Pfropfenstromverfahren	291,8	124,3	-
Nassvergärung	269,0	124,3	-
Behandlung in MVA ¹	82,5	157,5	97,5
Grüngut			
Offene Grüngutkompostierung inkl. der energetischen Verwertung einer holzigen heizwertreichen Teilmenge	132,1	95,8	-

¹ angenommener Heizwert Biogut: 3 MJ/kg [BGK / ZAW 2009]

Tabelle 11: Zusatznutzen an Nährstoffen und organischer Substanz aus der Behandlung von Bio- und Grüngut

Verfahren	Nährstoffe [kg/t _{Input}]					Organische Substanz [kg/t _{Input}]		
	N ¹	K ₂ O ¹	P ₂ O ₅ ¹	CaO ¹	MgO ¹	Torf / Rindenhumus	Humus-C	Seq. Kohlenstoff
Biogut								
Kompostierung, offen ¹	3,65	3,57	2,05	20,0	2,98	43,7	15,5	2,88
Kompostierung, geschlossenen bzw. teilgeschlossen ²	3,74	3,65	2,09	20,5	3,05	44,7	15,9	2,95
Vergärung ³	3,3 ³	3,65	2,09	20,5	3,05	38,4	5,75	2,64
Grüngut								
Offene Grüngutkompostierung ¹ inkl. der energetischen Verwertung einer holzigen heizwertreichen Teilmenge	2,41	2,54	1,23	10,89	2,14	33,1	12,3	2,17

¹ N = Stickstoff; K₂O = Kaliumoxid; P₂O₅ = Diphosphorpentoxid; CaO = Calciumoxid, MgO = Magnesiumoxid
² BGK 2011, FBK 2011
Offene Kompostierung Biogut 430 kg Kompost aus 1 t Material zur Rotte; Offene Grüngutkompostierung 350 kg Kompost aus 790 kg Material zur Rotte (Annahme: 210 kg des Grüngut werden vor der Rotte zur energetischen Verwertung abgetrennt); teil-/geschlossene Kompostierung Biogut: 440 kg Kompost aus 1 t Material zur Rotte
³ Für einen symmetrischen Vergleich von Kompostierung und Vergärung geht bifa davon aus, dass unabhängig von der betrachteten Vergärungsvariante je Tonne vergorenem Biogut absolut die Mengen an K₂O, CaO, MgO und P₂O₅ aus der geschlossenen/teilgeschlossenen Kompostierung bereitgestellt werden. N-Gehalte werden spezifisch für Batch-, für Propfenstrom-, Nassvergärung berechnet. Die aus einer Tonne Biogut erzeugte nutzbare Menge an organischer Substanz wird für alle Vergärungsvarianten gleich angenommen basierend auf der Verrechnung der Produktmengen aus der Propfenstromvergärung mit den entsprechenden BGK-Angaben.

Kompostierungs- und Vergärung stellen Nährstoffe und organische Substanz bereit. Der stoffliche Nutzen wird sowohl in Vergärungsanlagen (über die Verwertung des im Fermenter entstehenden Biogases in Blockheizkraftwerken sowie das Ausschleusen einer heizwertreichen Fraktion aus der Vorsortierung und der Kompostaufbereitung) als auch in Kompostieranlagen (über das Ausschleusen einer heizwertreichen Fraktion aus der Kompostaufbereitung) mit der Nutzung des Energieinhalts aus schwer abbaubaren Anteilen gekoppelt. Die Behandlung als Teil des Restabfalls in einer MVA nutzt dagegen ausschließlich den Energieinhalt des Bioguts.

5.4 Umweltwirkungen und Ökologie-Index

Die Ermittlung der Umweltwirkungen für jedes der Verfahren erfolgt anhand der in Kapitel 10.1 beschriebenen Methodik. Für die Analyse der Umweltwirkungen wird eine Darstellung gewählt, in der die Umweltwirkungen ihrer Herkunft nach den Abschnitten der Entsorgungskette zugeordnet werden. Die Darstellung erleichtert die Analyse aus betrieblicher bzw. technischer Sicht. Dafür sind folgende Sektoren definiert worden:

- Umweltbelastungen aus dem eigentlich Prozess, dem Ausbringen und Lagern der stofflichen Produkte und der Entsorgung der Rückstände (linker farblich unterteilter Balken nach oben).
- Umweltentlastungen (Gutschriften) aus bereitgestelltem Zusatznutzen für Energie, Dünger und organische Substanz (linker farblich unterteilter Balken nach unten).
- Nettoergebnis aus der Verrechnung der Umweltbe- und -entlastungen (rechter einheitlich grüner Balken nach oben bzw. unten).

Biogutbehandlung

In *Abbildung 2* ist zu sehen, dass aus der offenen Kompostierung insgesamt eine geringe Umweltentlastung resultiert, während alle anderen Behandlungsverfahren insgesamt zu deutlicheren Umweltentlastungen führen.

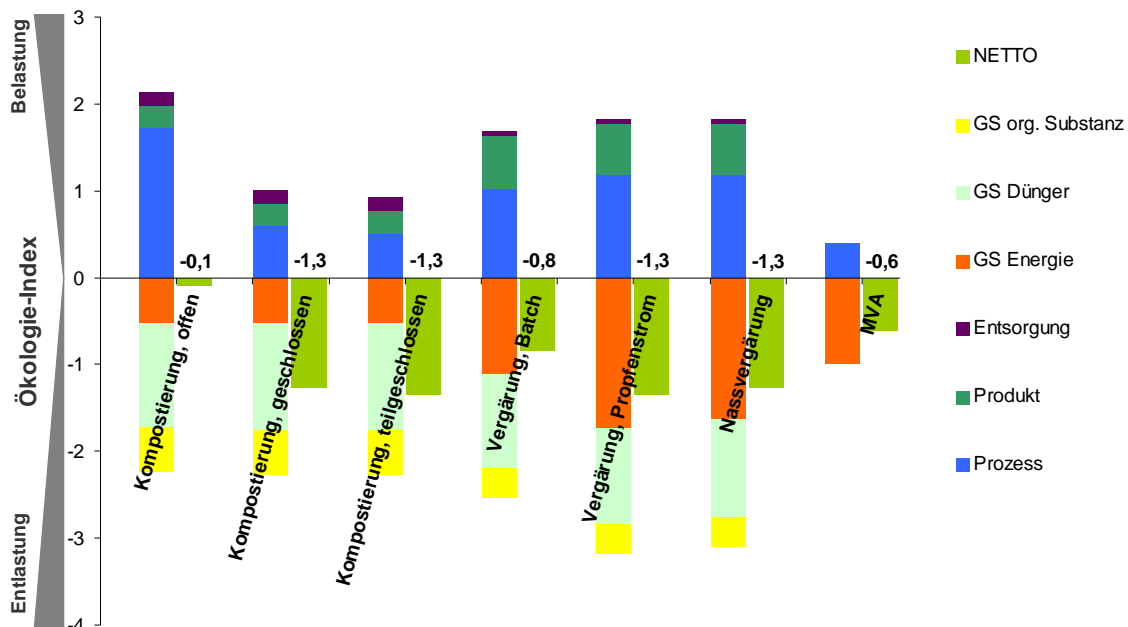


Abbildung 2: Biogutbehandlung: Beiträge der Sektoren zum Ökologie-Index der Basisszenarien (GS = Gutschrift)

Abbildung 2 zeigt, dass

- bei den Kompostierungsverfahren die Umweltbelastungen hauptsächlich durch Emissionen aus den Prozessen selbst bestimmt sind. Zwischen 54% und 80% der Belastungen resultieren vorwiegend aus der Intensiv- und Nachrotte. Die restlichen Umweltbelastungen stammen vor allem aus der Verwertung der stofflichen Produkte Frisch- und Fertigkompost. Umweltentlastungen sind bei den Kompostierungsverfahren größtenteils auf die Substitution von Nährstoffen zurückzuführen. Ca. 54% der Entlastungen entfallen auf diese Gutschriften. Die restlichen Umweltentlastungen können zu ähnlichen Anteilen der Substitution fossiler Energieträger sowie der Bereitstellung organischer Substanz zugeordnet werden. Bei Betrachtung des ökologischen Gesamtergebnisses führt die offene Kompostierung zu einer geringen Umweltentlastung während die geschlossene und teilgeschlossene Kompostierung deutlich zur Umweltentlastung beitragen.

- bei den Vergärungsverfahren die Umweltbelastungen hauptsächlich durch Emissionen aus den Prozessen selbst bestimmt sind. 60% bzw. 63% aller Belastungen resultieren vorwiegend aus der Fermentation und insbesondere aus dem Handling der Gärprodukte. Die restlichen Umweltbelastungen stammen vor allem aus der stofflichen Verwertung der flüssigen und kompostierten Gärprodukte. Beim Batchverfahren resultieren Gutschriften in ungefähr gleicher Größenordnung sowohl aus der Substitution fossiler Energieträger als auch von Nährstoffen. Jeweils ca. 43% der Entlastungen entfallen auf diese Gutschriften. Beim Pfropfenstromverfahren und bei der Nassvergärung sind die Gutschriften dagegen hauptsächlich auf die Substitution fossiler Energieträger infolge der Energieerzeugung aus dem Biogas sowie der heizwertreichen Fraktion zurückzuführen. Zwischen 53% und 54% der Entlastungen entfallen auf diese Gutschriften. Von den verbleibenden Gutschriften stammt der größte Teil aus der Substitution von Nährstoffen. Bei Betrachtung des ökologischen Gesamtergebnisses tragen die Vergärungsverfahren durchweg zu einer Umweltentlastung bei.
- bei der thermischen Verwertung in einer MVA die Umweltbelastungen fast ausschließlich aus dem Verbrennungsprozess resultieren und die Umweltentlastungen vollständig auf die substituierten fossilen Energieträger zurückzuführen sind. Bei Betrachtung des ökologischen Gesamtergebnisses führt die thermische Verwertung in einer MVA zu einer Umweltentlastung.

Grüngutbehandlung

Abbildung 3 zeigt, dass aus der Grüngutbehandlung insgesamt eine Umweltentlastung resultiert.

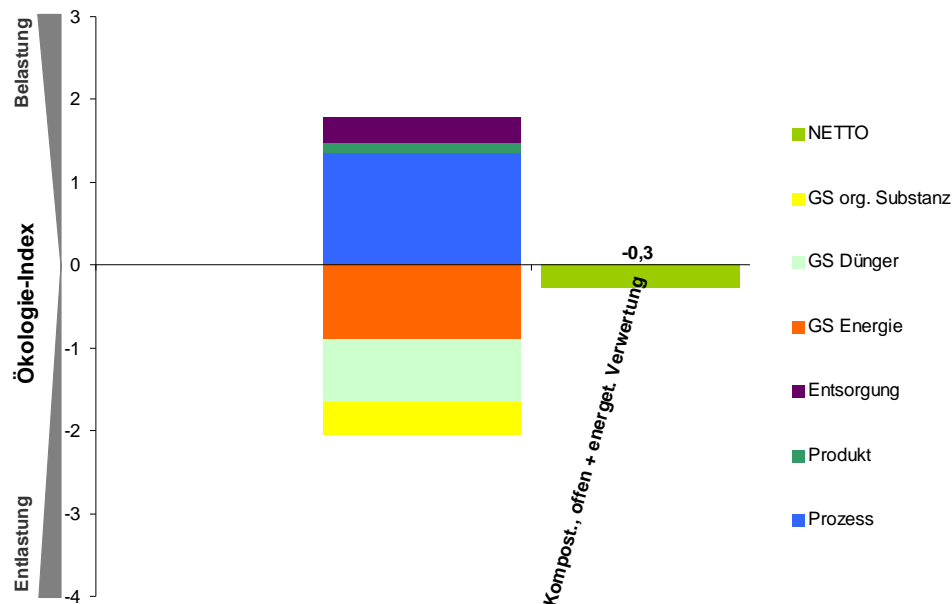


Abbildung 3: Grüngutbehandlung: Beiträge der Sektoren zum Ökologie-Index der Basisszenarien (GS = Gutschrift).

Abbildung 3 zeigt, dass bei der Behandlung von Grüngut in der offenen Kompostierung inklusive der energetischen Verwertung einer holzigen heizwertreichen Teilmenge die Umweltbelastungen hauptsächlich durch Emissionen aus dem Prozess bestimmt sind. Ca. 76% der Belastungen resultieren aus der Haupt- und Nachrotte. Die restlichen Umweltbelastungen stammen in ähnlicher Größenordnung aus

der stofflichen Verwertung der Frisch- und Fertigungskomposte sowie der Verwertung der heizwertreichen Fraktionen und der Beseitigung der Störstoffe. An den Umweltentlastungen, die aus der offenen Kompostierung von Grüngut resultieren, hat die Substitution fossiler Energieträger den größten Anteil. Ca. 44% der Entlastungen entfallen auf diese Gutschriften. Ca. 37% der Gutschriften resultieren aus der Substitution von Nährstoffen und die restlichen 19% können der Bereitstellung organischer Substanz zugeordnet werden. Bei Betrachtung des ökologischen Gesamtergebnisses trägt die offene Kompostierung von Grüngut zu einer Umweltentlastung bei.

5.5 Behandlungskosten

Der ökonomische Teil der Ökoeffizienzanalyse rekurriert auf die Kosten der Behandlung. Unter Kosten sind dabei die Aufwendungen zu verstehen, die den Städten und Landkreisen Netto bei der externen Beauftragung der Behandlungsleistung entstehen. Dafür wurden in Zusammenarbeit mit dem Beirat auf Basis von Netto-Preisen und den Ergebnissen aus [bifa 2010] Kostenwerte abgeschätzt, die einen Anlagenbetrieb nach guter fachlicher Praxis beschreiben. Die Kosten für die Erfassung der Abfälle sind nicht Bestandteil des Verfahrensvergleichs. Den angenommenen Behandlungskosten liegen Informationen von realisierten Anlagen zugrunde. Sie setzen daher eine für die jeweilige Technik wirtschaftlich zu realisierende Anlagenkapazität zugrunde. Eine Normierung der Kosten auf eine definierte Anlagenkapazität wurde nicht vorgenommen. Die Behandlungskosten werden erheblich durch die mit der Anlagenkapazität verbundenen positiven bzw. negativen Skaleneffekte beeinflusst. So lassen sich nach Aussage des Beirats Vergärungsanlagen mit einem Jahresdurchsatz kleiner als 10.000 bis 15.000 Tonnen kaum wirtschaftlich betreiben. Für die Ökoeffizienzanalyse der Behandlungsverfahren werden nicht die absoluten spezifischen Behandlungskosten abgebildet, sondern auf den Maximalwert der Verfahren normierte Kosten-Index Punkte.

Tabelle 12: *Angenommene Kosten-Index Punkte für die Vergleichsverfahren auf Basis von Behandlungskosten, die einem Betrieb nach guter fachlicher Praxis entsprechen.*

	Behandlung von Biogut als Teil des Restabfalls in MVA	Offene Kompostierung	Teilgeschlossene Kompostierung	Geschlossene Kompostierung	Batchvergärung	Propfenstromvergärung	Nassvergärung	Offene Grüngutkompostierung ¹
Kosten-Index Punkte	1	0,38	0,52	0,7	0,75	0,59	0,46	0,28

¹ Mittelung aus Behandlungskosten für energetischen Verwertung und offene Kompostierung

Die thermische Behandlung von Biogut als Teil des Restabfalls ist das kostenintensivste Verfahren. Die technisch einfache, offene Kompostierung ist die preisgünstigste Möglichkeit zur Biogutbehandlung. Die aufwendigeren Vergärungsverfahren und die geschlossenen/teilgeschlossenen Kompostierungsverfahren liegen mit Blick auf die angenommenen Kosten nahe beieinander.

Die Behandlungskosten für Grüngut fallen im Vergleich zum Biogut geringer aus.

5.6 Ökoeffizienzanalyse

Die Ökoeffizienzanalyse stellt das Ergebnis der ökobilanziellen Betrachtung den mit der Behandlung verbundenen spezifischen Kosten gegenüber. Dafür werden nicht die absoluten spezifischen Behandlungskosten verwendet, sondern auf den Maximalwert normierte Kosten-Index Punkte. Die Visualisierung der Ergebnisse zeigen die Ökoeffizienz-Portfolios in *Abbildung 4* und *Abbildung 5*. Ein Ökoeffizienz-Portfolio ist so aufgebaut, dass in Richtung links unten im Diagramm Verfahren mit niedriger Ökoeffizienz (hohen Kosten- und positive Ökologie-Indizes, also Umweltbelastungen) zu finden sind, während Verfahren mit hoher Ökoeffizienz (niedrige Kosten- und negative Ökologie-Indizes, also Umweltentlastungen) in Richtung rechts oben aufgetragen werden.

5.6.1 Biogutbehandlung

Das Portfolio in *Abbildung 4* zeigt einen durchschnittlichen Betrieb der jeweiligen Verfahren zur Biogutbehandlung.

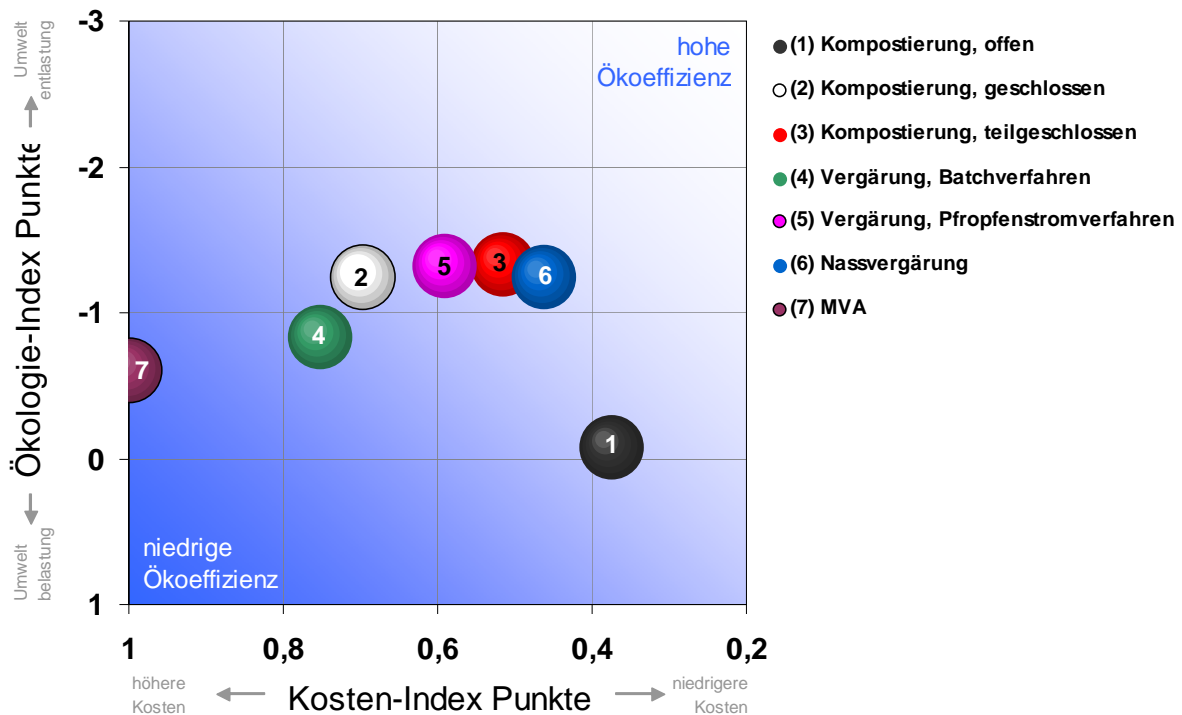


Abbildung 4: Biogutbehandlung: Ökoeffizienz-Portfolio der untersuchten Verfahren (Ökologie-Index < 0 bedeutet Umweltentlastung; Ökologie-Index > 0 bedeutet Umweltbelastung; Kosten-Index: Normierung der verfahrensspezifischen Kosten am Maximalwert der untersuchten Behandlungsverfahren – vgl. Tabelle 12). Bezugsseinheit: Behandlung von 1 t Biogut.

Die offene Kompostierung stellt bzgl. der Verwertung von Biogut zwar das kostengünstigste Verfahren dar, ist aber auf der anderen Seite das Verfahren mit der geringsten Umweltentlastung. Alle anderen Verfahren führen zu einer größeren Entlastung der Umwelt, wobei die geschlossene und teilgeschlossene Kompostierung sowie das Pfropfenstromverfahren und die Nassvergärung ähnlich gut abschneiden. Von diesen vier Verfahren weisen die Vergärung im Pfropfenstromverfahren und die teilgeschlossene Kompostierung die – wenn auch nur geringfügig abweichend – niedrigsten Ökologie-Indices auf.

Die thermische Verwertung in einer MVA sowie die Vergärung im Batchverfahren liegen im Mittelfeld der Behandlungsverfahren für Biogut.

Beim Kosten-Index folgen auf die schon erwähnten niedrigsten Kosten für die offene Kompostierung die teilgeschlossene Kompostierung sowie die Nassvergärung. Die höchsten Kosten werden bei der thermischen Verwertung in einer MVA verursacht.

Viele zur Beschreibung notwendige Parameter wie beispielsweise Emissionsfrachten, Energieauskopp- lung und Nutzung der stofflichen Produkte variieren von Anlage zu Anlage erheblich. Die Ansätze zur Verbesserung des Anlagenbetriebs sowie Sensitivitäten/Verfahrensvarianten in den Kapiteln 6 und 7 tragen dem Rechnung und zeigen Optimierungspotenziale auf.

5.6.2 Grüngutbehandlung

Das Portfolio in *Abbildung 5* zeigt einen durchschnittlichen Betrieb des untersuchten Verfahrens zur Grüngutbehandlung.

