

CustomLCA

# Ökobilanz Entsorgung BAW

**Ökologischer Vergleich von biologisch abbaubaren Werkstoffen BAW:  
Entsorgung in KVA vs. Entsorgung in Biogasanlage**

## **Auftraggeber**

Martin Gruber, AUE Basel-Stadt  
Rolf Wagner, AWEL Zürich,  
Cornelia Kissling, Entsorgung & Recycling, Bern  
Martin Moser, AfU Solothurn

## **Verfasser**

Dr. Fredy Dinkel, Carbotech AG  
Thomas Kägi, Carbotech AG

Anzahl Seiten: 35  
Referenz: 287.12  
Basel, Februar 2013

—

Dieser Bericht wurde von der Carbotech AG mit Sorgfalt erarbeitet unter Verwendung aller uns zur Verfügung stehenden, aktuellen und angemessenen Hilfsmittel und Grundlagen, dies im Rahmen der vertraglichen Abmachung mit dem Auftraggeber unter Berücksichtigung der Vereinbarung bezüglich eingesetzter Ressourcen. Die Grundlagen der Bewertungsmethode, auf welcher dieser Bericht basiert, können ändern. Danach sind die Schlussfolgerungen nicht mehr uneingeschränkt gültig und vom Auftraggeber nur noch auf eigene Verantwortung verwendbar. Aus dem Inhalt dieses Berichtes hervorgehende Veröffentlichungen, welche Resultate und Schlussfolgerungen daraus nur teilweise und nicht im Sinne des Gesamtberichtes darstellen, sind nicht erlaubt. Insbesondere dürfen solche Veröffentlichungen diesen Bericht nicht als Quelle angeben oder es darf nicht anderweitig eine Verbindung mit diesem Bericht oder der Carbotech AG hergestellt werden können. Für Forderungen ausserhalb des oben genannten Rahmens lehnen wir jegliche Verantwortung gegenüber dem Auftraggeber sowie Dritten ab. Dieser Bericht ist ausschliesslich für den Auftraggeber erstellt worden und wir übernehmen keine Verantwortung gegenüber Dritten, welche Kenntnis erlangen über diesen Bericht oder Teile davon.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Zusammenfassung</b>	<b>4</b>
<b>1 Ausgangslage und Auftrag</b>	<b>8</b>
<b>2 Vorgehen</b>	<b>9</b>
2.1 Auswahl der Materialien	9
2.2 Messung der anaeroben Abbaubarkeit	9
2.3 Modellierung der Umweltwirkungen mittels Ökobilanz	9
2.3.1 Vergleichsbasis, die funktionelle Einheit	10
2.3.2 Systemgrenzen	12
2.3.3 Sachbilanz	12
2.3.4 Wirkbilanz	15
2.3.5 Bewertung (Gewichtung der Umweltbelastungen)	15
2.3.6 Darstellung der Resultate	16
<b>3 Resultate</b>	<b>17</b>
3.1 Abbaubarkeit und Methanwerte	17
3.2 Umweltbelastung der Entsorgung pro BAW	18
3.2.1 PLA Becher und PLA Tasche	18
3.2.2 Mater Bi Beutel (Compobag)	19
3.2.3 Celluloseacetat Folie	20
3.2.4 Kartonbecher mit PE-Beschichtung	22
3.2.5 Kartonbecher mit BAW-Beschichtung	23
3.2.6 Teller Zuckerrohrfasern	24
3.2.7 Palmblattteller	25
3.3 Szenario Analysen	26
3.3.1 Szenario Analyse Kompostierung	26
3.3.2 Szenario Analyse Strom Gutschrift	27
3.3.3 Szenario Analyse Biogas Gutschrift	31
<b>4 Schlussfolgerungen</b>	<b>34</b>
<b>5 Literatur</b>	<b>35</b>

**Anhang: Resultate bewertet mit der Methode Eco Indikator 99 HA**

**Anhang Vergärstudie (Baier 2012)**

# Zusammenfassung

Im Auftrag des Amtes für Umwelt und Energie, Basel-Stadt (AUE), des Amtes für Abfall, Wasser, Energie und Luft, Zürich (AWEL) sowie mit Unterstützung des Amtes für Umwelt (AfU), Solothurn und Entsorgung & Recycling, Bern wurden folgende zwei Fragestellungen untersucht:

1. Welche biologisch abbaubaren Werkstoffe (BAW) sind geeignet, um in einer Biogasanlage verwertet zu werden, d.h. wie sieht die biologische Abbaubarkeit von verschiedenen BAW in einer Biogasanlage aus?
2. Ist es aus Umweltsicht sinnvoller, ein BAW Material in einer Biogasanlage oder in einer KVA zu entsorgen?

## Vorgehen

Um eine gute Grundlage für die Modellierung der Verwertung der Materialien in Biogasanlagen zu erhalten, wurde die anaerobe Abbaubarkeit und der Biogasertrag von der Fachhochschule Wädenswil (ZHAW) in einem standardisierten Verfahren ermittelt (siehe Anhang, Baier 2012).

Um den ökologischen Nutzen abzuklären, wurde die Methode der Ökobilanzierung verwendet. Sie gilt als die umfassendste Methode, um ökologische Fragestellungen zu beantworten, weil sie eine Vielzahl von Umweltauswirkungen über den gesamten Lebensweg des untersuchten Systems berücksichtigt. Bestandteil der Untersuchung war die Sammlung, Verarbeitung und Verwertung der Materialien. Da die verschiedenen Verwertungsarten zu verschiedenen Produkten mit unterschiedlichem Nutzen führen, können sie nur verglichen werden, wenn sie auf einen gemeinsamen Nenner gebracht werden. Für die Untersuchung wurden die Systeme deshalb so erweitert, dass alle denselben Gesamtnutzen aufweisen. Damit werden die Nutzen der verschiedenen Verwertungswege, wie Biogas, Strom und Wärmegewinnung berücksichtigt. Als Vergleichsbasis (funktionelle Einheit) dient die Verwertung von einem Kilogramm BAW. Die Belastbarkeit der Resultate wurde mit Sensitivitätsanalysen überprüft.

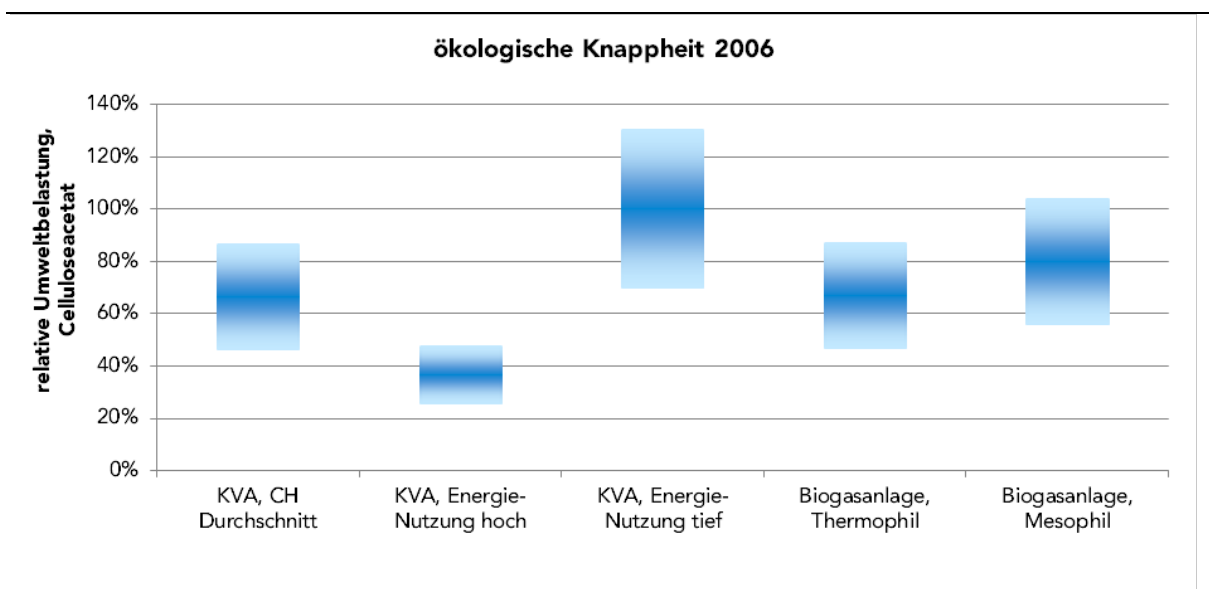
Die Auswirkungen der Emissionen und des Ressourcenbedarfs wurden mit den folgenden zwei international anerkannten Methoden ausgewertet: Eco-Indicator 99 (EI 99) und ökologische Knappheit 2006 (UBP 06). Diese beiden Methoden haben den Vorteil, dass sie die unterschiedlichen Umweltauswirkungen gegeneinander gewichten und zu einer einzigen Kennzahl zusammenfassen. Die Darstellung solcher Kennzahlen erleichtert Vergleiche oder macht solche überhaupt erst möglich. Die Methode UBP 06 wurde vom Bundesamt für Umwelt mitentwickelt. Sie geht von der Umweltsituation in der Schweiz aus und richtet sich bei der Bewertung nach der schweizerischen Umweltpolitik. Entsprechend werden Emissionen sehr hoch bewertet, für welche die Umweltpolitik weitere Einträge als sehr problematisch erachtet. Die Gewichtung bei der Methode EI 99 basiert auf der Einschätzung von europäischen Experten. Als Hauptmethode wurde die Methode der ökologischen Knappheit verwendet, da diese der Umweltsituation in der Schweiz Rechnung trägt und im Speziellen den Strom-Mix der Schweiz adäquater bewertet als die Methode EI 99. Die zusätzliche Verwendung der Methode EI 99 ist sinnvoll, da damit überprüft werden kann, ob sich auf Grund der unterschiedlichen Gewichtungen andere Resultate ergeben. Denn obwohl die Resultate dieser beiden Methoden vergleichbar sind, zeigen sie auf Grund der unterschiedlichen Bewertungen auch Differenzen. Diese beruhen im Rahmen dieser Studie vor allem auf der Tatsache, dass die Methode EI 99 im Vergleich zur Methode UBP die Verwendung von fossilen Ressourcen bzw. dessen Ersatz sehr hoch, jedoch die Auswirkung von Strom aus Kernkraftwerken praktisch nicht bewertet. Entsprechend werden Verfahren, die zu einem Ersatz von fossilen Ressourcen führen mit der Methode EI 99 tendenziell besser bewertet, als solche, welche keinen energetischen Nutzen aufweisen oder den schweizerischen Strom-Mix ersetzen.

## Resultate

Die Vergärversuche kamen zu folgenden Ergebnissen (siehe Anhang Baier 2012):

- Eine Abbaubarkeit von mehr als 75% in einer Biogasanlage und einen entsprechenden Gasertrag weisen folgende BAW auf:
  - Folien aus Celluloseacetat
  - Teller aus Zuckerrohrfasern
  - Kartonbecher BAW beschichtet.
- Eine Abbaubarkeit von ungefähr 50% in einer Biogasanlage weisen folgende BAW auf:
  - Kartonbecher PE beschichtet
  - Palmblatzteller
  - Mater Bi Beutel in thermophiler Anlage
- Da sie sich in der gegebenen Zeit kaum abgebaut haben, sind die folgenden BAW für Biogasanlagen ungeeignet:
  - PLA Becher
  - PLA Tasche
  - Mater Bi Produkt in mesophilen Biogasanlagen.

Der Vergleich mittels Ökobilanzierung zeigte, dass sich die biologische Abbaubarkeit der Materialien im Vergleich zur Entsorgung in einer KVA mit einer Ausnahme (Palmblatzteller) nicht als Vorteil erweist. Siehe dazu Abbildung 1, welche die Ergebnisse für ein gut abbaubares BAW mit entsprechend hohem Biogasertrag darstellt. Als Grundlage für diese Berechnung wurde angenommen, dass das Biogas in einem BHWK verwertet wird und dabei neben dem Strom die Wärme zu 100% genutzt wird, um fossile Brennstoffe zu ersetzen<sup>1</sup>. Trotz dieser optimalen Verwertung sind die Umweltauswirkungen bei einer Vergärung in einer Biogasanlage vergleichbar mit denjenigen in einer durchschnittlichen KVA und nur tendenziell besser als in einer KVA mit geringer Energienutzung, jedoch signifikant höher als in einer KVA mit optimaler Energienutzung.



**Abbildung 1: Relative Umweltwirkung der verschiedenen Verwertungswege eines BAW mit gutem Abbauverhalten (Celluloseacetat) nach der Methode der ökologischen Knappheit 2006: Systemdarstellung nach „Basket of benefits“ normiert auf das Maximum.** Die Ausdehnung der Balken gibt die Unsicherheiten der Resultate an.

<sup>1</sup> Eine Aufbereitung und Einspeisung ins Gasnetz z.B. für Treibstoff oder Heizen führt zu einer kleineren Gutschrift.

Dafür sind insbesondere folgende Gründe verantwortlich:

- Bei der Verbrennung in einer KVA wird als Zusatznutzen Wärme und Strom generiert. Dabei ist zu beachten, dass bei der Verbrennung theoretisch 100% der im Material enthaltenen Energie genutzt werden kann, während bei der Vergärung nur ein Teil dieser Energie nutzbar ist (einerseits wird nicht alles abgebaut, andererseits entsteht nebst Methan auch noch CO<sub>2</sub>, welches energetisch nicht genutzt werden kann). Dies gilt auch für Materialien, die sich während der Verweilzeit in einer Biogasanlage gut abbauen (z.B. Celluloseacetat oder Karton).
- Das bei der Vergärung anfallende Gärsubstrat der untersuchten biologisch abbaubaren Materialien (mit Ausnahme der Palmblättler) bewirkt im Gegensatz zu Gärsubstrat von Grüngut keine zusätzliche Humusbildung oder relevante Düngergabe.

Um die Aussagekraft der Resultate abzusichern, wurden die folgenden Szenarien Rechnungen durchgeführt:

- Um den Einfluss des Strom Mix abzuklären, wurden für ausgewählte Materialien die Berechnungen mit dem europäischen Strom Mix und einem Strom aus einem Gasturbinenkraftwerk berechnet.
- Für Materialien, welche zu Humusbildung führen oder eine Düngergutschrift aufweisen, wurde ebenfalls die Verwertung mit einer Kompostierung berechnet.
- Nutzung des Biogases als Ersatz von Erdgas z.B. für Wärme oder als Treibstoff.

Die Szenarien-Rechnungen zu Strom haben wohl tendenzielle Unterschiede ergeben, jedoch führten sie nicht zu anderen Resultaten. Die Abklärungen zu Kompost haben gezeigt, dass für Palmblättler die Kompostierung einen vergleichbaren Umweltnutzen aufweist, wie die der Biogasgewinnung, während für das andere untersuchte BAW der Nutzen in der Kompostierung geringer ist als derjenige in der Biogasanlage. Entsprechend ergeben sich auf Grund der Szenarien Rechnungen keine anderen Schlussfolgerungen.

## Schlussfolgerungen

Die Resultate dieser Studie zeigen, dass

- nicht alle untersuchten BAW während der Verweildauer in einer Biogasanlage genügend (mehr als 50%) abbauen.
- bei 7 von 8 untersuchten BAW **die Abbaubarkeit nicht zu einem signifikanten ökologischen Vorteil führt**, darunter befinden sich auch gut abbauende Materialien.

Für alle betrachteten biologisch abbaubaren Materialien (PLA, Mater Bi, Celluloseacetat, Karton, Zuckerrohrfasern) mit Ausnahme des Palmblättlers gelten folgende Erkenntnisse:

- Die Entsorgung in einer KVA führt nicht zu signifikant höheren Umweltbelastungen als die Entsorgung in Biogasanlagen. Je nach KVA fallen die Resultate **ähnlich bis signifikant besser für die KVA aus**.
- Die Verwertung in einer Kompostieranlage ist tendenziell schlechter als in einer Vergärungsanlage.

Für das Palmblatt gelten folgende Erkenntnisse:

- Die Entsorgung in Biogasanlagen weist tendenziell bis signifikant geringere Umweltbelastungen auf im Vergleich zur die Entsorgung in einer KVA.
- Die Gutschrift für die Humusbildung hat einen wesentlichen Einfluss auf das Resultat.
- Die Verwertung in einer Kompostieranlage ist vergleichbar mit der Verwertung in einer Vergärungsanlage.

Es gibt somit BAW, wie z.B. die untersuchten PLA Produkte, welche besser nicht in eine Biogasanlage gelangen sollten. Einerseits ist der Abbau ungenügend und andererseits ist die Verwertung in der KVA der ökologisch sinnvollere Entsorgungsweg.

Auch für die untersuchten, gut abbaubaren BAW gilt, dass es aus ökologischer Sicht kein Nachteil ist, wenn diese anstatt in die Vergärung in die KVA gelangen. Je nach Art der KVA und des Materials kann dies sogar die ökologisch sinnvollere Entsorgung darstellen. Eine Ausnahme bildet der untersuchte Palmblattteller, bei dem die Verwertung in einer Biogasanlage mit geringeren Umweltauswirkungen verbunden ist, als denjenigen in einer durchschnittlichen schweizerischen KVA. Für dieses Material kann die Verwertung in einer Vergärungsanlage empfohlen werden.

Somit ergibt sich aus der Abbaubarkeit von BAWs kein grundsätzlicher ökologischer Vorteil, falls die Abfälle einer der untersuchten Verwertungswege zugeführt werden. Zu beachten ist ebenfalls, dass für eine abschliessende Aussage über den ökologischen Vorteil eines Produktes der gesamte Lebenszyklus des Produktes (d.h. inklusive Herstellung etc.) betrachtet werden muss.

Die Ergebnisse dieser Studie gelten für die untersuchten BAW und nicht allgemein für die Vergärung von Biomasse. Die Vergärung von Biomasse kann in vielen Fällen ökologisch sinnvoll sein. In den meisten Fällen liefert vergärtes Grüngut einen Beitrag zur Bodenstruktur und verfügt über eine Düngerwirkung.

# 1 Ausgangslage und Auftrag

Mit dem vermehrten Aufkommen von biologisch abbaubaren Werkstoffen (BAW), stellt sich auch die Frage nach der optimalen Verwertung und Entsorgung derselben. Im Speziellen stellt sich die Frage, ob diese Materialien während der Verweildauer in einer Biogasanlage genügend abbauen. Bei denjenigen, welche ein gutes Abbauverhalten zeigen, stellt sich die Frage, ob die biologische Abbaubarkeit ein Kriterium darstellt, um BAW als ökologisch sinnvoll einzustufen. Um solche Fragen zu beantworten sind entsprechende Grundlagen und Methoden notwendig. Heute besteht auch im internationalen Umfeld Einigkeit darüber, dass die Ökobilanzierung die umfassendste und verlässlichste Methode ist, welche es zur Zeit gibt, um die Umweltauswirkungen eines Produktes, Prozesses oder einer Dienstleistung zu beurteilen.

Im Auftrag des Amtes für Umwelt und Energie, Basel (AUE) sowie des Amtes für Abfall, Wasser, Energie und Luft, Zürich (AWEL) wurden folgende zwei Fragestellungen untersucht:

- 1. Welche BAWs können in einer Biogasanlage verwertet werden, d.h. wie sieht die biologische Abbaubarkeit von verschiedenen BAW in einer Biogasanlage aus?**
- 2. Hat die biologische Abbaubarkeit einen ökologischen Vorteil, d.h. ist es aus Umweltsicht sinnvoller, ein BAW Material in einer Biogasanlage oder in einer KVA zu entsorgen?**

Erstere Fragestellung über die anaerobe Abbaubarkeit wurde von der Fachhochschule Wädenswil (ZHAW) untersucht.

Die zweite Fragestellung über die ökologisch sinnvolle Entsorgungsvariante wurde von Carbotech aufgrund ihrer langjährigen Erfahrung im Bereich Umweltberatung und Ökobilanzen untersucht. Im Speziellen hat die Carbotech AG langjährige Erfahrung bei der Beurteilung von biogenen Rohstoffen sowie deren stofflichen und energetischen Verwertung.

Aus vorherigen Studien ist bekannt, dass bei der Kompostierung von BAW in den meisten Fällen nicht mit einem Humuszuwachs oder mit einem Nährstoffbeitrag zu rechnen ist und somit kein zusätzlicher Nutzen ausgewiesen wird, da keine strukturbildenden Elemente oder Nährstoffe nur in marginalen Mengen enthalten sind (z.B. Pladerer et al. 2008). Deshalb wurde in dieser Studie der Fokus auf die anaerobe Vergärung in einer Biogasanlage gelegt. In einer Variantenanalyse wurde der Vollständigkeit halber einzig für die Entsorgung der Palmblättler und von Celluloseacetat die Kompostierung berücksichtigt, da diese beiden Materialien strukturbildende Komponenten oder Nährstoffe enthalten.

Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass Carbotech in keiner Weise an den hier erwähnten Unternehmen beteiligt oder von ihnen abhängig ist und umgekehrt. Damit ist die Voraussetzung für die Durchführung einer neutralen Ökobilanz gegeben. Aus Ressourcen- und Vertraulichkeitsgründen sind der dokumentierte Detaillierungsgrad und damit die Transparenz eingeschränkt.



## 2 Vorgehen

### 2.1 Auswahl der Materialien

In gemeinsamer Absprache mit den Auftraggebern wurden die in Tabelle 1 aufgelisteten biologisch abbaubaren Werkstoffen (BAW) ausgewählt. Sämtliche Produkte sind heutzutage im Detailhandel erhältlich.

**Tabelle 1: Ausgewählte biologisch abbaubare Werkstoffe (BAW):**

PLA: Poly lactic acid – Polymilchsäure. Mater Bi: Stärke Blend - Mischung aus Stärke und fossilem Kunststoff.

Bezeichnung	Produkt	Form	Material
<b>Celluloseacetat Folie</b>	Verpackungsfolie Berliner	Folie	100% Celluloseacetat
<b>Mater Bi Beutel</b>	Compobag	Beutel	100% Mater Bi
<b>PLA Becher</b>	Trinkbecher	Becher	100% PLA
<b>PLA Tasche</b>	Plastiktüte	Tasche	100% PLA
<b>Palmblattteller</b>	Einwegteller	Teller	100% Palmblätter
<b>Teller aus Zuckerrohrfasern</b>	Einwegteller	Teller	100% Zuckerrohr- und Bambusfasern
<b>Kartonbecher Öko</b>	Kaffeebecher	Becher	94% Karton FSC mit 6% Stärkebeschichtung
<b>Kartonbecher</b>	Kaffeebecher	Becher	94% Karton FSC mit 6% PE-Beschichtung

### 2.2 Messung der anaeroben Abbaubarkeit

Für eine möglichst reale Modellierung der Entsorgung der Materialien in Biogasanlagen wurde die anaerobe Abbaubarkeit und der Biogasertrag von der Fachhochschule Wädenswil (ZHAW) in einem standardisierten Verfahren ermittelt (siehe Anhang, Baier 2012).

Die anaeroben Abbauprobeversuche der verschiedenen Biokunststoffe wurden in je zwei Korngrößen über 3 – 8 Wochen mit Gasanalytik inkl. Nullprobe, je 3 Wiederholungen und internem Standardsubstrat durchgeführt. Dabei wurden zwei unterschiedliche Temperaturbedingungen betrachtet.

- thermophil (55 °C: Bedingungen Kompogasanlage)
- mesophil (37 °C: Landwirtschaftliche Biogasanlage)

Das genaue Untersuchungsdesign kann im Anhang nachgelesen werden.

### 2.3 Modellierung der Umweltwirkungen mittels Ökobilanz

Mit der Ökobilanz werden die Auswirkungen der relevanten Stoff- und Energieströme auf die Umwelt über den gesamten Lebensweg eines Produktes oder – wie hier – die gesamthaften Auswirkungen eines Prozesses erfasst. Eine ökologische Bewertung umfasst nach der ISO-Norm 14'040 (ISO 2006a und 2006b) die folgenden Schritte:

- Festlegung der Ziele und Systemgrenzen
- Sachbilanz
- Wirkungsbilanz
- Interpretation und Bewertung der Ergebnisse

Wie Abbildung 2 zeigt, ist dies kein linearer Prozess, sondern ein interaktiver Erkenntnis- und Optimierungsprozess.

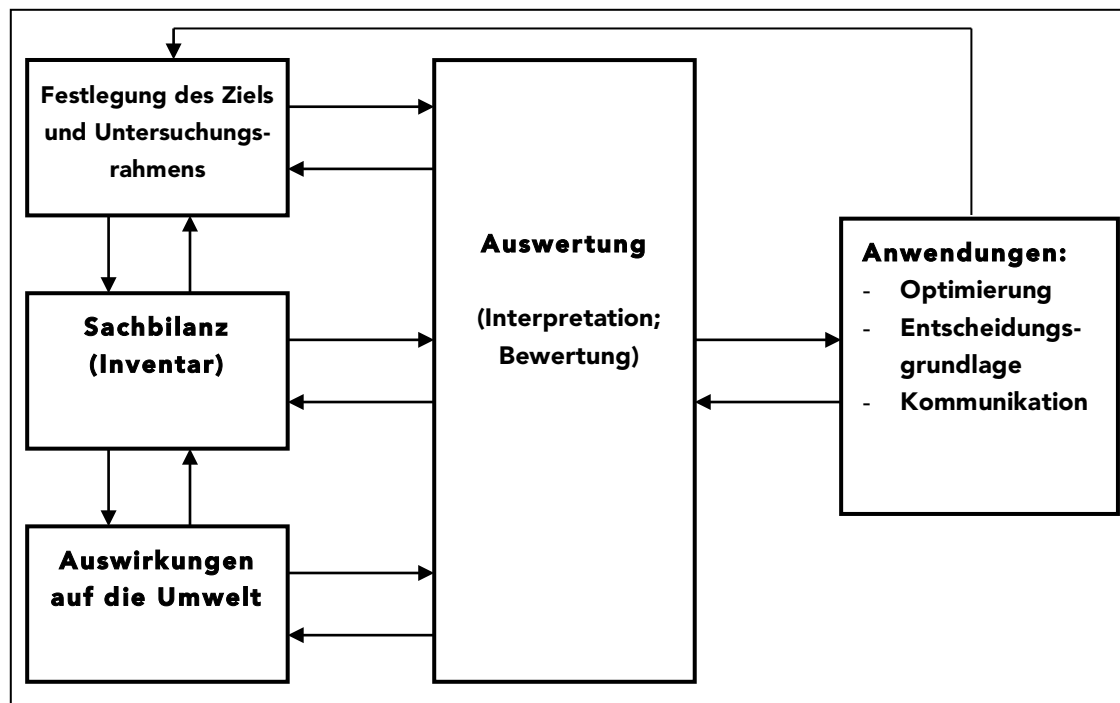


Abbildung 2: Schritte einer Ökobilanz nach ISO 14'040ff.

