

Carbotech AG
Postfach
CH-4002 Basel

T +41 61 206 95 25
F +41 61 206 95 26

www.carbotech.ch



Bericht

Ökologischer Nutzen des PE-Folien-Recyclings Schweiz (Landwirtschaft, Industrie und Gewerbe)



Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt Schweiz (BAFU)
Sur mandat de l'Office fédéral de l'environnement (OFEV)
Su mandato dell'Ufficio federale dell'ambiente (UFAM)

in Kooperation mit InnoPlastics Schweiz, Eschlikon

282.10
Basel, Januar 2012

Impressum

Auftraggeber: Bundesamt für Umwelt (BAFU), Abt. Abfall, Stoffe, Biotechnologie, CH-3003 Bern
Das BAFU ist ein Amt des Eidg. Departements für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK).

Auftragnehmer: Carbotech AG, Basel

Autor/Autorin: Dr. Fredy Dinkel (Projektleitung), Cornelia Stettler, Ruben Miranda

Begleitung BAFU: Dr. Michel Monteil, Susan Glättli

Titelfoto: Susan Glättli, BAFU

Hinweis: Dieser Bericht wurde im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) verfasst. Für den Inhalt ist allein der Auftragnehmer verantwortlich.

Mentions légales

Mandant: Office fédéral de l'environnement (OFEV), division déchets, substances et biotechnologie], CH-3003 Berne

L'OFEV est un office du Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication (DETEC).

Mandataire: Carbotech AG, Basel

Auteur: Dr. Fredy Dinkel (chef de projet), Cornelia Stettler, Ruben Miranda

Accompagnement OFEV: Dr. Michel Monteil, Susan Glättli

Photo de couverture: Susan Glättli, OFEV

Remarque: Le présent rapport a été réalisé sur mandat de l'OFEV. Seul le mandataire porte la responsabilité de son contenu.

Nota editoriale

Mandante: Ufficio federale dell'ambiente (UFAM), divisione rifiuti, sostanze, biotecnologia, CH-3003 Berna
L'UFAM è un Ufficio del Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e delle comunicazioni (DATEC).

Mandatario: Carbotech AG, Basel

Autore: Dr. Fredy Dinkel (responsabile di progetto), Cornelia Stettler, Ruben Miranda

Consulenza UFAM: Dr. Michel Monteil, Susan Glättli

Foto di copertina: Susan Glättli, UFAM

Nota: il presente rapporto è stato redatto su mandato dell'Ufficio federale dell'ambiente (UFAM). La responsabilità dei contenuti è interamente del mandatario.

Freigabe BAFU: 22. März 2012

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..

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	2
Glossar	4
Zusammenfassung	6
<i>Résumé</i>	17
Auftrag und Zielsetzung	29
1 Vorgehen und Methodik	30
1.1 Allgemeine Beschreibung der Ökobilanzierung	30
1.2 Vorgehen bei der Ökobilanzierung	30
1.3 Zielsetzung und Rahmenbedingungen	32
1.3.1 Fragestellungen	32
1.3.2 Verwertungsszenarien	32
1.3.3 Vergleichsbasis, die "Funktionelle Einheit"	33
1.3.4 Systemgrenzen	33
1.3.5 Stoffflüsse PE-Folien Recycling - Allokation	35
1.3.6 Systemerweiterung	37
1.4 Sachbilanz	39
1.4.1 Grundlage	39
1.4.2 Datenherkunft	39
1.4.3 Annahmen und Berechnungsgrundlagen	40
1.5 Bestimmung der Umweltauswirkungen (Wirkbilanz)	40
1.5.1 Kumulierter Energieaufwand (KEA)	41
1.5.2 Treibhauspotential - Global Warming Potential (GWP)	42
1.6 Bewertung der Umweltbelastungen	42
1.6.1 Methode Ökologische Knappheit 2006 ("Umweltbelastungspunkte" - UBP)	42
1.6.2 ReCiPe	43
1.7 Grenzen der vorliegenden Untersuchung	43
1.7.1 Inhaltlich	43
1.7.2 Methodisch	43
1.8 Unsicherheit und Signifikanz	44
1.9 Sensitivitätsanalysen	44
2 Vergleichsbasis und Datengrundlagen	46
2.1 Referenzsystem und Basisszenario PE Recycling	47
2.2 Relevanzanalyse	48
2.2.1 R-PE Herstellung	48
2.2.2 R-PE Herstellung inkl. Entsorgung	51
2.2.3 Verölung und Verwertung im Zementwerk	52
2.3 Sensitivitätsanalysen	53
2.3.1 R-PE ersetzt neues PE nicht zu 100%	55
2.3.2 Variation der Wärme- und Strombereitstellung der KVA	55
2.3.3 Variation der Materialverluste PE-Recycling (Entsorgung PE-Abfälle und Papier)	57
2.3.4 Recycling von Folien aus LLDPE	57
2.3.5 Variation der Stromeffizienz bei der Aufbereitung	57
2.3.6 Logistik	57
2.3.7 Anzahl Recyclingzyklen	57
2.3.8 Zusammenfassung der untersuchten Sensitivitäten	58
3 Öko-Effizienz	59
4 Ergebnisse	63