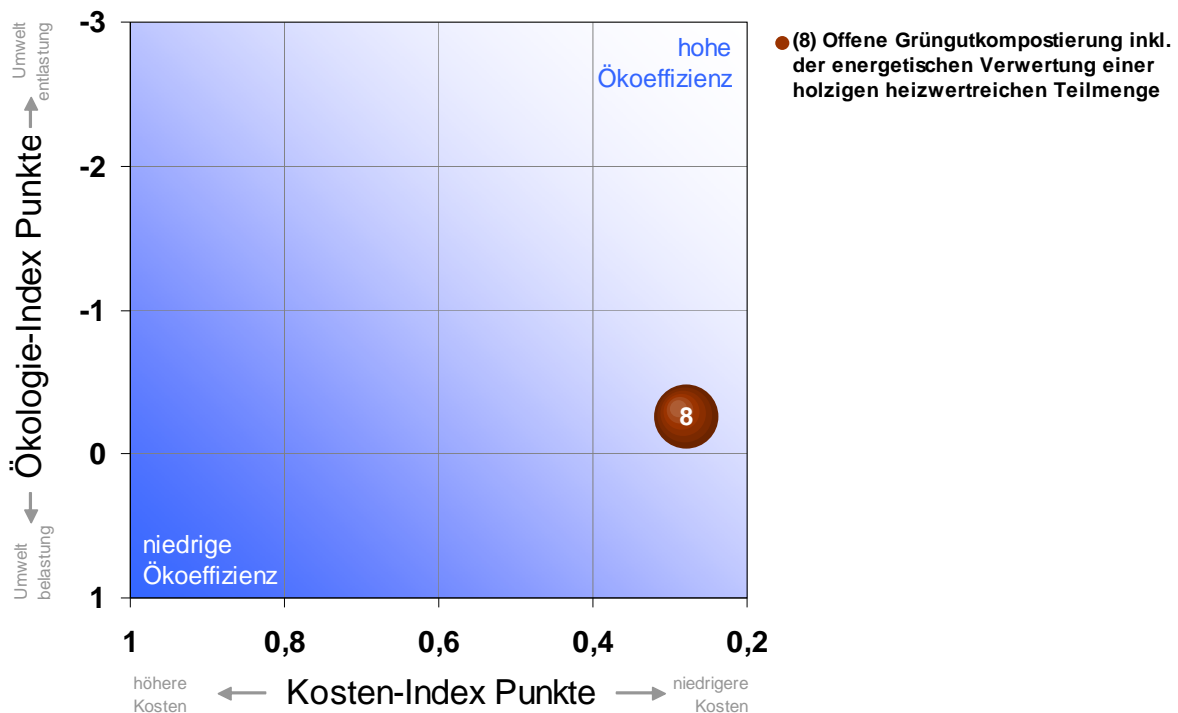


Abbildung 5: Grüngutbehandlung: Ökoeffizienz-Portfolio des untersuchten Verfahrens (Ökologie-Index < 0 bedeutet Umweltentlastung; Ökologie-Index > 0 bedeutet Umweltbelastung; Kosten-Index: Normierung der verfahrensspezifischen Kosten am Maximalwert der untersuchten Behandlungsverfahren – vgl. Tabelle 12) Bezugseinheit: Behandlung von 1 t Grüngut.

Wie bei der Biogutbehandlung werden mögliche Ansätze zur Verbesserung des Anlagenbetriebs sowie Sensitivitäten/Verfahrensvarianten in den Kapiteln 6 und 7 untersucht und Optimierungspotenziale aufgezeigt.

6 Variationen und Sensitivitäten zum durchschnittlichen Betrieb

Die durchschnittlichen Verfahren zur Behandlung von Bio- und Grüngut lassen sich nicht in allen Einflussgrößen und Parametern eindeutig fixieren. In Ergänzung zu den beschriebenen durchschnittlichen Anlagenbetrieben, beleuchtet das folgende Kapitel deshalb relevante prozesstechnische Varianten und Einflüsse, die beispielsweise aufgrund eines standortabhängigen Anlagenumfelds als Wertintervalle abgebildet werden.

6.1 Biogas: Vergärungsverfahren

6.1.1 Externe Nutzung der Abwärme: Maximaler bzw. minimaler Wärmeabsatz

Für die energetische Nutzung des Biogases im Blockheizkraftwerk wird im durchschnittlichen Anlagenbetrieb von einer Stromausbeute von ca. 38 % und einem Ertrag von 49 % thermischer Energie ausgegangen. Die erzeugten Mengen an elektrischer und thermischer Energie decken zunächst den Eigenbedarf. Darüber hinaus kann Energie an Dritte abgegeben werden. bifa geht in konservativer Näherung bisher davon aus, dass im Anlagendurchschnitt 25 % der erzeugten Abwärme, das bedeutet 92 kWh/t Abfall (Nass- und Pfropfenstromvergärung) bzw. 54 kWh/t Abfall (Batchvergärung) als Fernwärme an Dritte abgegeben werden. Die folgende Tabelle fasst die Annahmen zur Beschreibung einer maximalen bzw. minimalen externen Wärmenutzung mit Blick auf die Abbildung ökonomischer und umweltbezogener Wirkungen zusammen. Die Bandbreite der Anlagensituationen ist zwischen diesen beiden Polen zu finden.

Tabelle 13: *Maximaler bzw. minimaler Wärmeabsatz bei der Vergärung. Angenommene Änderungen im Vergleich zum durchschnittlichen Anlagenbetrieb*

	Maximaler Wärmeabsatz	Minimaler Wärmeabsatz
Umweltwirkung	Vollständiger Absatz der für eine externe Nutzung zur Verfügung stehenden Wärme (320 kWh/t bei kontinuierlicher Nass- und Pfropfenstromvergärung bzw. 250 kWh/t für Batchvergärung nach [UMBW 2011 und UBA 2010]).	Kein Absatz der für eine externe Nutzung zur Verfügung stehenden Wärme.
Ökonomische Wirkung ¹	Mehrerlöse bis zu 6 EUR/t Biogas für kontinuierliche Verfahren bzw. 4 EUR/t für die Batchvergärung.	Erlösminderung: 2 EUR/t (kontinuierliche Verfahren) bzw. 1 EUR/t (Batchvergärung).

¹ Angenommener Erlös von 2,5 Cent/kWh. Die Kostenabschätzung impliziert, dass die Abwärmenutzungsanlagen (Abwärmeauskopplungsanlage und Wärmetransport- und -verteilssystem) bereits vorhanden sind.

6.1.2 Aufbereitung von Biogas und Einspeisung ins Erdgasnetz

Im durchschnittlichen Anlagenbetrieb wird das erzeugte Biogas in einem Blockheizkraftwerk am Standort zur Strom- und Wärmeproduktion eingesetzt. Bei größeren Anlagen kann die Aufbereitung des Biogases auf Erdgasqualität und die anschließende Einspeisung eine Alternative bieten [UBA 2010 S.138].

Umweltbezogene Wirkungen

Für den Methanschlupf werden 0,2 % der der Aufbereitung zugeführten Methanmenge angenommen. Der Stromverbrauch für die Aufbereitung beträgt 0,25 kWh/Nm³ Biogas². Aufgrund der fehlenden Biogasverwertung am Standort ist außerdem der Eigenbedarf der Vergärungsanlage an Wärme – ca. 30% der erzeugten Wärme – und ggf. Strom durch externe Quellen zu decken³. Nach der Einspeisung kann das Biogas in allen Erdgasanwendungen beispielsweise stationären Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen als Substitut für Erdgas eingesetzt werden.

Ökonomische Wirkungen

Die ökonomischen Perspektiven der Biogasaufbereitung und -einspeisung sind umfassend in [BMBF 2008] dargestellt. Hinsichtlich wirtschaftlicher Anlagengrößen zeigt diese Untersuchung, dass bei kleineren Biogaserzeugungsanlagen mit 250 Nm³/h Rohbiogas⁴ wesentlich höhere spezifischere Kosten entstehen als in Anlagen mit größeren Kapazitäten. Wirtschaftlich attraktive Anlagengrößen liegen zwischen 500 und 1.400 Nm³/h Rohbiogas. Nach Auskunft des Beirats sind unter den aktuellen Rahmenbedingungen Projekte für Vergärungsanlagen mit einer Anlagenkapazität von 40.000 t bzw. einer Rohbiogasmenge ab 600-700 Nm³/h wirtschaftlich realisierbar. Die Kalkulation muss stets im Einzelfall anhand der konkreten Betriebsparameter und Verhandlungen mit dem Biogasabnehmer erfolgen.

6.1.3 Analyse der umweltbezogenen Wirkungen

Die Analyse der Sensitivitäten und Variationen hinsichtlich ihrer umweltbezogenen Wirkungen erfolgt zunächst beispielhaft anhand der Propfenstromvergärung. Die folgende Abbildung veranschaulicht die Umweltentlastungen, die mit den untersuchten Sensitivitäten und Variationen im Vergleich zum durchschnittlichen Anlagenbetrieb verbundenen sind. Die Darstellung erfolgt sektoral gegliedert nach lebenswegbezogener Herkunft der Umweltbe- und -entlastungen und aggregiert über alle analysierten Umweltwirkungen.

² Das EEG 2012 sieht als Anspruchsvoraussetzung für den Gasaufbereitungsbonus einen Stromverbrauch für die Aufbereitung von höchstens 0,5 kWh/Nm³ und Methanemissionen von höchstens 0,2 % des Methaninputs vor.

³ Wenn das eingespeiste Biogas in EEG-Anlagen verwendet werden soll, muss der Eigenbedarf durch erneuerbare Energien im Sinne des EEG gedeckt werden.

⁴ entspricht einer Bioabfallbehandlungskapazität von ca. 16.000 t/a (BSZ: 8000h/a und 125 Nm³/t)

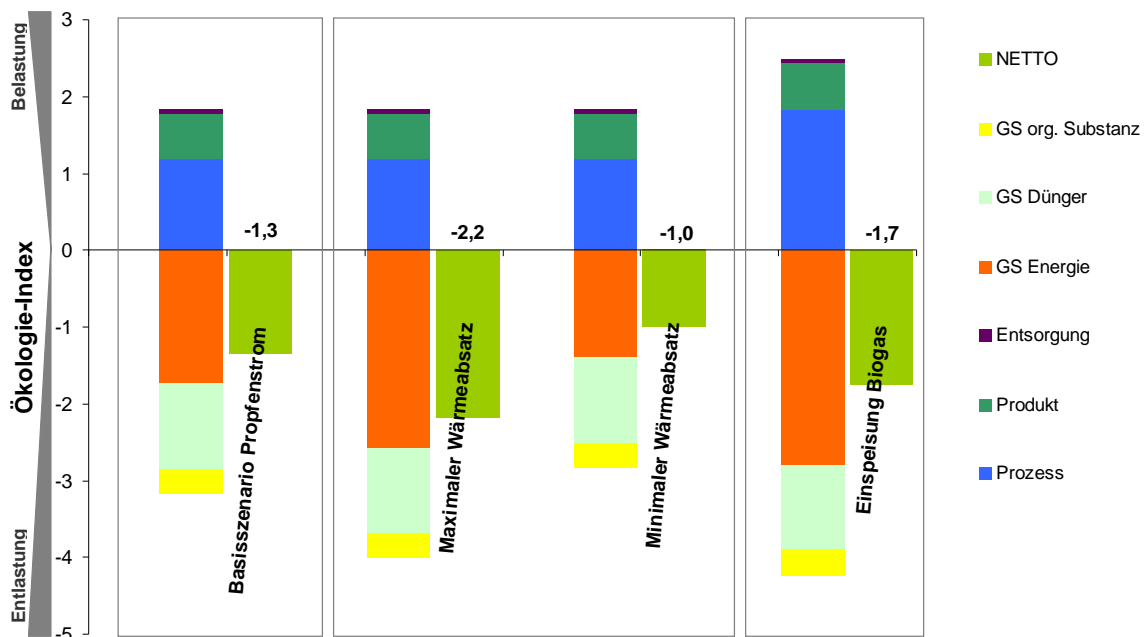


Abbildung 6: Biogutvergärung: Durchschnittlicher Betrieb Propfenstromvergärung (Basisszenario Propfenstrom), Sensitivitäten und Variationen im Vergleich. Ökologie-Index der analysierten Ansätze differenziert nach lebenswegbezogener Herkunft. Bezugseinheit: Behandlung von 1 t Biogut. Negative Ökologie-Indizes repräsentieren Umweltentlastungen.

Der Absatz der für die externe Nutzung bereitgestellten Wärme hat signifikanten Einfluss auf die umweltbezogene Bewertung der Vergärung. Für den Good-Case der vollständigen Wärmenutzung wird im Vergleich zum durchschnittlichen Anlagenbetrieb die genutzte Wärmemenge mehr als verdreifacht. Durch die zusätzlichen Gutschriften aus der Substitution der konventionellen Wärmeerzeugung wird eine sehr deutliche Steigerung der Gesamtumweltentlastung erzielt. Dagegen ist die fehlende externe Nutzung der Wärme mit geringeren Gutschriften und korrespondierend mit geringeren Gesamtumweltentlastungen verbunden.

Die Einspeisung des Biogases in das Erdgasnetz ist aus umweltbezogener Sicht eine Alternative bei ungünstigen oder fehlenden Möglichkeiten zur externen Wärmenutzung am Standort. Die Aufbereitung und Einspeisung des Biogases zur zentralen Erzeugung von Strom und Wärme erhöht die Gutschriften. Allerdings stehen den Gutschriften die Belastungen entgegen, die aus der nun erforderlichen externen Bereitstellung der zur Vergärung benötigten Wärme- und Strommengen entstehen. Ein weiterer Vorteil der Biogaserzeugung durch anaeroben Abbau und besonders dessen Einspeisung ins Erdgasnetz ist es, dass die enthaltene Energie prinzipiell in einer speicherfähigen Form zur Verfügung steht, die eine örtlich und zeitlich flexible und an der Nachfrage orientierte Nutzung ermöglicht.

6.1.4 Ökoeffizienzanalyse

Das folgende Ökoeffizienz-Portfolio kombiniert für die Sensitivitäten und Variationen die beschriebenen Änderungen der Umweltwirkungen mit den verbundenen Änderungen der Behandlungskosten und stellt prozentual die Abweichung vom durchschnittlichen Betrieb der Propfenstromvergärung dar.

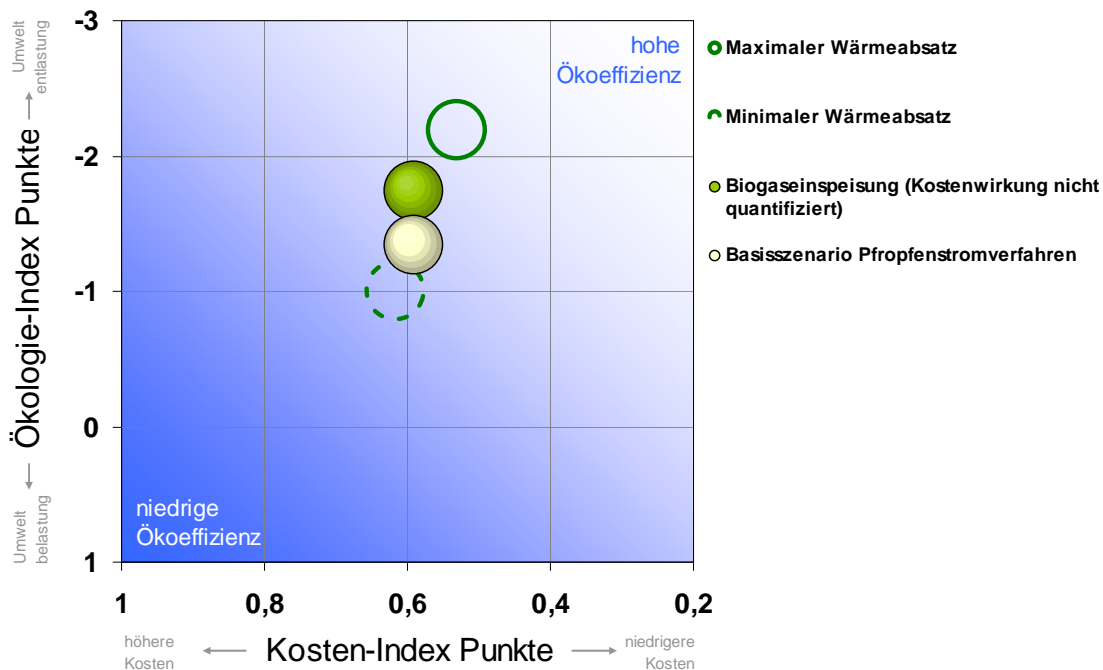


Abbildung 7: *Biogutvergärung: Durchschnittlicher Betrieb Pfpfenstromvergärung (Basisszenario Pfpfenstrom), Sensitivitäten und Variationen im Vergleich (Ökologie-Index < 0 bedeutet Umweltentlastung; Ökologie-Index > 0 bedeutet Umweltbelastung; Kosten-Index: Normierung der verfahrensspezifischen Kosten am Maximalwert der untersuchten Behandlungsverfahren – vgl. Tabelle 12). Bezugseinheit: Behandlung von 1 t Biogut. Kostenwirkung der Biogaseinspeisung nicht quantifiziert.*

Die Steigerung der am Standort für eine externe Nutzung eingesetzten Wärmemenge bietet das größte Ökoeffizienzpotenzial.

6.2 Biogut: Kompostierungsverfahren

Für die Kompostierungsverfahren wurde in einer Sensitivitätsbetrachtung der Bedarf an Sekundärdünger dem Bedarf an organischer Substanz gegenüber gestellt.

6.2.1 Anwendung der Komposte

Tabelle 14 zeigt die für den durchschnittlichen Anlagenbetrieb angenommene Verwertung von Frisch- und Fertigungskompost.

Tabelle 14: *Aufteilung des Frisch- und Fertigungskomposts auf die Verfahrenswege im durchschnittlichen Betrieb der Kompostierungsanlagen*

Verwertungsweg	Erwerbsgartenbau	Erdenwerke	Garten- und Landschaftsbau	Hobbygartenbau	Landwirtschaft
Frischkompost	0,7%	3,6%	-	1%	94,7%
Fertigungskompost	6,1%	48,8%	9%	15,7%	20,4%

Umweltbezogene Wirkungen

Bei Betrachtung einer einzelnen Anlage kann diese Aufteilung signifikant abweichen. Im Rahmen dieser Sensitivitätsbetrachtung wird beleuchtet, welche umweltbezogenen Wirkungen resultieren, wenn die Komposte jeweils vollständig der stofflichen Verwertung in der Landwirtschaft bzw. einem Erdenwerk zugeführt werden. Wesentlicher Unterschied zwischen beiden Verwertungswegen ist, dass die in den Komposten enthaltene organische Substanz entweder eine äquivalente Menge an Humus-C aus Ackergras (Landwirtschaft) oder Torf (Erdenwerk) substituiert.

Ökonomische Wirkungen

Für die Berechnung der Behandlungskosten wird angenommen, dass für die landwirtschaftlichen Verwertung 1,5 € pro Tonne Kompost⁵ und für die Verarbeitung von Kompost in Erdenwerken 2 € pro Tonne Kompost⁶ erlöst werden. Mangels belastbarer Informationen werden die Erlöse für die Verwertung im Erwerbsgartenbau, Garten- und Landschaftsbau sowie Hobbygartenbau ebenfalls mit 2 € pro Tonne angenommen.

Das führt bei einer vollständigen landwirtschaftlichen Verwertung der Komposte zu einer Erhöhung der Behandlungskosten um 0,13 €/t Materialinput (Frischkompost: +0,01 €/t; Fertigungskompost: +0,12 €/t) und bei einer vollständigen Verwertung in Erdenwerken zu einer Reduzierung der Behandlungskosten um 0,09 €/t Materialinput (Frischkompost: -0,06 €/t; Fertigungskompost: -0,03 €/t).

6.2.2 Analyse der umweltbezogenen Wirkungen

Die Analyse der Sensitivitätsbetrachtung hinsichtlich der Auswirkungen auf Umweltbe- und -entlastungen wird beispielhaft anhand der geschlossenen Kompostierung vorgenommen.

Abbildung 8 veranschaulicht die Umweltentlastungen, die mit der Sensitivitätsbetrachtung im Vergleich zum durchschnittlichen Anlagenbetrieb verbunden sind. Die Darstellung erfolgt sektoral gegliedert nach lebenswegbezogener Herkunft der Umweltbe- und -entlastungen und aggregiert über alle analysierten Umweltwirkungen.

⁵ Während an Landwirte in der Vergangenheit noch bis zu 3 €/t bei der Abnahme von Kompost gezahlt wurden, bekommen diese heute nichts mehr. Zum Teil müssen Landwirte bereits 1 bis 2 €/t bezahlen.