### 2.3.1 Vergleichsbasis, die funktionelle Einheit

Um die verschiedenen Verwertungsmöglichkeiten zu beurteilen, ist es notwendig eine Vergleichsbasis zu definieren, welche denselben Nutzen ergibt und damit dieselbe Funktion erfüllt. Dies wird in der Ökobilanzierung mit dem Begriff *funktionelle Einheit* bezeichnet. Als funktionelle Einheit wird in dieser Untersuchung die Verwertung von 1 kg BAW verwendet.

Ein Kilogramm BAW wird, abhängig vom betrachteten Verwertungssystem, zu folgenden Produkten verarbeitet:

Tabelle 2: Nutzbare Endprodukte der untersuchten Verwertungswege

Vergärung	KVA
Biogas -> Wärme und Strom	Fernwärme
Gärgut	Strom

Die Betrachtung der thermischen Verwertung der BAW in der Kehrlichtverbrennungsanlage geht davon aus, dass das bestehende Fernwärmenetz, unabhängig von der KVA, weiterhin in Betrieb gehalten wird. Entsprechend wird die Infrastruktur des Fernwärmenetzes nicht berücksichtigt. Da sich die verwendeten Wärmemengen auf die verkauften Mengen beziehen, sind die Verluste bereits berücksichtigt.

Bei der Verwertung der BAW entstehen je nach Entsorgungsweg unterschiedliche Endprodukte. Damit die Resultate aussagekräftig sind, ist es notwendig, dass der Nutzen der untersuchten Varianten vergleichbar

ist. Dazu müssen die Varianten auf einen gemeinsamen Nenner gebracht werden. Um dies zu erreichen wird der Untersuchungsrahmen jeder Variante mit den fehlenden Produkten der anderen Varianten erweitert. Diese Systemerweiterung wird als „Basket of benefits“ bezeichnet:

**Tabelle 3: Systemdarstellung mit Systemerweiterung nach dem Konzept „Basket of benefits“**

	<b>Vergärung</b>	<b>KVA</b>
Produkte	Biogas -> Wärme und Strom	Fernwärme
	Gärgut	Strom
Ersatzprodukte	⊕ Wärme ab Erdgas / -öl (Differenz zu KVA)	⊕ Erdgas, bzw. Strom, Wärme Differenz zu Vergärung
	⊕ Strom ab Netz (Differenz zu KVA)	⊕ Torf & Stroh als Bodenstruktur (nur beim Palmblatt)
		⊕ Mineraldünger

Um die Vergärung mit dem Prozess der Kehrlichtverbrennung vergleichen zu können, wird Erstere um die Energieträger, welche durch die Energienutzung in der KVA ersetzt werden, ergänzt. Bei der Variante KVA dagegen muss zusätzlich Erdgas mit demselben Energieinhalt des Biogases der Vergärung bereitgestellt werden. Falls das Biogas der Vergärung in einem BHKW genutzt wird, um Wärme und Strom bereitzustellen, so muss nur die Differenz Strom/Wärme zwischen den beiden Varianten bei derjenigen Variante mit dem geringeren Ertrag hinzugefügt werden. Auf diese Weise kann für alle in den Vergleich einbezogenen Systeme eine gemeinsame Basis erstellt werden.

Das beschriebene Vorgehen entspricht der Vermeidung einer Allokation durch Systemerweiterung, welche von ISO 14'040ff unter anderen empfohlen wird, um verschiedene Systeme vergleichbar zu machen.

Eine andere Möglichkeit der Darstellung, welche ebenfalls verwendet wird, ist die Systemerweiterung über die Ausweisung von Gutschriften. Diese Methode wird als "Avoided burden" bezeichnet und wird häufig innerhalb von Recyclingsystemen aber auch grundsätzlich bei Verwertungsprozessen angewandt. Alle zu vergleichenden Systeme erhalten hierzu eine Gutschrift für "vermiedene Produkte" bzw. Belastungen, welche als "Avoided burden" bezeichnet werden. Die Vergärung produziert Biogas, welches Erdgas ersetzt sowie Gärsubstrat, welches die äquivalente Menge Mineraldünger und strukturbildendes Material ersetzt, während die Verbrennung in der KVA entsprechend Wärme und Strom produziert und damit fossile Energieträger bzw. Strom aus anderen Quellen ersetzt (siehe Tabelle 3).

Mit Hilfe der Darstellung entsprechend dem "Avoided burden" (siehe Tabelle 4) werden die Unterschiede der verschiedenen Systeme klarer erkennbar, jedoch kann es vorkommen, dass sich grosse relative Unterschiede zeigen, welche im Rahmen der Unsicherheit der Ergebnisse nicht aussagekräftig sind. Daher werden die wesentlichen Resultate mit Hilfe beider hier vorgestellten Methoden der Systemerweiterung dargestellt.

**Tabelle 4: Systemdarstellung mit Gutschriften (Systemerweiterung nach dem Konzept „Avoided burden“)**

<b>Vergärung</b>	<b>KVA</b>
Biogas	Fernwärme
Gärgut	Strom
⊖ Strom und Wärme aus einem BHKW	⊖ Fernwärme (Gutschrift Erdgas)
⊖ Nährstoffe als Ersatz von Mineraldünger	⊖ Strom ab Netz
⊖ Torf & Stroh als Bodenstruktur	

Insbesondere wenn die Gutschriften das Endergebnis signifikant beeinflussen, muss die Auswahl sorgfältig vorgenommen werden. Aus diesem Grund wurden in dieser Studie zwei mögliche Gutschriften abgeklärt:

1. Biogas in einem BHKW genutzt:

dabei wird Strom (32%) und Wärme (55%) bereitgestellt. Im Sinne einer best case Annahme wurde angenommen, dass 100% der Wärme genutzt wird und damit fossile Energieträger ersetzt werden.

2. Biogas ersetzt Erdgas:

dabei wird einerseits die gesamte Erdgaskette von der Förderung bis zum Abnehmer ersetzt und andererseits entstehen bei der Verbrennung keine klimarelevanten CO<sub>2</sub> Emissionen, da diese biogenen Ursprungs sind. Nicht berücksichtigt wurden die Aufwände für die Aufbereitung des Biogases auf Erdgasqualität mit 96% Methan und die Einspeisung ins Netz. Diese Variante entspricht einer optimalen Variante beim Einsatz als Treibstoff oder zur Wärmegewinnung.

Für die vorliegende Systembetrachtung wurde die Variante 1: Biogas in einem BHKW als Hauptvariante verwendet. Diese Wahl wurde aus den folgenden Gründen getroffen: Einerseits entstehen dabei dieselben Produkte wie bei der Verwertung in der KVA und andererseits haben Szenarien Rechnungen gezeigt, dass sich bei dieser Variante bei der Bewertung mit der Methode UBP eine höhere Gutschrift ergibt als bei der Variante 2. Bei der Bewertung mit der Methode Eco Indicator 99 bleiben die Gutschriften in etwa gleich. In dem Sinne stellen die Resultate eine optimale Variante der Biogasnutzung dar.

### 2.3.2 Systemgrenzen

In die Berechnung eingeschlossen sind alle als relevant betrachteten Stoff- und Energieflüsse der verschiedenen Verwertungswege. Dabei handelt es sich im Wesentlichen um die Folgenden:

- Emissionen bei der Verwertung, wie z. B. Emissionen der KVA, Methanverluste bei der Vergärung etc.
- sämtliche benötigte Transporte,
- benötigte Hilfsstoffe,
- Infrastruktur,
- Nutzen der Verwertung durch die Substitution anderer Energieträger, wie z. B. Erdgas oder Strom
- Bereitstellung von Strom und Energie

Alle einbezogenen Stoff- und Energieflüsse wurden von der Wiege bis zur Bahre analysiert, z. B. bei Strom von der Ressourcengewinnung, über die Aufbereitung und Transporte der Energieträger sowie die Stromerzeugung bis zur Steckdose des Verbrauchers. Bei der Nutzung des Biogases wurde berücksichtigt, dass diese Energiequelle erneuerbar ist und das entstehende CO<sub>2</sub> nicht zur Klimaerwärmung beiträgt.

### 2.3.3 Sachbilanz

In der Sachbilanz wird ein Modell für das zu bilanzierende Produktsystem entworfen und die Energie- und Stoffflüsse der damit verbundenen Prozesse erfasst. Diese umfassen:

- Die Beziehungen eines Prozesses mit andern Prozessen der Technosphäre, wie z. B. Menge an benötigten Rohstoffen, Hilfsstoffen, Energiebedarf oder Transporte.
- Die Beziehungen eines Prozesses mit seiner natürlichen Umwelt der Ökosphäre, wie z. B. Bedarf an Ressourcen (fossile Energieträger, Landressourcen etc.) und Emissionen, wie z. B. CO<sub>2</sub>, CO, Methan Stickoxide u.a..

Die Modellierung der Systeme erfolgte auf der Basis von projektspezifischen Daten. Zur Erstellung der Sachbilanz wurden bestehende Grundlagedaten aus ecoinvent Version 2.2 (ecoinvent, 2010) verwendet. Dabei handelt es sich um Daten, welche einen sehr hohen Qualitätsstandard haben und auch international anerkannt sind. Diese Daten wurden soweit notwendig und machbar durch projektspezifische Daten ergänzt.

## Wichtigste Kennzahlen für die Entsorgung der BAW

Die wichtigsten Kennzahlen der betrachteten Materialien hinsichtlich Entsorgung sind in Tabelle 5 zusammengefasst

**Tabelle 5: Kennzahlen der biologisch abbaubare Werkstoffe(BAW)**

BAW	Heizwert MJ/kg	%TS	%oTS	Anteil biog. C	N Gehalt	K Gehalt	P Gehalt	Beitrag zur Humusbildung <sup>2</sup>
<b>Celluloseacetat Folie</b>	21.0	92.0	88.4	100%	1.0%	-	-	nein
<b>Mater Bi Beutel</b>	18.3	97.6	95.3	70%	0.37%	0.01%	0.01%	nein
<b>PLA Becher</b>	18.9	99.7	83.7	100%	0.30%	-	-	nein
<b>PLA Tasche</b>	18.9	99.6	99.3	100%	0.20%	-	-	nein
<b>Palmlattteller</b>	16.9	91.2	86.2	100%	0.59%	0.94%	0.04%	ja
<b>Teller aus Zucker- rohfasern</b>	15.6	94.5	94.2	100%	0.25%	-	0.01%	nein
<b>Kartonbecher BAW beschichtet</b>	15.8	94.3	93.8	100%	0.26%	0.01%	-	nein
<b>Kartonbecher PE beschichtet</b>	17.3	94.9	80.5	94%	0.17%	-	-	nein

## Verbrennung in der Kehrlichtverbrennungsanlage (KVA)

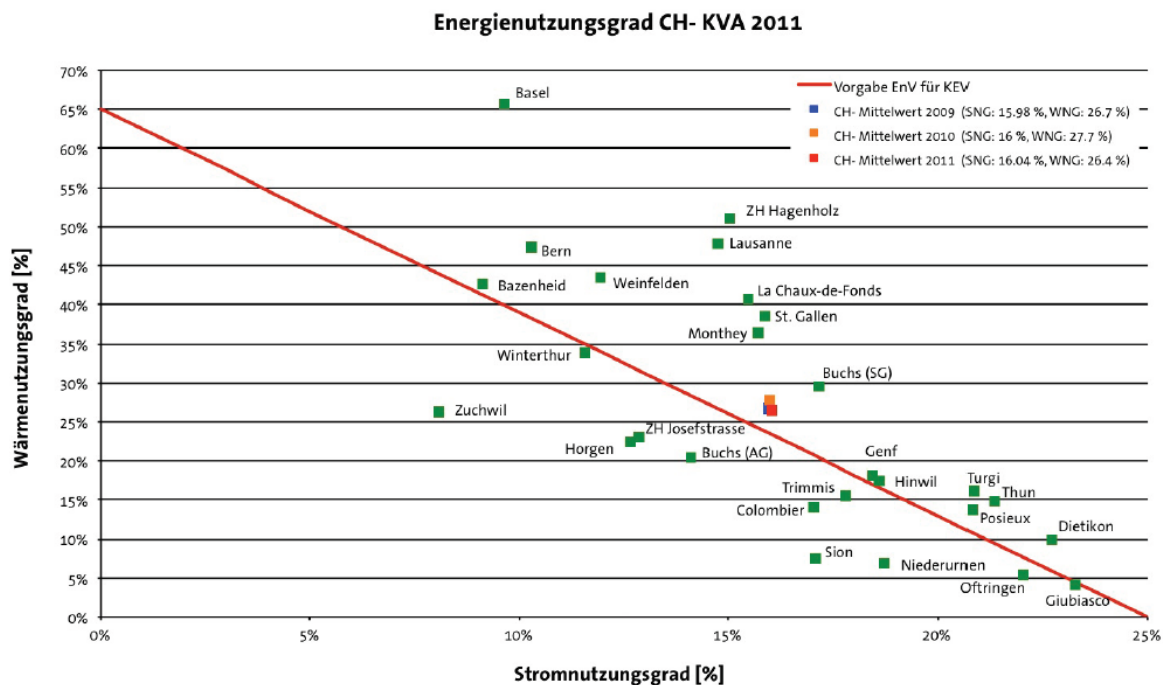
Für die thermische Verwertung der BAW in der KVA wurde als Grundlage die bestehenden Prozesse gemäss ecoinvent verwendet, wobei einige Anpassungen notwendig waren. Insbesondere wurden die folgenden Korrekturen vorgenommen:

- Dioxinwert bei der Emission in Luft:  
Der in ecoinvent verwendeter Wert war mehr als 10 Mal höher als der in der Schweiz erlaubte Grenzwert und rund 100 Mal höher, als Messungen in Deutschland gezeigt haben. Entsprechend wurden diese Emissionen angepasst. Dabei wurde der Grenzwert verwendet, der eine obere Grenze darstellt, der effektive Wert wird voraussichtlich tiefer liegen. Der in ecoinvent angegebene Wert war zur Zeit der Erfassung dieses Prozesses im Jahre 2000 korrekt, er ist unterdessen jedoch veraltet.
- Heizwert BAW:  
Da die Gutschriften für Erdöl, Erdgas und Strom bei der Kehrlichtverbrennungsanlage in hohem Masse vom angenommenen Heizwert (früher: unterer Heizwert) des Grüngutes abhängen, wurde aufgrund von Literaturwerten Abschätzungen bezüglich des Energieinhalts der BAW durchgeführt (siehe Kapitel 3).
- Entsorgung biobasierter Kunststoffe:  
Im Vergleich zu fossilen Kunststoffen unterscheiden sich die Emissionen der Entsorgung von biobasierten Kunststoffen in der KVA im Wesentlichen in der Menge biogenem und fossilem CO<sub>2</sub>, CO und CH<sub>4</sub>. Die wurde entsprechend berücksichtigt.

Für die Bestimmung der Effizienz bezüglich der Energieumwandlung innerhalb der KVA wurde auf Schweizer Durchschnittswerte abgestützt. Allerdings beinhalten diese Werte die Daten sämtlicher Schweizer KVA, sie stellen also lediglich den Durchschnitt sehr unterschiedlicher Anlagen dar. Wie Abbildung 3 zeigt, weisen die verschiedenen Kehrlichtverbrennungsanlagen in der Schweiz zum Teil sehr unterschiedliche Energieeffizienzen in Bezug auf Wärme und Strom auf, weshalb diese Durchschnittswerte für Vergleiche nur beschränkt geeignet sind. Um den Einfluss der unterschiedlichen Wärme- und Stromeffizienz der KVA darzustellen, wurde mittels Variantenbetrachtungen nebst der durchschnittlichen KVA (26.4% Wärme- und

<sup>2</sup> Ein Beitrag zur Humusbildung ist bei schwer abbaubaren Verbindungen wie Lignin oder Wachs zu erwarten, jedoch nicht bei allen anderen leicht abbaubaren zellulose- und zuckerbasierten Verbindungen

16% Stromnutzungsgrad) auch eine KVA mit einer hohen Energienutzung (entspricht in etwa der KVA ZH Hagenholz: 51% Wärme- und 15% Stromnutzungsgrad oder Basel mit 65.6% Wärme und 9.6% Strom, für die Berechnungen wurde die KVA ZH Hagenholz verwendet) sowie eine mit tiefer Energienutzung (entspricht in etwa der KVA Zuchwil: 25.5% Wärme- und 8% Stromnutzungsgrad) betrachtet.



**Abbildung 3: Netto Wärme- und Stromnutzungsgrad der CH Kehrichtverbrennungsanlagen 2011 (Rytec 2012)**

## 2.3.4 Wirkbilanz

Selbst die Beschränkung auf die "wichtigsten" emittierten Stoffe in der Sachbilanz führt sofort zu unübersichtlichen Zahlentabellen, welche nur schwer oder gar nicht zu interpretieren sind. Zudem sind nicht die Stoffemissionen sondern deren Auswirkungen auf die Umwelt von Bedeutung. Um diese zu bestimmen werden die Stoffe nach ihrer unterschiedlichen Wirkung gruppiert und gemäss ihrem Schädigungspotential gewichtet.

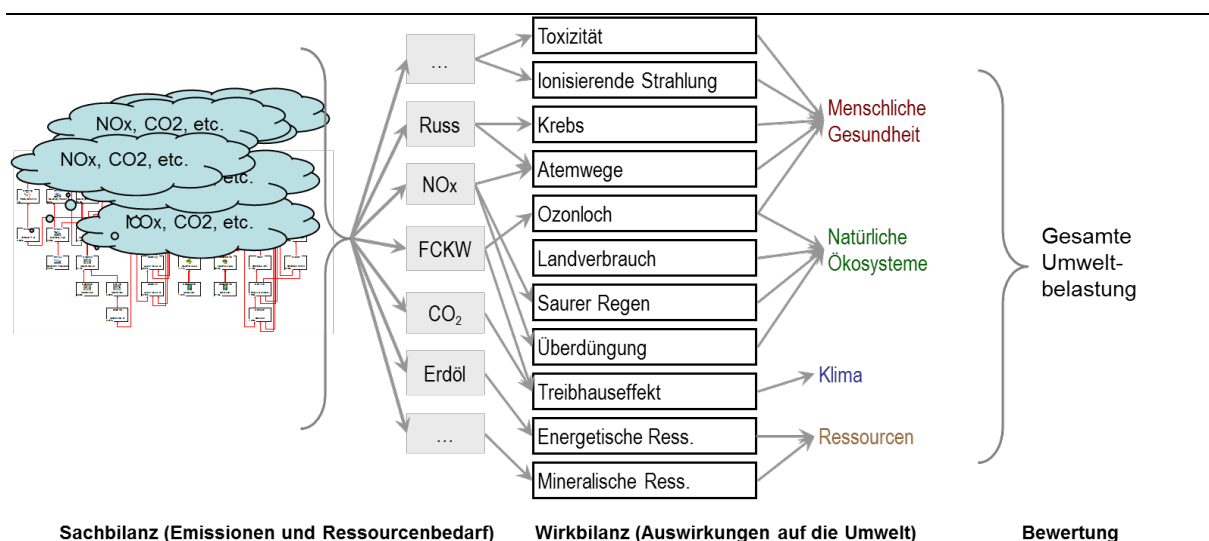
Folgende Wirkungen bzw. Aspekte wurden berechnet und für die Interpretation der Resultate verwendet, jedoch nicht in diesem Bericht speziell ausgewiesen:

- Treibhauspotential (Beitrag zur Klimaerwärmung))
- Kumulierter Energieaufwand (KEA), graue Energie oder Verbrauch an nicht erneuerbaren energetischen Ressourcen wie z. B. Erdöl oder Erdgas.
- Ozonbildungspotential (Beitrag zur Bildung von Ozon (Sommersmog))
- Säurebildungspotential (Beitrag zur Versauerung von Böden und Gewässern)
- Toxizität für den Menschen (Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit)
- Ökotoxizität (Auswirkungen auf Tiere und Pflanzen)
- Eutrophierung oder Überdüngung (Beitrag zur Nährstoffanreicherung in Boden und Wasser)

Für Berechnungsdetails wird auf die Originalliteratur (Guinée et al., 2002) verwiesen. Jeder dieser Indikatoren deckt nur einen Teilbereich der gesamten Umweltauswirkungen ab. Nur die Berücksichtigung der verschiedenen Auswirkungen gibt ein umfassendes Bild der ökologischen Auswirkungen. Problematisch dabei ist, dass die Ergebnisse der verschiedenen Wirkkategorien nicht direkt miteinander verglichen werden können. Einerseits sind die Einheiten und damit Dimensionen unterschiedlich und andererseits wird keine Aussage gemacht, wie problematisch die betreffende Wirkung relativ zu anderen ist. Um diese verschiedenen Auswirkungen zu einer Kennzahl zusammenzufassen ist eine Normierung und Gewichtung der verschiedenen Auswirkungen notwendig.

## 2.3.5 Bewertung (Gewichtung der Umweltbelastungen)

Beim Resultat der Wirkbilanz handelt es sich um eine Zusammenstellung von verschiedenen Indikatoren, welche jeweils einen Aspekt der Umweltauswirkungen beschreiben, siehe Abbildung 4.



**Abbildung 4: Ablauf der Bewertung bei der Ökobilanzierung**

Um eine fundierte Entscheidungsbasis zu erhalten, müssen die verschiedenen Auswirkungen gewichtet und zu einer Kennzahl zusammengefasst werden. Dazu gibt es verschiedene Methoden. Im Rahmen dieser Studie wurden die ökologische Knappheit sowie die Methode Eco-Indicator 99 zur Bewertung verwendet.

### **Methode der ökologischen Knappheit ("Umweltbelastungspunkte" - UBP)**

Die Bewertung mittels der Methode der ökologischen Knappheit (Frischknecht et al. 2008) wurde unter Mitarbeit des Bundesamts für Umwelt entwickelt und ist eine in der Schweiz etablierte Methode. Diese Methode wurde gewählt, da sie für die Bewertung sowohl die Umweltsituation wie auch die Umweltziele der Schweiz berücksichtigt. Obwohl diese Methode die schweizerische Umweltpolitik widerspiegelt, hat sie auch international eine hohe Akzeptanz. Die Resultate werden in Umweltbelastungspunkten (UBP) ausgedrückt.

### **Eco-Indicator 99**

Diese Methode wurde in Holland entwickelt (Goedkoop, 2000). Sie berücksichtigt die Europäische Umweltsituation sowie deren Ziele. Beim Eco-Indicator 99 werden die Schäden, welche an den drei Schutzziele Menschliche Gesundheit, Ökosystemqualität und Ressourcen entstehen, berechnet. Anschliessend werden diese verschiedenen Schäden auf der Basis von gesellschaftlichen Wertmassstäben relativ zueinander gewichtet. Dabei werden drei verschiedene mögliche Gewichtungen angegeben. In der vorliegenden Studie wurde die Perspektive "Hierarchist" zur Gewichtung ausgewählt, da es sich hierbei um die ausgeglichene der Perspektiven handelt und diese zudem von den Autoren der Methode als Hauptgewichtung empfohlen wird. Bezüglich der Details und der Hintergründe dieser Methoden wird auf die Originalliteratur verwiesen.

## **2.3.6 Darstellung der Resultate**

Auf Grund der Komplexität der untersuchten Varianten und der damit verbundenen Prozesse und deren Auswirkungen, welche bei der Ökobilanzierung berücksichtigt werden, sind die Resultate mit Unsicherheiten behaftet. Um die Aussagekraft der Ergebnisse anzugeben, wurden diese Unsicherheiten berechnet und im Bericht als Unsicherheitsbereiche ausgewiesen. Ein Unterschied zwischen zwei Werten wird in dieser Studie als signifikant gewertet, wenn sich die angegebenen Unsicherheitsbereiche nicht überschneiden.

Die Resultate der folgenden Methoden werden in diesem Bericht dargestellt:

- Methode der Ökologischen Knappheit 2006 (UBP 06)
- Eco-Indicator 99 HA

Auf Grund der Tatsache, dass die Resultate der beiden Methoden vergleichbar sind, wurden die Ergebnisse mit der Methode Eco-Indicator 99 nur im Anhang aufgeführt. Die Resultate der Wirkbilanz wurden für die Interpretation der Resultate verwendet, jedoch aus Gründen der Übersichtlichkeit und Verständlichkeit nicht in diesem Bericht ausgewiesen.



## 3 Resultate

### 3.1 Abbaubarkeit und Methanwerte

Aus Gründen der Übersichtlichkeit werden hier nur die Abbaubarkeit nach 14 Tagen (relevant für thermophile Anlagen) und nach 21 Tagen (relevant für mesophile Anlagen) sowie die Methanwerte der biologisch abbaubare Werkstoffe (BAW) dargestellt. Die detaillierten Ergebnisse können im Anhang in der Studie von Baier (2012) nachgelesen werden.

**Tabelle 6: Abbaubarkeit und Methanwerte der untersuchten biologisch abbaubare Werkstoffe (BAW)**

BAW	Abbaugrad nach 14	Abbaugrad nach 21	NL Methanertrag / kg	NL Methanertrag / kg
	Tagen (55°C)	Tagen (37°C)	FM nach 14 Tagen (55°C)	FM nach 21 Tagen (37°C)
<b>Celluloseacetat Folie</b>	82%	74%	356	292
<b>Mater Bi Beutel</b>	58%	6.0%	368	40
<b>PLA Becher</b>	4.4%	0.0%	26	0
<b>PLA Tasche</b>	3.2%	0.8%	22	5
<b>Palmblattteller</b>	60%	51%	303	277
<b>Teller aus Zuckerrohrfasern</b>	83%	80%	397	351
<b>Kartonbecher BAW beschichtet</b>	76%	74%	360	372
<b>Kartonbecher PE beschichtet</b>	46%	47%	201	231

Aufgrund dieser Resultate können folgende Aussagen gemacht werden:

Eine Abbaubarkeit von mehr als 75% in einer Biogasanlage und einen entsprechenden Gasertrag weisen folgende BAW auf:

- Celluloseacetat Folie
- Teller aus Zuckerrohrfasern
- Kartonbecher Stärke beschichtet.