4.1	Verwertungsarten im Basisszenario	63
4.1.1	Kumulierter Energieaufwand, nicht erneuerbar (KME)	65
4.1.2	Klimarelevante Auswirkungen	65
4.1.3	ReCiPe	66
4.1.4	Ökologische Knappheit (UBP 2006)	67
4.1.5	Schlussfolgerung	68
4.2	Sensitivitätsanalysen	69
4.2.1	Szenario – R-PE ersetzt neues PE nicht zu 100%	69
4.2.2	Variation der Strom- und Wärmebereitstellung der KVA	70
4.2.3	Variation der zu entsorgenden Mengen an PE- und Papier	73
4.2.4	Folien aus LLDPE (Folien für Silage)	73
4.2.5	Variation der Stromeffizienz	75
4.2.6	Schlussfolgerungen	75
4.3	Ergebnisse Öko-Effizienz	77
4.3.1	Portfolio Darstellung der Öko-Effizienz	77
4.3.2	Kennzahlen Darstellung der Öko-Effizienz	79
5	Schlussfolgerungen und Empfehlungen	81
5.1	Sensitivitätsanalysen	82
5.2	Ökoeffizienz	83
5.3	Empfehlungen	83
5.4	Optimierungspotentiale	84
6	Literatur	85
	<u>Critical Review</u>	88
Anhang 1	Ergänzende Auswertungen und Diskussionen	1
	Wirkbilanz	1

Glossar

Avoided burden	Vermiedene Belastung: Eine Möglichkeit, wie in einer Ökobilanz mit Nebenprodukten umgegangen wird, indem Gutschriften für die Nebenprodukte gegeben werden. Siehe dazu im Kapitel Allokationen.
Basket of benefits	Menge der verschiedenen Nutzen: Eine Möglichkeit, wie in einer Ökobilanz mit Nebenprodukten umgegangen wird, indem bei allen zu vergleichenden Produkten oder Dienstleistungen die Systemgrenze so erweitert wird, dass alle denselben Nutzen beinhalten. Siehe dazu im Kapitel Allokationen.
Eco Indicator 99	Bewertungsmethode, welche verschiedene Umweltauswirkungen zu einer Kenngröße (Indikator) zusammenfasst.
Energetische Ressourcen	Bedarf an energetischen Ressourcen wie Erdöl und Erdgas, für die Bereitstellung von Energieträgern oder Produkten. Dabei werden die Energieinhalte der Rohstoffe ab Förderung berücksichtigt.
EVA	Mit EVA (Ethylenvinylacetat) wird eine Gruppe von Copolymeren bezeichnet. Für einen Kunststoff hat EVA eine hohe Wärmebeständigkeit und gute Alterungsbeständigkeit.
GWP	Global Warming Potential: Treibhauspotential, potentieller Beitrag zur Klimaveränderung
HDPE	High density Polyethylen. Dieser Typ Polyethylen wird nicht für Folien sondern z.B. für Hohlkörper wie Flaschen eingesetzt.
Heizöl S	Schweröl, Erdöl mit einem hohen Schwefelgehalt
IPCC	International Panel of Climate Change. Gremium welches sich mit dem Verständnis und den Risiken der durch den Menschen verursachten Klimaveränderungen befasst.
KEA	Kumulierter Energieaufwand, in dieser Studie wird nur der nicht erneuerbare Anteil des KEA ausgewiesen.
KVA	Kehrichtverbrennungsanlage
LDPE	Low density Polyethylene. Dieser Typ Polyethylen dominiert den Folienmarkt.
LLDPE	Linear low density Polyethylene wird vor allem für die Produktion von Silagefolien verwendet. Dabei wird oft PIB als Weichmacher und EVA zur besseren Haftung der Folien beigemischt.
NMVO	Nicht Methan VOC: Flüchtige organische Verbindungen ohne Methan.
Nutzung energetische	Verbrennung des Werkstoffes, in dieser Studie PE-Folien, wobei der Energieinhalt zumindest teilweise genutzt wird.
Nutzung, rohstofflich	Die Kunststoffe, in dieser Studie PE-Folien, werden zumindest teilweise in ihre rohstofflichen Komponenten zerlegt, Öl oder Gas und dieses dann genutzt. Diese Nutzung kann sowohl energetisch sein oder auch stofflich, indem z.B. neue Polymere hergestellt werden.
Nutzung, werkstofflich	Die Werkstoffe, in dieser Studie die PE-Folien, werden aufbereitet und als Werkstoff mit im Wesentlichen denselben Eigenschaften wie das Primärmaterial eingesetzt.