⁶ Erdenwerke zahlen derzeit 1 bis 3 €/t Kompost

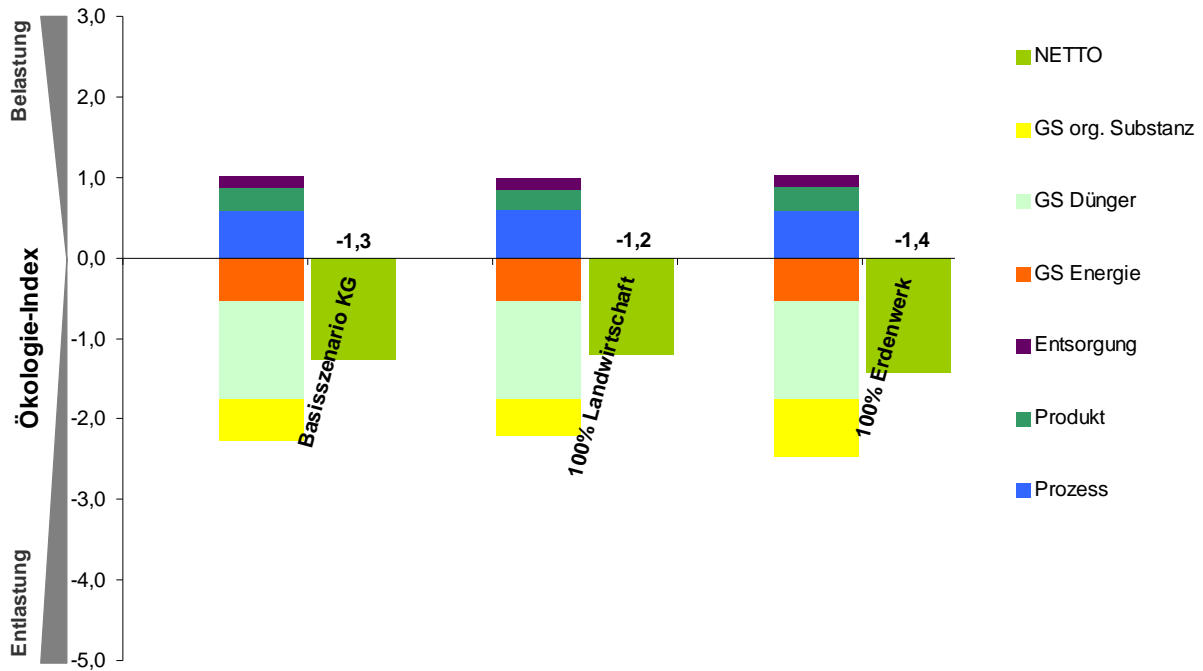


Abbildung 8: *Biogutkompostierung: Durchschnittlicher Betrieb der geschlossenen Kompostierung (Basisszenario KG) und Sensitivitätsbetrachtung im Vergleich. Ökologie-Index differenziert nach lebenswegbezogener Herkunft. Bezugseinheit: Behandlung von 1 t Biogut. Negative Ökologie-Indizes repräsentieren Umweltentlastungen.*

6.2.3 Ökoeffizienzanalyse

Das Portfolio in *Abbildung 9* kombiniert die beschriebene Umweltbe- und -entlastung mit den verbundenen Änderungen der angenommenen Behandlungskosten und stellt die Abweichung vom durchschnittlichen Betrieb einer geschlossenen Kompostierungsanlage prozentual dar. Es zeigt, dass die vollständige Verwertung der Komposte im Erdenwerk ein geringes Potenzial zur Steigerung der Ökoeffizienz der geschlossenen Kompostierung von Biogut aufweist, wogegen die vollständige landwirtschaftliche Verwertung zu einer etwas geringeren Ökoeffizienz führt.

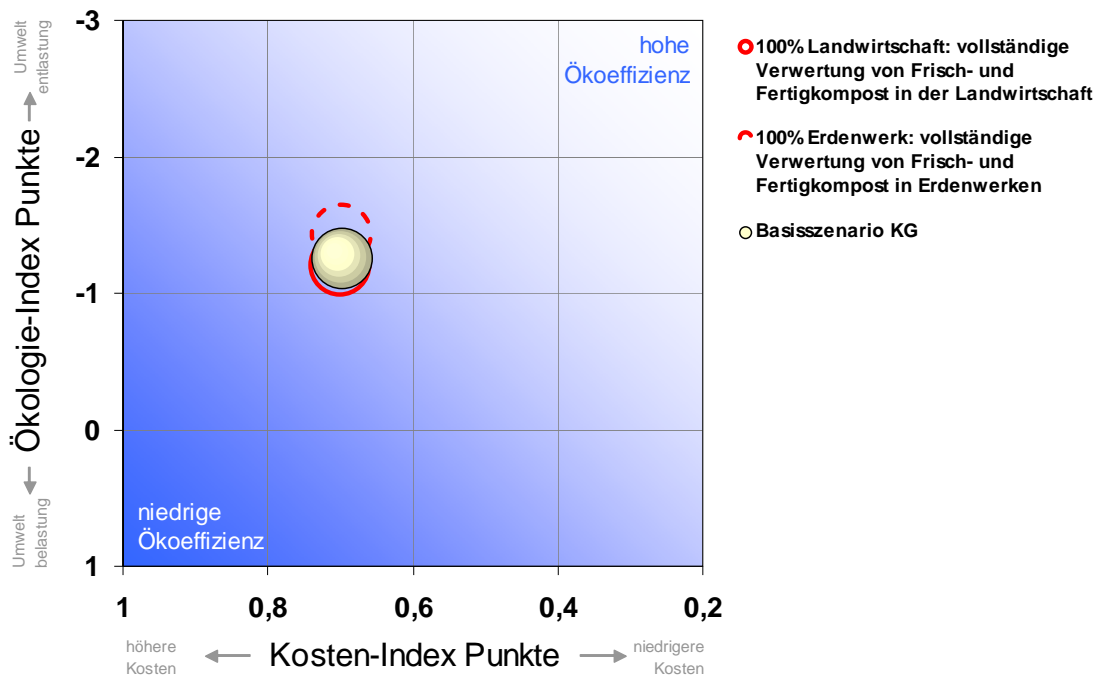


Abbildung 9: Biogutkompostierung: Durchschnittlicher Betrieb der geschlossenen Kompostierung (Basisszenario KG) und Sensitivitätsbetrachtung im Vergleich (Ökologie-Index < 0 bedeutet Umweltentlastung; Ökologie-Index > 0 bedeutet Umweltbelastung; Kosten-Index: Normierung der verfahrensspezifischen Kosten am Maximalwert der untersuchten Behandlungsverfahren – vgl. Tabelle 12). Bezugsseinheit: Behandlung von 1 t Biogut.

Gegenüber dem durchschnittlichen Betrieb einer geschlossenen Kompostierungsanlage führt die Variation der Anwendung der Komposte sowohl zu höheren als auch zu niedrigeren Behandlungskosten. Allerdings sind die Einflüsse auf die Behandlungskosten mit einer prozentualen Änderung von deutlich weniger als 1% sehr gering.

6.3 Biogut: Mitbehandlung als Teil des Restmülls in einer MVA

6.3.1 Energienutzung

Umweltwirkung

Zur Abbildung der Bandbreite bei Nutzung der Energie aus MVA werden die in folgender Tabelle dargestellten Wirkungsgrade abgebildet.

Tabelle 15: Energetische Wirkungsgrade bayerischer MVA für externe Nutzung [Informationen der ATAB]

	Durchschnittlicher Anlagenbetrieb	Good-Case	Worse-Case
exportierter Strom [%]	9,9	-	13,3
exportierte Fernwärme [%]	18,9	-	-
exportierter Prozessdampf [%]	11,7	65	-

Ökonomische Wirkungen

Die angenommenen durchschnittlichen Kosten für die thermische Behandlung subsumieren Anlagen mit unterschiedlichster externer Nutzung der erzeugten Energie. Auf dieser Basis kann der Einfluss expliziter Wirkungsgrade auf die Behandlungskosten und die Allokation der Behandlungskosten auf Biogut nicht belastbar ausgewiesen werden. Näherungsweise nimmt bifa an, dass die Behandlungskosten sowohl für Good- als auch für Worse-Case unverändert bleiben

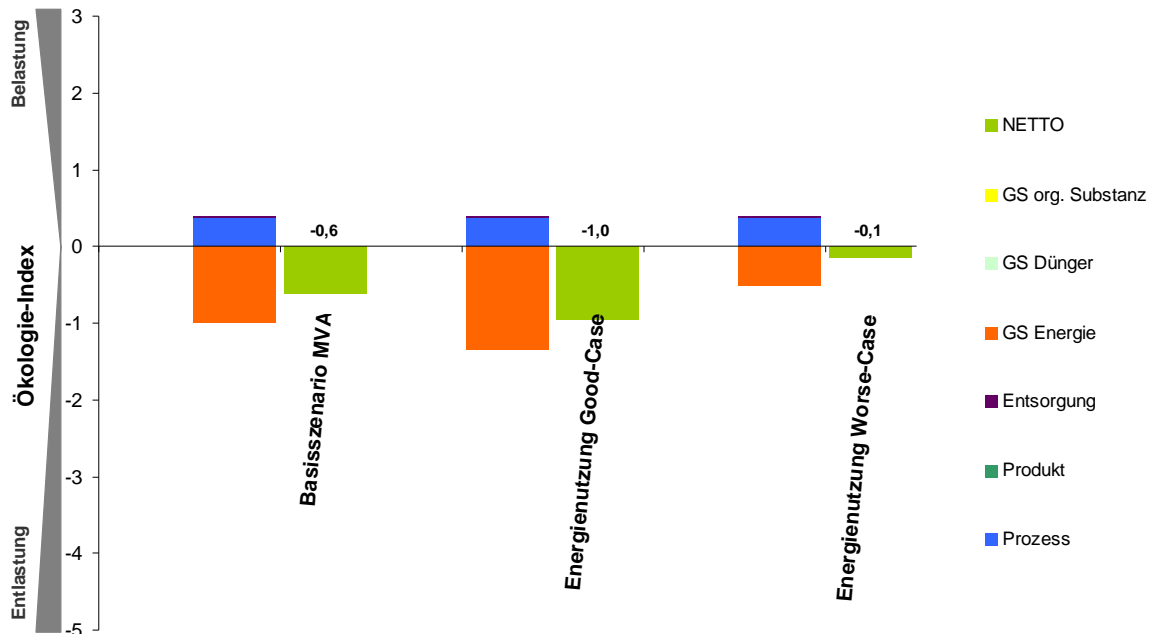


Abbildung 10: Biogutbehandlung als Teil des Restmülls in MVA: Durchschnittlicher Betrieb (Basisszenario MVA), Sensitivitäten und Variationen im Vergleich. Ökologie-Index differenziert nach lebenswegbezogener Herkunft. Bezugseinheit: Behandlung von 1 t Biogut. Negative Ökologie-Indizes repräsentieren Umweltentlastungen.

Die Strom- und Wärmemengen, die aus dem Biogut gewonnen und für eine externe Nutzung bereitgestellt werden, haben sehr erheblichen Einfluss auf die umweltbezogene Bewertung der Mitbehandlung von Biogut in einer MVA. Im Good-Case kann die Umweltentlastung durch Substitution der Strom- und Wärmeerzeugung aus fossilen Energieträgern im Vergleich zum durchschnittlichen Anlagenbetrieb verdoppelt werden. Im Worse-Case wiegen allerdings die Umweltbelastungen die geringen Entlastungen aus den Gutschriften nahezu auf.

6.4 Grüngut: Offene Kompostierung inkl. der energetischen Verwertung einer holzigen heizwertreichen Teilmenge

6.4.1 Optimierung Energieerzeugung bei Verwertung der holzigen Teilmenge im BMHKW

Für die energetische Verwertung einer holzigen, heizwertreichen Teilmenge des Materialinputs wurde in einer Sensitivitätsbetrachtung die vollständige Abgabe der erzeugten Wärme einer optimalen Stromerzeugung ohne Wärmeerzeugung gegenüber gestellt.

Umweltbezogene und ökonomische Wirkungen

Für die energetische Nutzung von Grüngut in einem Biomasseheizkraftwerk wird von einer Stromausbeute von 17,55% und einem Wärmeertrag von 51% ausgegangen. Die erzeugten Mengen an elektrischer und thermischer Energie decken zunächst den Eigenbedarf. Darüber hinaus erzeugte Energiemengen werden an externe Verbraucher abgegeben, wobei bifa in konservativer Näherung bisher davon ausgeht, dass im Anlagendurchschnitt 25% der erzeugten Abwärme als Fernwärme an Dritte abgegeben wird.

Tabelle 16 fasst die Annahmen zur Beschreibung einer vollständigen Abgabe der erzeugten Wärme sowie einer optimalen Stromausbeute mit Blick auf die Abbildung ökonomischer und umweltbezogener Wirkungen zusammen.

Tabelle 16: *Optimierung Energieerzeugung bei Verwertung der holzigen Teilmenge im BMHKW: Angenommene Änderungen im Vergleich zum durchschnittlichen Anlagenbetrieb (Basisszenario)*

Sensitive Betrachtung	Vollständige Abgabe der erzeugten Wärme	Optimale Stromausbeute ohne Wärmeerzeugung
Umweltbezogene Wirkungen	Vollständiger Absatz der für eine externe Nutzung zur Verfügung stehenden Wärme → Steigerung des Systemnutzens thermische Energie in Höhe von 1.275 MJ/t Materialinput auf 5.100 MJ/t. Beibehaltung des Systemnutzens elektrische Energie in Höhe von 488 kWh/t Materialinput.	Erhöhung des elektrischen Wirkungsgrades des Biomasseheizkraftwerks auf 29% [IE 2007] → Steigerung des Systemnutzens elektrische Energie in Höhe von 488 kWh/t Materialinput auf 806 kWh/t. Keine Wärmeerzeugung → Reduzierung des Systemnutzens thermische Energie in Höhe von 1.275 MJ/t Materialinput auf 0 MJ/t.
Ökonomische Wirkungen	Die vollständige Abwärmennutzung generiert Mehrerlöse beim Biomasseheizkraftwerk. Die Allokation der Behandlungskosten auf Grüngut kann nicht belastbar ausgewiesen werden. Näherungsweise nimmt bifa an, dass die Behandlungskosten unverändert bleiben.	Die ausschließliche Stromerzeugung generiert Mehrerlöse beim Biomasseheizkraftwerk. Der Allokation der Behandlungskosten auf Grüngut kann nicht belastbar ausgewiesen werden. Näherungsweise nimmt bifa an, dass die Behandlungskosten unverändert bleiben.

6.4.2 Analyse der umweltbezogenen Wirkungen

Abbildung 11 veranschaulicht die Umweltentlastungen, die mit den untersuchten Sensitivitäten und Variationen im Vergleich zum durchschnittlichen Anlagenbetrieb verbunden sind. Die Darstellung erfolgt sektoral gegliedert nach lebenswegbezogener Herkunft der Umweltbe- und Umweltentlastungen und aggregiert über alle analysierten Umweltwirkungen.

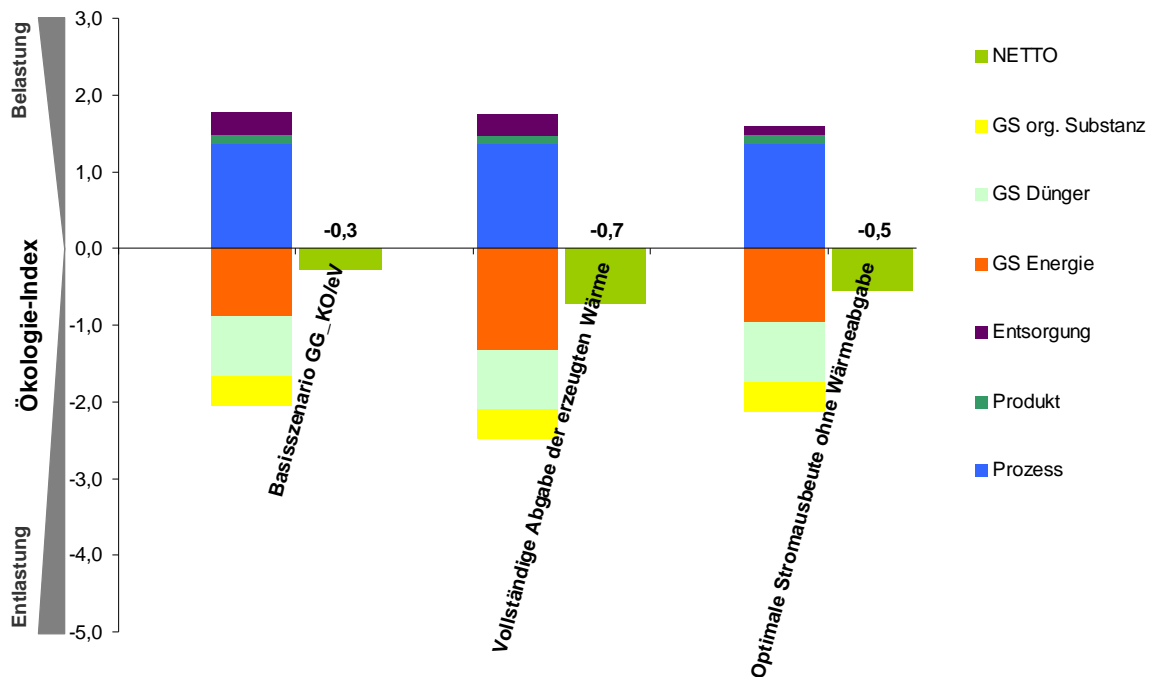


Abbildung 11: Grüngutbehandlung: Durchschnittlicher Betrieb der offenen Kompostierung inkl. der energetischen Verwertung einer holzigen heizwertreichen Teilmenge (Basisszenario GG_KO/ev), Sensitivitäten und Variationen im Vergleich. Ökologie-Index differenziert nach lebenswegbezogener Herkunft. Bezugseinheit: Behandlung von 1 t Grüngut. Negative Ökologie-Indizes repräsentieren Umweltentlastungen.

Die Variation der Energieerzeugung und -nutzung hat einen erheblichen Einfluss auf die umweltbezogene Bewertung der untersuchten Grüngutbehandlung. Abbildung zeigt zum einen erwartungsgemäß eine deutliche Verbesserung des Ökologie-Index bei der vollständigen Abgabe der erzeugten Wärme an Dritte infolge der zusätzlichen Gutschriften an thermischer Energie. Zum anderen resultiert aber auch aus einer optimalen Stromausbeute eine erhebliche Steigerung, auch wenn in diesem Fall auf die Erzeugung von Wärme verzichtet wird.

6.4.3 Ökoeffizienzanalyse

Das Portfolio in *Abbildung 12* kombiniert die beschriebene Umweltbe- und -entlastung mit den verbundenen Änderungen der angenommenen Behandlungskosten und stellt das Ergebnis dem durchschnittlichen Anlagenbetrieb gegenüber.

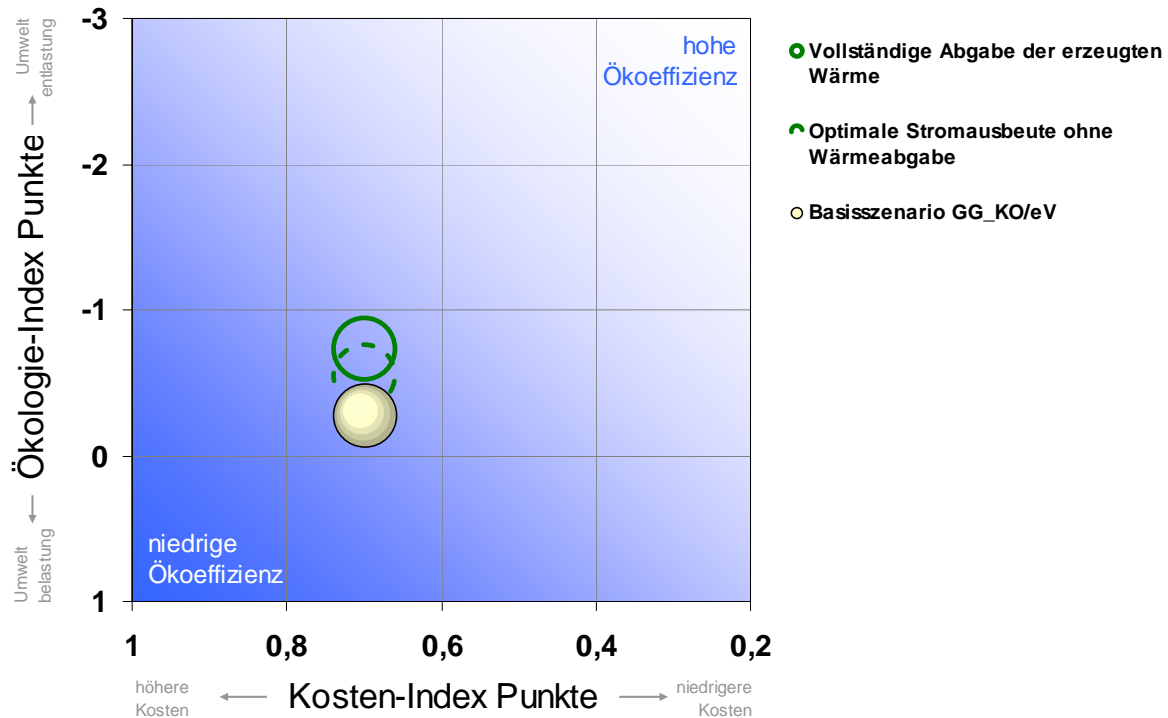


Abbildung 12: *Grüngutbehandlung: Durchschnittlicher Betrieb der offenen Kompostierung inkl. der energetischen Verwertung einer holzigen heizwertreichen Teilmenge (Basisszenario GG_KO/eV), Sensitivitäten und Variationen im Vergleich (Ökologie-Index < 0 bedeutet Umweltentlastung; Ökologie-Index > 0 bedeutet Umweltbelastung; Kosten-Index: Normierung der verfahrensspezifischen Kosten am Maximalwert der untersuchten Behandlungsverfahren – vgl. Tabelle 12). Bezugseinheit: Behandlung von 1 t Grüngut.*

Die Variationen zur Optimierung der Energieerzeugung zeigen bei näherungsweise gleich bleibenden Behandlungskosten eine Erhöhung der Entlastung der Umwelt aufgrund der vollständigen Abgabe der erzeugten Wärme bzw. der optimalen Stromausbeute.