Eine Abbaubarkeit von ungefähr 50% in einer Biogasanlage weisen folgende BAW auf:

- Kartonbecher PE beschichtet
- Palmblattteller
- Mater Bi Beutel in thermophiler Anlage

In der gegebenen Zeit kaum abgebaut und daher für Biogasanlagen ungeeignet scheinen die folgenden Produkte zu sein:

- PLA Becher
- PLA Tasche
- Mater Bi Beutel in mesophiler Anlagen.

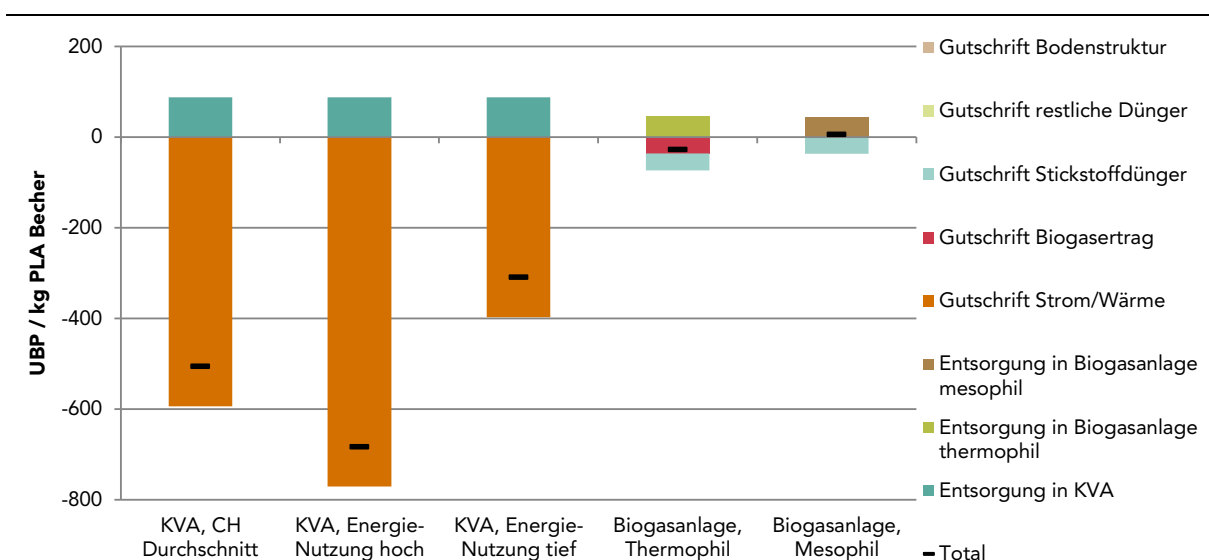
## 3.2 Umweltbelastung der Entsorgung pro BAW

Die Ergebnisse dieser Berechnungen sind in den folgenden Grafiken dargestellt. Für die Methode der ökologischen Knappheit erfolgt die Darstellung sowohl nach der Erweiterung "avoided burdens" also auch "basket of benefits", für die übrigen hier verwendeten Bewertungsmethoden werden jeweils die Ergebnisse der Berechnungen nach "basket of benefits" ausgewiesen.

Es sei hier nochmals erwähnt, dass nur der Teil Entsorgung ohne die Herstellung im Laufe des Lebenszyklus der untersuchten Materialien betrachtet wurde. Damit kann für jedes Material die Frage beantwortet werden, welcher der betrachteten Entsorgungspfade die geringere Umweltbelastung aufweist.

### 3.2.1 PLA Becher und PLA Tasche

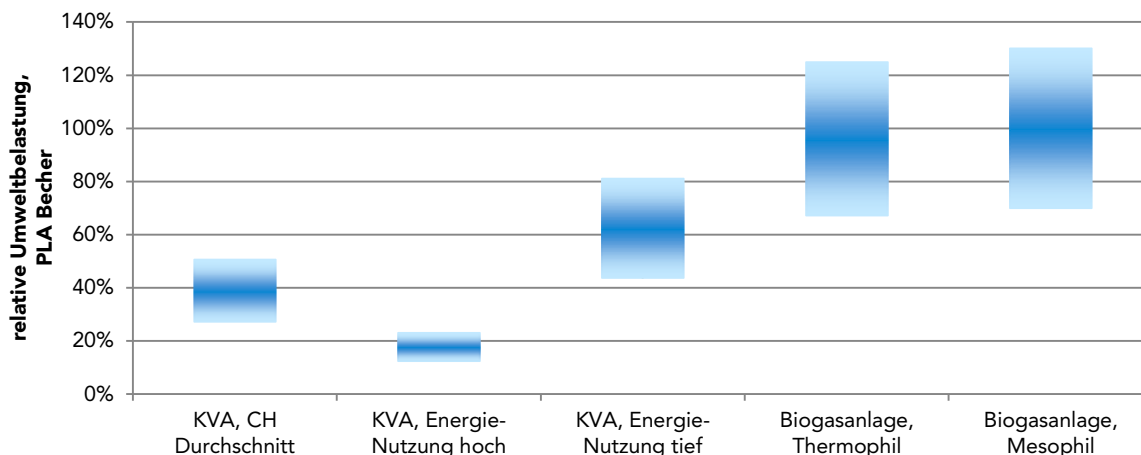
Es werden nur die Resultate des PLA Bechers dargestellt. Diese gelten jedoch auch stellvertretend für die PLA Tasche, da beide sehr ähnliche Werte für die Entsorgung in der KVA und Biogasanlage aufweisen.



**Abbildung 5: Umweltauswirkungen bewertet mit der Methode der Ökologischen Knappheit 2006: Systemdarstellung nach „avoided burdens“.** Das Total setzt sich zusammen aus der Summe der Umweltbelastungen und Gutschriften.

Abbildung 5 zeigt für den PLA Becher, dass die Emissionen des Entsorgungsprozesses KVA höher sind als die der Biogasanlage. Die Entsorgung in der KVA weist jedoch die grösseren Gutschriften für Strom und Wärme auf als die Entsorgung in der Biogasanlage. Der PLA Becher baut sich während der Verweilzeit in der Biogasanlage nur schlecht ab, so dass praktisch keine Gutschrift für Biogas resultiert. In der Summe sind die Belastungen der KVA geringer als diejenigen in der Biogasanlage.

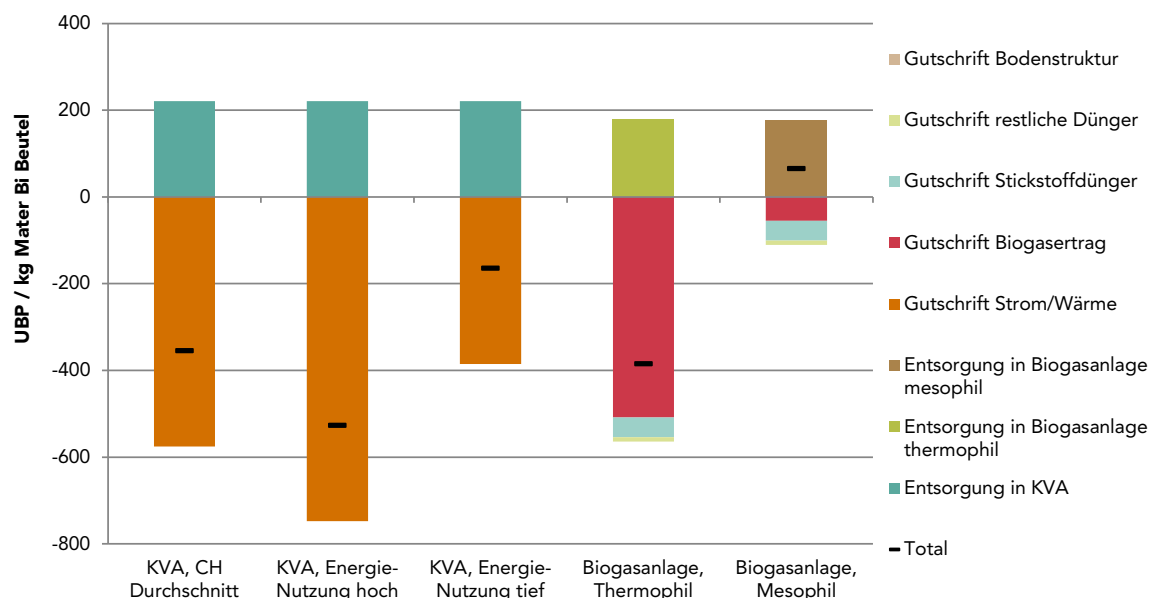
### ökologische Knappheit 2006



**Abbildung 6: Relative Umweltauswirkungen bewertet mit der Methode UBP 2006: Systemdarstellung nach „basket of benefits“ normiert auf das Maximum.** Die Ausdehnung der Balken gibt die Unsicherheiten der Resultate an.

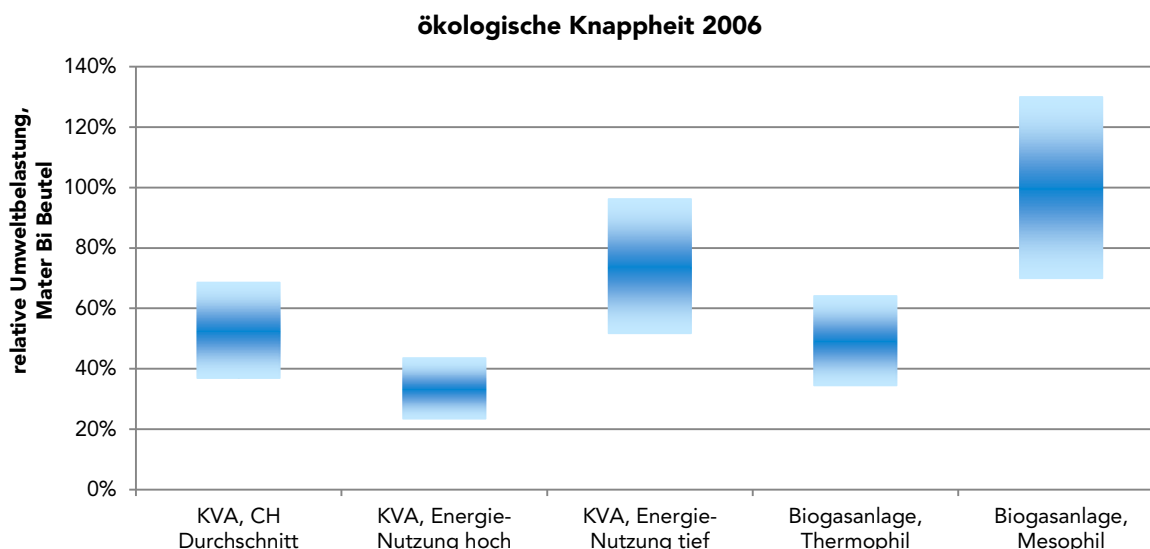
Wie die Darstellung der Ergebnisse mittels des Ansatzes "basket of benefits" zeigt (Abbildung 6), weist die Verwertung in einer durchschnittlichen oder energieoptimierten KVA signifikant tiefere und die Verwertung in einer KVA mit geringer Energienutzung eine tendenziell tiefere Umweltbelastung auf als die Verwertung in einer Biogasanlage.

### 3.2.2 Mater Bi Beutel (Compobag)



**Abbildung 7: Umweltauswirkungen bewertet mit der Methode der Ökologischen Knappheit 2006: Systemdarstellung nach „avoided burden“.** Das Total setzt sich zusammen aus der Summe der Umweltbelastungen und Gutschriften.

Abbildung 7 zeigt für den Compobag aus Mater Bi, dass die Umweltauswirkungen der Emissionen des Entsorgungsprozesses Biogasanlage etwas geringer sind als diejenigen des Entsorgungsprozesses KVA. Die Entsorgung in der KVA weist dagegen die grösseren Gutschriften (Strom und Wärme) auf als diejenigen bei der Entsorgung in der Biogasanlage (Biogas und Düngergutschrift), so dass die Summe der Umweltauswirkungen bei der KVA geringer sind. Der Compobag aus Mater Bi baut sich während der Verweilzeit in der mesophilen Biogasanlage nur schlecht ab, so dass in einer solchen Anlage praktisch keine Gutschrift für Biogas resultiert, dagegen weist die Vergärung in einer thermophilen Anlage einen wesentlich höheren Biogasertrag aus.

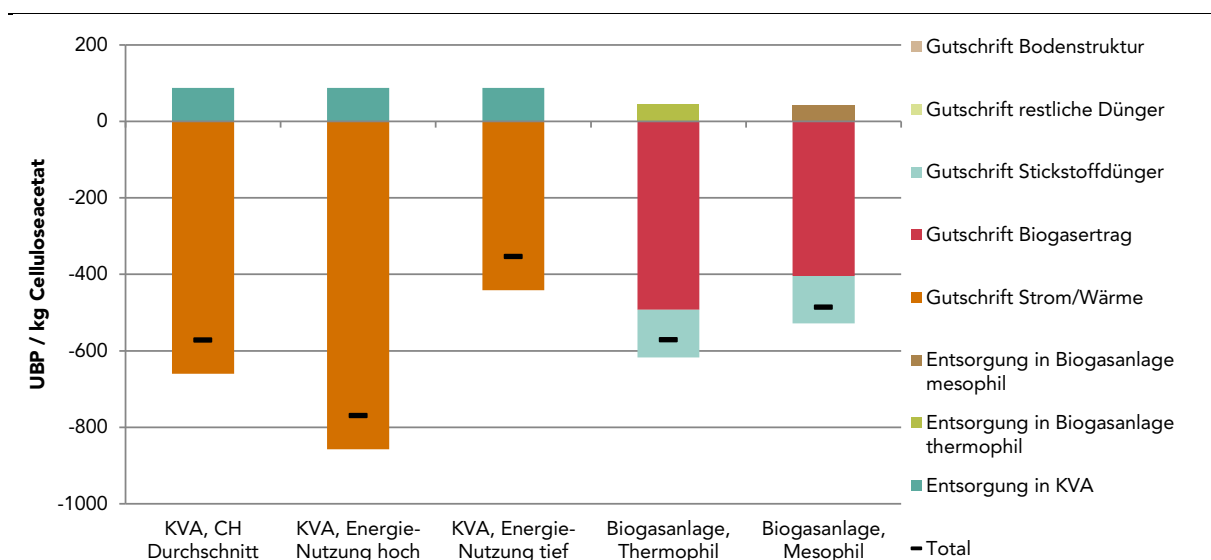


**Abbildung 8: Relative Umweltauswirkungen bewertet mit der Methode UBP 2006: Systemdarstellung nach „basket of benefits“ normiert auf das Maximum.** Die Ausdehnung der Balken gibt die Unsicherheiten der Resultate an.

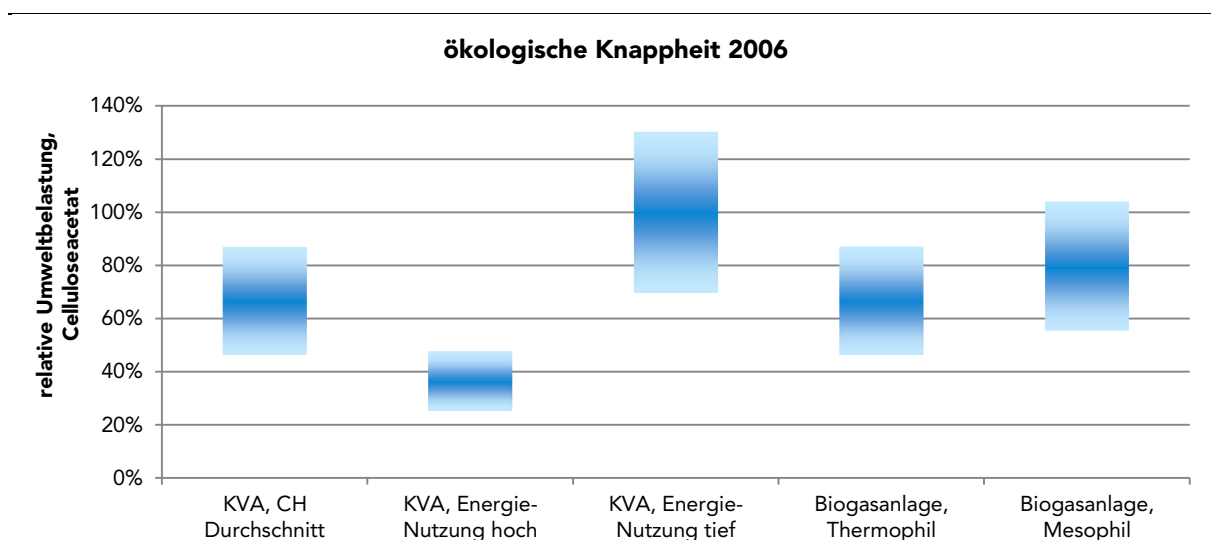
Wie die Darstellung der Ergebnisse mittels des Ansatzes "basket of benefits" zeigt (Abbildung 8), sind die Unterschiede der Umweltauswirkungen gemessen in UBP der verschiedenen Verwertungswege nicht signifikant. Die Verwertung in einer energieoptimierten KVA hat tendenziell geringere Auswirkungen als die Verwertung in einer Biogasanlage.

### 3.2.3 Celluloseacetat Folie

Abbildung 9 zeigt für die Celluloseacetat Folie, dass die Emissionen des Entsorgungsprozesses KVA höher sind als die der Biogasanlage. Die Entsorgung in der KVA weist die grösseren Gutschriften (Strom und Wärme) auf als die Verwertung in der Biogasanlage (Biogas und Dünger), so dass die Summe der Auswirkungen bei den KVA Varianten etwas geringer ist. Die Celluloseacetat Folie erhält nebst der Biogasgutschrift auch noch eine Gutschrift für den im Material gemessenen Stickstoffanteil.



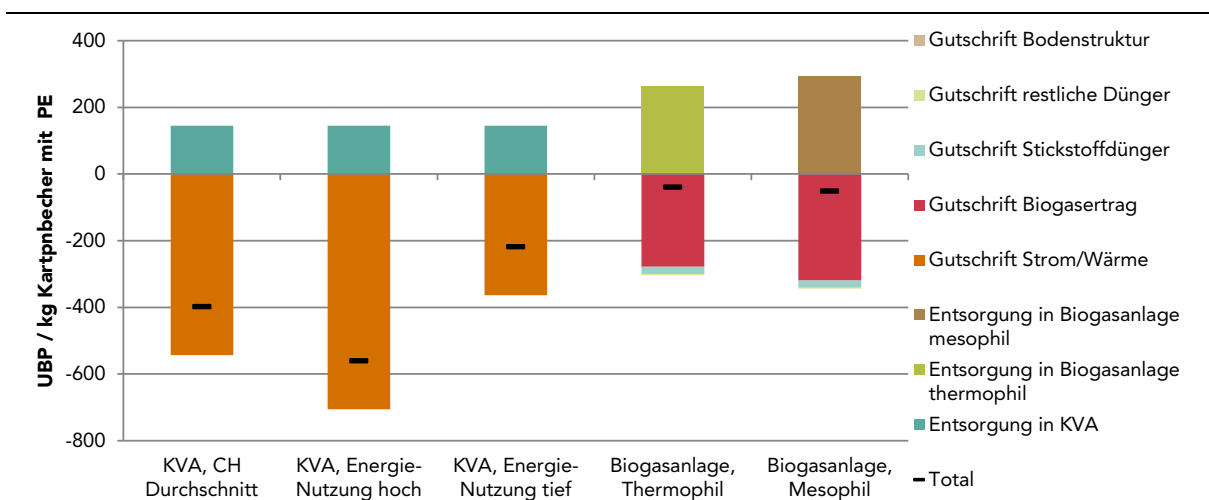
**Abbildung 9: Umweltauswirkungen bewertet mit der Methode der Ökologischen Knappheit 2006: Systemdarstellung nach „avoided burden“.** Das Total setzt sich zusammen aus der Summe der Umweltbelastungen und Gutschriften.



**Abbildung 10: Relative Umweltauswirkungen bewertet mit der Methode UBP 2006: Systemdarstellung nach „basket of benefits“ normiert auf das Maximum.** Die Ausdehnung der Balken gibt die Unsicherheiten der Resultate an.

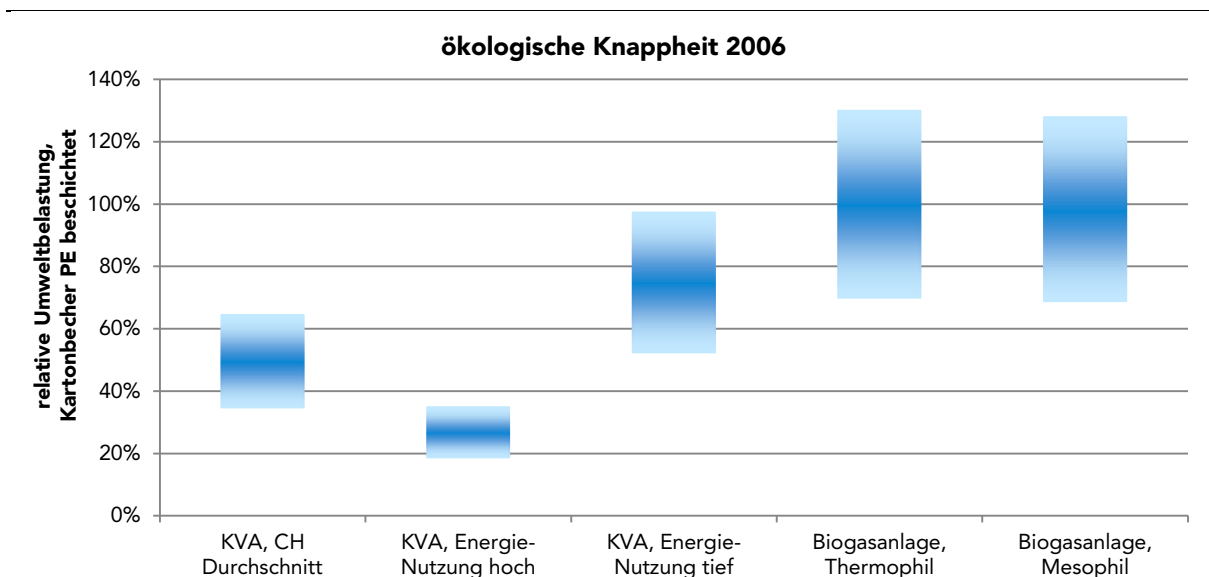
Wie die Darstellung der Ergebnisse mittels des Ansatzes "basket of benefits" zeigt (Abbildung 10), weist die Verwertung von Celluloseacetat in einer durchschnittlichen oder einer KVA mit geringer Energienutzung eine etwa gleich hohe Umweltbelastung auf wie die Verwertung in einer Biogasanlage. Die Verwertung in einer energieoptimierten KVA kommt auf signifikant tiefere Werte.

### 3.2.4 Kartonbecher mit PE-Beschichtung



**Abbildung 11: Umweltauswirkungen bewertet mit der Methode der Ökologischen Knappheit 2006: Systemdarstellung nach „avoided burdens“.** Das Total setzt sich zusammen aus der Summe der Umweltbelastungen und Gutschriften.

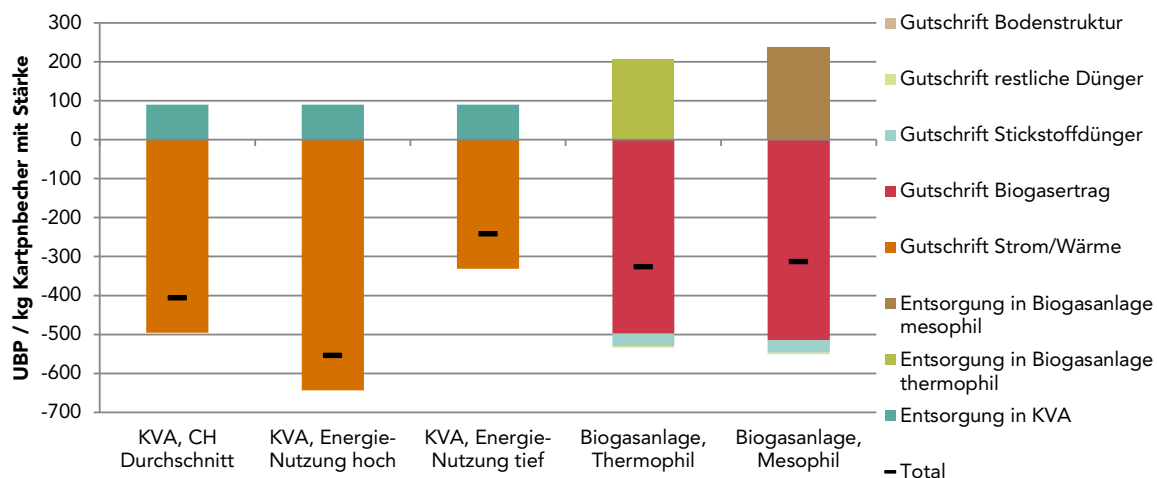
Abbildung 11 zeigt für den Kartonbecher mit PE-Beschichtung, dass die Umweltauswirkungen der Emissionen des Entsorgungsprozesses Biogasanlage etwas höher sind als diejenigen des Entsorgungsprozesses KVA unter anderem wegen den Schwermetallemissionen. Der Kartonbecher mit PE-Beschichtung erhält zwar eine Biogassgutschrift, diese ist jedoch deutlich geringer als die Gutschriften der Verwertung in einer KVA.



**Abbildung 12: Relative Umweltauswirkungen bewertet mit der Methode UBP 2006: Systemdarstellung nach „basket of benefits“ normiert auf das Maximum.** Die Ausdehnung der Balken gibt die Unsicherheiten der Resultate an.

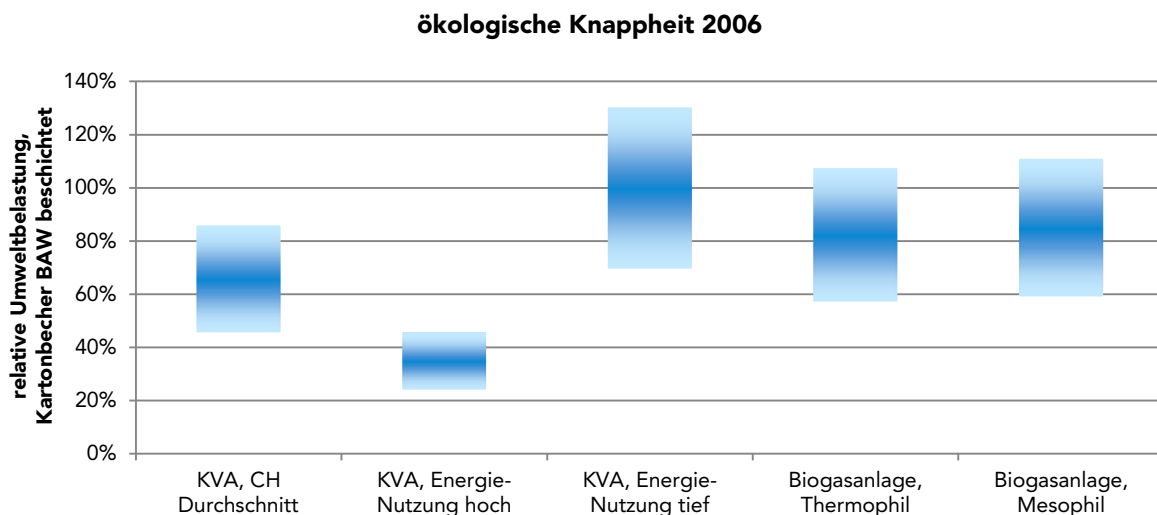
Wie die Darstellung der Ergebnisse mittels des Ansatzes "basket of benefits" zeigt (Abbildung 12), weist die Verwertung von Kartonbecher mit PE-Beschichtung in einer durchschnittlichen oder energieoptimierten KVA eine signifikant tiefere Umweltbelastung gemessen in UBP auf als die Verwertung in einer Biogasanlage. Die Verwertung in einer KVA mit geringerer Energienutzung kommt auf vergleichbare Werte.

### 3.2.5 Kartonbecher mit BAW-Beschichtung



**Abbildung 13: Umweltauswirkungen bewertet mit der Methode der Ökologischen Knappheit 2006: Systemdarstellung nach „avoided burdens“.** Das Total setzt sich zusammen aus der Summe der Umweltbelastungen und Gutschriften.

Abbildung 13 zeigt für den Kartonbecher mit BAW-Beschichtung, dass die Umweltauswirkungen der Emissionen des Entsorgungsprozesses Biogasanlage höher sind als diejenigen des Entsorgungsprozesses KVA unter anderem wegen den Schwermetallemissionen. Der Kartonbecher mit BAW-Beschichtung erhält zwar eine Biogasgutschrift, diese ist jedoch deutlich geringer als die Gutschriften der Verwertung in einer KVA.

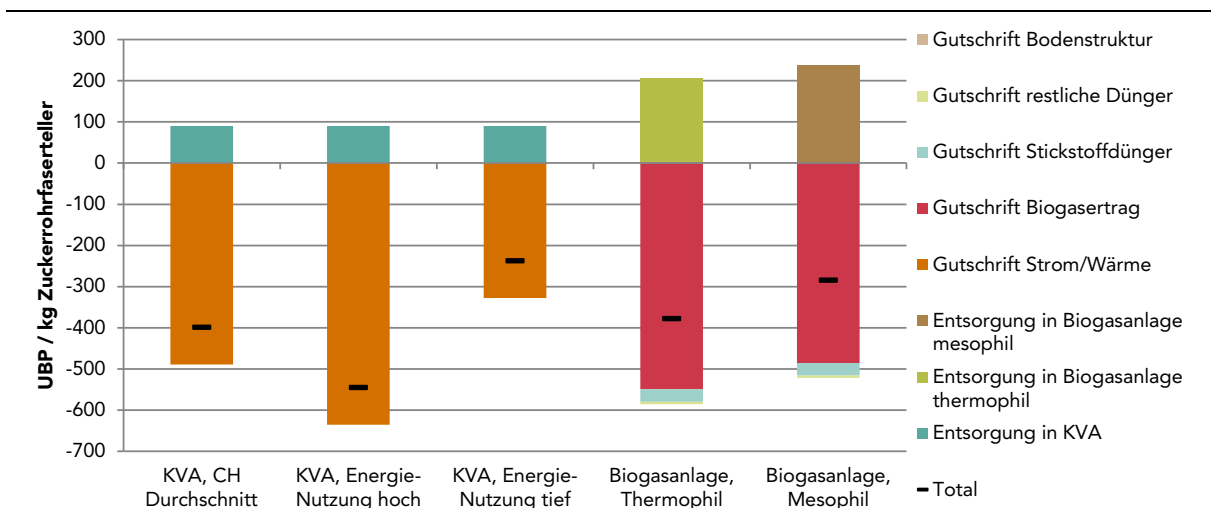


**Abbildung 14: Relative Umweltauswirkungen in UBP 2006: Systemdarstellung nach „basket of benefits“ normiert auf das Maximum.** Die Ausdehnung der Balken gibt die Unsicherheiten der Resultate an.

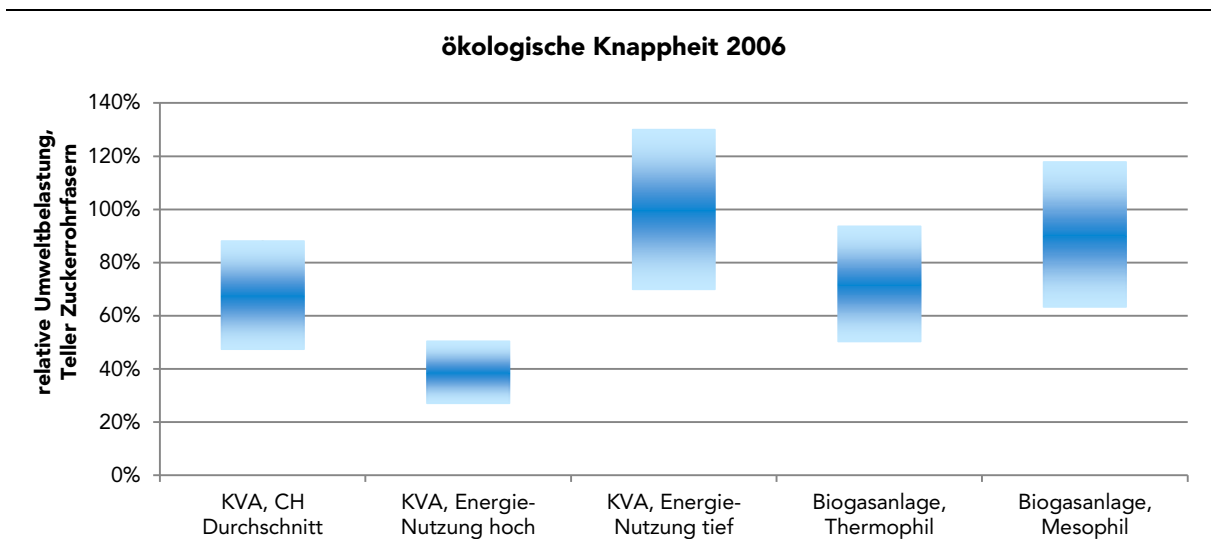
Wie die Darstellungen der Ergebnisse mittels des Ansatzes "basket of benefits" zeigen (Abbildung 14), weisen alle Verwertungen abgesehen von der KVA mit hoher Energienutzung vergleichbare Umweltauswirkungen auf. Letztere hat eine signifikant geringere Umweltbelastung.

### 3.2.6 Teller Zuckerrohrfasern

Abbildung 15 zeigt für den Teller aus Zuckerrohrfasern, dass die Umweltauswirkungen der Emissionen des Entsorgungsprozesses Biogasanlage höher sind als diejenigen des Entsorgungsprozesses KVA unter anderem wegen den Schwermetallemissionen. Der Teller aus Zuckerrohrfasern erhält zwar eine Biogasgutschrift, diese ist jedoch deutlich geringer als die Gutschriften der Verwertung in einer KVA.



**Abbildung 15: Umweltauswirkungen bewertet mit der Methode der Ökologischen Knappheit 2006: Systemdarstellung nach „avoided burden“.** Das Total setzt sich zusammen aus der Summe der Umweltbelastungen und Gutschriften.

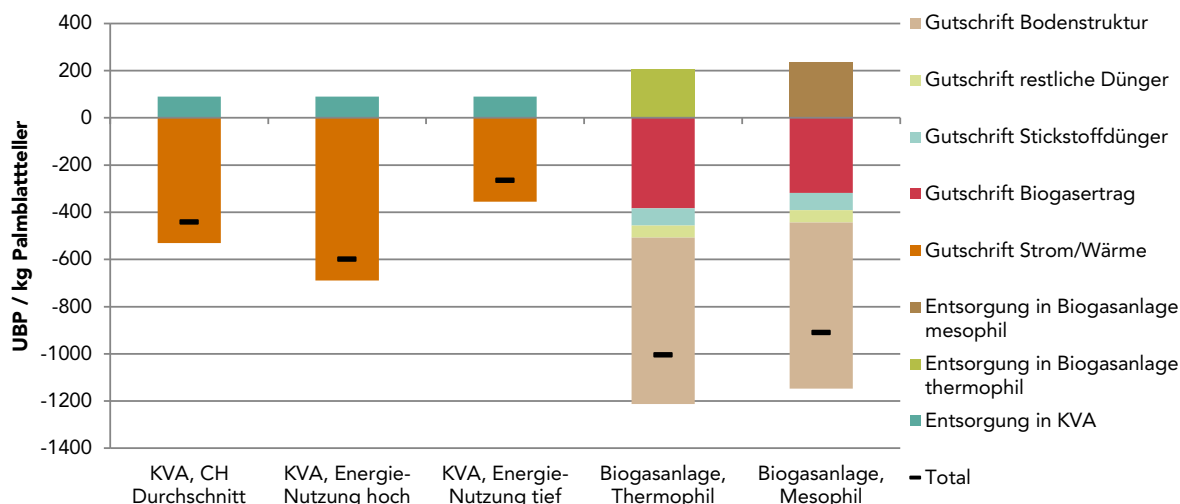


**Abbildung 16: Relative Umweltauswirkungen in UBP 2006: Systemdarstellung nach „basket of benefits“ normiert auf das Maximum.** Die Ausdehnung der Balken gibt die Unsicherheiten der Resultate an.

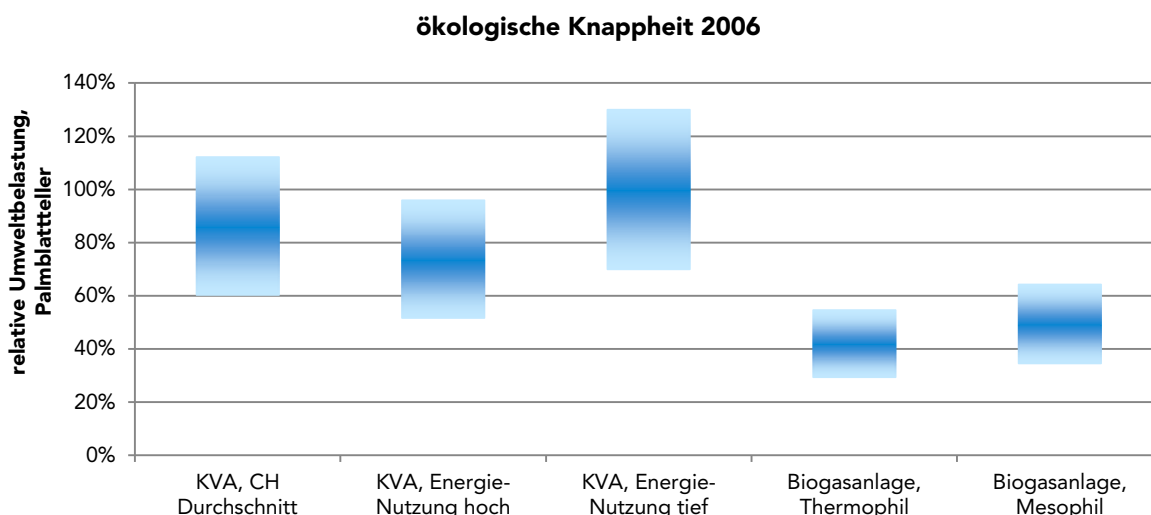
Wie die Darstellung der Ergebnisse mittels des Ansatzes "basket of benefits" zeigt (Abbildung 16), weist nur die Variante KVA mit hoher Energienutzung einen signifikanten Unterschied aus. Die anderen Verwertungen zeigen vergleichbare Umweltauswirkungen, wobei die KVA mit einer geringen Energienutzung tendenziell am schlechtesten abschneidet.



### 3.2.7 Palmblattteller



**Abbildung 17: Umweltauswirkungen bewertet mit der Methode der Ökologischen Knappheit 2006: Systemdarstellung nach „avoided burdens“.** Das Total setzt sich zusammen aus der Summe der Umweltbelastungen und Gutschriften.



**Abbildung 18: Relative Umweltauswirkungen bewertet in UBP 2006: Systemdarstellung nach „basket of benefits“ normiert auf das Maximum.** Die Ausdehnung der Balken gibt die Unsicherheiten der Resultate an.

Abbildung 17 zeigt für den Palmblattteller, dass die Umweltauswirkungen der Emissionen des Entsorgungsprozesses Biogasanlage etwas höher sind als diejenigen des Entsorgungsprozesses KVA unter anderem wegen den Schwermetallemissionen. Das Palmblatt erhält als einziges der untersuchten Materialien aufgrund seiner Eigenschaften und Zusammensetzung eine Gutschrift für die Förderung der Bodenstruktur. Die Gutschrift in Form von Stroh und Kompostersatz orientiert sich an der in Dinkel et al. (2012) beschriebenen und entwickelten Methodik. Die Bodenstrukturgutschrift weist einen höheren Wert auf als alle anderen Gutschriften bei der Verwertung in einer Biogasanlage und liegt in derselben Grössenordnung wie die Gutschrift für Strom und Wärme in einer energieoptimierten KVA. Dies führt dazu, dass in der Summe die Umweltauswirkungen der Biogasanlage signifikant geringer sind als diejenigen der KVA.

Wie die Darstellung der Ergebnisse mittels des Ansatzes "basket of benefits" zeigt (Abbildung 18), sind die Unterschiede der verschiedenen Verwertungen gemessen in UBP signifikant. Entsprechend weisen die Umweltauswirkungen der Biogasanlagen geringere Umweltbelastung auf verglichen mit der Verwertung in einer KVA. Bei einer mesophilen Vergärung gegenüber einer KVA mit optimaler Energienutzung ist der Unterschied nur knapp signifikant.

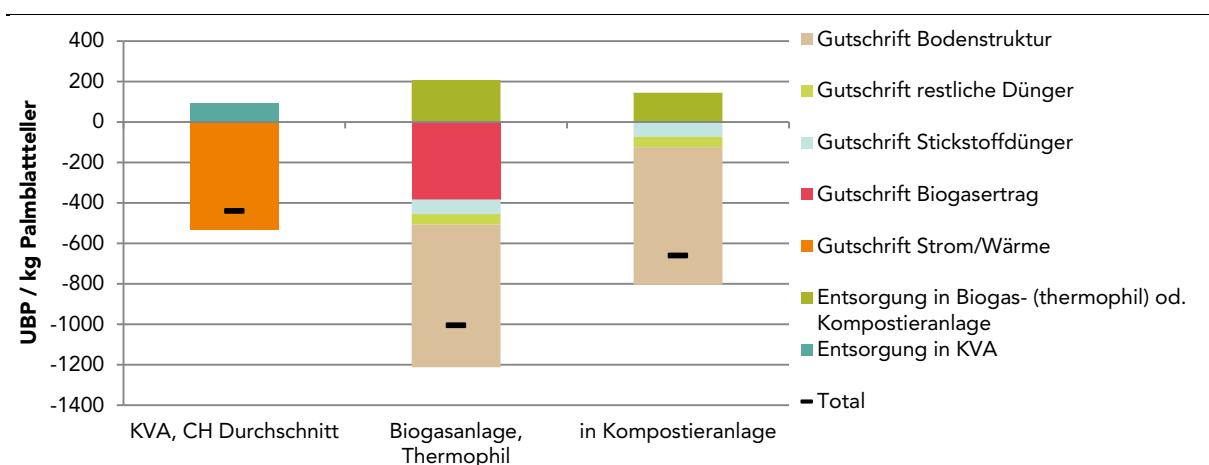
### 3.3 Szenario Analysen

In jeder Ökobilanz müssen Annahmen getroffen werden, welche mehr oder weniger grossen Einfluss auf die Resultate haben. Um die Stabilität der Ergebnisse und damit die Aussagekraft der Studie abzuklären, werden im Folgenden für zwei Aspekte Szenarien Rechnungen durchgeführt. Es handelt sich dabei um die folgenden Fragestellungen:

- Ist es sinnvoller die untersuchten BAW zu kompostieren?
- Wie gross ist der Einfluss der Wahl des Strom Mix auf die Resultate?

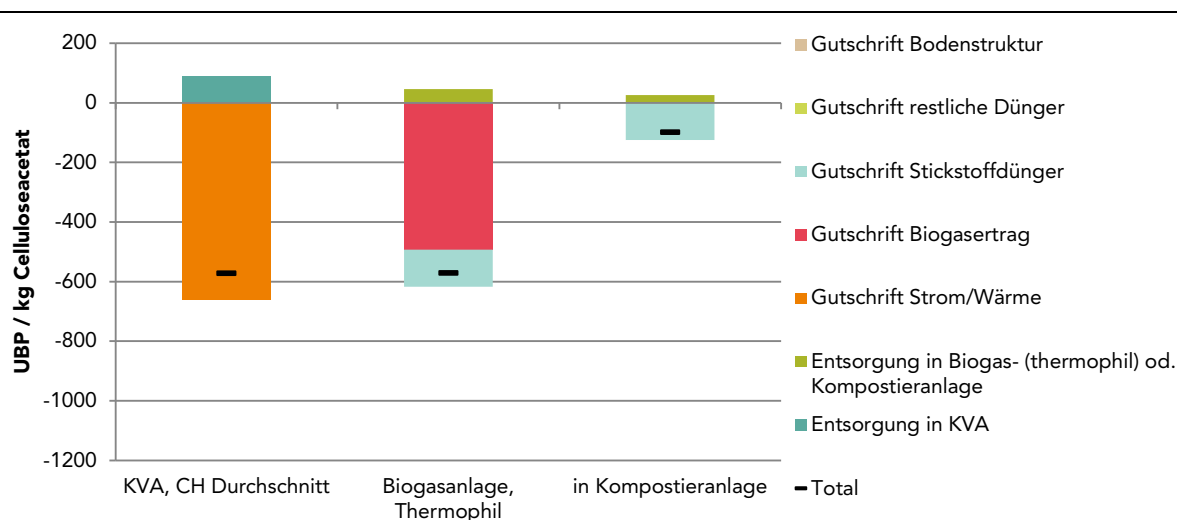
#### 3.3.1 Szenario Analyse Kompostierung

Für die Produkte aus Palmblättern und aus Celluloseacetat wurde zudem untersucht, wie hoch die Umweltauswirkungen der Kompostierung sind. Für die anderen Materialien wurde dies nicht gemacht, da diese keine strukturbildenden Elemente oder keine Nährstoffe beinhalten, siehe Kapitel 1.



**Abbildung 19: Umweltauswirkungen bewertet mit der Methode der Ökologischen Knappheit 2006: Systemdarstellung nach „avoided burden“** Das Total setzt sich zusammen aus der Summe der Umweltbelastungen und Gutschriften.

Abbildung 19 zeigt für den Palmblattteller, dass die Kompostierung dank der Bodenstrukturgutschrift ein ähnliches Resultat erreicht wie die Verwertung in der Biogasanlage. Das Palmblatt erhält als einziges der untersuchten Materialien aufgrund seiner Eigenschaften und Zusammensetzung eine Gutschrift für die Förderung der Bodenstruktur. Die Gutschrift in Form von Stroh und Kompostersatz orientiert sich an der in Dinkel et al. (2012) beschriebenen und entwickelten Methodik. Die Bodenstrukturgutschrift ist tendenziell etwas höher als die Gutschrift für Strom und Wärme in einer durchschnittlichen KVA.



**Abbildung 20: Umweltauswirkungen bewertet mit der Methode der Ökologischen Knappheit 2006: Systemdarstellung nach „basket of benefits“.** Das Total setzt sich zusammen aus der Summe der Umweltbelastungen und Gutschriften.

Abbildung 20 zeigt am Beispiel von Celluloseacetat, dass die Kompostierung tendenziell schlechter abschneidet als die Verwertung in einer Biogasanlage oder KVA. Der Grund liegt darin, dass bei der Kompostierung nur ein Nutzen bezüglich der Düngewirkung erbracht wird. Celluloseacetat trägt aufgrund seiner Eigenschaften nicht zu einer Humusbildung bei und erhält deshalb keine Bodenstrukturgutschrift. Der Nutzen der Kompostierung ist somit geringer als der Nutzen in einer Biogasanlage oder KVA.

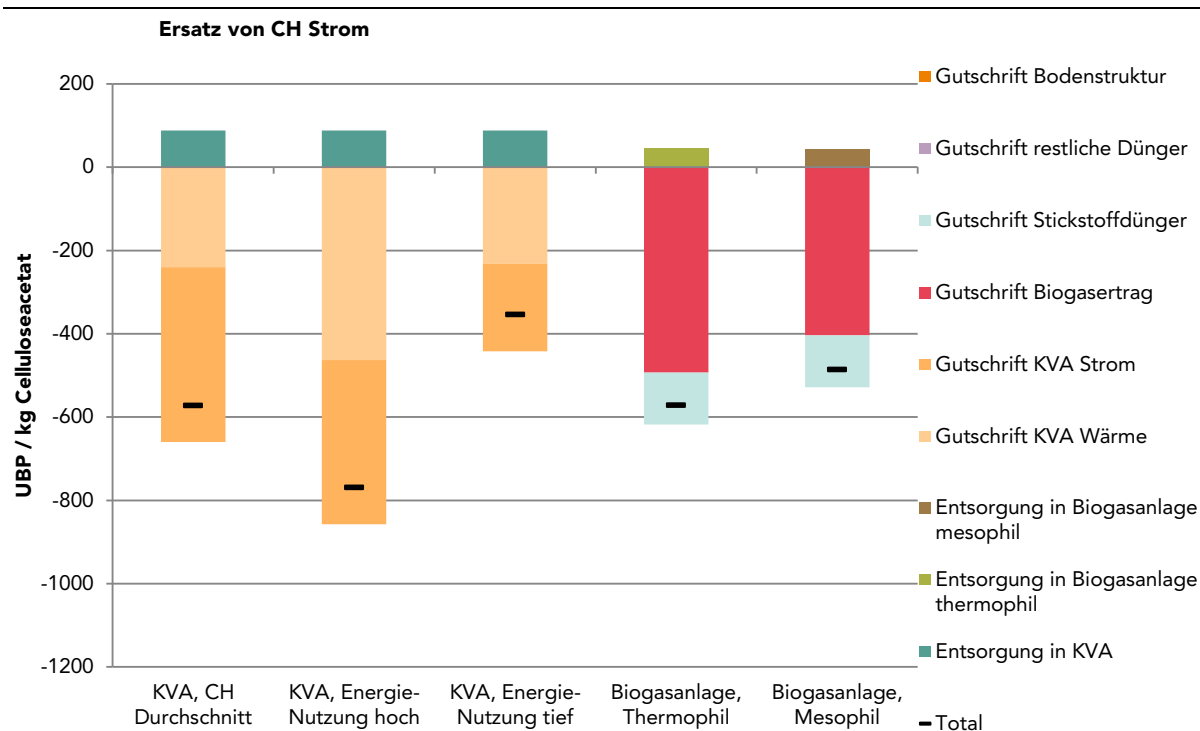
Dieses Ergebnis gilt stellvertretend für alle in dieser Studie untersuchten Materialien mit Ausnahme des Palmblatts.

### 3.3.2 Szenario Analyse Strom Gutschrift

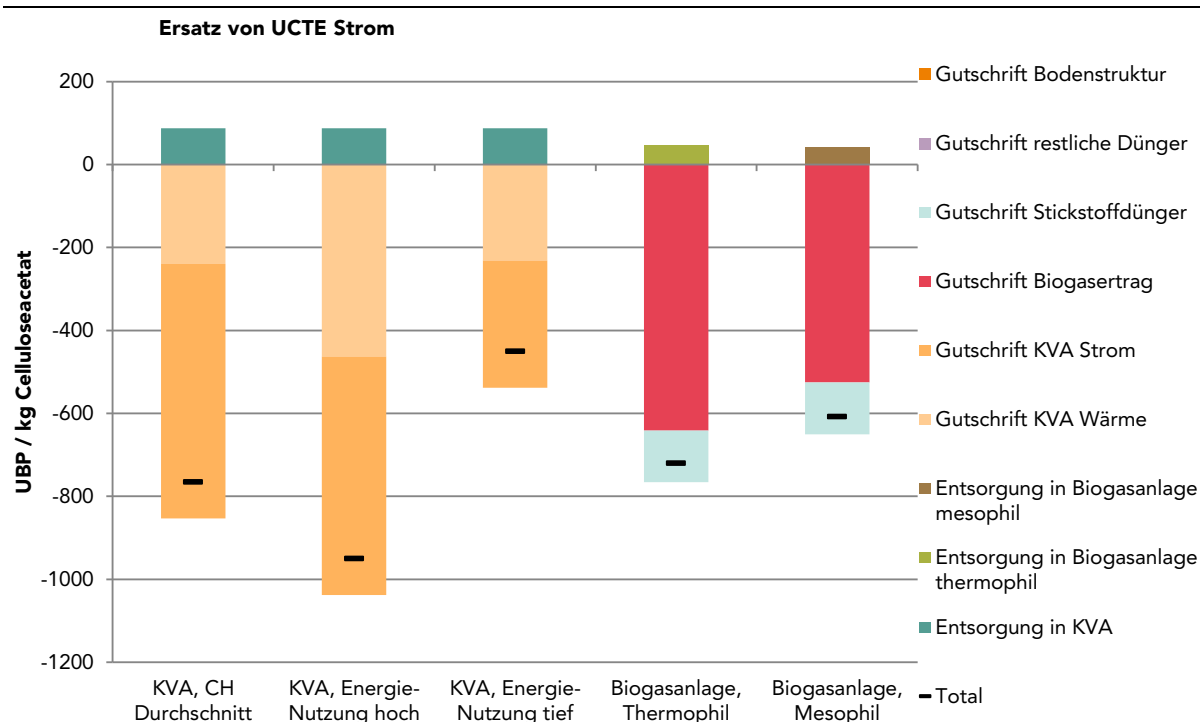
Im Folgenden wird untersucht, welchen Einfluss die Wahl des Strom-Mix auf die Resultate haben kann. Um dies abzuklären werden am Beispiel von Celluloseacetat die Umweltauswirkungen berechnet, wenn anstelle vom Schweizer Strom Mix der europäische Strom Mix oder Strom aus einem Gas-Kombikraftwerk berücksichtigt wird. Dahinter steht folgende Überlegung: Wenn durch die Entsorgung der BAW zusätzlich Strom eingespart wird, muss weniger Strom importiert werden. Importierter Strom besteht entweder aus dem durchschnittlichen Europäischen Verbundmix (UCTE) oder in Zukunft ist ebenfalls Gas-Kombikraftwerkstrom denkbar. Celluloseacetat wurde verwendet, da dieser BAW eine gute Abbaubarkeit und damit einen relativ hohen Biogasertrag aufweist.