7 Optimierungsansätze

Im Folgenden werden die Potenziale aller Verwertungsverfahren anhand der Formulierung, Modellierung und Ökoeffizienzanalyse ausgewählter Optimierungsansätze über die gesamte Prozesskette analysiert. Ausgangspunkt der Ansätze zur Gestaltung der optimalen Verfahren ist jeweils der anhand aktueller Daten beschriebene, durchschnittliche Anlagenbetrieb. Die Konkretisierung der Ansätze erfolgt deshalb bis zu dem Grad, der näherungsweise eine umweltbezogene und ökonomische Potenzialabschätzung des jeweiligen Ansatzes erlaubt. Die Arbeiten des bifa umfassen weder eine detaillierte technische Beschreibung, noch eine abschließende anlagentechnische Ausgestaltung. Für die im Rahmen des Vorhabens analysierten Optimierungsansätze weist die Ökoeffizienzanalyse die zu erwartende umweltbezogene und ökonomische Wirkungsrichtung und Einflussstärke aus. Die quantitative Übertragung der Ergebnisse auf konkrete Einzelfallbetrachtungen von Anlagen ist nur eingeschränkt möglich. Die konkrete Anlagensituation vor Ort kann erheblich davon abweichen. Bei der Übertragung der Ergebnisse auf die Einzelanlage, sind deshalb die jeweiligen Rahmenbedingungen vor Ort zu berücksichtigen.

7.1 Vergärungsverfahren

7.1.1 Gasdichte Abdeckung des Lagers für flüssige Gärreste und Restgasnutzung

Tabelle 17: *Erläuterung und Konkretisierung Gasdichte Abdeckung des Lagers für flüssige Gärreste und Restgasnutzung*

Erläuterung

Erhebliche Emissionen an Kohlenwasserstoffverbindungen (CH₄ und NMVOC) entstehen bei der Lagerung der flüssigen Gärprodukte. Die Minderung dieser Emissionen erfolgt durch Kapselung und Entlüftung des Gärproduktlagers und Zufuhr der Abluft zum Blockheizkraftwerk.

Das bayerische Biogashandbuch weist darauf hin, dass Gärproduktlager von Anlagen zur biologischen Behandlung von Abfällen gasdicht mit Anschluss an die Gasverwertung auszuführen sind [LfU 2011]. Als bindend für den Vergütungsanspruch fordert das EEG 2012 im §6 Abs. 4 Satz 1 Nr. 1, dass für neu zu errichtende Gärproduktlager eine gasdichte Abdeckung und ein Anschluss an die Gasverwertung vorzusehen sind. Perspektivisch ist deshalb davon auszugehen, dass diese Anforderungen beim Neubau von Anlagen umgesetzt werden.

Der Ausbau des Gärproduktlagers zum Gasspeicher ermöglicht eine gleichmäßige und bedarfsorientierte Biogaszufuhr an das Blockheizkraftwerk. Dazu kann der Behälter mit einer doppelten Membran oder einem Foliendach gasdicht abgedeckt werden. Auch feste Behälterdächer aus Faserzement oder glasfaserverstärktem Kunststoff sind möglich. Weitere Anforderungen an die Abdeckungen werden im Bayerischen Biogashandbuch konkretisiert.

Die Eignung des Abluftstroms und die technische Möglichkeit der Zufuhr der Abluft in Blockheizkraftwerke sind stets im konkreten Einzelfall und in Abstimmung mit dem Kraftwerkshersteller zu prüfen.

Konkretisierung: Umweltbezogene Wirkung und umweltbezogenes Potenzial

Für die Quantifizierung der Emissionsminderung nimmt bifa an, dass die Abluft aus der Lagerung der flüssigen Gärprodukte erfasst und über Blockheizkraftwerk bzw. Fackel oxidiert wird. Die im durchschnittlichen Anlagenbetrieb auftretenden Emissionen aus diesen Anlagenbereichen werden damit vollständig vermieden. Durch die Behandlung der CH₄-haltigen Abluft aus dem Gärproduktlager steigt die genutzte Biogasmenge, die im Blockheizkraftwerk zu Strom und Wärme gewandelt wird.

Konkretisierung: Ökonomisches Potenzial

Angaben über die Zusatzkosten des erforderlichen Umbaus des Abluftsystems liegen nicht vor. bifa geht deshalb näherungsweise davon aus, dass die jährlichen Zusatzkosten in Summe unter 1 EUR/t Biogut bleiben. Die Stromerzeugung aus der zusätzlich erfassten und verwerteten Biogasmenge ist mit Erlösen verbunden, die den Aufwendungen gegenüber gestellt werden.

7.1.2 Saure Wäsche der Abluft aus der Gärproduktbehandlung

Tabelle 18: *Erläuterung und Konkretisierung Saure Wäsche der Abluft aus der Gärproduktbehandlung*

Erläuterung

Der Großteil aller NH_3 -Emissionen aus der Vergärung entsteht bzw. entweicht während der Nachbehandlung der festen Gärprodukte. Bei eingehauster Nachbehandlung der festen Gärprodukte mit Ablufterfassung kann ein dem Biofilter vorgeschalteter, saurer Wäscher Emissionen deutlich reduzieren. Die Installation eines sauren Wäschers ist aber mit hohen Investitions- und Betriebskosten und energieintensivem Betrieb verbunden.

Konkretisierung: Umweltbezogene Wirkung und umweltbezogenes Potenzial

Für die Ermittlung der umweltbezogenen Wirkungen nimmt bifa an, dass die emissionsrelevanten Bereiche der Nachbehandlung geschlossen ausgeführt sind und ein saurer Wäscher für die erfasste Abluft vorgesehen ist.

Saure Wäscher stellen eine hohe Ammoniakabscheidung (85% bis nahezu 100%) sicher. Durch die effektive Abscheidung von NH_3 im Wäscher wird zusätzlich die Bildung von sekundärem N_2O im Biofilter verhindert. Das Reaktionsprodukt der sauren Wäsche kann als mineralischer Stickstoffdünger eingesetzt werden.

Konkretisierung: Ökonomisches Potenzial

Für Etablierung und Betrieb eines sauren Wäschers werden zusätzlich Kosten von 3 EUR/t Biogut angenommen, die sich etwa zu gleichen Anteilen aus Investitions- und Betriebskosten zusammensetzen.

7.1.3 Optimierte Betriebsführung bei Aerobisierung bzw. Nachrotte der festen Gärprodukte

Tabelle 19: *Erläuterung und Konkretisierung Optimierte Betriebsführung bei Aerobisierung bzw. Nachrotte der festen Gärprodukte*

Erläuterung

Die Behandlung der festen Gärprodukte ist mit erheblichen Emissionen verbunden. Bei der Aerobisierung ist davon auszugehen, dass die Methanbildung in Teilbereichen des Materials noch weiterläuft. Außerdem ist auch in der Nachrotte mit spezifisch erhöhten NH_3 - und N_2O -Emissionen zu rechnen. Aus umweltbezogener Sicht ist eine vollständig offene Nachbehandlung der festen Gärprodukte abzulehnen. Für emissionsrelevante Anlagenbereiche der Nachbehandlung sind eine Einhausung und ein Anschluss an die Abluftreinigung vorzusehen.

Die Minderung der Methanemissionen aus der Aerobisierung kann durch eine intensive Belüftung, Ablufterfassung und Verbrennung der Abluft erzielt werden. Außerdem unterstützt eine geeignete Betriebsführung die Reduzierung von Emissionen: Die Aerobisierung kann optimiert werden, indem den strukturarmen und nassen Gärrückständen hohe Anteile an frischem Material insbesondere strukturreichen, d.h. ligninreichen Stoffen hinzugefügt werden. Zur Vermeidung überhöhter Emissionen in der Nachrotte, auch von Ammoniak und Lachgas, ist ein ausreichender Strukturgehalt der Rottekörper unabdingbar [H&K 2009].

Konkretisierung: Umweltbezogene Wirkung und umweltbezogenes Potenzial

Die näherungsweise abgeleitete Emissionsreduktion durch optimale Betriebsführung der Nachbehandlung beträgt bezogen auf den gesamten Vergärungsprozess für CH_4 , NMVOC und NH_3 über 60% und für N_2O ca. 30%.

Konkretisierung: Ökonomisches Potenzial

bifa nimmt an, dass die Maßnahmen zum optimierten Betrieb der Nachrotte in der Regel innerhalb der angenommenen Vergärungskosten, die einen Betrieb nach guter fachlicher Praxis (Einhausung der emissionsrelevanten Anlagenbereiche und Abluftreinigung bereits vorhanden) widerspiegeln, realisiert werden können und daher maximal zu einer geringen Steigerung der Behandlungskosten führen.

7.1.4 Steigerung der Stromausbeute bei der Biogasnutzung

Tabelle 20: *Erläuterung und Konkretisierung Steigerung der Stromausbeute bei der Biogasnutzung*

Erläuterung

Laut aktuellen Herstellerangaben werden bei der Biogasnutzung elektrische Wirkungsgrade größer 40 % erzielt, die nach Information des Beirats auch in der betrieblichen Praxis erreicht werden können.

Konkretisierung: Umweltbezogene Wirkung und umweltbezogenes Potenzial

Zur Berücksichtigung umweltbezogener und ökonomischer Wirkungen wird für einen optimalen Anlagenbetrieb ein elektrischer Wirkungsgrad von 40 % angenommen. Im Vergleich zum durchschnittlichen Anlagenbetrieb steigt die erzeugte Strommenge um ca. 6 %. Im gleichen Maß steigen die Gutschriften aus der Substitution der konventionellen Stromerzeugung.

Konkretisierung: Ökonomisches Potenzial

Der Ausbau der exportierten Strommenge um ca. 6 % steigert bei aktuellen Förderbedingungen je Tonne behandeltem Biogut die Erlöse um 2,4 EUR/t (kontinuierliche Verfahren) bzw. 1,4 EUR/t (Batchvergärung).

7.1.5 Reduktion von Ammoniak-Emissionen beim Ausbringen flüssiger Gärprodukte

Tabelle 21: *Erläuterung und Konkretisierung Reduktion von Ammoniak-Emissionen beim Ausbringen flüssiger Gärprodukte*

Erläuterung

Um bei der Ausbringung möglichst geringe NH_3 -Emissionen zu erreichen, sollten Gärprodukte möglichst auf unbewachsenem Acker ausgebracht und möglichst unmittelbar eingearbeitet werden. Ist eine Ausbringung auf unbewachsenen Äckern und damit eine Einarbeitung nicht möglich, so wird die Ausbringung mit Schlepplschlauch empfohlen [BMU 2008]. Daneben kann moderne Ausbringungstechnik, wie die direkte Einarbeitung der flüssigen Gärprodukte mittels Injektionsverfahren, helfen NH_3 -Emissionen zu reduzieren. Allerdings weisen Untersuchungen darauf hin, dass sich beim Einsatz von Injektionsverfahren die N_2O -Emissionen um mehr als den Faktor 4 erhöhen können (vergleiche [BMU 2008]).

Konkretisierung: Umweltbezogene Wirkung und umweltbezogenes Potenzial

bifa nimmt für flüssige Gärprodukte an, dass bei unmittelbarer Einarbeitung nur noch 10 % des applizierten NH_4 als NH_3 entweichen.

Konkretisierung: Ökonomisches Potenzial

Die unmittelbare Einarbeitung der flüssigen Gärprodukte bei Ausbringung erfordert höhere Aufwendungen. Inwieweit sich die Mehraufwendungen monetär in den Konditionen für den Anbieter der flüssigen Gärprodukte abbilden, lässt sich nicht belastbar quantifizieren. Näherungsweise geht bifa davon aus, dass die Kosten-/Erlössituation aus Sicht der Vergärungsanlage unverändert bleibt.

7.1.6 Analyse der umweltbezogenen Wirkungen

Die Analyse der Optimierungsansätze hinsichtlich ihrer Potenziale zur Steigerung der Umweltentlastung aus der Vergärung erfolgt zunächst beispielhaft anhand der Pfropfenstromvergärung. Die folgende Abbildung veranschaulicht die Umweltentlastungen, die mit den untersuchten Ansätzen im Vergleich zum durchschnittlichen Anlagenbetrieb verbunden sind. Die Darstellung erfolgt sektoral geglie-

dert nach lebenswegbezogener Herkunft der Umweltbe- und -entlastungen und aggregiert über alle analysierten Umweltwirkungen.

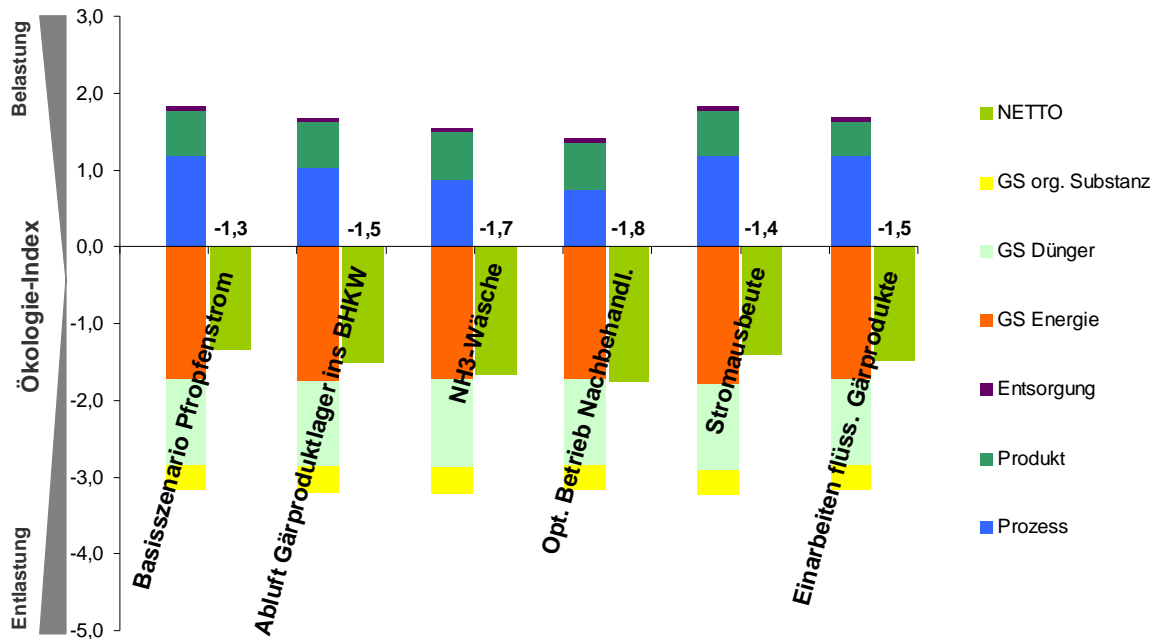


Abbildung 13: Biogutvergärung: Durchschnittlicher Betrieb Pflropfenstromvergärung (Basisszenario Pflropfenstrom) und Optimierungsansätze im Vergleich. Ökologie-Index der analysierten Optimierungsansätze differenziert nach lebenswegbezogener Herkunft. Bezugseinheit: Behandlung von 1 t Biogut. Negative Ökologie-Indizes repräsentieren Umweltentlastungen.

Die untersuchten Optimierungsansätze haben zum Teil deutliche Potenziale, die Umweltwirkung der Vergärung zu verbessern. Die gasdichte Abdeckung des Lagers für flüssige Gärreste und Restgasnutzung im BHKW, saure Wäsche der Abluft aus der Behandlung der festen Gärprodukte und die optimierte Betriebsführung bei der Behandlung fester Gärprodukte tragen durch die Vermeidung oder Minderung von Emissionen aus den emissionsrelevanten Prozessschritten der Vergärung deutlich zur Verringerung der Umweltbelastung aus dem Sektor Prozess bei.

Die optimierte Betriebsführung bei der Behandlung der festen Gärprodukte bietet dabei grundsätzlich das größte Potenzial. Der Grund dafür ist, dass ein optimierter Betrieb die Chance bietet, sowohl C- als auch N-haltige Emissionen aus der Nachbehandlung zu reduzieren. Das Potenzial der sauren Wäsche ist etwas geringer, da eine Emissionsminderung nur für NH₃ und N₂O erreicht wird, während Emissionen an kohlenwasserstoffhaltigen Verbindungen nicht reduziert werden. Im Vergleich zur optimierten Betriebsführung, wird aber die Emissionsminderung bei Installation eines Wäschers verlässlich erreicht und das Potenzial damit tatsächlich ausgeschöpft. Das ausgewiesene Potenzial einer optimierten Betriebsführung der Nachbehandlung basiert dagegen auf einer theoretischen Ableitung aus den Angaben in [Cuhls 2012].

Die Nutzung bzw. Verbrennung der Abluft aus dem Lager der flüssigen Gärprodukte reduziert alle Emissionen. Insgesamt sind aber die Emissionen aus dem Lager der flüssigen Gärprodukte denen der Nachbehandlung der festen Gärprodukte mengenmäßig untergeordnet.

Das Potenzial aus der Optimierung der Stromausbeute durch bessere Wirkungsgrade bei der Biogasnutzung ist aus umweltbezogener Sicht vergleichsweise gering. Der angenommene durchschnittliche An-

lagenbetrieb weist bereits ein hohes Niveau bei der Stromerzeugung auf, das aus Sicht des Wirkungsgrades nur noch begrenzt gesteigert werden kann.

Die Emissionen beim Ausbringen insbesondere der flüssigen Gärprodukte haben deutlichen Einfluss auf die umweltbezogenen Wirkungen. Die ohne technischen Zusatzaufwand zu realisierende zeitnahe Einarbeitung der flüssigen Gärprodukte bietet dementsprechend über die Reduktion von NH_3 -Emissionen ein Potenzial, das mit den Maßnahmen zur Emissionsminderung aus dem Prozess vergleichbar ist. Allerdings liegt die Steigerung dieses Potenzials nicht im unmittelbaren Einflussbereich des Anlagenbetreibers.

7.1.7 Ökoeffizienzanalyse

Das folgende Ökoeffizienz-Portfolio kombiniert für die Optimierungsansätze die beschriebene Erhöhung der Umweltentlastungen mit der verbundenen Änderung der Behandlungskosten und stellt die Abweichung vom durchschnittlichen Betrieb der Propfenstromvergärung prozentual dar.

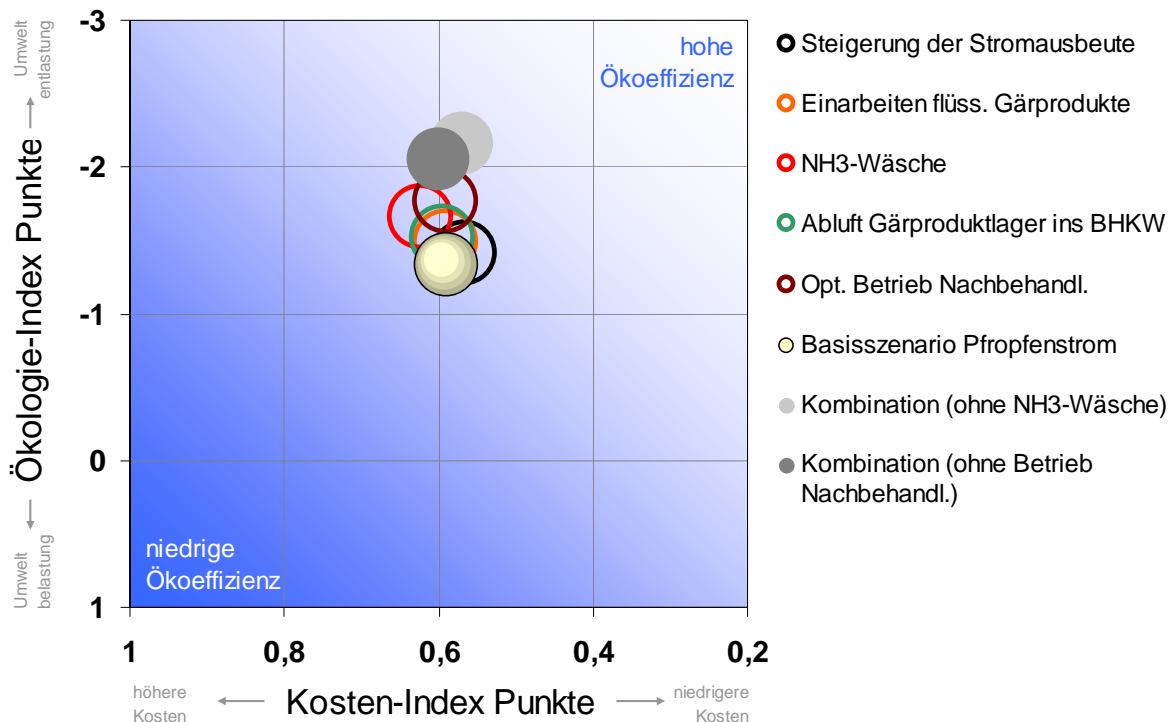


Abbildung 14: Biogutvergärung: Durchschnittlicher Betrieb Propfenstromvergärung (Basisszenario Ppropfenstrom) und Optimierungsansätze im Vergleich (Ökologie-Index < 0 bedeutet Umweltentlastung; Ökologie-Index > 0 bedeutet Umweltbelastung; Kosten-Index: Normierung der verfahrensspezifischen Kosten am Maximalwert der untersuchten Behandlungsverfahren – vgl. Tabelle 12). Bezugseinheit: Behandlung von 1 t Biogut.

Die untersuchten Optimierungsansätze beziehen sich mit Ausnahme von NH_3 -Wäscher und optimierter Nachbehandlung der festen Gärprodukte auf jeweils unterschiedliche Abschnitte der Vergärung. Bei der Kombination aller Einzelansätze zu einem optimierten Gesamtverfahren können deshalb die einzelnen Umweltenlastungen und Kostenänderungen summiert werden. Auch diese Kombinationen sind in *Abbildung 14* dargestellt. Da sich sowohl NH_3 -Wäscher als auch optimierte Betriebsführung bei Nachbehandlung der festen Gärprodukte auf die Nachbehandlung beziehen, ist für diese Ansätze der Umwelt-

entlastungen eine Addition nicht aussagekräftig. Die Kombination der Einzelansätze zu einem optimierten Gesamtverfahren beinhaltet deshalb jeweils einen der Ansätze zur Optimierung der Nachbehandlung.

Die Steigerung der Stromausbeute ist aus umweltbezogener Sicht nur von geringer Bedeutung. Aufgrund der attraktiven Förderbedingungen ist allerdings der Einfluss auf die Reduktion der Behandlungskosten deutlich.