#### Aus Sicht der Methode der ökologischen Knappheit:

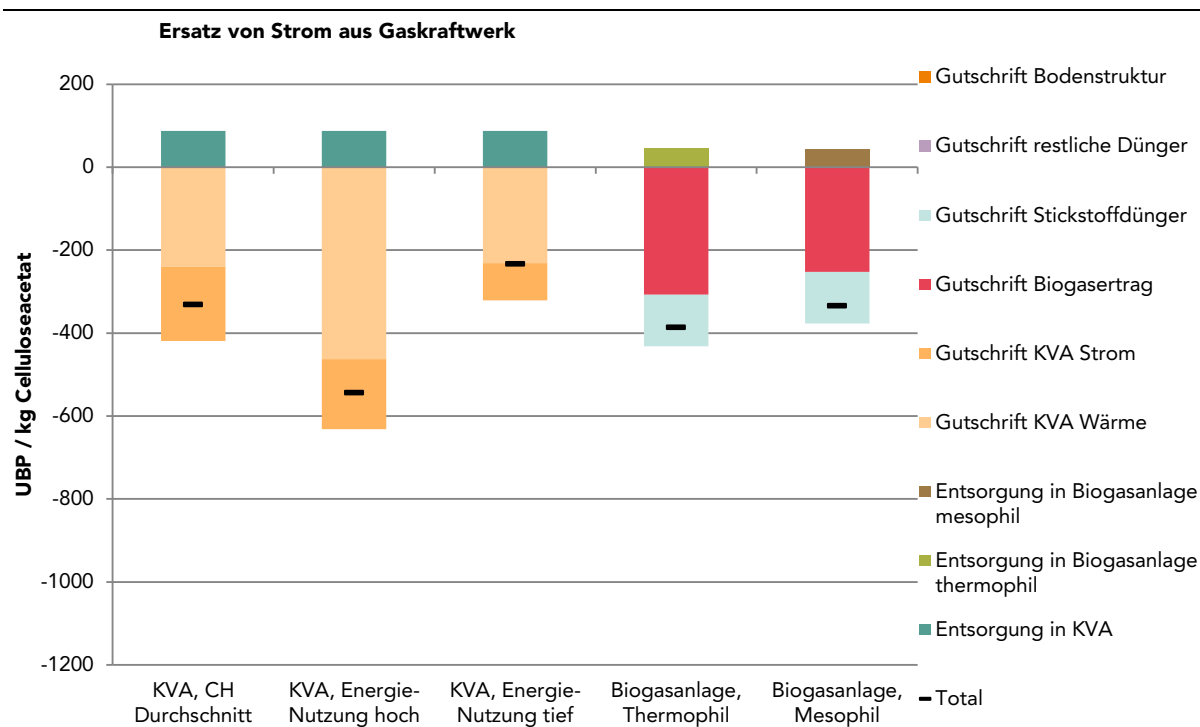
Die Gutschrift für den UCTE Strom Mix fällt rund 50% höher aus als die Gutschrift für den Schweizer Strom Mix. Demgegenüber wird Strom aus einem Gas und Dampfkraftwerk als weniger umweltbelastend bewertet, so dass die Gutschrift rund halb so hoch ausfällt. Abbildung 21 bis Abbildung 23 zeigen am Beispiel von Celluloseacetat die verschiedenen Auswirkungen. Trotz der relativ grossen Unterschiede in den absoluten Werten, bleiben die relativen Verhältnisse in etwas gleich, unabhängig davon, welcher Strom-Mix verwendet wird. Auf dem Hintergrund der Unsicherheiten, siehe auch Kapitel 3.2.3, ergeben sich keine signifikanten Unterschiede. Das heisst die Resultate sind bezüglich der Wahl des Strom-Mixes stabil.



**Abbildung 21: Umweltauswirkungen bewertet mit der Methode der Ökologischen Knappheit 2006: Systemdarstellung nach „avoided burdens“**



**Abbildung 22: Umweltauswirkungen bewertet mit der Methode der Ökologischen Knappheit 2006: Systemdarstellung nach „avoided burdens“**

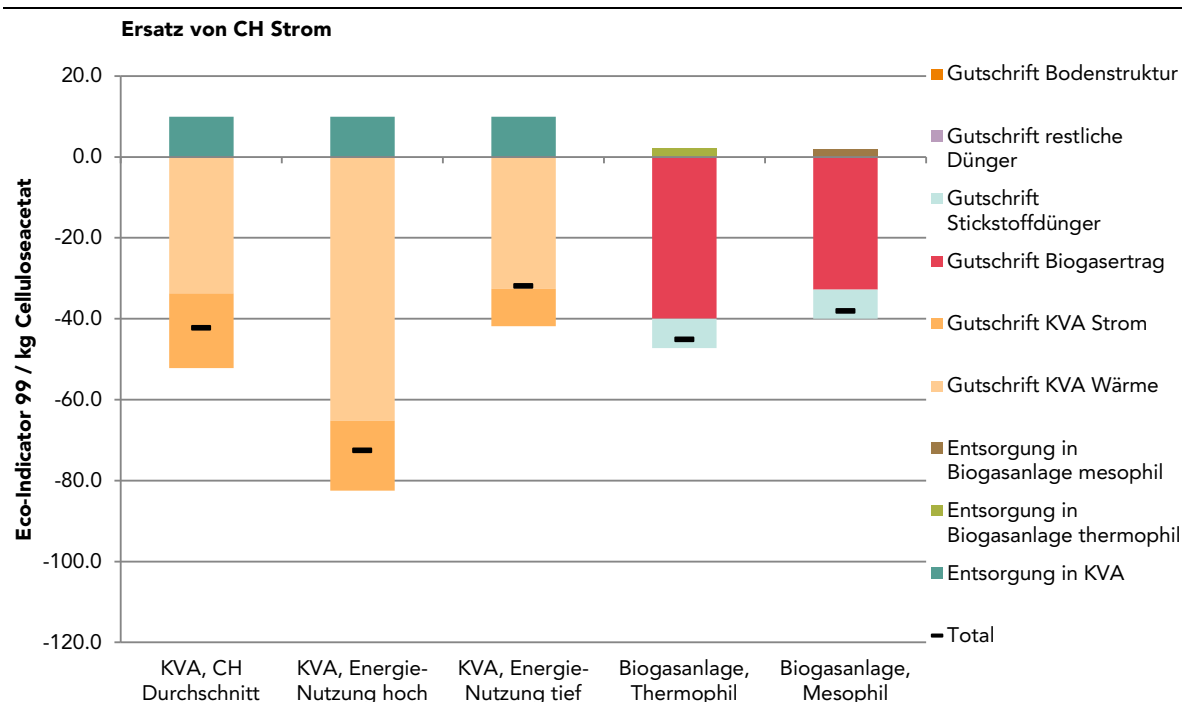


**Abbildung 23: Umweltauswirkungen bewertet mit der Methode der Ökologischen Knappheit 2006: Systemdarstellung nach „avoided burden“**

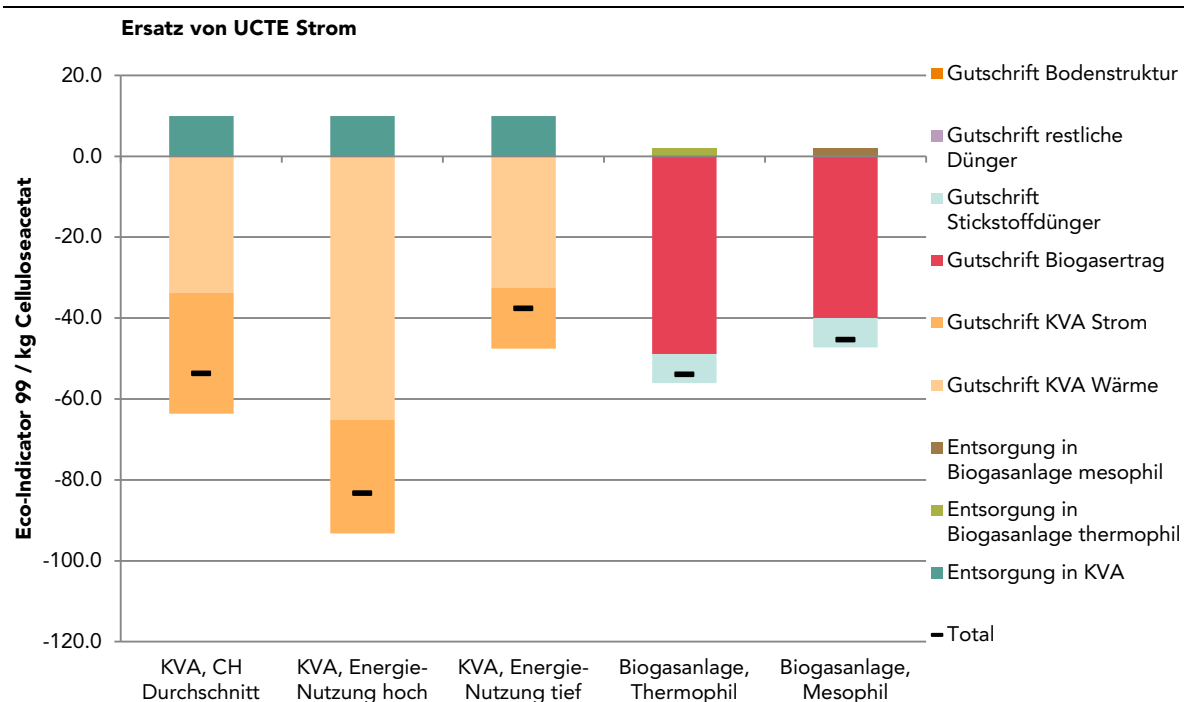
### Aus Sicht von Eco-Indicator 99:

Diese Methode bewertet den Strom Mix Schweiz zu gut, da sie Strom aus Kernkraftwerken praktisch nicht berücksichtigt. Die Gutschrift für UCTE Strom Mix fällt deshalb fast doppelt so hoch aus wie die Gutschrift für Schweizer Strom Mix und die Gutschrift für Strom aus reinen Gaskraftwerken ist rund 40% höher als diejenige von Schweizer Strom Mix. Abbildung 24 bis Abbildung 26 zeigen am Beispiel von Celluloseacetat die verschiedenen Auswirkungen. Trotz der relativ grossen Unterschiede bei den absoluten Werten, bleiben die relativen Verhältnisse in etwas gleich, unabhängig davon, welcher Strom-Mix verwendet wird. Zudem sind die Resultate die sich mit dieser Bewertungsmethode ergeben vergleichbar mit denjenigen, welche sich aus der Bewertung mit der Methode UBP 06 zeigen. Auf dem Hintergrund der Unsicherheiten, siehe auch Kapitel 3.2.3, ergeben sich keine signifikanten Unterschiede.

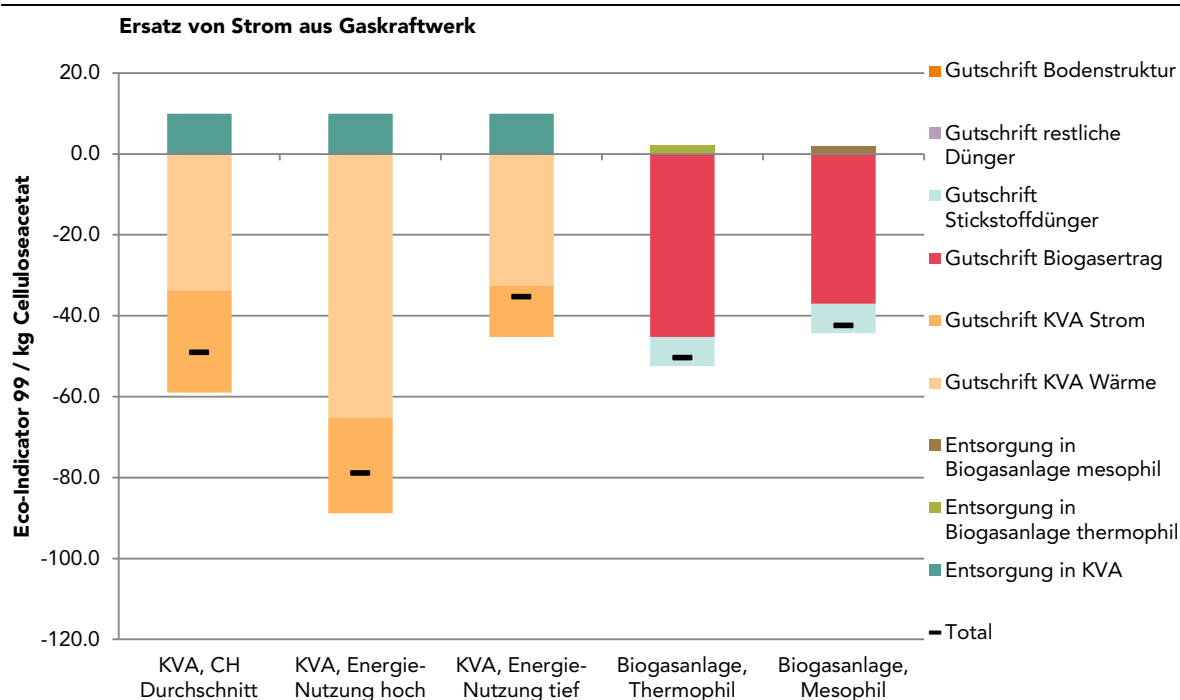
Das heisst die Resultate sind bezüglich der Wahl des Strom-Mix stabil und dieses Ergebnis ist unabhängig von der Bewertungsmethode.



**Abbildung 24: Umweltauswirkungen bewertet mit der Methode Eco-Indicator 99: Systemdarstellung nach „avoided burden“**



**Abbildung 25: Umweltauswirkungen bewertet mit der Methode Eco-Indicator 99: Systemdarstellung nach „avoided burden“**



**Abbildung 26: Umweltauswirkungen bewertet mit der Methode Eco-Indicator 99: Systemdarstellung nach „avoided burden“**

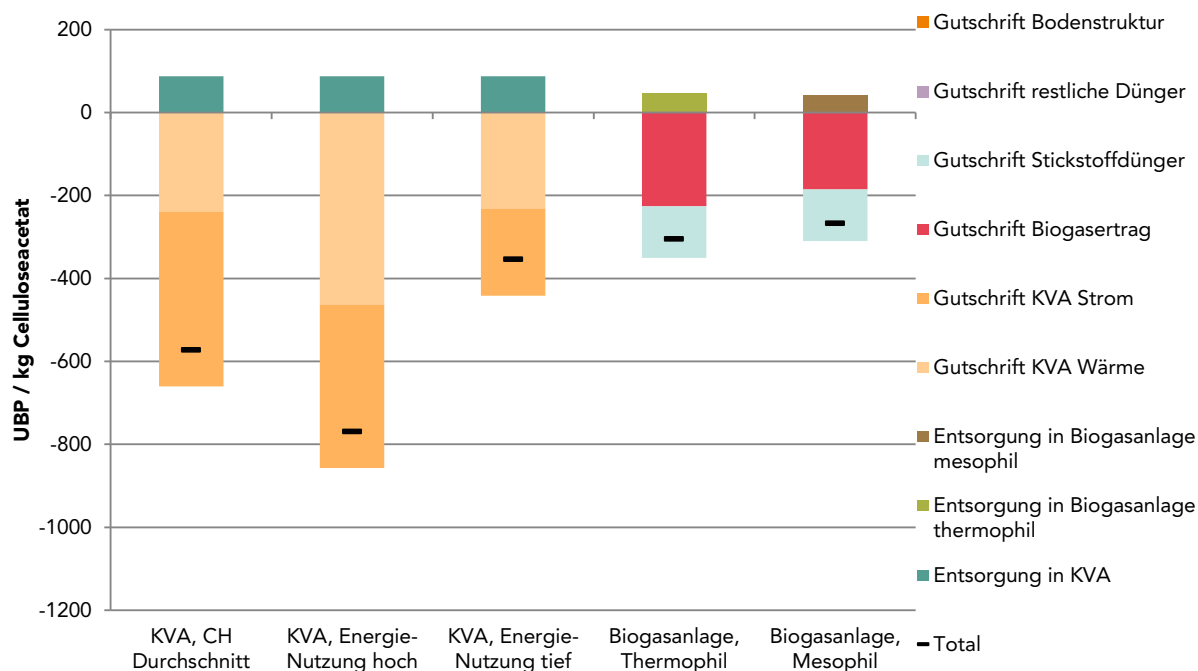
### 3.3.3 Szenario Analyse Biogas Gutschrift

Wie in Kapitel 2.3.1 beschrieben wurde, können die Resultate davon abhängen, wie das erzeugte Biogas genutzt wird. Bilanztechnisch bedeutet dies, wie hoch die Gutschriften sind, welche verwendet werden. Für die Resultate in Kapitel 3.2 wurde angenommen, dass das Biogas in einem BHKW mit dem folgenden Wirkungsgrad energetisch genutzt wird: 55% Wärme und 32% Strom.

Eine andere Möglichkeit der Nutzung wäre z.B. die Aufbereitung des Biogases auf eine Reinheit von 96% Methan, die Einspeisung ins Erdgasnetz und die Nutzung als Treibstoff oder in einer Feuerung. Um abzuklären, ob sich bei dieser Nutzung eine bessere Bewertung der Vergärung ergäbe, wurde im Sinne einer Best Case Annahme der Nutzen dieser energetischen Verwertungen als Gutschrift verwendet und die Aufwände für die Aufbereitung und Verteilung nicht berücksichtigt. Das heisst die effektiven Gutschriften für das Biogas sind geringer.

Diese Berechnungen wurden für Celluloseacetat gemacht, da dieser BAW gut abbaut und einen hohen Biogasertrag resultiert. Bei den anderen BAW sind die Effekte entsprechend geringer.

**Biogas energetisch in einer Feuerung oder als Treibstoff verwertet**

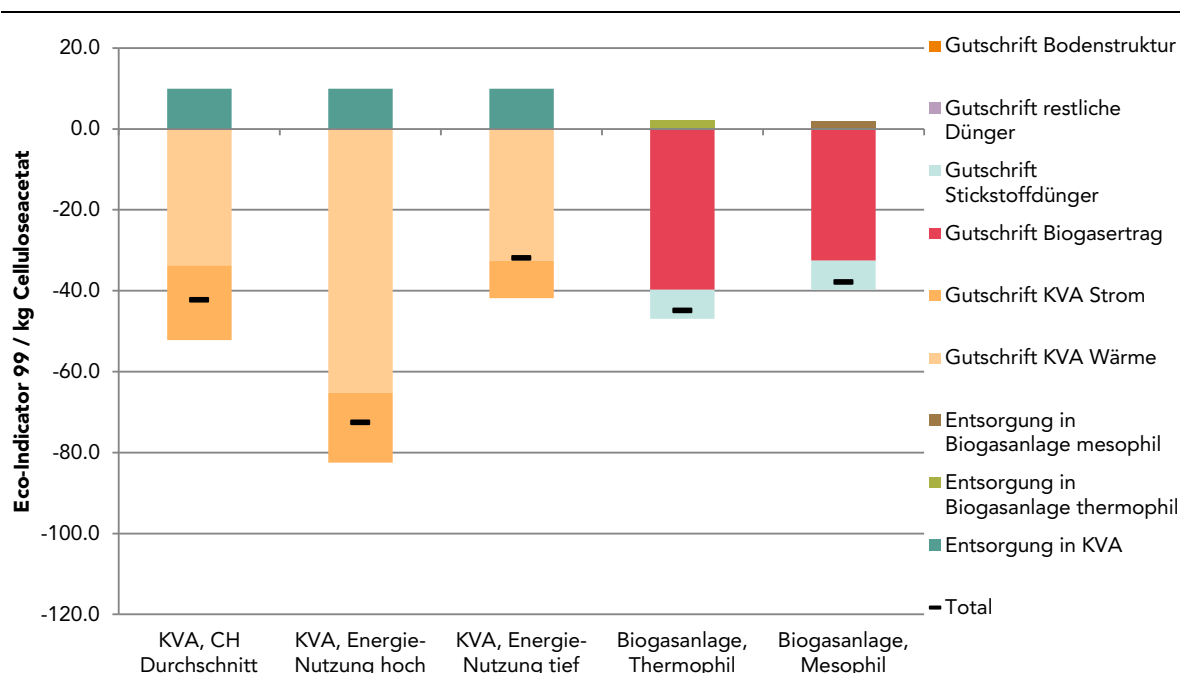


**Abbildung 27: Umweltauswirkungen bewertet mit der Methode UBP 06: Systemdarstellung nach „avoided burden“. Biogas energetisch in einer Feuerung oder als Treibstoff verwertet.**

Ein Vergleich der Abbildung 27 (Biogas in einer Feuerung oder als Treibstoff verwertet) und Abbildung 9 oder 21 (Biogas in BHKW) zeigt, dass die Verwertung in einem BHKW ökologisch zu einem besseren Ergebnis der Vergärung führt. Bei der Methode Eco Indicator 99, siehe Abbildung 28 (Biogas in einer Feuerung oder als Treibstoff verwertet) und Abbildung 24 (Biogas in BHKW) sind die Unterschiede so klein, dass diese in der Graphik nicht erkennbar sind.

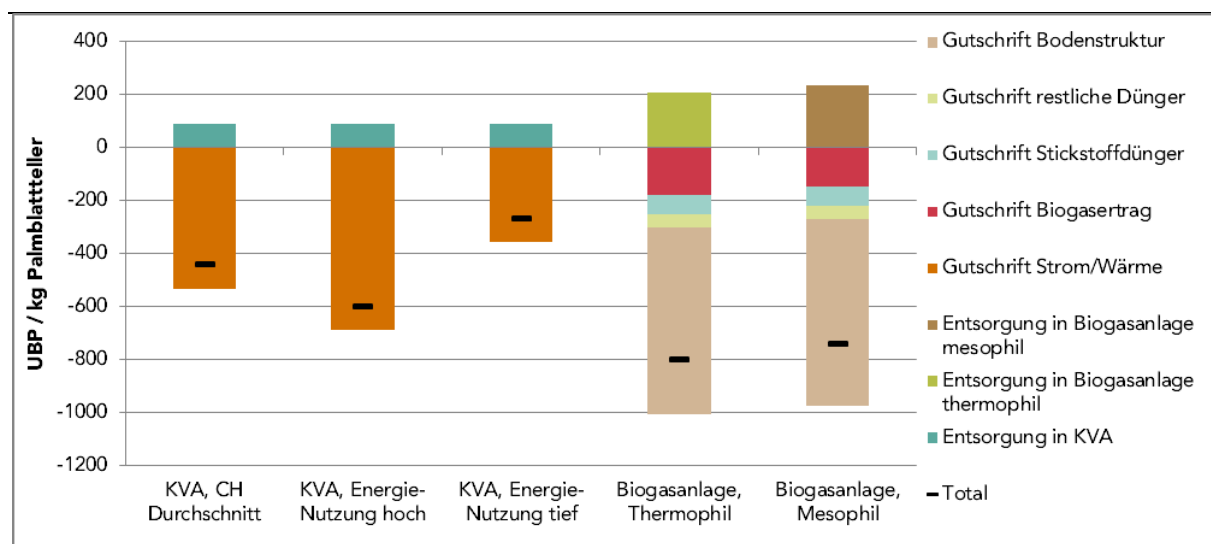
Diese Ergebnisse zeigen, dass die Annahme der Nutzung des Biogases in einem BHKW zu einer vergleichbaren oder tendenziell besseren Bewertung der Vergärung führt. In dem Sinne können die Resultate in Kapitel 3.2 als stabil oder als Optimal für die Vergärung bezeichnet werden.





**Abbildung 28: Umweltauswirkungen bewertet mit der Methode Eco-Indicator 99: Systemdarstellung nach „avoided burden“. Biogas energetisch in einer Feuerung oder als Treibstoff verwertet.**

Auf Grund dieses Resultates wurden zudem die Berechnungen für den Palmblattteller durchgeführt, um zu sehen, ob sich daraus eine andere Beurteilung des Palmblatttellers ergibt. Die Ergebnisse in Abbildung 29 zeigen, dass sich bei diesem BAW keine andere Beurteilung ergibt. Auch unter dieser Bedingung ist die Vergärung aus ökologischer Sicht die optimale Verwertung.



**Abbildung 29: Umweltauswirkungen bewertet mit der Methode UB 06: Systemdarstellung nach „avoided burden“. Biogas energetisch in einer Feuerung oder als Treibstoff verwertet.**

## 4 Schlussfolgerungen

Die Frage nach dem richtigen Entsorgungsweg für die untersuchten BAW hängt stark davon ab, welcher Zusatznutzen bei der Entsorgung erzeugt werden kann und somit auch welcher Strom Mix effektiv ersetzt wird. Zudem ist entscheidend wie die verschiedenen Umweltauswirkungen bewertet werden. Szenarien Analysen haben jedoch gezeigt, dass die Resultate in dem Sinne stabil sind, dass sich auch bei der Wahl eines anderen Strom Mix oder einer anderen Bewertungsmethode wohl tendenzielle, jedoch keine signifikanten Unterschiede ergeben. Für fast alle untersuchten Materialien gilt, dass die Abbaubarkeit der Materialien sich insgesamt im Vergleich zur Entsorgung in einer KVA nicht als Vorteil erweist. Diese Erkenntnis basiert auf folgenden Hauptgründen:

- Bei der Verbrennung in einer KVA wird als Zusatznutzen Wärme und Strom generiert. Dabei hat sich gezeigt, dass dieser Zusatznutzen grösser ist, als der Zusatznutzen der sich aus der Nutzung des Biogases bei einer Verwertung in einer Biogasanlage ergibt. Dies hängt einerseits davon ab, dass in einer Biogasanlage nicht 100% des Materials abgebaut wird und bei der Bildung von Biogas nicht nur Methan, sondern auch CO<sub>2</sub> entsteht, welches energetisch nicht genutzt werden kann. Diese Erkenntnis gilt auch für Materialien, die sich während der Verweilzeit in einer Biogasanlage gut abgebaut haben wie z.B. Celluloseacetat oder Karton.
- Das bei der Vergärung anfallende Gärsubstrat der untersuchten biologisch abbaubaren Materialien (mit Ausnahme des Palmblatts) bewirkt im Gegensatz zu Gärsubstrat aus Grüngut keine zusätzliche Humusbildung (Schleiss 2012) aufgrund fehlender strukturbildender Stoffe (lignin- oder wachshaltige Stoffe). Zudem verfügen die meisten der untersuchten BAW über keine oder nur eine geringe Düngerwirkung (Baier 2012). Entsprechend hat auch die Kompostierung keinen wesentlichen Mehrwert.

Für alle betrachteten biologisch abbaubare Materialien (PLA, Mater Bi, Celluloseacetat, Karton, Zuckerrohrfasern) mit Ausnahme des Palmblatts gelten folgende Erkenntnisse:

- Die Entsorgung in einer durchschnittlichen KVA hat tendenziell eine tiefere, mindestens jedoch eine vergleichbare Umweltbelastung wie die Entsorgung in Biogasanlagen.
- Die Entsorgung in einer Wärme optimierten KVA hat eine tendenziell bis signifikant tiefere Umweltbelastung als die Entsorgung in Biogasanlagen.

Für das Palmblatt gelten folgende Erkenntnisse:

- Die Gutschrift für die Förderung der Bodenstruktur hat einen wesentlichen Einfluss auf das Resultat.
- Die Entsorgung in Biogasanlagen weist vergleichbare bis tendenziell geringere Umweltbelastungen auf verglichen mit denjenigen einer Entsorgung in einer KVA.

Es gibt somit BAW, wie z.B. die untersuchten PLA Produkte, welche besser nicht in eine Biogasanlage gelangen sollten, da der Abbau ungenügend ist. Für diese ist die Verwertung in der KVA der ökologisch sinnvolle Entsorgungsweg.

Auch für die untersuchten, gut abbauenden BAW gilt, dass es aus ökologischer Sicht kein Nachteil ist, wenn diese anstatt in die Vergärung in die KVA gelangen. Je nach Art der KVA und des Materials kann diese sogar die ökologisch sinnvollere Entsorgung darstellen. Eine Ausnahme ist der untersuchte Palmblattteller, bei dem die Verwertung in einer Biogasanlage mit tendenziell geringeren Umweltauswirkungen verbunden ist, als denjenigen in einer durchschnittlichen schweizerischen KVA.

## 5 Literatur

### **Baier (2012)**

Baier U. (2012). Biogaspotential biologisch abbaubarer Werkstoffe. ZHAW, Institut für Biotechnologie, Fachstelle Umweltbiotechnologie. Im Auftrag der Carbotech AG

### **Dinkel et al. 2012**

Dinkel F., Zschokke M. und Schleiss K. (2012). Ökobilanzen zur Biomasseverwertung, Schlussbericht 20. April 2012, Bundesamt für Energie

### **Ecoinvent 2010**

ecoinvent 2010:Version 2.2, Swiss Center for Life Cycle Inventories. May 2010

### **Frischknecht et al. 2008**

Frischknecht, R., R. Steiner, und N. Jungbluth (2008). Ökobilanzen: Methode der ökologischen Knappheit – Ökofaktoren 2006. Methode für die Wirkungsabschätzung in Ökobilanzen, Öbu SR 28/2008.

### **Goedkoop 2000**

Goedkoop, M., The Eco-Indicator 1999. 2000: Amersfoort.

### **Guinée et al. 2002**

Guinée, J.B.; Gorrée, M.; Heijungs, R.; Huppes, G.; Kleijn, R.; Koning, A. de; Oers, L. van; Wegener Sleseswijk, A.; Suh, S.; Udo de Haes, H.A.; Bruijn, H. de; Duin, R. van; Huijbregts, M.A.J. Handbook on life cycle assessment. Operational guide to the ISO standards. I: LCA in perspective. IIa: Guide. IIb: Operational annex. III: Scientific background. Kluwer Academic Publishers, ISBN 1-4020-0228-9, Dordrecht, 2002, 692 pp.

### **ISO 2006a**

ISO 14040, in Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework. 2006: Geneva.

### **ISO 2006b**

ISO 14040, in Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines. 2006: Geneva.

### **Pladerer et al. 2008**

Pladerer C., Dehoust G. und Dinkel F. (2008). Ökobilanz von Mehrweg- und Einwegbechern an der Euro 08 im Auftrag der Umweltministerien DE, AT, CH.

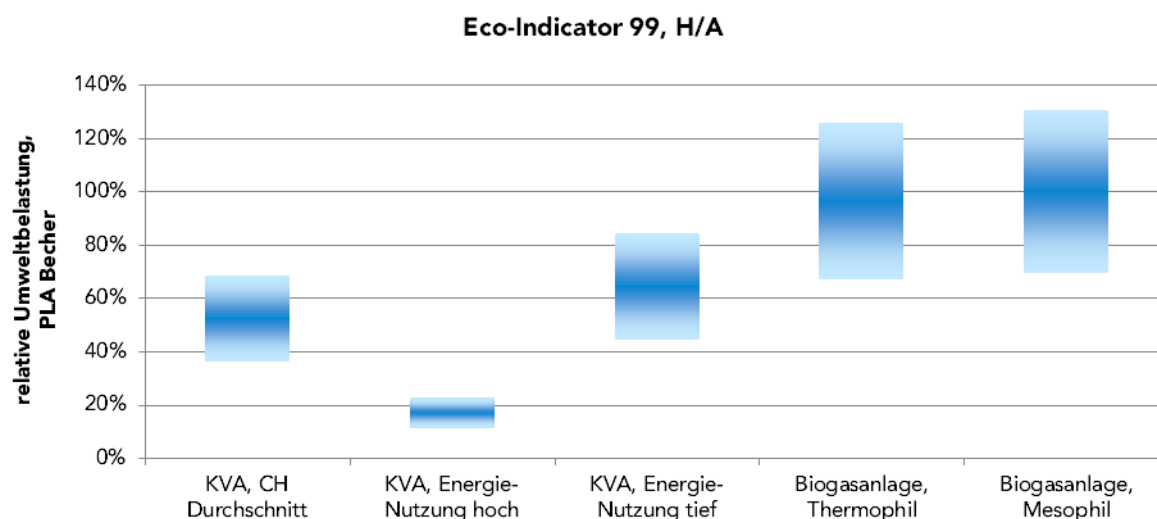
### **Rytec 2012**

Rytec (2012). Einheitliche Heizwert- und Energiekennzahlenberechnung der Schweizer KVA nach europäischem Standardverfahren – Resultate 2011, Bundesämter für Umwelt und Energie

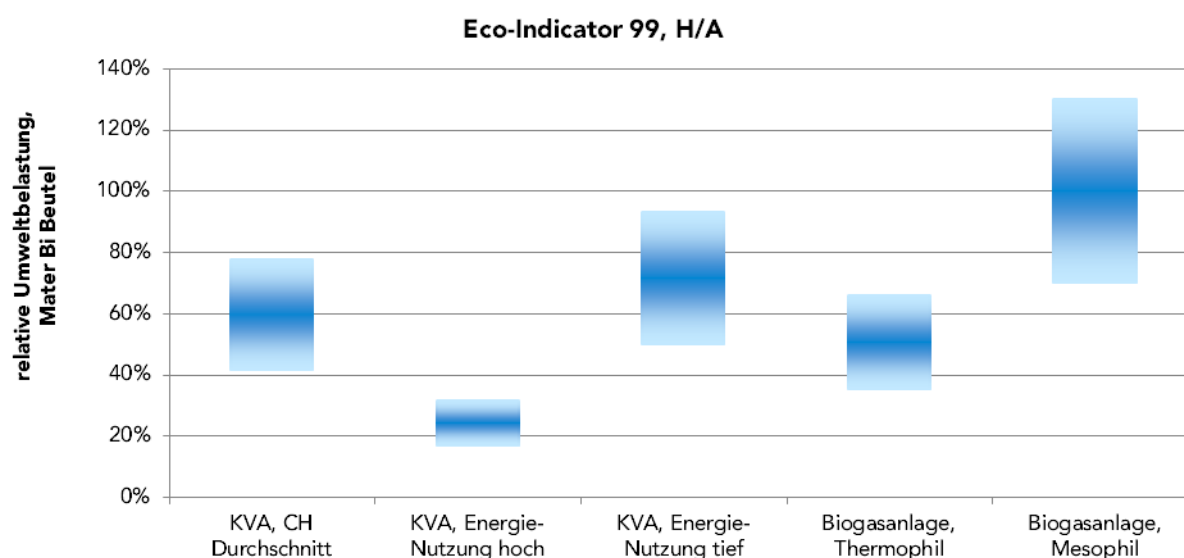
### **Schleiss 2012**

Persönliche Mitteilung von Dr. K. Schleiss, Fachmann im Bereich Grüngut-Verwertung, Umweko GmbH, Oktober 2012

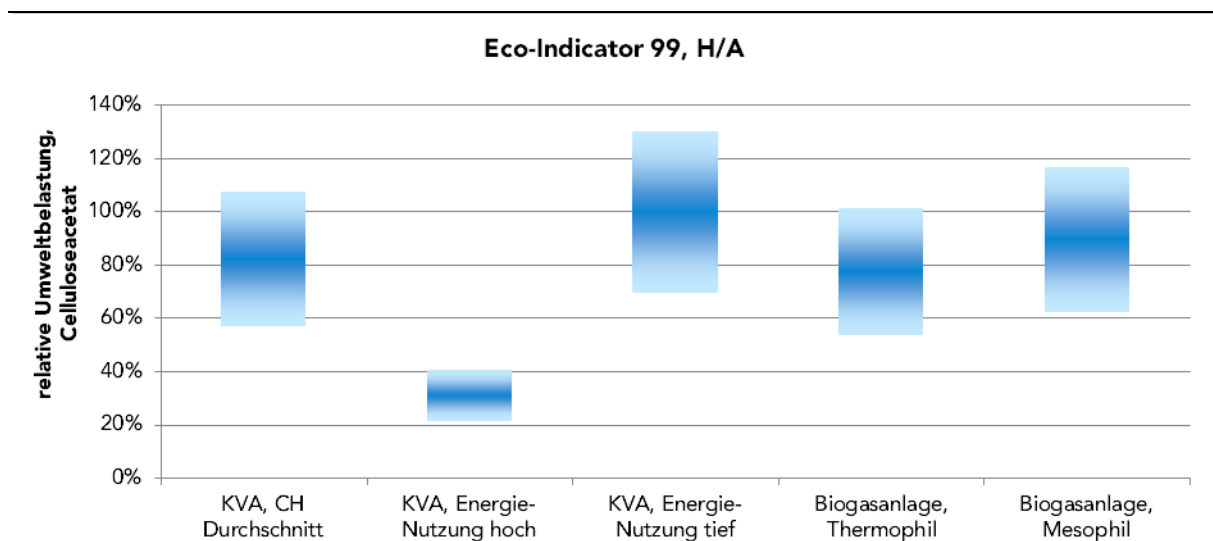
# Anhang: Resultate bewertet mit der Methode Eco Indikator 99 HA



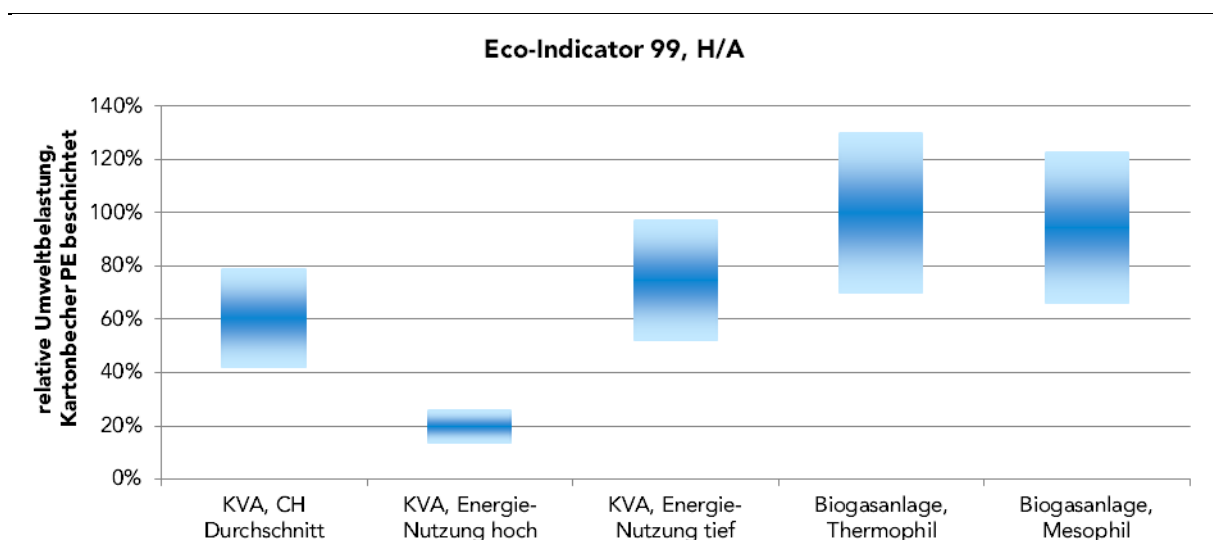
**Abbildung 30: Relative Umweltauswirkungen bewertet mit der Methode EI 99: Systemdarstellung nach „basket of benefits“ normiert auf das Maximum.** Die Ausdehnung der Balken gibt die Unsicherheiten der Resultate an.



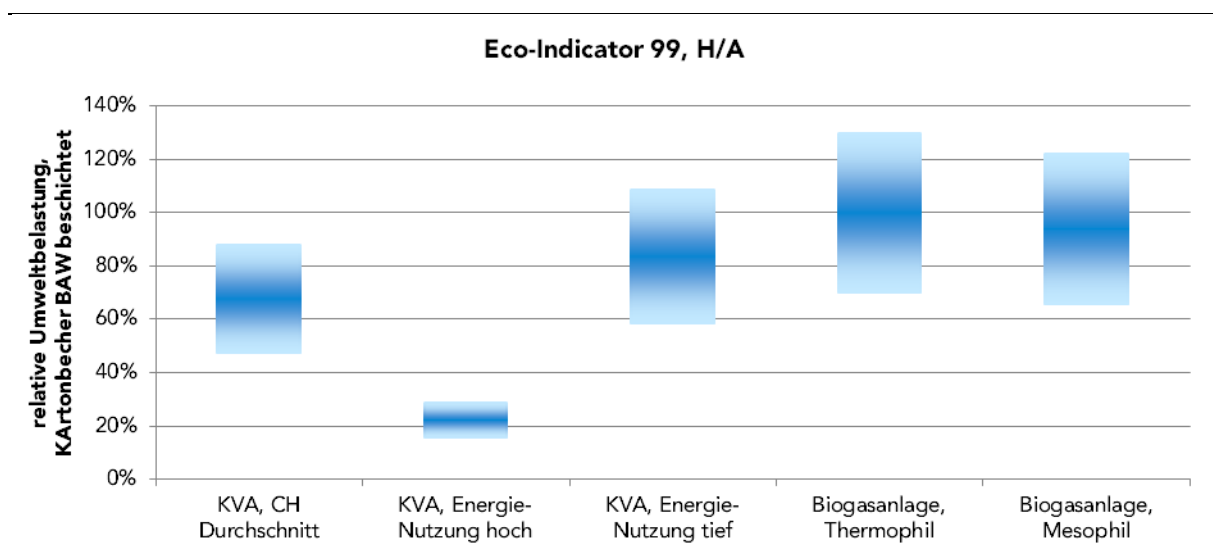
**Abbildung 31: Relative Umweltauswirkungen bewertet mit der Methode EI 99: Systemdarstellung nach „basket of benefits“ normiert auf das Maximum.** Die Ausdehnung der Balken gibt die Unsicherheiten der Resultate an.



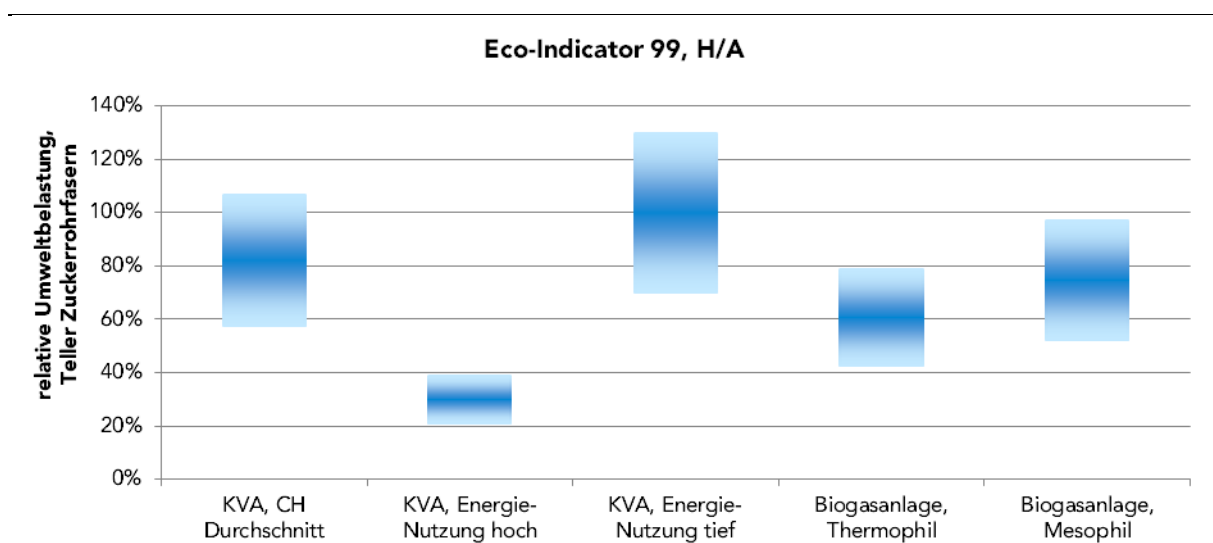
**Abbildung 32: Relative Umweltauswirkungen bewertet mit der Methode EI 99: Systemdarstellung nach „basket of benefits“ normiert auf das Maximum.** Die Ausdehnung der Balken gibt die Unsicherheiten der Resultate an.



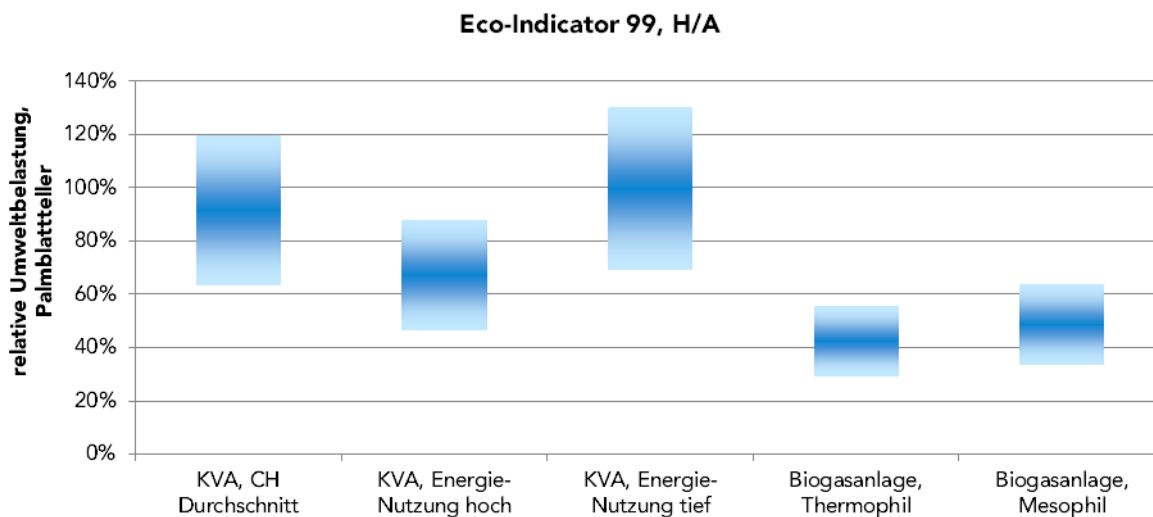
**Abbildung 33: Relative Umweltauswirkungen bewertet mit der Methode EI 99: Systemdarstellung nach „basket of benefits“ normiert auf das Maximum.** Die Ausdehnung der Balken gibt die Unsicherheiten der Resultate an.



**Abbildung 34: Relative Umweltauswirkungen bewertet mit der Methode EI 99: Systemdarstellung nach „basket of benefits“ normiert auf das Maximum.** Die Ausdehnung der Balken gibt die Unsicherheiten der Resultate an.



**Abbildung 35: Relative Umweltauswirkungen bewertet mit der Methode EI 99: Systemdarstellung nach „basket of benefits“ normiert auf das Maximum.** Die Ausdehnung der Balken gibt die Unsicherheiten der Resultate an.



**Abbildung 36: Relative Umweltauswirkungen bewertet mit der Methode EI 99: Systemdarstellung nach „basket of benefits“ normiert auf das Maximum.** Die Ausdehnung der Balken gibt die Unsicherheiten der Resultate an.

## **Anhang Vergärstudie (Baier 2012)**

Um die Frage der Abbaubarkeit und des zu erwartenden Methanertrags der untersuchten Materialien in Biogasanlagen zu beantworten, wurde die ZHAW Wädenswil (Baier 2012) beauftragt, in einem standardisierten Verfahren unter möglichst realen Bedingungen die Abbaubarkeit und den Methanertrag der Materialien zu ermitteln. Der hier angehängte Bericht beschreibt die Versuchsanordnung sowie die Resultate der ZHAW-Studie.



# Biogaspotential biologisch abbaubarer Werkstoffe



**Carbotech AG, Basel**

21.11.2012

ZHAW Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften  
IBT Institut für Biotechnologie  
Fachstelle Umweltbiotechnologie  
CH – 8820 Wädenswil

**Ansprechpartner:**

**Carbotech AG**  
Umweltprojekte und Beratung

Gasometerstrasse 9  
CH – 8005 Zürich

Thomas Kägi / +41 44 444 2017  
t.kaegi@carbotech.ch

[www.carbotech.ch](http://www.carbotech.ch)

**Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften**  
Dep. Life Sciences und Facility Management  
IBT Institut für Biotechnologie  
Fachstelle Umweltbiotechnologie  
Campus Reidbach  
CH – 8820 Wädenswil

Urs Baier / +41 58 934 5714  
urs.baier@zhaw.ch

[www.umweltbiotech.zhaw.ch](http://www.umweltbiotech.zhaw.ch)

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>AUFTRAG UND AUFGABENSTELLUNG .....</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>MATERIAL UND METHODEN.....</b>	<b>5</b>
2.1	GEMESSENE PARAMETER .....	6
2.2	BIOGASBILDUNGSVERSUCH .....	6
2.3	BERECHNUNGEN THEORETISCHEN BIOGAS- UND CH <sub>4</sub> -POTENTIALS .....	7
<b>3</b>	<b>ERGEBNISSE.....</b>	<b>8</b>
3.1	GEMESSENE PARAMETER .....	8
3.2	EXPERIMENTELLES GASBILDUNGSPOTENZIAL.....	9
3.3	ABBAUGRADE.....	13
3.4	OPTISCHE BEURTEILUNG DES ANAEROBEN ABBAUS.....	15
3.5	ANAEROBER ABBAUVERSUCH MIT GROSSEN STÜCKEN BEI RAUMTEMPERATUR .....	18
<b>4</b>	<b>SCHLUSSFOLGERUNGEN.....</b>	<b>21</b>

## **1 Auftrag und Aufgabenstellung**

Herkömmliche Plastiktüten, Wegwerfgeschirr sowie diverse Verpackungen werden aus fossilen Ressourcen hergestellt, die jedoch stets knapper werden. Biologisch abbaubare Werkstoffe (BAW) aus nachwachsenden Ressourcen sind eine denkbare ökologisch verträgliche Alternative dazu. Durch eine Entsorgung in einer Biogasanlage mit anschliessender Kompostierung lassen sich BAW energetisch und stofflich nutzen.

In den Folgend beschriebenen Versuchen wurden acht unterschiedliche biologisch abbaubare Werkstoffe auf ihre anaerobe Vergärbarkeit sowie ihren Nährstoffgehalt untersucht.