7.2 Kompostierung

7.2.1 Optimierung Materialinput und optimierte Betriebsführung Rotte

Tabelle 22: *Erläuterung und Konkretisierung Optimierung Materialinput und optimierte Betriebsführung Rotte*

Erläuterung

Die wichtigsten technischen Maßnahmen für eine Optimierung des Materialinputs (Rotteausgangsgemisch) hinsichtlich einer Emissionsminderung sind die unverzügliche Verarbeitung der Bio- und Grüngutabfälle sowie eine gute fachliche Praxis bei der Herstellung des Rotteausgangsmaterials [Cuhls 2008]. Eine gute fachliche Praxis bzgl. der Minimierung von Emissionen ist im wesentlichen durch folgende Parameter gekennzeichnet [Cuhls 2008]:

- Einstellung eines für die Rotte günstigen C/N-Verhältnisses von < 25 zur Minimierung von Ammoniak- und Lachgasemissionen
- Gewährleistung eines optimalen Wassergehalts, der bei Prozessbeginn 65% bis 70% nicht übersteigen und im weiteren Prozessverlauf auf 50% bis 60% reduziert werden sollte
- Zumischung von ausreichend Strukturmaterial zur Erreichung eines günstigen Luftporenvolumens zwischen 30% und 50%

Die technischen Maßnahmen, die eine optimierte Betriebsführung der Rotte gewährleisten, können wie folgt zusammengefasst werden [Cuhls 2008, BGK 2010]:

- Aufrechterhaltung eines ausreichenden Luftporenvolumens bzw. einer ausreichenden Strukturstabilität des Rottekörpers
- Aufrechterhaltung einer guten Luftdurchlässigkeit bei geringer Vernässung
- Minderung der Emissionen, u.a. durch die Vermeidung des Aufschichtens zu großvolumiger Rottekörper, aktive Belüftung, Steuerung der Rottetemperaturen etc.

Konkretisierung: Umweltbezogene Wirkung und umweltbezogenes Potenzial

Für die Quantifizierung der Emissionsminderung nimmt bifa an, dass die in [Cuhls 2012] angegebenen optimalen Erwartungswerte für Emissionen aus Haupt- und Nachrotte erreicht werden können. Für die Biogutbehandlung heißt das am Beispiel der geschlossenen Kompostierung:

- Reduzierung der aus Haupt- und Nachrotte resultierenden Emissionen an Methan um 41%, an Lachgas um 8%, an Ammoniak um 68% sowie an NMVOC um 14%.

Für die offene Grüngutkompostierung inkl. der energetischen Verwertung einer holzigen heizwertreichen Teilmenge heißt das:

- Reduzierung der aus Haupt- und Nachrotte resultierenden Emissionen an Methan um 45%, an Lachgas um 25%, an Ammoniak um 31% sowie an NMVOC um 53%.

Konkretisierung: Ökonomisches Potenzial

bifa nimmt an, dass die Maßnahmen für eine Optimierung des Materialinputs sowie eine optimierte Betriebsführung der Rotte in der Regel innerhalb der angenommenen Behandlungskosten, die einen Betrieb nach guter fachlicher Praxis widerspiegeln, realisiert werden können.

7.2.2 Ausbau der Abtrennung von Anteilen zur thermischen Verwertung

Tabelle 23: *Erläuterung und Konkretisierung Ausbau der Abtrennung von Anteilen zur thermischen Verwertung*

Erläuterung

Die abgetrennte Menge an heizwertreichem Material ist im durchschnittlichen Betrieb offener, teilgeschlossener und geschlossener Biogutkompostierungsanlagen im Mittel mit 12% sowie im durchschnittlichen Betrieb offener Grüngutkompostierungsanlagen inkl. der energetischen Verwertung einer holzigen heizwertreichen Teilmenge im Mittel mit 24% angenommen. Der Anteil Strukturmaterial am Bio- bzw. Grüngut liegt deutlich darüber, weshalb unter Berücksichtigung jahreszeitlicher Schwankung eine höhere Menge heizwertreiches Material der thermischen Verwertung zugeführt werden kann.

Konkretisierung: Umweltbezogene Wirkung und umweltbezogenes Potenzial

Ist eine Erhöhung der Abtrennquote vorgesehen, muss sichergestellt sein, dass die Rottekörper weiterhin ausreichend Strukturmaterial enthalten, damit Feuchtrohdichten von ca. 0,5 bis 0,6 t/m³ gewährleistet sind. Ansonsten ist aufgrund zunehmend anaerober Milieubedingungen im Rottekörper von höheren Methanemissionen auszugehen.

Dieser Optimierungs-Zielkonflikt „höhere Brennstoffmengen vs. niedrige Emissionen“ sollte zugunsten der Gewährleistung von ausreichenden Strukturanteilen im Rottekörper entschieden werden. Aus diesem Grund folgt bifa dem Vorschlag des Projektbeirates, die Entnahme von Strukturmaterial als heizwertreiche Fraktion bei der Biogutkompostierung auf 15% und bei der Grüngutkompostierung auf 30% zu begrenzen.

Eine Intensivierung der Abtrennung von Strukturmaterial in der Rohmaterialannahme führt vermutlich zu einer Zunahme an mitgerissenen Störstoffen sowie einer höheren Feuchte. Um dem Rechnung zu tragen, ist der Heizwert der heizwertreichen Fraktion aus dem Siebschnitt von 13 MJ/kg auf 12 MJ/kg reduziert. Darüber hinaus wird davon ausgegangen, dass die Steigerung der Menge heizwertreichen Materials mit einer Reduzierung der erzeugten Kompostmengen verbunden ist. Diese wird bei der Biogutkompostierung mit ca. 30 kg und bei der offenen Grüngutkompostierung inkl. der energetischen Verwertung einer holzigen heizwertreichen Teilmenge mit ca. 60 kg abgeschätzt. Die verringerten Kompostmengen führen zu verringerten Gutschriften an Nährstoffen.

Konkretisierung: Ökonomisches Potenzial

Betreiber von Biomasseheizkraftwerken zahlen je nach Qualität zwischen 7 und 20 € pro Tonne Brennmaterial. bifa nimmt an, dass nach Verrechnung gegebenenfalls höherer Sortieraufwendungen 10 € pro Tonne heizwertreiches Material Erlöst werden können.

Dem gegenüber stehen verringerte Einnahmen aufgrund geringerer Kompostmengen. Der Verlust wird in der landwirtschaftlichen Verwertung mit 1,5 € pro Tonne Kompost und bei der Verwertung in Erdenwerken mit 2 € pro Tonne Kompost angenommen⁷. Erlöse und Verluste verrechnet ergeben in Summe bei der Biogutkompostierung zusätzliche Einnahmen in Höhe von ca. 0,26 €/t Biogut und bei der offenen Grüngutkompostierung inkl. der energetischen Verwertung einer holzigen heizwertreichen Teilmenge zusätzliche Einnahmen in Höhe von ca. 1,35 €/t Grüngut.

⁷ Siehe Fußnoten 5 und 6

7.2.3 Ausbau des Einsatzes organischer Substanz zur Torfsubstitution

Tabelle 24: *Erläuterung und Konkretisierung Ausbau des Einsatzes organischer Substanz zur Torfsubstitution*

Erläuterung

An Hand der Humusbilanzierungen der letzten Jahre konnte gezeigt werden, dass im Allgemeinen der Humusbedarf landwirtschaftlicher Kulturen noch gedeckt werden kann. Festgestellt wird aber auch, dass die Entwicklung ackerbaulicher, klimatischer und ökonomischer Bedingungen zu einem Anstieg des Humusbedarfs führt. Dieser Bedarf ist aufgrund rechtlicher Vorgaben (Nährstoffbilanzen), aber auch aus ökologischer Sicht geboten [BGK 2009].

Im landwirtschaftlichen Bereich wird organische Substanz zur Humusbildung hauptsächlich über Erntereste, Wirtschaftsdünger, Zwischenfrüchte und Sekundärrohstoffdünger rückgeführt. Dem gegenüber wird in Kultursubstraten für Hobby- und Erwerbsgartenbau oft Torf in unterschiedlichen Anteilen eingesetzt. Im Vordergrund stehen dabei die hohe Wasserspeicherfähigkeit und der ausreichend hohe Luftgehalt bei Wassersättigung.

Aus ökologischen Gründen und Gründen des Ressourcenschutzes sollte der Einsatz von Torf in Blumenerden und Kultursubstraten reduziert werden. Zahlreiche Versuche zeigen, dass dies in einem erheblichen Umfang ohne Qualitätsverluste möglich ist [UMBW 2011].

Konkretisierung: Umweltbezogene Wirkung und umweltbezogenes Potenzial

Zur Ermittlung des Potenzials nimmt bifa an, dass bei der offenen, geschlossenen und teilgeschlossenen Biogutkompostierung der Fertigkompost sowie bei der offenen Grüngutkompostierung der Frischkompost vollständig an Erdenwerke abgegeben wird. Damit steigt der Anteil der Verwertung in Erdenwerken an der Gesamtmenge Frisch- und Fertigkompost von ca. 36% auf ca. 73% bei der Biogutkompostierung bzw. auf ca. 63 % bei der offenen Grüngutkompostierung inkl. der energetischen Verwertung einer holzigen heizwertreichen Teilmenge. Hauptsächlich geht das zu Lasten der landwirtschaftlichen Verwertung sowie der Verwertung im Hobbygartenbau.

Konkretisierung: Ökonomisches Potenzial

Für die Verarbeitung von Kompost in Erdenwerken wird angenommen, dass 2 € pro Tonne Kompost Erlöst werden. Dem gegenüber stehen verringerte Einnahmen aufgrund geringerer Kompostmengen in der landwirtschaftlichen Verwertung, die mit 1,5 € pro Tonne Kompost angesetzt werden⁸.

Erlöse und Verluste verrechnet ergeben in Summe bei der Biogutkompostierung zusätzliche Einnahmen in Höhe von ca. 0,22 €/t Biogut und bei der offenen Grüngutkompostierung inkl. der energetischen Verwertung einer holzigen heizwertreichen Teilmenge zusätzliche Einnahmen in Höhe von ca. 0,05 €/t Grüngut.

⁸ Siehe Fußnoten 5 und 6

7.2.4 Weitergehende Kompostverarbeitung am Anlagenstandort

Tabelle 25: *Erläuterung und Konkretisierung Weitergehende Kompostverarbeitung am Anlagenstandort*

Erläuterung

Bei der Herstellung von Pflanzsubstraten können bis zu 20% Kompost verarbeitet werden. Der Rest ist zum größten Teil Mutterboden, evtl. mit Düngerzusatz. Kompostierwerke erzeugen Pflanzsubstrate, die im Allgemeinen als lose Ware vermarktet werden. Das Absacken in einer eigenen Anlage lohnt meist nicht, da es sehr teuer ist und nicht unerhebliche Staubbelastungen verursacht. Sackware wird deshalb in der Regel von spezialisierten Erdenwerken hergestellt.

Nischenprodukte und Spezialsubstrate bzw. Spezialerdenmischungen auf der Basis von Fertigkompost können in geringen Mengen auch von den Betreibern der Kompostanlagen selbst erzeugt und verkauft werden.

Konkretisierung: Umweltbezogene Wirkung und umweltbezogenes Potenzial

Es wird angenommen, dass die Betreiber von Kompostanlagen bis zu 10% des erzeugten Fertigkomposts, der für die Weiterverarbeitung in Erdenwerken bestimmt ist, zur Herstellung eigener Substrate und Erden abzweigen könnten. Die damit verbundenen Aufwendungen und Emissionen entsprechen denen in Erdenwerken.

Der ökologische Vorteil besteht im vermiedenen Transport des Fertigkomposts zum Erdenwerk. Dieser ist im durchschnittlichen Anlagenbetrieb mit 60 km angesetzt.

Konkretisierung: Ökonomisches Potenzial

Nach Verrechnung der Kosten für Ausgangsstoffe (Sand, Torf, Muttererde etc.) und betriebliche Aufwendungen inklusive nicht zu unterschätzender Analysekosten können Spezialsubstrate bzw. Spezialerdenmischungen bis zu 18 €/t erzielen.

Dem gegenüber stehen verringerte Einnahmen aufgrund geringerer Kompostmengen zur Verarbeitung in Erdenwerken, die mit 2 € pro Tonne Kompost angesetzt werden⁹.

Erlöse und Verluste verrechnet ergeben in Summe bei der Biogutkompostierung zusätzliche Einnahmen in Höhe von ca. 0,51 €/t Biogut und bei der offenen Grüngutkompostierung inkl. der energetischen Verwertung einer holzigen heizwertreichen Teilmenge zusätzliche Einnahmen in Höhe von ca. 0,41 €/t Grüngut.

⁹ Siehe Fußnote 6

7.2.5 Ausbau der Erzeugung von Frischkompost

Tabelle 26: *Erläuterung und Konkretisierung Ausbau der Erzeugung von Frischkompost*

Erläuterung

Da landwirtschaftliche Abnehmer in Süddeutschland in der Regel sowohl Frisch- als auch Fertigkompost kostenfrei bzw. gegen Zuzahlung bekommen, ist es für Kompostierungsanlagen aus betriebswirtschaftlichen Gründen sinnvoll, möglichst große Mengen als Frischkompost abzugeben und die Aufwendungen für die Erzeugung von Fertigkompost zu vermeiden. Zumal aufgrund höherer Nachfrage Landwirte bereits bis zu 2 €/t Frischkompost zahlen.

Begrenzender Verfahrensschritt ist hierbei die Intensivrotte, die aufgrund der biologischen Vorgänge kaum beschleunigt werden kann. Ob das Material aus der Intensivrotte zeitnah als Frischkompost abgegeben wird oder einer Nachrotte zur Erzeugung von Fertigkompost zugeführt wird, hängt von der Vermarktungssituation vor Ort (z.B. jahreszeitlich unterschiedlicher Bedarf) und vom verfügbaren Platz zur Nachkompostierung (Lagerfläche) in Bezug auf die Input-Mengen Biogut ab. Zudem sollte gewährleistet sein, dass mögliche erhöhte Geruchsemissionen bei der Zwischenlagerung und Ausbringung weitgehend vermieden werden.

Konkretisierung: Umweltbezogene Wirkung und umweltbezogenes Potenzial

Der Ausbau des Anteils Frischkompost an der Gesamt-Kompostmenge sollte 50% nicht überschreiten, um die Entsorgungssicherheit bei eventuellen Engpässen potenzieller Abnehmer zu gewährleisten. Allerdings liegt dieser Annahme keine Analyse der Vermarktungssituation zugrunde. Es wird davon ausgegangen, dass die Abnahme des Frischkomposts gesichert ist.

Eine verringerte Erzeugungsmenge Fertigkompost ist mit niedrigeren Emissionswerten aus der Nachrotte verbunden. Bei der Biogutkompostierung beträgt die näherungsweise abgeleitete Emissionsminderung für Methan, Ammoniak und NMVOC ca. 5%, und für Lachgas ca. 19%. Bei der offenen Grüngutkompostierung inkl. der energetischen Verwertung einer holzigen heizwertreichen Teilmenge wurde die Emissionsminderung für Methan mit 5%, für Lachgas mit 19%, für Ammoniak mit 6% sowie für NMVOC mit 10% abgeschätzt. Dem gegenüber stehen leicht höhere Emissionen bei der Ausbringung von Frischkompost gegenüber Fertigkompost.

Aufgrund der Komposteigenschaften kann davon ausgegangen werden, dass aus der größeren Menge landwirtschaftlich verwerteten Frischkomposts höhere Gutschriften an Nährstoffen resultieren. Dem gegenüber steht eine niedrigere Menge Fertigkompost.

Konkretisierung: Ökonomisches Potenzial

Näherungsweise wird davon ausgegangen, dass die Kosten für die Nachrotte unverändert bleiben, während sich erlösseitig folgende Änderungen ergeben: Für die landwirtschaftliche Verwertung vom Kompost wird angenommen, dass 1,5 € pro Tonne Kompost Erlös werden. Dem gegenüber stehen verringerte Einnahmen aufgrund geringerer Kompostmengen zur Verarbeitung in Erdenwerken, die mit 2 € pro Tonne Kompost angesetzt werden¹⁰.

Erlöse und Verluste verrechnet ergeben in Summe bei der Biogutkompostierung zusätzliche Einnahmen in Höhe von ca. 0,07 €/t Biogut und bei der offenen Grüngutkompostierung inkl. der energetischen Verwertung einer holzigen heizwertreichen Teilmenge zusätzliche Einnahmen in Höhe von ca. 0,05 €/t Grüngut.

¹⁰ Siehe Fußnoten 5 und 6

7.2.6 Analyse der umweltbezogenen Wirkungen am Beispiel geschlossene Kompostierung von Biogut

Die Analyse der Optimierungsansätze hinsichtlich ihrer Potenziale zur Steigerung der Umweltentlastung aus der Biogutbehandlung wird beispielhaft anhand der geschlossenen Kompostierung vorgenommen. *Abbildung 15* veranschaulicht die Umweltentlastungen, die mit den untersuchten Ansätzen im Vergleich zum durchschnittlichen Anlagenbetrieb einer geschlossenen Kompostierung verbunden sind. Die Darstellung erfolgt sektoral gegliedert nach lebenswegbezogener Herkunft der Umweltbe- und Umweltentlastungen und aggregiert über alle analysierten Umweltwirkungen.

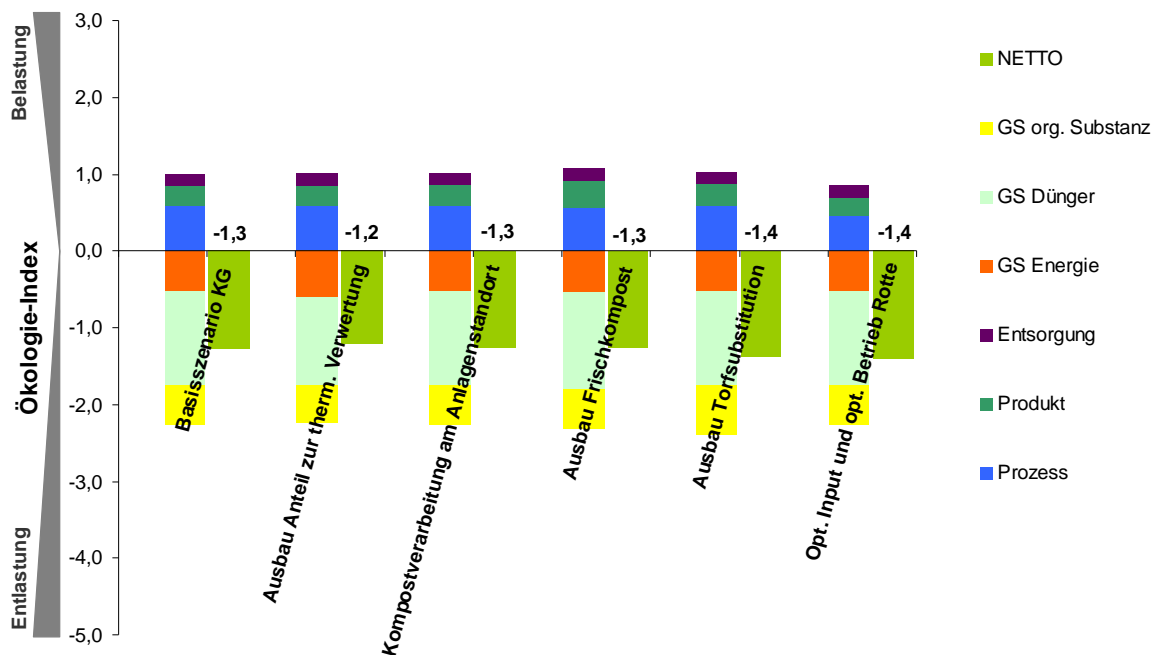


Abbildung 15: Biogutkompostierung: Durchschnittlicher Betrieb der geschlossenen Kompostierung (Basisszenario KG) und Optimierungsansätze im Vergleich. Ökologie-Index der analysierten Optimierungsansätze differenziert nach lebenswegbezogener Herkunft. Bezugseinheit: Behandlung von 1 t Biogut. Negative Ökologie-Indizes repräsentieren Umweltentlastungen.

Die untersuchten Optimierungsansätze haben umweltbezogen keine bis geringe Potenziale, die Umweltwirkungen der Biogutkompostierung zu verbessern. Auf der einen Seite führt der Ansatz des Ausbaus der Abtrennung von Anteilen zur thermischen Verwertung zu einer geringen Mehrbelastung der Umwelt während der Ausbau der Erzeugung von Frischkompost und eine weitergehende Kompostverarbeitung am Anlagenstandort als gleichwertig zum durchschnittlichen Anlagenbetrieb angesehen werden können. Auf der anderen Seite tragen die Ansätze Ausbau der Torfsubstitution und Optimierung des Materialinput inkl. optimierter Betriebsführung der Rotte zur Verringerung der Umweltbelastung bei.

Für die geringe Mehrbelastung der Umwelt infolge der Abtrennung heizwertreicher Fraktionen sind reduzierte Gutschriften für Nährstoffe und organische Substanz verantwortlich. Die zusätzlichen Emissionen bei der deshalb notwendigen Herstellung von Dünger aus Primärrohstoffen sind größer als die vermiedenen Emissionen bei der durch die Mehrung der heizwertreichen Fraktion ersetzten Energieerzeugung aus fossilen Brennstoffen.

Die Umweltentlastung beim Ansatz Ausbau der Torfsubstitution ist auf die höheren Gutschriften an organischer Substanz zurückzuführen.

Das größte Potenzial zur Umweltentlastung bietet der Ansatz Optimierung des Materialinput und optimierte Betriebsführung der Rotte, der auch der einzige Ansatz ist, der direkt den Kompostierungsprozess beeinflusst. Hauptsächlich dafür verantwortlich ist die Möglichkeit, mit einem optimierten Betrieb sowohl CH_4 - als auch NH_3 - und N_2O -Emissionen aus der Haupt- und Nachrotte zu reduzieren.

7.2.7 Ökoeffizienzanalyse am Beispiel geschlossene Kompostierung

Das Ökoeffizienz-Portfolio in *Abbildung 16* kombiniert für die Optimierungsansätze die beschriebenen Umweltwirkungen auf die geschlossene Kompostierung mit den Auswirkungen auf die Behandlungskosten.

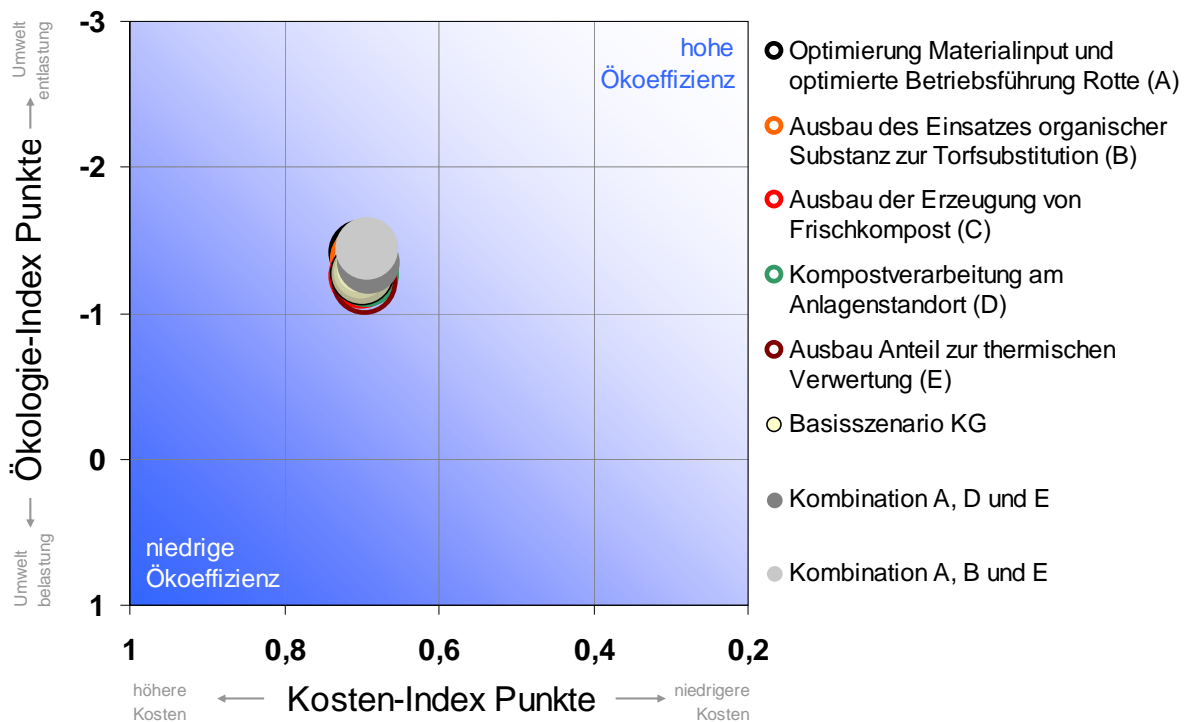


Abbildung 16: *Biogutkompostierung: Durchschnittlicher Betrieb der geschlossenen Kompostierung (Basisszenario KG) und Optimierungsansätze im Vergleich (Ökologie-Index < 0 bedeutet Umweltentlastung; Ökologie-Index > 0 bedeutet Umweltbelastung; Kosten-Index: Normierung der verfahrensspezifischen Kosten am Maximalwert der untersuchten Behandlungsverfahren – vgl. Tabelle 12). Bezugseinheit: Behandlung von 1 t Biogut.*

Gegenüber dem durchschnittlichen Betrieb einer geschlossenen Kompostierungsanlage weisen alle Optimierungsansätze verringerte bis gleichwertige Behandlungskosten auf. Allerdings sind die Einflüsse auf die Behandlungskosten mit einem Reduzierungspotenzial von maximal 1% nur sehr gering.

Wie bereits beschrieben, ist durch die Ansätze Ausbau der Abtrennung von Anteilen zur thermischen Verwertung und Ausbau der Erzeugung von Frischkompost gegenüber dem durchschnittlichen Betrieb einer geschlossenen Kompostierungsanlage keine weitere Entlastung der Umwelt zu erwarten. Die anderen Optimierungsansätze weisen etwas bessere Ökologie-Indizes auf, wobei das größte Umweltent-

lastungspotenzial für den Ansatz Optimierung des Materialinput und optimierte Betriebsführung der Rotte zu erwarten ist.

Eine Kombination von Optimierungsansätzen ist nur möglich, wenn sich diese auf unterschiedliche Abschnitte des Verfahrens beziehen. Deshalb können die Ansätze zur Emissionsminderung und zur optimierten Produkterzeugung nur mit jeweils einem Ansatz zur optimierten Produktnutzung/Kostenreduzierung gekoppelt werden. Diese Kombinationen sind ebenfalls in Abbildung aufgenommen, allerdings ohne die Berücksichtigung des Ansatzes Ausbau der Erzeugung von Frischkompost aufgrund seiner sehr geringen Auswirkungen auf den durchschnittlichen Anlagenbetrieb.

Auf die Behandlungskosten haben auch die kombinierten Ansätze mit Reduzierungspotenzialen um ca. 1% nur einen sehr geringen Einfluss. Die Betrachtung der ökologischen Gesamtwirkung sieht dagegen anders aus. Die Ökologie-Indizes der beiden kombinierten Ansätze sind sichtbar besser als der Ökologie-Index des durchschnittlichen Anlagenbetriebs.

8 Fazit und Handlungsempfehlungen

8.1 Bewertung der Behandlungsverfahren

Durchschnittlicher Betrieb der Behandlungsverfahren

Die Behandlung von Biogut ist mit Umweltbelastungen aus dem eigentlichen Prozess, dem Ausbringen und Lagern der stofflichen Produkte und der Entsorgung der Rückstände verbunden. Dem stehen Umweltentlastungen aus den bereitgestellten Nutzen an Energie, Nährstoffen und organischer Substanz gegenüber.

Mit Blick auf die durch die Behandlung verursachten Belastungen sind an erster Stelle die Emissionen an C-/N-haltigen Verbindungen aus dem eigentlichen Behandlungsprozess von Relevanz. Daneben haben die NH₃-Emissionen beim Ausbringen fester und ggf. flüssiger Produkte einen bedeutenden umweltbelastenden Beitrag.

Umweltentlastungen resultieren aus der Bereitstellung stofflicher und energetischer Produkte. Alle Zusatznutzen – die Erzeugung von Strom und Wärme, die Bereitstellung von Phosphat und weiteren Nährstoffen und die Nutzung der organischen Substanz – tragen signifikant zu den Umweltentlastungen bei. Die Bedeutung der Zusatznutzen hängt allerdings vom jeweils betrachteten Behandlungsverfahren ab. Alle betrachteten Verfahren zur Behandlung von Bio- und Grüngutabfällen entlasten bei Berücksichtigung der Gutschriften aus der Bereitstellung von Energie, Nährstoffen und organischer Substanz die Umwelt.

Die umweltbezogenen Unterschiede zwischen geschlossener bzw. teilgeschlossener Kompostierung einerseits und Nass- bzw. Propfenstromvergärung andererseits sind bei Betrachtung des durchschnittlichen Anlagenbetriebs gering. Mit entsprechender Technik bzw. Betriebsführung nach guter fachlicher Praxis kann also sowohl bei Kompostierung als auch Vergärung ein ähnlich positives Umweltergebnis erreicht werden.

Die teil-/geschlossene Kompostierung ist mit vergleichsweise geringen Umweltbelastungen aus der Behandlungsanlage und beim Ausbringen der Frisch- und Fertigkomposte verbunden. Im Gegensatz

dazu sind die Belastungen aus der Vergärung nahezu doppelt so hoch. Emissionsrelevant ist dabei besonders der Umgang mit den flüssigen und den festen Produkten aus der Vergärung. Diesen Nachteil kann die Vergärung durch hohe Gutschriften aus der Bereitstellung von Strom und Wärme aufwiegen. Bei der vollständigen stofflichen Verwertung aller Produkte aus Vergärung bzw. Kompostierung stellen beide Verfahren gleiche Mengen an Nährstoffen bereit und erzielen deshalb in diesem Bereich gleiche Gutschriften.

Legt man den durchschnittlichen Anlagenbetrieb zugrunde, besteht ein Vorteil von geschlossener bzw. teilgeschlossener Kompostierung und Nass- bzw. Propfenstromvergärung gegenüber der Mitbehandlung von Biogut als Teil des Restmülls in der MVA. Der umweltbezogene Vorteil der stofflichen Verfahren ergibt sich durch die Bereitstellung von Phosphat, weiteren Nährstoffen und organischer Substanz und gleichzeitiger Nutzung des Energieinhalts. Dabei sei angemerkt, dass bei ausschließlicher Betrachtung der prozessseitigen Belastungen die thermische Behandlung das Verfahren mit der deutlich geringsten Umweltbelastung ist.

Die offene Kompostierung von Biogut ist mit hohen Emissionen bei der Prozessführung verbunden und bietet deshalb aus umweltbezogener Sicht keine Alternative zu einer geschlossenen Kompostierung. Eine abschließende Bewertung der Batchvergärung anhand der zur Verfügung stehenden Daten fällt schwer. Daten aus der betrieblichen Praxis weisen einen deutlichen Nachteil dieser Vergärungsvariante mit Blick auf die Erzeugung von Strom und Wärme im Vergleich zu den kontinuierlichen Vergärungsanlagen aus. Dieser Nachteil kommt deutlich im umweltbezogenen Gesamtergebnis zum Tragen. Spezifische Untersuchungen der luftseitigen Emissionen aus der Batchvergärung besonders mit Blick auf die aus Emissionssicht relevanten An- und Abfahrvorgänge und die Behandlung der Gärprodukte liegen nicht vor. Dennoch bestehen auch bei der Batchvergärung durch die Realisierung der untersuchten Optimierungsansätze Potenziale, einen emissionsarmen Betrieb zu realisieren.

Im Rahmen dieser Untersuchung wird die Bewertung der Umweltwirkungen mit einer ökonomischen Analyse verknüpft. Die für diese Untersuchung zur Verfügung stehenden ökonomischen Informationen zu den Behandlungsverfahren ermöglichen ein Ausweisen der Verfahrensunterschiede. Zwischen teil-/geschlossener Kompostierung und kontinuierlicher Vergärung bestehen keine wesentlichen kostenbezogenen Unterschiede mit Blick auf die Realisierung eines Betriebs nach guter fachlicher Praxis. Im Vergleich zur Behandlung als Hausmüllbestandteil haben Kompostierung und Vergärung einen Kostenvorteil.

Die energetische Verwertung von heizwertreichen Grüngutfraktionen ist nur für die holzige Teilmenge relevant. Die offene Grüngutkompostierung übernimmt die Behandlung der verbleibenden Grüngutfraktionen.

Sensitivitäten, Varianten und Optimierungsansätze von Kompostierung und Vergärung

Für die analysierten Sensitivitäten, Varianten und Optimierungsansätze weist die Ökoeffizienzanalyse die zu erwartende umweltbezogene und ökonomische Wirkungsrichtung und die zugehörige Einflussstärke aus. Ausgangspunkt für die Bewertung von Sensitivitäten, Varianten und Optimierungsansätzen ist ein durchschnittlicher Anlagenbetrieb. Die konkrete Anlagensituation vor Ort kann erheblich davon abweichen. Bei der Übertragung der Ergebnisse auf Einzelanlagen sind deshalb die jeweiligen Rahmenbedingungen vor Ort zu berücksichtigen.

Alle Verfahren haben das Potenzial, durch die Realisierung geeigneter Maßnahmen ihre Umweltwirkungen zu verbessern. Die folgende Abbildung fasst exemplarisch für die Propfenstromvergärung die

untersuchten Sensitivitäten, Varianten und Optimierungsansätze zusammen, die in ihrer möglichen Kombination eine aus Sicht der Umweltwirkungen optimierte Vergärung abbilden.

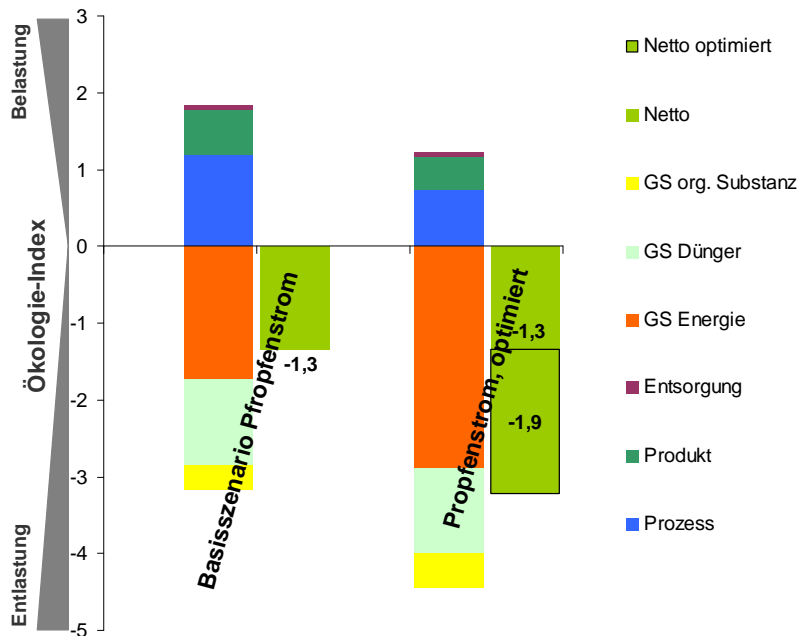


Abbildung 17: Biogutvergärung. Durchschnittlicher Betrieb Propfenstromvergärung (Basisszenario Propfenstrom) und Verbesserungsansätze zusammengefasst im Vergleich. Reduktion von Umweltlasten und Steigerung von Gutschriften durch Sensitivitäten, Varianten und Optimierungsansätze (ohne Ansatz: Optimierte Betriebsführung bei der Behandlung fester Gärprodukte). Differenziert nach lebenswegbezogener Herkunft. Bezugseinheit: Behandlung von 1 t Biogut. Negative Ökologie-Indizes repräsentieren Umweltentlastungen.

Für die Vergärung sind vor allem zwei Einflüsseebenen mit Blick auf die umweltbezogene Wirkung relevant:

- Reduzierung der Emissionen beim Handling der festen und flüssigen Gärprodukte. Hier können beispielsweise durch NH_3 -Wäscher und Kapselung des Lagers für flüssige Gärprodukte die Emissionen gegenüber dem durchschnittlichen Anlagenbetrieb um 40% gesenkt werden.
- Ausbau der für eine externe Nutzung bereitgestellten Mengen an Strom und Wärme. Bei diesem Ansatz, der dabei potenziell die stärkste Wirkung entfaltet, ist die bereitgestellte Wärme vollständig einer externen Nutzung zuzuführen.

Insgesamt besteht das Potenzial, durch Ausschöpfen aller Ansätze die Netto-Umweltentlastung der Vergärung mehr als zu verdoppeln.

Abbildung 18 fasst exemplarisch für die geschlossene Kompostierung die untersuchten Sensitivitäten, Varianten und Optimierungsansätze zusammen, die in ihrer möglichen Kombination eine aus Sicht der Umweltwirkungen optimierte Kompostierung abbilden.

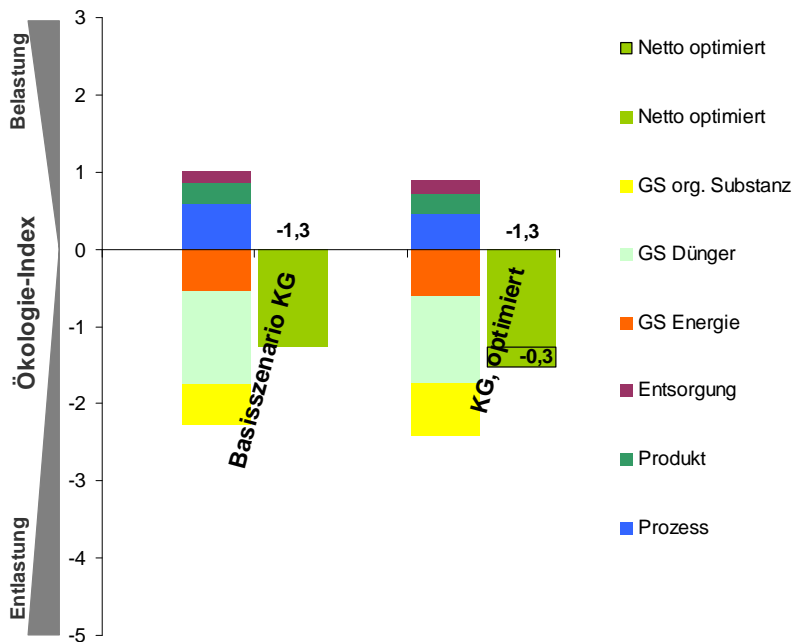


Abbildung 18: Biogutkompostierung. Durchschnittlicher Betrieb der geschlossenen Kompostierung (Basisszenario KG) und Verbesserungsansätze zusammengefasst im Vergleich. Reduktion von Umweltlasten und Steigerung von Gutschriften durch Sensitivitäten, Varianten und Optimierungsansätze. Differenziert nach lebenswegbezogener Herkunft. Bezugseinheit: Behandlung von 1 t Biogut. Negative Ökologie-Indizes repräsentieren Umweltentlastungen.

Für die Kompostierung sind vor allem zwei Einflüsseebenen mit Blick auf die umweltbezogene Wirkung relevant:

- Reduzierung der Emissionen beim Handling des Materialinputs sowie der Betriebsführung der Rotte. Hier können durch eine optimale Betriebsführung sowie technische Maßnahmen die Emissionen gegenüber dem durchschnittlichen Anlagenbetrieb um mehr als 20% gesenkt werden.
- Ausbau der stofflichen Verwertung von Komposten in Erdenwerken. Bei einer angenommenen vollständigen Verwertung in Erdenwerken ist eine Steigerung der Umweltentlastung um mehr als 10% möglich.

Insgesamt besteht das Potenzial, durch Ausschöpfen aller Ansätze die Netto-Umweltentlastung der Kompostierung um mehr als ca. ein Viertel zu steigern.

Abbildung 19 fasst für die offene Grüngutkompostierung inkl. der energetischen Verwertung einer holzigen heizwertreichen Teilmenge die untersuchten Sensitivitäten, Varianten und Optimierungsansätze zusammen, die in ihrer möglichen Kombination eine aus Sicht der Umweltwirkungen optimierte Grüngutbehandlung abbilden.

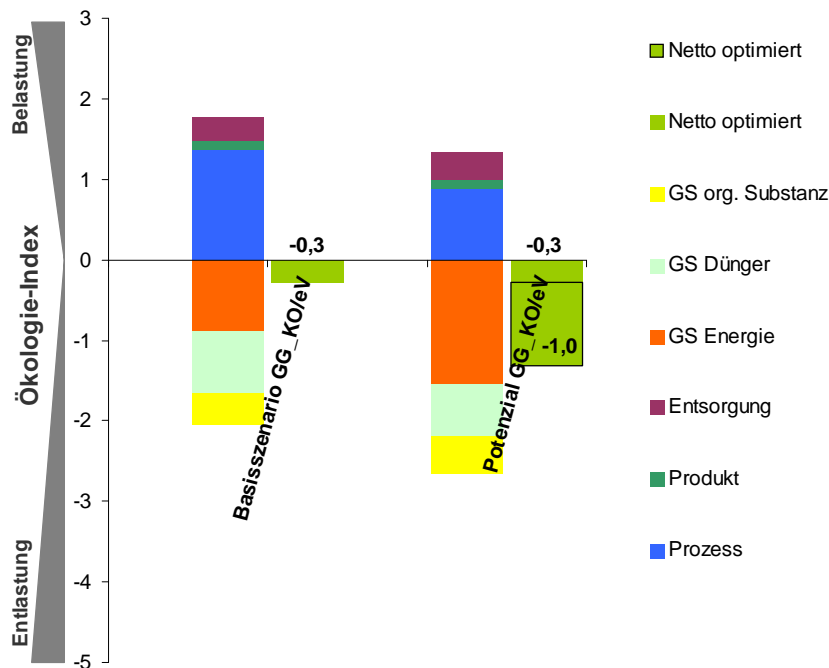


Abbildung 19: Grüngutbehandlung. Durchschnittlicher Betrieb der offenen Grüngutkompostierung inkl. der energetischen Verwertung einer holzigen heizwertreichen Teilmenge (Basisszenario GG_KO/eV) und Verbesserungsansätze zusammengefasst im Vergleich. Reduktion von Umweltlasten und Steigerung von Gutschriften durch Sensitivitäten, Varianten und Optimierungsansätze. Differenziert nach lebenswegbezogener Herkunft. Bezugseinheit: Behandlung von 1 t Grüngut. Negative Ökologie-Indizes repräsentieren Umweltentlastungen.

Für die offene Kompostierung von Grüngut inkl. der energetischen Verwertung einer holzigen heizwertreichen Teilmenge sind vor allem zwei Einflussebenen mit Blick auf die umweltbezogene Wirkung relevant:

- Reduzierung der Emissionen beim Handling des Materialinputs sowie der Betriebsführung der Rotte. Hier können durch eine optimale Betriebsführung sowie technische Maßnahmen die Emissionen gegenüber dem durchschnittlichen Anlagenbetrieb um mehr als 30% gesenkt werden.
- Ausbau der für eine externe Nutzung bereitgestellten Mengen an Strom und Wärme bei der Verwertung der holzigen Teilmenge im BMHKW. Die potenziell stärkste Wirkung wird bei diesem Ansatz entfaltet, wenn die bereitgestellte Wärme vollständig einer externen Nutzung zugeführt werden kann.