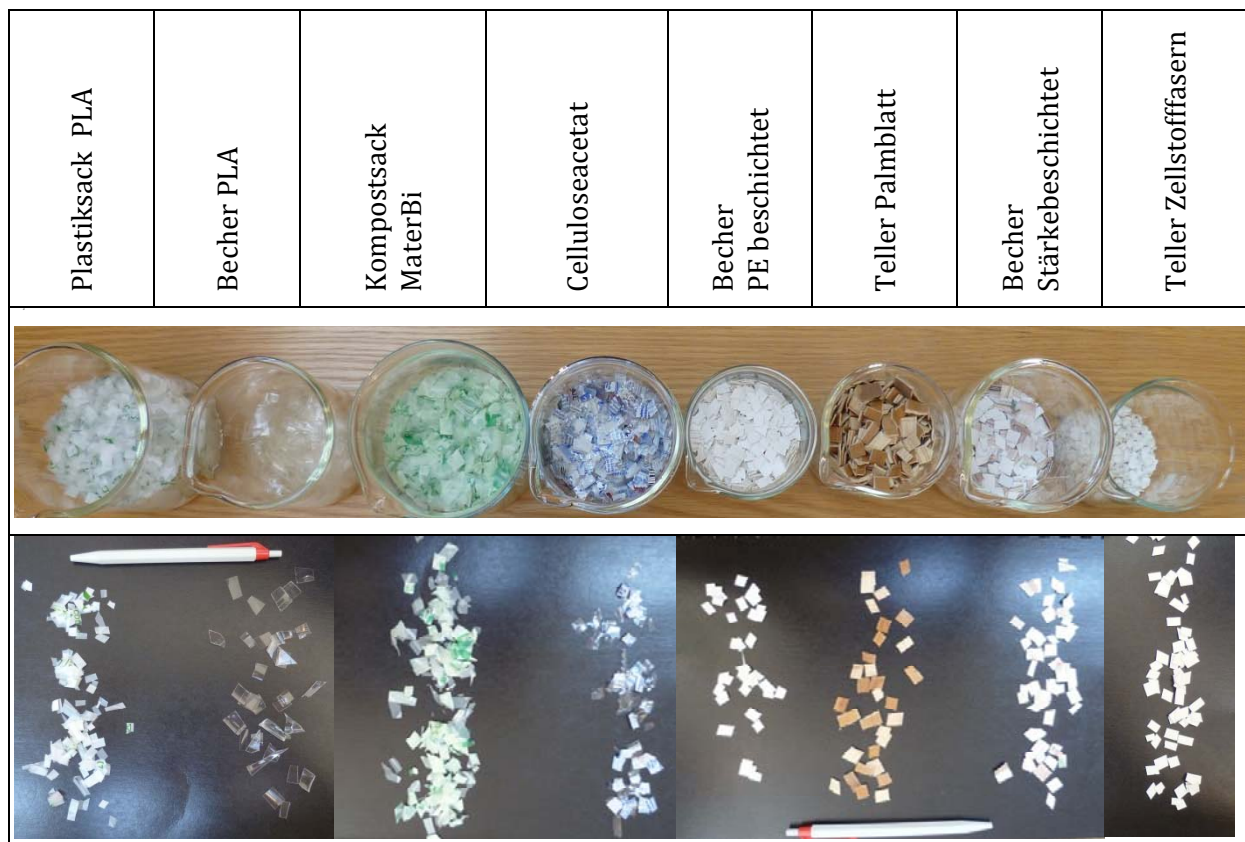
Zur Bestimmung ihres Biogaspotentials sind die unterschiedlichen BAW im Labor der Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften (ZHAW) in Wädenswil entsprechende Gasbildungsversuche durchgeführt worden. Zusätzlich wurde das Abbauverhalten von grossen BAW – Stücken mittels eines anaeroben Versuchs bei Raumtemperatur optisch bewertet.

## 2 Material und Methoden

Um abzuschätzen, ob und welche BAW sich für eine biologische Verwertung in einer Biogasanlage mit anschliessender Kompostierung eignen, wurden für acht BAW (Abbildung 1) folgende Tests, Messungen und Berechnungen durchgeführt:

- Experimentelles Gasbildungspotential mesophil und thermophil
- Elementanalyse vor und nach Vergärung (C, N, H, O, P, K)
- Abbaugrad inklusive C-Bilanz
- Optische Beurteilung der Vergärbarkeit

Vorgängig zu den Versuchen wurden die BAW zu Quadraten à ca. 5 \* 5 mm zerkleinert (Abbildung 1). Die Zerkleinerung entspricht einem akzeptablen Kompromiss zwischen der Realität auf Grossanlagen (Zerkleinerung durch Schredder auf Kantenlängen von 12 – 20 mm) und einer guten Benetzbarkeit und Einmischung im Laborversuch. Eine Vermahlung zu Mehl, wie sie zur Ermittlung der maximalen Abbaurrate angewandt werden kann, ist in der vorliegenden Fragestellung nicht zielführend.



**Abbildung 1: Untersuchte BAW.** Acht unterschiedliche BAW wurden auf unterschiedliche Kriterien untersucht, um abschätzen zu können, welche sich für die Verwertung in einer Biogasanlage eignen. Vorgängig zu den Versuchen wurden die BAW gleichmässig zerkleinert.

## 2.1 Gemessene Parameter

Um das Material zu charakterisieren wurden neben den klassischen Parametern, wie TS und oTS auch die Gewichtsanteile an Kohlenstoff, Wasserstoff, Stickstoff, Sauerstoff sowie Phosphor bestimmt. Die Gewichtsanteile von den Elementen C, H, N und O wurden mit einem TruSpec Macro Analyser, respektive einem TruSpec O Zusatzmodul gemessen. Phosphor und Kalium wurden mittels Röntgenfluoreszenzanalyse (Spectro Xepos Analyser) bestimmt.

## 2.2 Biogasbildungsversuch

Die Biogasbildungspotential-Versuche der acht BAW wurden in je drei parallelen Batch-Ansätzen in luftdichten, druckbeständigen Glasflaschen bei 37 °C und bei 55°C während mindestens 49 Tagen durchgeführt. Als Inokulum wurde Presswasser aus der mesophilen beziehungsweise thermophilen Biogasanlage in Inwil verwendet. Diese Impfkulturen zeichnen sich durch eine hohe anaerobe Aktivität aus und haben sich in Vergangenheit bewährt. Sie sind im Realbetrieb einem breiten Substratspektrum ausgesetzt, allenfalls sind sie bereits mit BAW in Kontakt gekommen und entsprechend adaptiert.

Die Batchansätze wurden kontinuierlich bei 90 rpm geschüttelt. Der entstehende Druck wurde regelmässig mittels eines digitalen Manometers registriert und gemäss der idealen Gasgleichung basierend auf der Gastemperatur im Kopfraum der Flasche auf Normvolumen Biogas pro kg oTS umgerechnet. Bei einem Maximaldruck um die 800-900 mbar wurde der Druck auf Umgebungsdruck ausgeglichen und die Gaszusammensetzung mittels eines Gasmessgerätes XAM-7000 (Dräger) bestimmt. Zusätzlich zu jedem Triplikat wurde eine pH Flasche angesetzt. Diese diente zur regelmässigen pH Kontrolle, um gegebenenfalls einer Versäuerung durch raschen Stärkeabbau rechtzeitig entgegenzuwirken.

Als Referenzsubstanz zur Überprüfung der Aktivität des Inokulums wurde ein Ansatz mit Zellulose durchgeführt. Zudem wurde in einem Ansatz die Hintergrund-Gasproduktion des dazugehörigen Inokulums bestimmt. Die Batch-Ansätze sind in [Tabelle 1](#) genau beschrieben.

**Tabelle 1: Batch-Ansätze, die je in Triplikaten plus einer pH-Kontrolle angesetzt wurden. Diese Ansätze wurden einmal mesophil und einmal thermophil inkubiert.**

Ansatz	Kontrolle	Zellulose	BAW (zerkleinert)
Inokulum <sup>1)</sup>	130 ml	130 ml	130 ml
Wasser <sup>2)</sup>	170 ml	170 ml	170 ml
Substrat	-	1 g Zellulose	3 g Celluloseacetat 4 g übrige BAW
Totalvolumen	300 ml	300 ml	300 ml

<sup>1)</sup> je nach Ansatz stammt das Inokulum aus einer thermophilen respektive mesophilen Biogasanlage.

<sup>2)</sup> Trinkwasser

### 2.3 Berechnungen theoretischen Biogas- und CH<sub>4</sub>-Potentials

Geht man davon aus, dass der gesamte Kohlenstoffanteil organischer Herkunft ist, lässt sich aus dem TS und dem C-Anteil das theoretische Biogasvolumen (NL/kg oTS) bei einem 100%-igen Abbau berechnen. Die Abbaugrade nach 14 und 21 Tagen, sowie der maximale Abbaugrad nach (x)-Tagen wurden über die experimentell ermittelte Biogasproduktion im Vergleich zum maximalen (bei einem 100%-igen) Abbau bestimmt.

### 3 Ergebnisse

#### 3.1 Gemessene Parameter

Die BAW weisen alle einen organischen Anteil von über 90% auf, abgesehen vom PE-beschichteten Becher und dem PLA Becher, deren oTS tiefer bei etwa 84% TS liegt. Der PE-beschichtete Becher weist hohe Anteile von Silizium und Magnesium auf. Die elementaren Zusammensetzungen der verschiedenen BAW sehen vergleichbar aus. Der Kompostsack MaterBi, sowie der PLA Plastiksack weisen relativ hohe C-Anteile von über 55% auf (Tabelle 2, Abbildung 2)

Die BAW, die auf die Nährstoffe Phosphor, Kalium und Stickstoff untersucht wurden, zeigen relativ geringe Werte. Lediglich das Palmblatt weist einen relativ hohen Kalium Gehalt von knapp 1% auf.

**Tabelle 2: Gemessene Parameter.** Die klassischen Parameter TS und oTS, sowie die gewichtsmässigen Anteile der Elemente C, O, H, N und P wurden aus allen BAWn bestimmt. Vier BAW weisen einen organischen Anteil (% TS) von weniger als 95% auf.

BAW	TS (%)	oTS (%TS)	oTS (%)	Anteil C (%)	Anteil H (%)	Anteil N (%)	Anteil O (%)	Anteil P (%)	Anteil K (%)	Rest(%)
Teller Zellstofffasern	94.50	99.72	94.24	43.55	6.15	0.25	56.33	0.0065	0.0039	0.37
Teller Palmblatt	91.21	94.47	86.16	44.65	5.55	0.59	47.23	0.0363	0.940	2.79**
Becher PE beschichtet	94.89	84.78	80.45	40.55	5.51	0.17	45.24	0.0033	0.0021	10.11*
Becher Stärke beschichtet	94.31	99.48	93.81	43.93	6.14	0.26	54.86	0.0042	0.0058	0.44
Becher PLA	99.70	83.94	83.68	49.35	5.45	0.30	46.20			
Kompostsack MaterBi	97.59	97.68	95.33	57.75	6.90	0.37	36.00	0.0115	0.0113	0.64
Plastiksack PLA	99.61	99.73	99.34	58.80	6.27	0.20	36.46			
Berliner Plastik Celluloseacetat	91.99	96.08	88.38	41.60	6.40	1.01	54.77			
Inokulum mesophil	7.16	51.94	3.72	27.95	3.34	2.42	26.58			
Inokulum thermophil	13.59	46.34	6.30	27.75	3.26	2.34	31.04			

Anteile in Gew.% TS

\* davon 5.19% Si und 4.58% Mg

\*\* davon 0.97% Si, 0.74%Cl, 0.48%Mg und 0.45% Ca.





**Abbildung 2: anorganischer Glührückstand nach glühen bei 550°C.**  
1= Plastiksack PLA, 2= Teller Zellstofffasern, 3= Becher Stärke beschichtet,  
4= Teller Palmblatt, 5= Becher PLA, 6= Becher PE beschichtet, 7= MaterBi

### 3.2 Experimentelles Gasbildungspotenzial

Die Gasbildungsversuche ([Abbildung 3](#) und [Abbildung 4](#)) scheinen einwandfrei funktioniert zu haben. Mittels einer mitgelaufenen pH-Flasche konnte der pH regelmässig kontrolliert und gegebenenfalls korrigiert werden. Somit ist eine Inhibierung der Mikroorganismen durch Versäuerung auszuschliessen. Zudem liegt der Abbaugrad der Zellulose bei über 50% und somit über dem geforderten Minimum. Es gibt grosse Unterschiede zwischen den unterschiedlichen BAW bezüglich der Biogasproduktion. Auch zeigt sich die Tendenz, dass sich unter thermophilen Bedingungen rascher und mehr Biogas aus den meisten Materialien bildet.

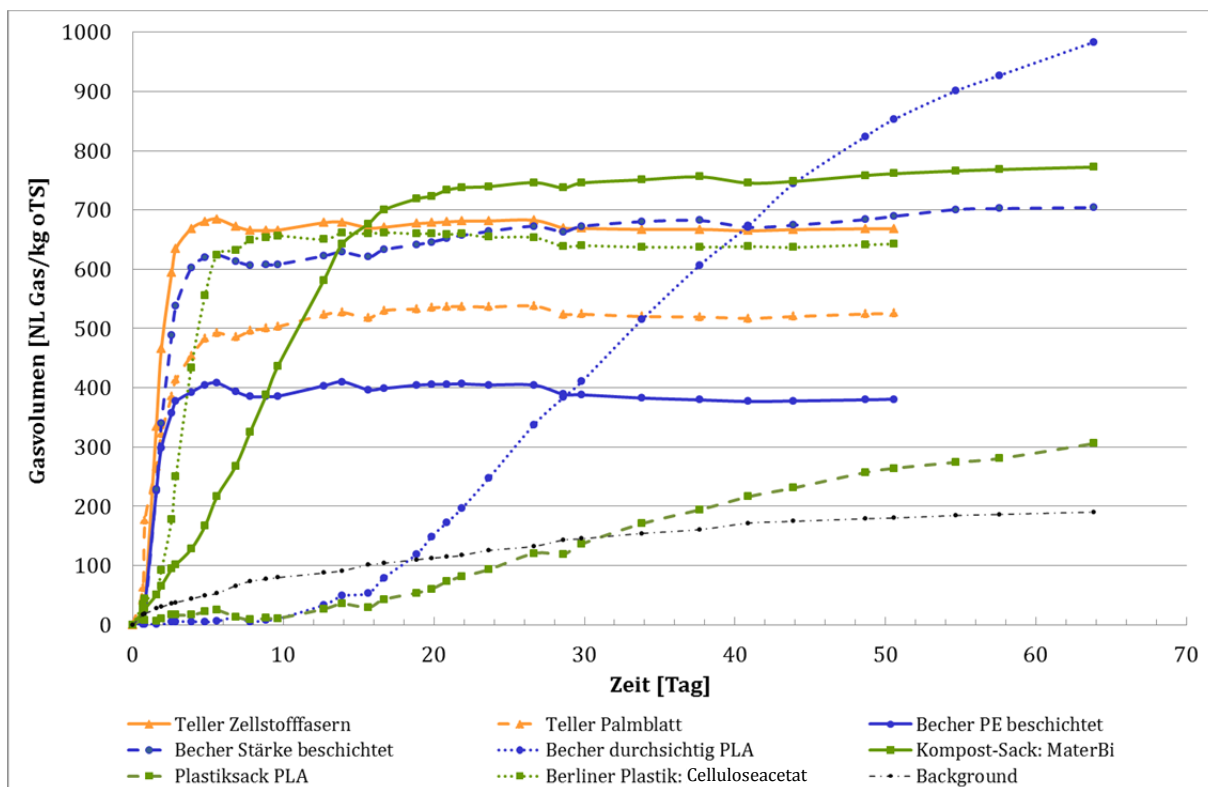


Abbildung 3: Zeitlicher Verlauf der thermophilen Biogasbildung in den Batchansätzen. Die Gasbildung des Hintergrunds ist bei den übrigen Verlaufskurven subtrahiert.

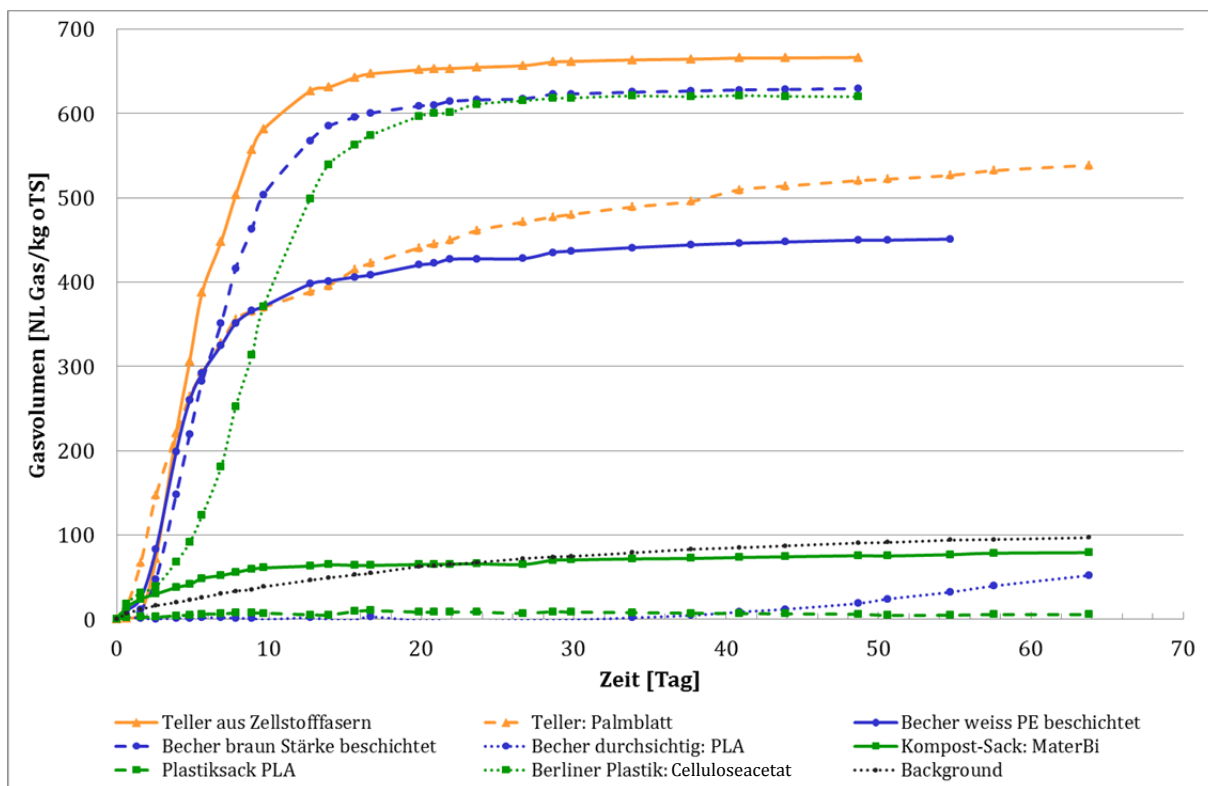


Abbildung 4: Zeitlicher Verlauf der mesophilen Biogasbildung in den Batchansätzen. Die Gasbildung des Hintergrunds ist bei den übrigen Verlaufskurven subtrahiert.

**Tabelle 3: Biogas und Methanproduktion der Gasbildungsversuche.** Die verschiedenen BAW zeigen unterschiedliche Biogasproduktionen, sowie unterschiedliche Gaszusammensetzungen. Zudem zeigen die thermophilen Abbauprobungen tendenziell eine raschere und zum Teil stark erhöhte Gasbildung.

BAW	Temperatur	NL/kg oTS	NL/kg TS	NL/kg FM	Maximal NL/kg oTS nach (x) Tagen	CH <sub>4</sub> /CO <sub>2</sub> *	NL CH <sub>4</sub> /kg oTS	NL CH <sub>4</sub> /kg TS	NL CH <sub>4</sub> /kg FM
Teller Zellstofffasern	37°C	653.1	651.3	615.5	666.6 (49)	57 : 43	372.3	371.2	350.8
	55°C	679.3	677.4	640.2	682.6 (27)	62 : 38	421.2	420.0	396.9
Teller Palmblatt	37°C	445.2	420.6	383.6	538.7 (64)	60 : 40	267.1	252.4	230.2
	55°C	527.1	497.9	454.2	537.7 (27)	61 : 39	321.5	303.7	277.0
Becher PE beschichtet	37°C	422.3	358.0	339.7	451.1 (55)	68 : 32	287.1	243.4	231.0
	55°C	410.0	347.6	329.9	410.0 (14)	61 : 39	250.1	212.0	201.2
Becher Stärke beschichtet	37°C	610.1	606.9	572.4	629.7 (49)	65 : 35	396.6	394.5	372.0
	55°C	628.8	625.5	589.9	704.1 (64)	61 : 39	383.6	381.6	359.8
Becher PLA	37°C	-1.3	-1.1	-1.1	52.2 (64)	--	--	--	--
	55°C	48.4	40.6	40.5	983.2 (64)	65 : 35	31.5	26.4	26.3
Kompostsack MaterBi	37°C	65.2	63.7	62.2	79.2 (64)	64 : 36	41.7	5.3	39.8
	55°C	642.5	627.6	612.4	772.4 (64)	60 : 40	385.5	376.5	367.5
Plastiksack PLA	37°C	8.5	8.5	8.4	10.3 (17)	63 : 37	5.4	5.3	5.3
	55°C	35.1	35.0	34.9	305.6 (64)	63 : 37	22.1	22.0	22.0
Berliner Plastik Celluloseacetat	37°C	600.5	576.9	530	621.4 (41)	55 : 45	330.3	317.3	291.9
	55°C	660.7	634.8	583.9	661.9 (17)	61 : 39	403.0	387.2	356.2

Die NL Biogas, sowie die NL Methan, beziehen sich auf die Referenzzeiten für mesophile Vergärung 21 Tage, für thermophile Vergärung 14 Tage, sofern nicht anders angegeben.

\* gemessenes CH<sub>4</sub>/CO<sub>2</sub> Verhältnis um Tag 14 respektive Tag 21.

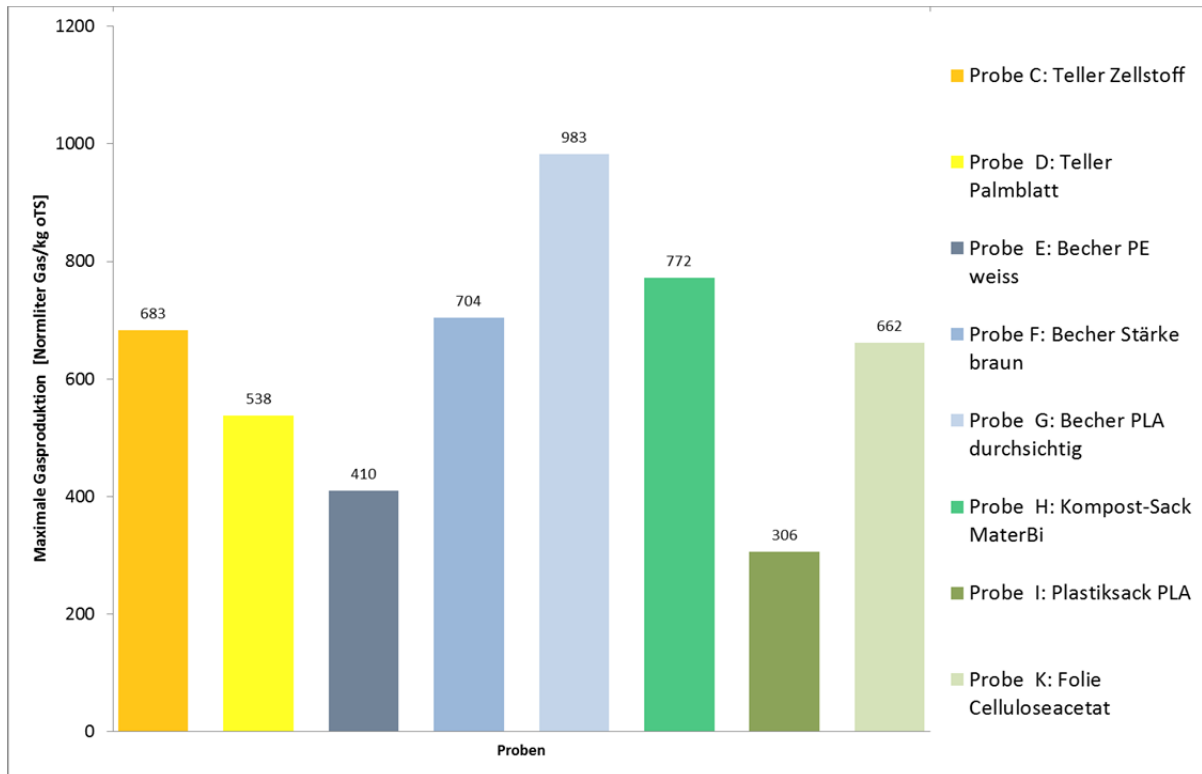


Abbildung 5: Maximale thermophile Biogasbildung in den Batchansätzen. Die Gasbildung des Hintergrunds ist bei den übrigen Verlaufskurven subtrahiert.

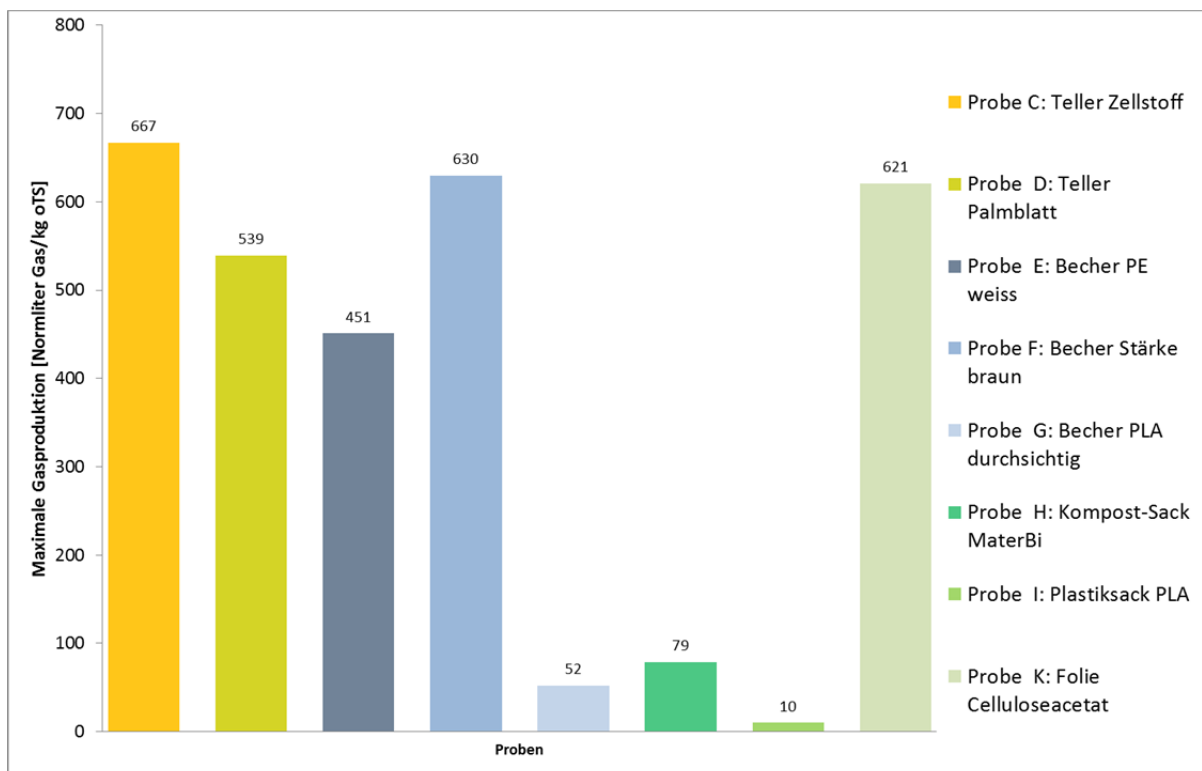


Abbildung 6: Maximale mesophile Biogasbildung in den Batchansätzen. Die Gasbildung des Hintergrunds ist bei den übrigen Verlaufskurven subtrahiert.