Insgesamt besteht das Potenzial, durch Ausschöpfen aller Ansätze die Netto-Umweltentlastung der offenen Kompostierung von Grüngut inkl. der energetischen Verwertung einer holzigen heizwertreichen Teilmenge die Netto-Umweltentlastung der Grüngutbehandlung mehr als zu verdreifachen.

Das Ökoeffizienzportfolio für Biogut in *Abbildung 20* zeigt exemplarisch für Propfenstromvergärung, geschlossene Kompostierung und Mitbehandlung als Teil des Restmülls über den durchschnittlichen Anlagenbetrieb hinaus das Potenzial zur Verbesserung der Ökoeffizienz durch Varianten und Optimierungsansätze. Kombinationen der Ansätze sind dabei nicht dargestellt, aber in der betrieblichen Praxis möglich.

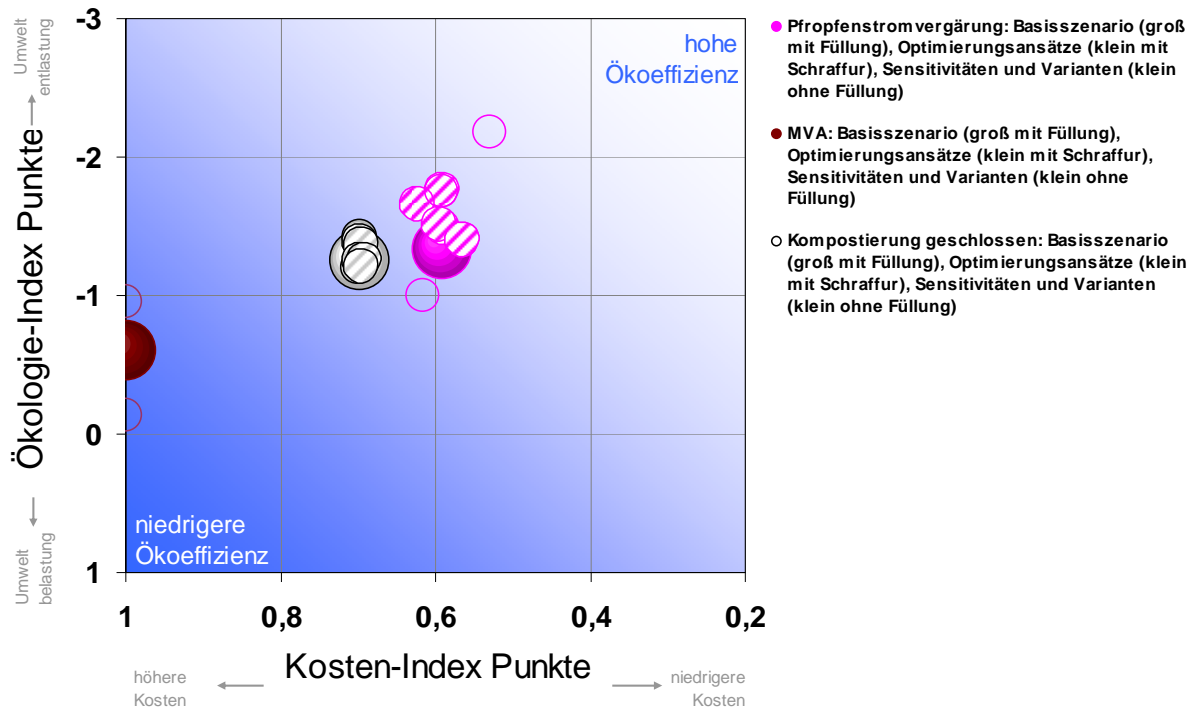


Abbildung 20: Biogutbehandlung: Ökoeffizienz-Portfolio ausgewählter untersuchter Verfahren (Ökologie-Index < 0 bedeutet Umweltentlastung; Ökologie-Index > 0 bedeutet Umweltbelastung; Kosten-Index: Normierung der verfahrensspezifischen Kosten am Maximalwert – vgl. Tabelle 12)

Die Ökoeffizienz der thermischen Mitbehandlung als Teil des Restmülls ist niedriger als die von Kompostierung und Vergärung – ein Betrieb nach guter fachlicher Praxis wird vorausgesetzt. Die Ökoeffizienzpotenziale der Vergärung liegen primär in der Steigerung der Umweltentlastung durch die Etablierung technischer Lösungen zur Emissionsreduzierung und Maximierung der Erzeugung bzw. Abgabe von Strom und Wärme.

Die Ökoeffizienzpotenziale der Kompostierungsverfahren fallen gegenüber den beiden anderen dargestellten Behandlungsverfahren geringer aus. Eine Steigerung der Umweltentlastung ist bei den Kompostierungsverfahren hauptsächlich prozessseitig durch eine gute fachliche Praxis, eine optimierte Betriebsführung der Rotte sowie produktseitig durch den Ausbau des Einsatzes organischer Substanz zur Torfsubstitution zu erreichen.

Die Grenzen zwischen den Verwertungsalternativen sind fließend. Unter der Berücksichtigung von Sensitivitäten, Varianten und Optimierungsansätzen kann sich die Rangfolge der Verfahren im Ökoeffizienzvergleich im Vergleich zum durchschnittlichen Betrieb ändern.

8.2 Handlungsempfehlungen für einen ökoeffizienten Anlagenbetrieb

Standortbezogene Optimierung durch Stoffstromtrennung und Systemkombinationen

Der über die Biotonne erfasste Abfall ist ohne weitere Vorbehandlung nicht für alle Verfahren gleichermaßen gut geeignet. Strukturarmes Biogut und Speiseabfälle sind am besten für eine Vergärung mit Biogasnutzung und stofflicher Verwertung der Gärrückstände geeignet. Struktureicherer Biogut, wie lignin- und zellulosereiches Pflanzenmaterial, lässt sich im Rahmen der Kompostierung gut aerob abbauen. Stark holzige, schwer aerob abbaubare Bestandteile sollten der energetischen Verwertung

zugeführt werden. Die stofflichen Produkte sollten hinsichtlich der Gütekriterien eine hohe Qualität aufweisen, da so eine höhere Akzeptanz bei potenziellen Abnehmern gewährleistet ist. Mit der Vorschaltung einer Vergärungsstufe kann bei bestehenden Kompostieranlagen in Form einer Kaskadennutzung die stoffliche und energetische Nutzung ökoeffizient intensiviert werden.

Synergieeffekte durch Anlagenverbunde nutzen

An geeigneten Standorten bietet die Integration von Vergärungsanlagen in die Infrastruktur bestehender thermischer Abfallverwertungsanlagen interessante Perspektiven wie z.B. die thermische Inertisierung der Vergärungsabluft oder optimierte Wärmenutzung im Verbund¹¹.

8.2.1 Vergärung

Im Vergleich zur teil-/geschlossenen Kompostierung liegt das Emissionsniveau der Vergärung inklusive Nachbehandlung bzw. Lagerung der Gärprodukte höher. Die Erzeugung von Biogas als Produkt des anaeroben Abbaus ist gekoppelt an erhebliche C-/N-Emissionen insbesondere beim Handling der Gärprodukte. Die weitgehende Nutzung des Energieinhaltes des Bioguts durch die Erzeugung von Biogas überwiegt allerdings diesen Nachteil.

Ansätze zur Emissionsminderung: Emissionen reduzieren durch eine Betriebsführung nach guter fachlicher Praxis und die Etablierung technischer Maßnahmen

Ausgehend von einem Anlagenbetrieb, der sich an einer guten fachlichen Praxis orientiert, bestehen zur Minderung der Emissionen eine Vielzahl von technischen bzw. betrieblichen Ansätzen. Ansätze mit großem Potenzial zur Verbesserung der umweltbezogenen Bewertung sind:

- **Optimierte Betriebsführung bei der Behandlung fester Gärprodukte** Eine optimierte Nachbehandlung bietet die Chance, sowohl C- als auch N-haltige Emissionen aus der Nachbehandlung deutlich zu reduzieren. Die Aerobisierung kann optimiert werden, indem den strukturarmen und nassen Gärrückständen hohe Anteile an frischem Material insbesondere strukturreichen, d.h. ligninreichen, Stoffen hinzugefügt werden. Zur Vermeidung überhöhter Emissionen in der Nachrotte, auch von Ammoniak und Lachgas, ist ein ausreichender Strukturgehalt der Rottekörper unabdingbar. Eine Minderung der Methanemissionen aus der Aerobisierung kann durch eine intensive Belüftung, Ablufferfassung und Verbrennung der Abluft erzielt werden. Die Maßnahmen zum optimierten Betrieb der Nachrotte sind nicht zwingend mit signifikanten zusätzlichen finanziellen Lasten verbunden.
- **Saure Wäsche der Abluft aus der Behandlung der festen Gärprodukte** Eine deutliche Emissionsminderung wird für NH_3 und N_2O erreicht, während kohlenwasserstoffhaltige Verbindungen nicht reduziert werden. Die Realisierung eines sauren Wäschers ist mit zusätzlichen Investitions- und Betriebskosten verbunden.
- **Verbrennung der Abluft aus dem Lager der flüssigen Gärprodukte** Diese Maßnahme reduziert verlässlich alle Emissionen. Insgesamt sind aber die Emissionen aus dem Lager der flüssigen Gärprodukte geringer als die aus der Nachbehandlung der festen Gärprodukte. Als bindend für den Vergütungsanspruch fordert das EEG 2012 im §6 Abs. 4 Satz 1 Nr. 1, dass für neu zu

¹¹ Im Rahmen des vom StMUG und der Arbeitsgemeinschaft der Betreiber thermischer Abfallbehandlungsanlagen in Bayern geförderten Vorhabens Ökoeffizienz von Anlagenkonzepten zur Integration von Vergärungsanlagen in die thermische Abfallverwertung wurden die technische Realisierung und Ökoeffizienzpotenziale dieses Ansatzes anhand ausgewählter Standorte konkretisiert.

errichtende Gärproduktlager eine gasdichte Abdeckung und ein Anschluss an die Gasverwertung vorzusehen ist. Perspektivisch ist deshalb davon auszugehen, dass diese Anforderungen beim Neubau von Anlagen umgesetzt werden. Zusatzkosten für den erforderlichen Umbau stehen Erlöse aus der zusätzlich verwerteten Biogasmenge gegenüber.

- **Emissionsseitigen Risiken der Batchvergärung Rechnung tragen** Die Batchvergärung bedarf zur Realisierung eines emissionsarmen Betriebs besondere Sorgfalt bei der Erfassung der Fermenterabluft und der Nachbehandlung des oftmals stark durchnässten Gärprodukts. Maßnahmen der Emissionsminderung im Rahmen einer guten fachlichen Praxis sind z.B. die geschlossene Ausführung der emissionsrelevanten Bereiche der Gärproduktnachbehandlung, die Bereitstellung großer Mengen an strukturgebenden Materialien und die Erfassung möglichst großer Anteile der Fermenterabluft bzw. der Belüftungsabgase.

Erzeugung von Strom und Wärme: Energieeffizienz steigern und Wärmenutzung ausbauen

Bei einem geeigneten Anlagenumfeld kann im Vergleich zum durchschnittlichen Anlagenbetrieb die genutzte Wärmemenge mehr als verdreifacht werden. Durch die zusätzlichen Gutschriften aus der Substitution der konventionellen Wärmerzeugung wird damit eine sehr deutliche Steigerung der Umweltentlastungen erzielt.

Die Einspeisung des Biogases in das Erdgasnetz ist hier aus umweltbezogener Sicht eine Alternative bei nicht vollständiger externer Wärmenutzung am Standort. Weitere Ansätze zur Steigerung der Energieeffizienz sind:

- die Steigerung der Stromausbeute bei Biogasnutzung im Blockheizkraftwerk und
- das Abtrennen holziger Komponenten aus dem Anlageninput zur energetischen Verwertung unter der Voraussetzung, dass ausreichend Strukturmaterial im Rottekörper der Nachkompostierung verbleibt.

8.2.2 Kompostierung

Das Emissionsniveau der teil-/geschlossenen Kompostierungsverfahren liegt im Vergleich zu den Vergärungsverfahren niedriger, was u.a. auf das Handling der stofflichen Produkte Frisch- und Fertigkompost zurückzuführen ist. Dieses ist mit deutlich geringeren C-/N-Emissionen verbunden, als das Handling der Rückstände aus den Vergärungsprozessen. Trotzdem sollte eine Reduzierung weiter im Fokus stehen.

Ansätze zur Emissionsminderung – Emissionen reduzieren durch eine Betriebsführung nach guter fachlicher Praxis und die Etablierung technischer Maßnahmen

Einem Anlagenbetrieb, der sich an einer guten fachlichen Praxis orientiert, stehen eine Reihe von technischen bzw. betrieblichen Ansätzen zur Verfügung, die ein Potenzial zur Verbesserung der umweltbezogenen Bewertung bieten:

- **Optimierung des Materialinputs** Durch eine unverzügliche Verarbeitung der angelieferten Bio- und Grüngutabfälle sowie durch eine gute fachliche Praxis bei der Herstellung des Rotteausgangsmaterials können sowohl C- als auch N-haltige Emissionen aus dem Kompostierungsprozess deutlich reduziert werden. Dafür ist es notwendig, ein für die Rotte günstiges C/N-Verhältnis einzustellen, einen optimalen Wassergehalt zu gewährleisten und durch Zumischung von ausreichend Strukturmaterial ein günstiges Luftporenvolumen einzustellen.

- **Optimierte Betriebsführung der Rotte** Eine optimierte Betriebsführung der Rotte bietet die Möglichkeit, sowohl C- als auch N-haltige Emissionen aus dem Kompostierungsprozess signifikant zu reduzieren. Neben technischen Maßnahmen, wie der Vermeidung zu großvolumiger Rottekörper, einer aktiven Belüftung sowie einer Steuerung der Rottetemperaturen tragen auch die Aufrechterhaltung eines ausreichenden Luftporenvolumens, einer ausreichenden Strukturstabilität des Rottekörpers sowie einer guten Luftdurchlässigkeit bei geringer Vernäsung zur Minderung der Emissionen bei.

Erzeugung von Strom und Wärme – Abtrennung einer heizwertreichen Fraktion ausbauen

Bei einem geeigneten Ausgangsmaterial an Bio- und Grüngutabfällen kann durch zusätzliche Gutschriften aufgrund höherer abgetrennter Mengen Strukturmaterial, die in Biomasseheizkraftwerken energetisch verwertet werden und der daraus folgenden Substitution der konventionellen Strom- und Wärmerzeugung, eine Steigerung der Umweltentlastungen erzielt werden. Allerdings muss dabei sichergestellt bleiben, dass die Rottekörper weiterhin ausreichend Strukturmaterial enthalten, um günstige Feuchtrohdichten zu gewährleisten. Ansonsten ist aufgrund zunehmend anaerober Milieubedingungen im Rottekörper von höheren Methan-Emissionen auszugehen.

8.3 Handlungsrahmen für eine nachhaltige Bioabfallverwertung

Bioabfallverwertung eine Säule nachhaltiger Abfallwirtschaft

Die Behandlung getrennt erfasster Bioabfälle in Bayern leistet bereits heute einen wichtigen Beitrag für eine nachhaltige Abfallwirtschaft. Durch die Entsorgung von ca. 1,9 Mio. t Bio- und Grüngut wurden 2011 in Bayern beispielsweise:

- ca. 495.000 t CO₂ aus fossiler Energieerzeugung, Düngemittelproduktion, Torfabbau und Ackergrasanbau vermieden,
- mehr als 1 Mio. MWh Strom und Wärme klimaneutral erzeugt und
- ca. 2.750 t Phosphat als Nährstoff bereitgestellt.

Durch eine vermehrte Nutzung der entstehenden Wärme lässt sich die bereitgestellte Energiemenge noch deutlich steigern. Die ca. 1,9 Mio. t Bio- und Grüngut, die 2011 in Bayern der stofflichen Verwertung zugeführt wurden, stellen bereits heute eine P₂O₅-Menge bereit, die ca. 5% bis 10% der in Bayern verbrauchten P₂O₅-Menge aus phosphathaltigen Düngemitteln beträgt.

Verwertung schafft Umweltvorteile

Die Ergebnisse der Studie bestätigen aus umweltbezogener Sicht grundsätzlich den Vorrang der Verwertung getrennt erfassten Bioguts vor dessen Sammlung über die Restmülltonne und der anschließenden Entsorgung in einer thermischen Behandlungsanlage. Voraussetzungen dafür sind, dass die Verwertungsverfahren auf eine möglichst umfassende Nutzung der organischen Substanz, der Nährstoffe und des Energieinhalts abzielen. Zusätzlich müssen durch einen Anlagenbetrieb nach guter fachlicher Praxis bzw. durch entsprechende technische Lösungen luftseitige Emissionen minimiert werden. Sind diese Aspekte in Einzelfällen oder unter speziellen Rahmenbedingungen nicht gegeben, dann ist der ökologische Vorrang der Verwertung anhand der spezifischen Situation zu prüfen.

Stoffstromlenkung und Verwertung in Kaskaden verbinden energetische und stoffliche Nutzung

Eine nachhaltige Verwertung biogener Abfälle soll an den Zielen Ressourcenschutz und Minimierung von Umweltbelastungen gleichermaßen ausgerichtet sein. Dabei greift eine Nutzung biogener Abfallströme, die sich nur auf deren Energieinhalt beschränkt, im Sinne einer ganzheitlichen Verwertung zu kurz. Die in den Bioabfällen ebenso enthaltenen Potenziale sowohl zum Schutz endlicher Ressource an Industriemineralien als auch zur Erhalt der Bodenfruchtbarkeit dürfen nicht ungenutzt bleiben.

Aus Sicht der umweltbezogenen Bewertung sind die Grenzen zwischen den jeweiligen Verwertungswegen fließend. Sowohl die stoffliche Verwertung von Kompostprodukten als auch die energetische Verwertung biogener Abfallströme liefern prinzipiell einen Beitrag zur Umweltentlastung und zur Schonung von Ressourcen. Entscheidend für eine ökoeffiziente Verwertung ist, dass eine Synthese aus stofflicher und energetischer Verwertung angestrebt wird. Dies kann erfolgen durch:

- Stoffstromlenkung so, dass Bioabfälle entsprechend ihrer aeroben bzw. anaeroben Abbaubarkeit jeweils dem optimalen Behandlungsverfahren zur ökoeffizienten Nutzung energetischer und stofflicher Potenziale verfügbar gemacht werden.
- Kaskadennutzung z.B. durch Kombination aus anaerobem Abbau zur Erzeugung von Biogas und nachgeschaltetem aeroben Abbau der festen Gärprodukte zu Komposten für die stoffliche Nutzung wertgebender Inhaltstoffe.

Handlungsempfehlungen an Politik und kommunale Entscheidungsträger für eine nachhaltige Bioabfallverwertung

Auf Basis der Untersuchung gibt bifa die folgenden Handlungsempfehlungen:

- Möglichst umfassende Erschließung der rohstofflichen und energetischen Nutzwerte des Bioabfalls. In der Regel ist die getrennte Sammlung und Verwertung die ökoeffizienteste Lösung.
- Stoffstromlenkung und Einsatz von differenzierten Verwertungssystemen, so dass in Kaskadennutzung die stofflichen und energetischen Eigenschaften des Bioabfalls unter den Randbedingungen vor Ort optimal genutzt werden.
- Vorgeben und Durchsetzen von hohen, insbesondere emissionsarmen, Anlagen- und Betriebsstandards und Sicherung der bestehenden Qualitätsanforderungen an die stofflichen Produkte.
- Innovations- und Investitionsbereitschaft durch verlässliche Randbedingungen sichern.
- Bei Ausschreibung und bei Eigenbetrieb ökologische Aspekte verstärkt berücksichtigen. Verfahren, die ökoeffizient arbeiten, sind Lösungen, die ausschließlich eine kostengünstige Entsorgung bieten, vorzuziehen.