### 3.3 Abbaugrade

Sowohl die Abbaugrade zu bestimmten Zeitpunkten, als auch die maximalen Abbaugrade, berechnet über die Biogasproduktion variieren zwischen den unterschiedlichen Biokunststoffen stark. Tendenziell zeigt sich, dass der thermophile Abbau rascher ist, sowie zum Teil stark erhöhte maximale Abbaugrade erzielt (Tabelle 4). Die BAW PLA-Becher, MaterBi Kompostsack sowie PLA Plastikbeutel, lassen sich mesophil kaum bis gar nicht abbauen innerhalb von 64 Tagen. Der PLA-Becher und Beutel zeigten auch unter thermophilen Bedingungen sehr geringe Abbaugrad nach den für thermophile Vergärungen üblichen 14 Tagen. Jedoch stiegen diese bei längerer Versuchsdauer stark an.

**Tabelle 4: Abbaugrad nach 14 und 21 Tagen, sowie der maximale Abbaugrad nach x-Tagen.** Die Abbaugrade wurden über die experimentell ermittelte Biogasproduktion im Vergleich zum theoretisch maximalen (100%-igen) Abbau bestimmt.

BAW	Theoretisch bei 100% C-Abbau (NL/ kg oTS)	Theoretisch bei 100% C-Abbau (NL/ kg TS)	Temperatur	Abbaugrad nach 14 Tagen	Abbaugrad nach 21 Tagen	Maximaler Abbaugrad nach (x) Tagen
Teller Zellstofffasern	815	813	37°C	77.4	80.1	81.8 (49)
			55°C	83.3	83.4	83.8 (27)
Teller Palmblatt	882	833.5	37°C	44.9	50.5	61.1 (41)
			55°C	59.7	60.8	61.0 (27)
Becher PE beschichtet	893	757	37°C	45.0	47.3	50.5 (55)
			55°C	45.9	45.5	45.9 (14)
Becher Stärke beschichtet	824	820	37°C	71.0	74.0	76.4 (49)
			55°C	76.3	79.1	85.4 (55)
Becher PLA	1098	921	37°C	-0.1	-0.1	4.8 (41)
			55°C	4.4	15.7	89.6 (55)
Kompostsack MaterBi	1104	1078	37°C	5.9	5.9	7.2 (41)
			55°C	58.2	66.4	70.0 (55)
Beutel PLA	1101	1097	37°C	0.5	0.8	0.9 (17)
			55°C	3.2	6.6	27.8 (41)
Celluloseacetat	808	777	37°C	66.7	74.3	76.8 (41)
			55°C	81.7	81.4	81.9 (17)

**Tabelle 5: Der maximal erzielte Abbaugrad wurde zum einen über die Biogasproduktion berechnet zum andern über die Kohlenstoffbilanz.**

BAW	mesophil		thermophil	
	Maximaler Abbaugrad via Gasbildungsversuch	Abbaugrad via Kohlenstoffanalyse vor und nach Gasbildungsversuch	Maximaler Abbaugrad via Gasbildungsversuch	Abbaugrad via Kohlenstoffanalyse vor und nach Gasbildungsversuch
Teller: Zellstofffasern	81.8	90.4	83.8	102.6
Palmblatt	61.1	74.0	61.0	65.8
weisser Becher: PE beschichtet	50.5	60.5	45.9	64.0
Brauner Becher: Stärke beschichtet	76.4	86.4	85.4	97.2
durchsichtiger Becher: PLA	4.8	6.9	89.6	103.5
Kompost Sack: MaterBi	7.2	-0.8	70.0	86.5
Plastiksack: PLA	0.9	9.0	27.8	41.5
Berliner Plastik: Celluloseacetat	76.8	96.5	81.9	108.3

Die Tendenzen der zwei Bestimmungsmethoden stimmen überein. Jedoch liegt der Abbaugrad der BAW, der über die Kohlenstoff-Bilanz berechnet wurde zwischen 8 und 30 % höher als jener berechnet über die Gasbildung. Es wird empfohlen, die Abbaugrade aus den Gasbildungsversuchen für weitere Berechnungen zu verwenden.

### 3.4 Optische Beurteilung des anaeroben Abbaus

Nach den Gasbildungsversuchen wurde pro Versuchsansatz der Inhalt einer Batchflasche über ein Kunststoffsieb ( $\varnothing = 1 \text{ mm}$ ) gegossen und mit Wasser gewaschen. Dabei waren bei einigen Ansätzen von Auge noch deutlich Rückstände der BAW – Stücke zu erkennen. Nach der mesophilen Vergärung waren bei allen Ansätzen, ausser bei jenem mit dem Zellstofffaser-Teller von Auge deutlich erkennbare Reste der BAW – Stücke zu erkennen ([Abbildung 7](#)). Bei den thermophilen Versuchen hingegen waren lediglich bei den Ansätzen mit dem PLA Plastiksack, der Folie aus Celluloseacetat, dem PE-beschichteten Becher sowie dem Palmblatt noch Substratrete festzustellen ([Abbildung 8](#)).

Mesophil

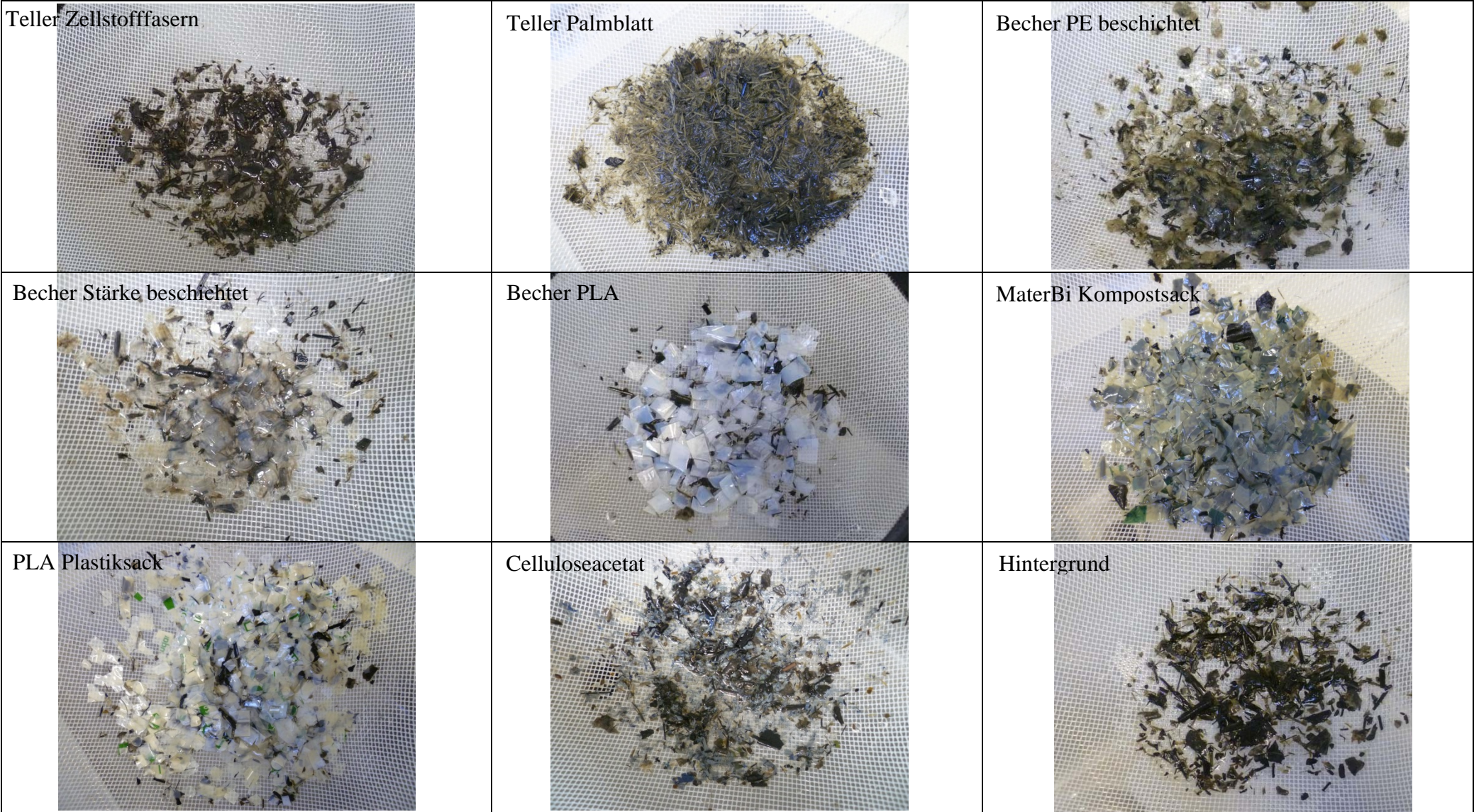


Abbildung 7: Übriggebliebenes, nicht abgebautes Material nach sechs bis sieben-wöchiger mesophiler Vergärung.



**Thermophil**

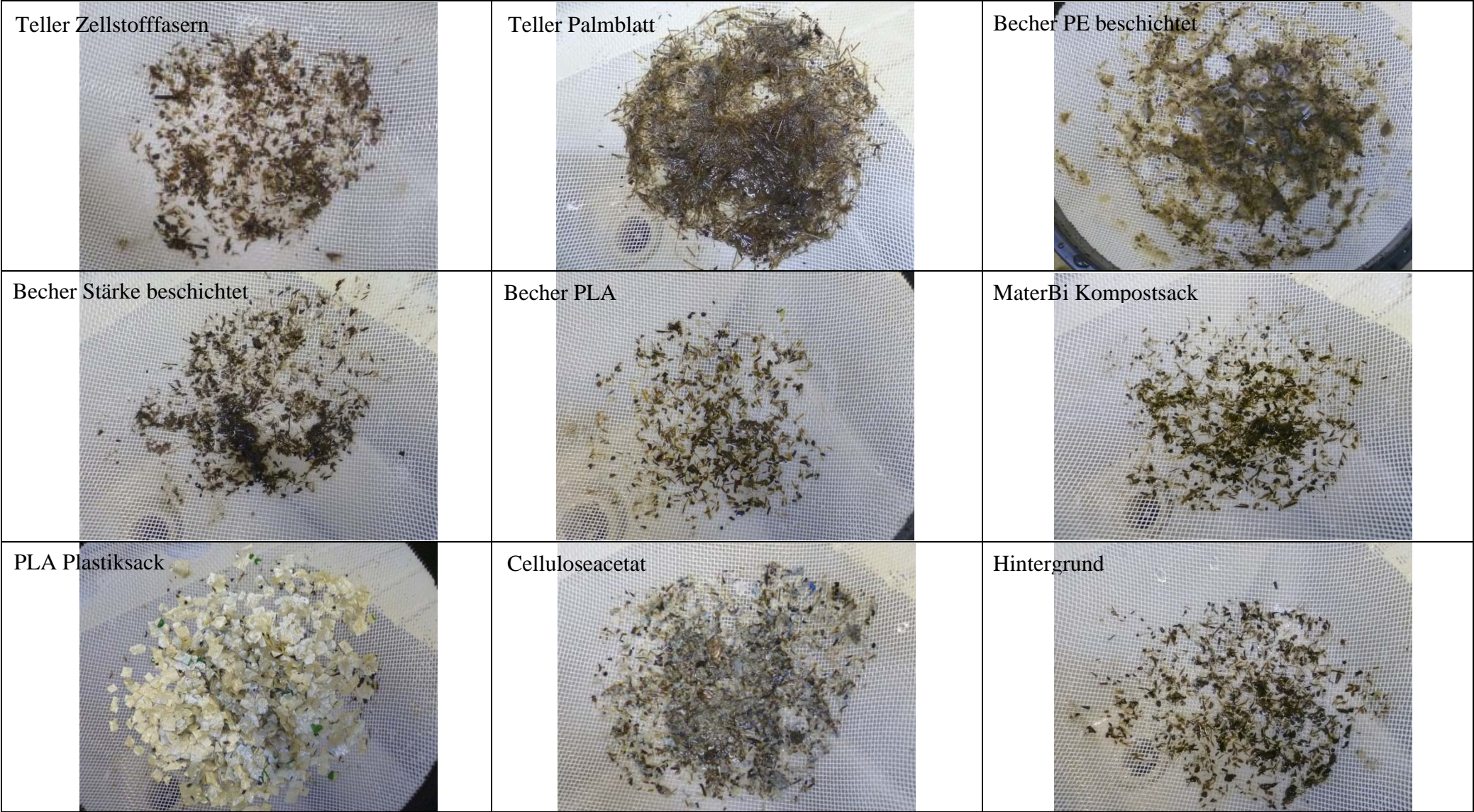


Abbildung 8: Übriggebliebenes, nicht abgebautes Material nach sechs bis sieben-wöchiger thermophiler Vergärung.

### 3.5 Anaerober Abbaueversuch mit grossen Stücken bei Raumtemperatur

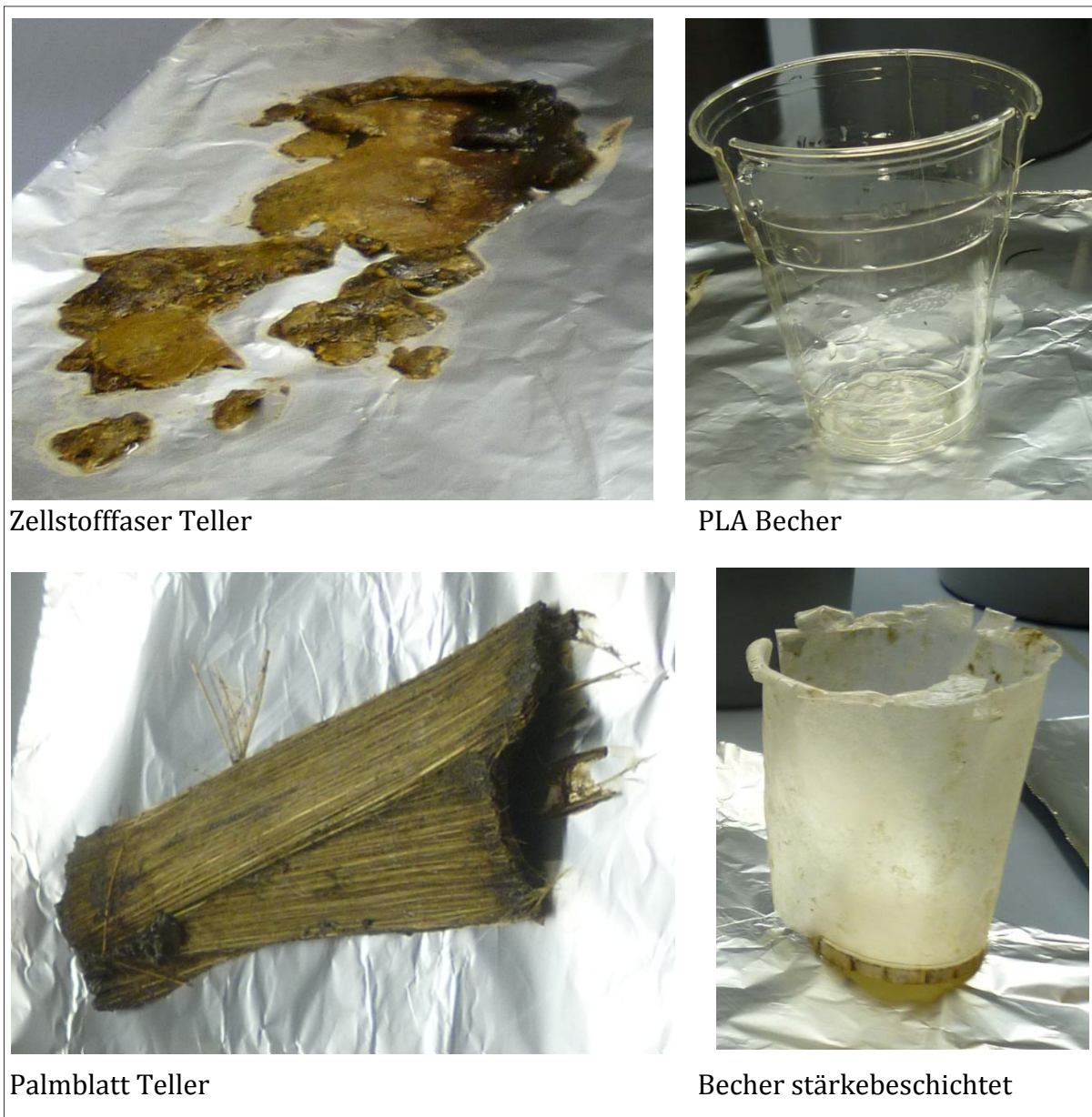
Die Zerkleinerung auf eine Grösse von 5 mm x 5 mm ist zwar sehr geeignet für den durchgeführten Laborversuch. In realen Biogasanlagen wird jedoch mit gröberen Stücken gearbeitet. Erste Informationen, wie sich die unterschiedlichen BAW in einer Biogasanlage verhalten könnten, konnte ein anaerober Versuch über 6 Wochen bei Raumtemperatur geben.



**Abbildung 9: BAW Stücke vor dem anaeroben Abbaueversuch bei Raumtemperatur, während dem Versuch und nach dem Versuch.** Die drei Folien wurden mit einem Kabelbinder aufgespiesst, damit sie nicht oben aufschwimmen und auch nicht zusammenkleben.

Die optische Bewertung dieses Abbauversuches zeigt deutlich, dass die einen BAW sehr geeignet zu sein scheinen für eine Verwertung in einer Biogasanlage, während andere eher weniger geeignet sind.

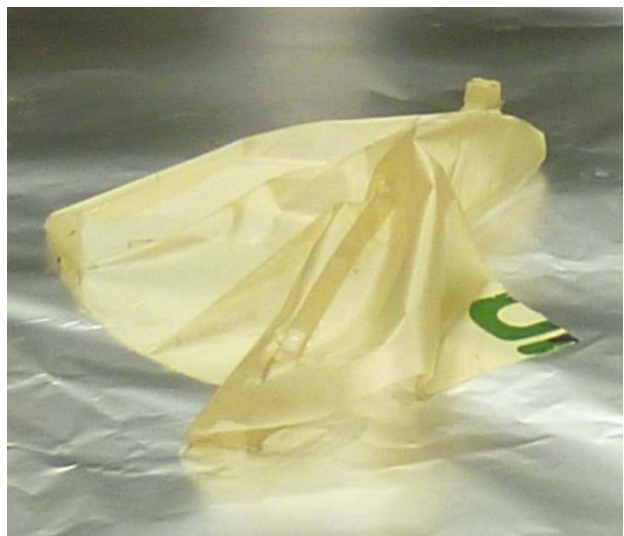
Der Zellstofffaser Teller, der Stärke beschichtete Becher, der PE-beschichtete Becher, sowie die Celluloseacetat Berliner Verpackung werden gut abgebaut, während der PLA Becher, der PLA Plastiksack sowie der MaterBi Kompostsack kaum abgebaut wurden [Abbildung 9](#). Genauere Aufnahme der vergärten Stücke sind in [Abbildung 10](#) und [Abbildung 11](#) dargestellt.



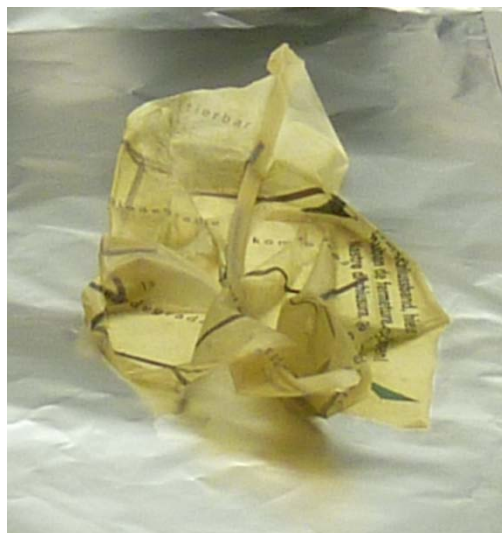
**Abbildung 10: Detailaufnahme der BAW - Stücke nach der 6 wöchigen anaeroben Vergärung.**



Becher PE-beschichtet



PLA Plastiksack



MaterBi Kompostsack



Celluloseacetat Berliner Verpackung

**Abbildung 11: Detailaufnahme der BAW - Stücke nach der 6 wöchigen anaeroben Vergärung.**

## 4 Schlussfolgerungen

### Schlussfolgerungen Abbau & Biogasproduktion

- Die diversen BAW weisen stark unterschiedliche Gasbildungsverläufe sowie unterschiedliche Abbaugrade und Abbauraten auf. Eine Pauschalaussage zur anaeroben Abbaubarkeit von BAW ist nicht möglich.
- Die Biogaserträge der meisten untersuchten BAW sind beachtlich und im Vergleich mit anderen Substraten im mittleren bis oberen Bereich anzusiedeln. Sie liegen beim mesophilen Abbau zwischen 450 und 650 NL/ kg oTS, beim thermophilen Abbau zwischen 500 und 800 NL/ kg oTS
- Generell zeigen die thermophilen Versuche (55 °C) wie zu erwarten einen rascheren Abbau und höhere Biogas-Erträge, als die mesophilen (37 °C).
- Wenige Materialien (PLA Becher, PLA Plastiksack, MaterBi Kompostsack) wurden mesophil während 64 Tagen kaum abgebaut. Es handelt sich hier möglicherweise oder gesichert um Blends von Materialien mit biogenem und fossilem Hintergrund. Der fossile Anteil (in MaterBi: 30 – 70 % PE) bringt dabei eine verminderte Abbaubarkeit mit sich, welche durchaus auch überproportional zu seinem Anteil sein kann, da durch die Mischung die Zugänglichkeit des biogenen Anteils herab gesetzt werden kann.
- Lediglich ein Material (PLA Plastiksack) wurde thermophil während 64 Tagen kaum abgebaut. Auch hier ist möglich, dass es sich um einen Blend mit fossilem Anteil handelt.
- Die mesophilen Abbaugrade nach 21 Tagen liegen für die gut abbaubaren Materialien im Bereich zwischen 47 – 80 %. Die terminalen mesophilen Abbaugrade steigen nach 40 – 50 Tagen nur noch unwesentlich. Einzig beim Palmblatt ist ein längerfristig wesentlich besserer Abbau fest zu stellen. Dies kann auf den erhöhten Anteil an nativen oder nur schwach aufgeschlossenen Fasern zurückgeführt werden.

- Die thermophilen Abbaugrade nach 14 Tagen liegen für die gut abbaubaren Materialien im Bereich zwischen 46 – 83 %. Die terminalen thermophilen Abbaugrade steigen nach 20 – 55 Tagen nur noch unwesentlich. Bei den beiden PLA Materialien ist ein längerfristig (mehrere Wochen) wesentlich besserer Abbau fest zu stellen als innerhalb der ersten 14 Tage.
- Zwei BAW Materialien, der PLA Becher sowie der PE beschichtete Becher weisen einen relativ hohen anorganischen Anteil von 15 – 15 % d.TR auf. Der mineralische Anteil wurde in der vorliegenden Studie nicht weiter analysiert.

## Methodische Schlussfolgerungen

- Die Verkleinerung auf Quadrate mit der Kantenlänge 5 mm ist eine sinnvolle Grösse für die durchgeführten Laborversuche.
- Alle untersuchten BAW lassen sich gut ins wässrige Inokulum einmischen und schwimmen weder auf, noch sedimentieren sie oder kleben an Wänden oder am Boden.
- Die gewählten Inokuli der Biogasanlage Inwil sind für den mesophilen beziehungsweise thermophilen Gasbildungsversuch geeignet.
- Die optische Beurteilung des gesiebten und gewaschenen Gärgutes gibt gute Hinweise auf die Abbaubarkeit der Materialien. So sind nach der mesophilen Vergärung überall noch Reste der BAW – Materialien zu erkennen. Hingegen sind nach den thermophilen Versuchen lediglich bei den Versuchen mit dem PLA-Plastik, dem Celluloseacetat, dem PE-beschichteten Becher sowie dem Palmblatt noch Materialreste festzustellen.
- Verschieden Faktoren wirkten zusammen und führten dazu, dass der Abbaugrad berechnet über die Biogasbildung 8 – 30% tiefer liegt als derjenige berechnet über die Kohlenstoffbilanz.
  - Die gewählten Inokuli eigneten sich bestens für die Gasbildungsversuche, jedoch erschwerten sie die C-Bilanz durch ihre relativ hohe C-Fracht stark.
  - Das Homogenisieren einiger BAW mittels einer Kugelmühle war nicht möglich.
  - Ebenfalls war die Homogenisierung einiger Gärgüter mit unvollständig abgebauten Plastikstücken kaum möglich.
  - Es war schwierig einen gesamten Batch einer vergärten Probe für die End-C-Bestimmung aus der Versuchsflasche zu gewinnen. Dies mag wohl einer der Hauptgründe für die Überschätzung des Abbaugrades über die C-Bilanz sein.

Folgende mögliche Gründe für eine Unterschätzung des Abbaugrades, berechnet über die Biogasbildung werden als minimal betrachtet.

- Kopfvolumen Zunahme durch Wasserverdampfung
- Undichtigkeit der Ventile und Gefässe
- Gasverlust zu Beginn des Versuches während Temperaturangleich (1h)