9 Literatur

- [BGK / ZAW 2009] Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V und Zweckverband Abfallwirtschaft Donau-Wald: Heizwert von Bioabfall. Unveröffentlichter Ergebnisbericht.
- [BGK 2009] Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V.: Humusbedarf der Landwirtschaft wächst. Humuswirtschaft & Kompost aktuell, 11/2009, S. 4-6
- [BGK 2010] Kehres, B.; Mähl, B.; Clemens, J.; Cuhls, C.; Reinhold, J.; Müsken, J.: Betrieb von Kompostierungsanlagen mit geringen Emissionen klimarelevanter Gase. Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V. (Hsg.), Köln 2010
- [BGK 2011] Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V.: Jahresmedianwerte gütegesicherter Komposte und Gärprodukte für das Jahr 2011
- [BGR 2007] Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe: Rohstoffwirtschaftliche Steckbriefe für Metall- und Nichtmetallrohstoffe. Stand 1/2007
- [BGR 2009] Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe: Reserven, Ressourcen und Verfügbarkeit von Energierohstoffen – Kurzstudie. Datenstand 2009.
- [bifa 2010] bifa Umweltinstitut: Ökoeffiziente Verwertung von Bioabfällen und Grüngut in Bayern. bifa-Text Nummer 47. Augsburg 2010. ISSN 0944-5935.
- [BMBF 2008] Fraunhofer Umsicht und Partner: BMBF 2008 Band 4 S.71] Verbundprojekt Biogaseinspeisung. Band 4 Technologie und Kosten der Biogasaufbereitung und Einspeisung in das Erdgasnetz. Ergebnisse der Markterhebung 2007 -2008. Gefördert durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF). Oberhausen, Leipzig, Wuppertal, Bochum, essen Magdeburg Trier im Juni 2009
- [BMU 2008] ifeu - Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH et al: Optimierungen für einen nachhaltigen Ausbau der Biogaserzeugung und -nutzung in Deutschland. Endbericht mit Materialband. Verbundprojekt gefördert vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) Projektträger: Forschungszentrum Jülich. F&E-Vorhaben, FKZ: 0327544Heidelberg, Leipzig, Berlin, Darmstadt, Mai 2008
- [Cuhls 2008] gewitra mbH - Ingenieurgesellschaft für Wissenstransfer. Emissionsergebnisse und Kohlendioxid-äquivalente bei der Verwertung von Bioabfällen. Gefördert durch das Umweltbundesamt. Förderkennzeichen (UFOPLAN) 206 33 326.
- [Cuhls 2012] gewitra mbH - Ingenieurgesellschaft für Wissenstransfer. Ermittlung der Emissionssituation bei der Verwertung von Bioabfällen. Gefördert durch das Umweltbundesamt. Förderkennzeichen (UFOPLAN) 206 33 326. und 3709 44 320. Abschlussbereich im Entwurf, Bearbeitungsstand 8.12.2011.
- [DBU 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.
- [DERA 2011] Deutsche Rohstoffagentur. Reserven, Ressourcen und Verfügbarkeit von Energierohstoffen 2011. Kurzstudie. Hannover 2011.
- [European Commission 2010] Critical raw materials for the EU. Report of the Ad-hoc Working Group on defining critical raw materials. June 2010
- [FBK 2011] Fachvereinigung Bayerischer Komposthersteller e.V.: Jahresmittelwerte gütegesicherter Komposte sowie von gütegesicherten „Kompost flüssig“ für das Jahr 2011
- [Guinée 1995] J. B. Guinée: Development of a methodology for the environmental life-cycle assessment of products. Doktorarbeit an der Rijksuniversiteit te Leiden 1995.
- [H&K 2009] Informationsdienst der BGK: Klimarelevante Gase bei der Bioabfallverwertung. Download unter: http://www.kompost.de/fileadmin/docs/HuK/HuK_05_09_internet.pdf (22.08.2012)

- [IE 2007] Institut für Energetik und Umwelt GmbH: Monitoring zur Wirkung des novellierten Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG) auf die Entwicklung der Stromerzeugung aus Biomasse. Im Auftrag des Umweltbundesamt. Dessau.
- [Jungbluth 2007] Jungbluth, N. et al.: Ecoinvent Report No.17 Life Cycle Inventories of Bioenergy. Swiss Center für Life Cycle Inventories. Dübendorf Dezember 2007.
- [Kern 2010] Kern, M. und Raussen, T.: Perspektiven der biologischen Abfallbehandlung. Erschienen in Praxis der Verwertung von Biomasse aus Abfällen. Fachbuchreihe Abfallwirtschaft des Witzenhausen-Institus für Abfall, Umwelt und Energie. 1.Auflage 2010.
- [LfL 2012] Gespräch mit Vertretern der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft am 07.08.2012
- [LfU 2003] Bittl, T.: "Empfehlungen der bayerischen Gebietskörperschaften zur Sammlung von Bioabfällen - ein Vergleich", LfU-Schriftenreihe, Heft 171, 6 S. Internetlangfassung, Augsburg 2003.
- [LTZ 2008] Landwirtschaftliches Technologiezentrum Augustenberg: Nachhaltige Kompostanwendung in der Land-wirtschaft. Abschlussbericht 2008.
- [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.
- [UBA 2009] Memmler, M.; Mohrbach, E.; Schneider, S.; Dreher, M.; Herbener, R.: Emissionsbilanz erneuerbarer Energieträger. Umweltbundesamtes 12/2009. Dessau-Roßlau, Oktober 2009
- [UBA 2010] Witzenhausen-Institut für Abfall, Umwelt und Energie GmbH: Aufwand und Nutzen einer optimierten Bioabfallverwertung hinsichtlich Energieeffizienz, Klima- und Ressourcenschutz. Im Auftrag des Umweltbundesamtes. Förderkennzeichen 3707 33 304. Dessau-Roßlau, August 2010
- [UMBW 2011] ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH und Partner: Leitfaden „Optimierung des Systems der Bio- und Grünabfallverwertung Herausgeber: Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg.
- [USGS 2012] U.S. Geological Survey. Mineral Commodity Summaries. PHOSPHATE ROCK 2012. download unter: http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/phosphate_rock/mcs-2012-phosp.pdf (21.08.2012)

10 Anhang: Methodische Grundlagen

10.1 Ökoeffizienzanalyse

10.1.1 Methodik ökobilanzielle Betrachtung

10.1.2 Erstellung Sachbilanz

Um die Vergleichbarkeit der Behandlungsverfahren zu gewährleisten, müssen neben der Festlegung der funktionellen Einheit auch die Grenzen der Betrachtung für die zu vergleichenden Szenarien konsistent definiert sein.

Die Normen zur Ökobilanzierung legen die Prozesse fest, die in das zu modellierende System aufgenommen werden. Im Idealfall sollte das System so modelliert werden, dass In- und Outputs an ihren Systemgrenzen Elementarflüsse sind. Da in vielen Fällen nicht ausreichend Zeit, Daten und Mittel zur Verfügung stehen, um eine derart umfassende Studie durchzuführen, müssen Entscheidungen darüber getroffen werden, welche Prozesse in die Untersuchung einbezogen beziehungsweise welche Emissionen in die Umwelt berücksichtigt werden und mit welcher Detailgenauigkeit die Prozesse untersucht beziehungsweise die Emissionen erfasst werden sollen.

Prozesse

Folgende Prozesse sind innerhalb der Systemgrenzen zu berücksichtigen:

- Alle Prozesse von der Behandlung der beschriebenen Abfallfraktionen aus den Haushalten bis zur eventuell notwendigen Behandlung der nach der Entsorgung anfallenden Rest- oder Wertstoffe.
- Alle mit den genannten Prozessen verbundenen relevanten Stoff- und Energieflüsse von der Gewinnung und Aufbereitung von Rohstoffen bis zu der Bereitstellung von Betriebsmitteln und, soweit als möglich, der Entsorgung von Reststoffen. Im Idealfall umfassen die Systemgrenzen die Gewinnung der Rohstoffe aus den natürlichen Lagerstätten und deren Bereitstellung für technische Prozesse und die Abgabe von Elementarflüssen an die Umweltmedien Wasser, Luft und Boden.

Die „Herstellung“ der zu Abfall gewordenen Produkte wird nicht innerhalb der Systemgrenzen berücksichtigt. Outputseitig wird die Systemgrenze für die untersuchten Verfahren dort gezogen, wo entweder Elementarflüsse wieder an die Umwelt abgegeben werden oder ein marktgängiger Zusatznutzen des Systems durch möglicherweise entstehende Stoffe oder frei werdende Energie zu berücksichtigen ist.

Die Bereitstellung und der Unterhalt der Infrastruktur (der Bau, die Wartung und Reparatur von Gebäuden, Maschinen, Industrieanlagen, Transportmitteln und Verkehrswegen) werden nicht berücksichtigt, da kein wesentlicher Einfluss zu erwarten ist.

Äquivalenzprozesse und Allokationen

Neben der Entsorgung der Abfälle resultieren aus den Entsorgungsverfahren zusätzliche Nutzen, wie z.B. Strom und Wärme aus der thermischen Verwertung oder Nährstoffe sowie organische Substanz aus der stofflichen Verwertung. Als Folge müssen die entsprechenden Energiemengen beziehungsweise Produkte nicht auf konventionellem Weg aus Primärrohstoffen hergestellt werden (eine gleichbleibende Nachfrage wird unterstellt). Die Umweltauswirkungen, die mit der konventionellen Herstellung jedes einzelnen Zusatznutzens verbunden sind, werden somit „eingespart“ beziehungsweise „vermieden“. Um den Vergleich der Entsorgungssysteme zu vervollständigen, werden diese „vermiedenen“ Umweltauswirkungen bilanziert und den Umweltauswirkungen des Entsorgungssystems gutgeschrieben¹².

Der konventionelle Herstellungs- beziehungsweise Produktionsprozess eines Zusatznutzens wird als Äquivalenzprozess oder Äquivalenzsystem bezeichnet. Für jeden quantifizierbaren Zusatznutzen wird ein spezifisches Äquivalenzsystem modelliert, das den gleichen beziehungsweise einen vergleichbaren funktionsäquivalenten Nutzen erzeugt.

10.1.3 Quantifizierung Umweltwirkungen

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 Behandlung von Bio- und Grüngut werden im Rahmen der Wirkungsabschätzung nicht berücksichtigt.

Tabelle 27: Erläuterung der Nicht-Berücksichtigung von Umweltwirkungen

Umweltwirkung	Erläuterung der Nicht-Berücksichtigung
Schwermetalleintrag in Böden durch das Ausbringen von Komposten	<p>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.</p> <p>Die Gehalte an unerwünschten Schwermetallen sind in Feldversuchen nach 9 bzw. 12-jähriger Kompostanwendung nicht angestiegen [LTZ 2008].</p>

¹² Die mit die Bilanzierung der konventionellen Herstellung der Zusatznutzen erhaltenen Elementarflüsse (Gutschriften) werden von den Umweltauswirkungen des jeweiligen Entsorgungssystems (Bruttoergebnis) rechnerisch abgezogen, was zu einem Nettoergebnis führt. Damit können auch negative Nettoergebnisse auftreten.

Umweltwirkung	Erläuterung der Nicht-Berücksichtigung
Eintrag organischer Schadstoffe in Boden durch das Ausbringen von Komposten	Langjährige regelmäßige Untersuchungen der 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.) konnten keine Anreicherungen im Boden trotz langjähriger Kompostanwendungen nachgewiesen werden [LTZ 2008, Seite 16 f.].
Aquatische Eutrophierung	<p>bifa geht davon, dass evtl. entstehende Sickerwässer aus der Kompostierung oder Vergärung nicht ungereinigt 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.</p> <p>Eine mögliche übermäßige Nährstoffzufuhr in aquatische Systeme durch ungereinigte Sickerwässer ist von untergeordneter Bedeutung und wird nicht weiter betrachtet.</p>
Phytotoxizität	Zur Quantifizierung der Schädlichkeit von Komposten gegenüber Kulturpflanzen (Salmonellen, Pflanzenkrankheiten) in Ökobilanzen existieren keine Modelle. Diese Schadwirkung kann daher nicht berücksichtigt werden.

10.1.4 Aggregation Einzelergebnisse zum Ökologie-Index

Die Aggregation der Einzelergebnisse zum Gesamtergebnis Ökologie-Index erfolgt in drei Schritten:

1. Normierung: Die Einzelergebnisse werden auf die gemeinsame Bezugseinheit „Einwohnerwerte“ umgerechnet

2. Gewichtung: Die einzelnen Wirkungskategorien werden in Anlehnung an eine Empfehlung des UBA mit Hilfe folgender Kriterien anhand ihrer „ökologischen Priorität“ gewichtet:

- Ökologische Gefährdung (wie schwerwiegend sind potenzielle Schäden?)
- Distance-to-Target (Abstand der derzeitigen Umweltsituation von der Zielsituation)

3. Zusammenführung: Die gewichteten Ergebnisse werden zum Ökologie-Index zusammengeführt.

10.1.4.1 Normierung: Berechnung der Einwohnerwerte

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. Positive Einwohnerwerte repräsentieren eine Umweltbelastung, während negative Einwohnerwerte Umweltentlastungen bedeuten.

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 folgender Tabelle dargestellt.

Tabelle 28: Grundlagen zur Ermittlung des spezifischen Beitrags – Gesamtemissionen und -verbräuche in Deutschland und mittlere Belastung durch einen Einwohner pro Jahr. Basis: 81.859.000 Einwohner nach Angabe des statischen Bundesamtes zum Stand 31.12.2011

Wirkungsindikator	Referenzwert (Deutschland)	Belastung je Einwohner
Aggregierte Werte		
Treibhauspotenzial	930.287.431 tCO ₂ -Äq./a	11,3 t CO ₂ -Äq./a
Versauerungspotenzial	2.771.501 tSO ₂ -Äq./a	33,8 kg SO ₂ -Äq./a
Eutrophierungspotenzial Terrestrisch	435.403 t PO ₄ -Äq./a	5,3 kg PO ₄ -Äq./a
Photooxidantienbildung	1.291.900 t Ethen-Äq./a	15,75 kg Ethen-Äq./a
Ressourcen- verknappungspotenzial ¹⁾	336.609.306 t Eisen-Äq./a	4,11 t Eisen-Äq./a
Nicht aggregierte Werte		
Stickoxide (als NO ₂)	1.294.266 t/a	15,81 kg/a
Schwefeldioxid	493.563 t/a	6,03 kg/a
Ammoniak	624.230 t/a	7,63 kg/a

¹⁾ Der Referenzwert für das Ressourcenverknappungspotenzial errechnet sich aus dem Verbrauch in Deutschland für die fossilen Energieträger [DERA 2011] und Phosphat (Statistisches Bundesamt Fachserie 4, Reihe 8.2) unter Berücksichtigung des zu jeder Ressource gehörenden Ressourcenverknappungspotenzials (siehe Tabelle)

10.1.4.2 Gewichtung

Die folgende Tabelle 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.)?

Tabelle 29: Hierarchisierung von Wirkungskategorien nach „Ökologischer Gefährdung“ und „Distance-to-Target“ durch das Umweltbundesamt [UBA 1999].

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

A = höchste Priorität D = niedrigste Priorität

¹⁾ Keine Vorgaben nach [UBA 1999]; Hierarchisierung deshalb analog [bifa 2010]

Im Rahmen dieses Vorhabens werden den Prioritäten der projektunabhängigen Kriterien ebenfalls feste Punktzahlen zugeordnet (vgl. Tabelle 30). Dies ermöglicht die anschließend durchzuführende Zusammenführung mit den normierten spezifischen Beiträgen.

Tabelle 30: Punktevergabe bei den projektunabhängigen Kriterien ökologische Gefährdung (ÖkG) und Distance-to-Target (DtT).

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

10.1.4.3 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. Durch Summation aller so erhaltenen Teilsummen für jede betrachtete Wirkungskategorie beziehungsweise jeden Sachbilanzparameter eines Verfahrens beziehungsweise Szenarios erhält man den Ökologie-Index.

10.2 Wirkungskategorie Ressourcennutzung

10.2.1 Bewertung Ressourcennutzung – Ressourcenverknappungspotenzial

Für die Beurteilung der Ressourcennutzung sind grundsätzlich die folgenden Aspekte zu berücksichtigen:

- die langfristige Verfügbarkeit für die menschliche Nutzung (Schutzgut „Ressourcen“)
- die mit der Gewinnung und Nutzung von Ressourcen verbundene Umweltbelastung und die mit abnehmender Verfügbarkeit drohende Zunahme der Umweltbelastung (Schutzgüter „Struktur und Funktion von Ökosystemen“ und „Menschliche Gesundheit“)

Die Bewertung der realen und potenziellen Umweltbelastungen bezogen auf die Schutzgüter „Ökosysteme“ und „Menschliche Gesundheit“ kann prinzipiell anhand etablierter Indikatoren zur Beschreibung von Umweltwirkungen erfolgen. Dagegen existieren für die Bewertung der Verfügbarkeit zwar Ansätze, die allerdings einer integrierten, das heißt über die ausschließliche Betrachtung von Reichweiten hinausgehenden Bewertung der Ressourcennutzung, nur bedingt gerecht werden oder nicht als geschlossener Indikator angewendet werden können. Aus diesen Gründen entwickelte bifa ein Raster zur Bewertung der Verfügbarkeit energetischer und abiotischer Rohstoffe. Die Bewertung der Verfügbarkeit eines Rohstoffs erhält man im Rahmen einer Nutzwertanalyse für die folgenden 3 Zielkriterien:

1. Reichweite
2. Überwiegende Art der Nutzung
3. Substituierbarkeit

Zweifellos ist es notwendig, neben der Bewertung von Reichweiten von Rohstoffen auf die Optionen der „Streckung“ der Verfügbarkeit von Primärrohstoffen durch effizientere Nutzung, Substitution durch weniger knappe Rohstoffe, Recycling und generell auf technische Innovationen hinzuweisen¹³. Nicht die Rohstoffknappheit ist die einzige Herausforderung, sondern der Umgang mit Rohstoffen. Für die im Rahmen dieser Untersuchung relevanten Rohstoffe und Energieträger sind die Zielgrößen für jedes der genannten Kriterien dargestellt.

¹³ Vergleiche [MaRes; S.17]

Tabelle 31: Charakterisierung von Rohstoffen und Energieträgern anhand der Zielkriterien.

Ressource	Statische Reichweite [a]	Überwiegende Art der Nutzung bifa Einschätzungen und [EC 2010]	Substituierbarkeit bifa Einschätzungen und [EC 2010]	Reserve [Mio. t]
Steinkohle	95 ¹	Destruktive Nutzung	Grundsätzlich substituierbar	605.000 ¹
Braunkohle	375 ¹	Destruktive Nutzung	Grundsätzlich substituierbar	375.000 ¹
Erdgas	58 ¹	Destruktive Nutzung	Grundsätzlich substituierbar	158.760 ¹
Erdöl	43 ¹	Destruktive Nutzung	Grundsätzlich substituierbar	169.000 ¹
P ₂ O ₅	372 ²	Dissipative Nutzung	Keine, mit gravierenden Folgen für Befriedigung der Grundbedürfnisse zukünftiger Generationen	17.488 ²

¹ Quelle [DERA 2011], ² [USGS 2012]

Anschließend werden die Zielgrößen klassiert und mit Punkten bewertet. Man erhält so die Zielwerte. Die Bewertung innerhalb der Punkte-Skala der Zielgrößen erfolgt dergestalt, dass Zielgrößen-Ausprägungen, die eine Verschärfung der Ressourcenverknappung beschreiben, einer höheren Punktzahl zugeordnet werden. Für die gewichtete Summation der Zielwerte nimmt bifa an, dass alle Zielkriterien gleichen Einfluss auf die Bewertung der langfristigen Verfügbarkeit haben und dementsprechend gleich zu gewichten sind. Die folgende Tabelle veranschaulicht die Zuordnung der Zielgrößen zur Punkteskala.

Tabelle 32: Bewertung der langfristigen Verfügbarkeit von Rohstoffen und Energieträgern. Ermittlung der Zielwerte aus Zielgrößen und Zuordnung Punkteskala.

Statische Reichweite)	Überwiegende Art der Nutzung	Substituierbarkeit (Substitutability Index - SI)	Punkteskala
Nahezu erschöpft (<25 Jahre)	Destruktive Nutzung	Keine, mit gravierenden Folgen für Befriedigung der Grundbedürfnisse zukünftiger Generationen	10
Sehr gering (<50 Jahre)	Dissipative Nutzung / kaum Recycling		8
Gering (<75 Jahren)		Keine, mit deutlichen Folgen für Befriedigung der	6

Statische Reichweite)	Überwiegende Art der Nutzung	Substituierbarkeit (Substitutability Index - SI)	Punkteskala
		Grundbedürfnisse zukünftiger Generationen	
Mittel (<100 Jahre)			4
hoch (< 125 Jahre)	Recycling etabliert (EU-Quote größer 20%)	Keine, ohne gravierenden Folgen für Befriedigung der Grundbedürfnisse zukünftiger Generationen	2
Sehr hoch (>125 Jahre)		Grundsätzlich substituierbar	0
25%	25%	50%	Gewichtung

Für jeden Rohstoff und Energieträger erfolgt anschließend eine gewichtete Summierung der Zielwerte zu einer dimensionslosen Kennzahl für die Bewertung der langfristigen Verfügbarkeit. Je höher die gewichtete Summe der drei Zielwerte ist, desto höher ist die resultierende Knappheit mit Blick auf die langfristige Verfügbarkeit dieses Rohstoffs beim Abbau einer Masseneinheit aus der Lagerstätte.

Die dimensionslose Formulierung des Ressourcenverknappungspotenzials lässt die absolut verfügbare Menge einer Ressource außer Acht¹⁴. bifa berücksichtigt deshalb, in Analogie zum Vorgehen in [Guineé 1995, S.97], zusätzlich als reziproke Gewichtung den Vorrat eines Rohstoffs beziehungsweise Energieträgers quantifiziert als Tonnage der jeweiligen Reserve. Die Gewichtung des Ressourcenverknappungspotenzials mit der vorhandenen Reserve ist in der folgenden Tabelle dargestellt. Durch die Normierung der gewichteten Ressourcenverknappungspotenziale am gewichteten Ressourcenverknappungspotenzial für Eisen erhält man als Einheit für das Ressourcenverknappungspotenzial Eisen-Äquivalente.

¹⁴ Vergleiche [Guineé 1995, S.97]: „A more sophisticated problem is that the share in the reserve is not assessed. Suppose that for fulfilling a particular function there is a choice between applying 1 kg of resource A or 1 kg of resource B, both of which have an R/P of 20 years. So only on the basis of these data, resource A and B appear to be equally attractive in terms of depletion. However, closer inspection of the R/P data might show that for resource A $R=10^9$ kg (and $P=5 \times 10^7$ kg/yr) and for resource B $R=100$ kg (and $P=5$ kg/yr). It is now readily seen that for fulfillment of the specified function resource A is to be preferred, as the reserve of A is affected far less by 1 kg of extraction.

Tabelle 33: Gewichtung des Ressourcenverknappungspotenzials mit der vorhandenen Reserve.

Ressource	Ressourcenverknappung	Reserve nach	Gewichtetes Ressourcenverknappungspotenzial <u>normiert auf Eisen</u>
	[-]	[Mio. t]	[Fe-Äquivalente]
Steinkohle	3,5	605.000	0,30
Braunkohle	2,5	375.000	0,35
Erdgas	4,0	158.760	1,3
Erdöl	4,5	169.000	1,4
P ₂ O ₅	7,0	17.488	21,1

bifa Umweltinstitut GmbH

Am Mittleren Moos 46

86167 Augsburg

Tel. +49 821 7000-0

Fax. +49 821 7000-100

www.bifa.de