Open-Loop-Recycling / Closed-Loop-Recycling	Art der Wiederverwertung: Open-loop Einsatz von Stoffen und Produkten in neue Produktionsprozesse und deren Umwandlung in andere, neue Werkstoffe resp. Produkte (z.B. Herstellung PE-Eimer aus PE-Folien). Closed-Loop Verwendung für dieselben Produktionsprozesse oder Produkte (Granulat aus Folien für Folienproduktion)
PAH	Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe
PE	Polyethylen, dabei wird zwischen den Typen LDPE, LLDPE und HDPE unterschieden.
PET	Polyethylenterephthalat (Polyester)
PIB	Polyisobutylen: Polyolefin, welches bei Raumtemperatur flüssig bis hochviskos ist und daher auch als Polymerweichmacher eingesetzt wird.
R-PE	Recycling-Polyethylen
ReCiPe	Bewertungsmethode, welche verschiedene Umweltauswirkungen zu einer Kenngrösse (Indikator) zusammenfasst.
Recyclat	Als Recyclat gelten jene Materialien, die nach Gebrauch und geeigneter Aufbereitung wieder als Rohstoffe eingesetzt werden.
Recycling	Wiederverwertung von Werkstoffen. Wobei zwischen werkstofflichem und rohstofflichem Recycling unterschieden wird, siehe unter Nutzung. Teilweise wird auch die energetische Nutzung als energetisches Recycling bezeichnet. In dieser Studie wird der Begriff Recycling nur für die werkstoffliche und rohstoffliche Nutzung verwendet.
Referenzsystem	In dieser Studie wurde aufgrund der Fragestellung und der heutigen Verwertungs- /Entsorgungspraxis die Verbrennung der PE-Folien in einer KVA mit durchschnittlicher Wärmenutzung verwendet, siehe auch Kapitel 2.1
UBP	Umweltbelastungspunkte: Einheit einer Bewertungsmethode, welche verschiedene Umweltauswirkungen zu einer Kenngrösse zusammenfasst.
UCTE	Europäisches Stromnetz
Verwertung	Die Verwertung bezeichnet die werkstoffliche, rohstoffliche oder energetische Nutzung eines Abfalls. In dieser Studie wird der Begriff Abfall als Überbegriff von Recycling und energetischer Nutzung verwendet.
Verwertung energetisch	Verwertungsverfahren, bei der die Energie, welche im Material enthalten ist, genutzt wird.
Verwertung rohstofflich	Verwertungsverfahren, bei dem Rohstoffe anfallen, aus denen das zu verwertende Material hergestellt ist. Im Falle von PE kann dies Erdöl oder Gas sein.
Verwertung werkstofflich	Verwertungsverfahren, bei dem das zu verwertende Material hergestellt wird. Im Falle von PE-Folien wird PE-Granulat hergestellt.
VOC	Volatile organic compounds: Flüchtige organische Verbindungen, wie z.B. Lösungsmittel.

Zusammenfassung

In der Schweiz hat die getrennte Sammlung von Wertstoffen, wie Glas, Papier, Aluminium und PET eine lange Tradition und bei den Konsumenten eine recht hohe Akzeptanz. Ebenso wird das betriebsinterne Recycling schon aus Kostengründen seit Jahrzehnten realisiert. Dennoch gibt es viele „post consumer“ Materialien, wie z.B. Folien aus Landwirtschaft sowie gewerblichen, industriellen Anwendungen oder Hohlkörper aus Polyolefinen, welche nicht oder nur sehr beschränkt einem stofflichen Recycling zugeführt werden. Diese werden heute meistens in einer KVA entsorgt, wobei die Energie zumindest teilweise genutzt wird.

Verschiedene Ökobilanzstudien, welche in den vergangenen Jahren diese Recyclingsysteme untersuchten, haben gezeigt, dass durch die getrennte Sammlung und Aufbereitung eine Reduktion der Umweltauswirkungen erreicht werden kann. Dabei ist zu beachten, dass typischerweise diejenigen Altstoffe gesammelt werden, welche leicht trennbar und nicht stark verschmutzt sind. Entsprechend stellt sich die Frage, ob sich der Aufwand für die Logistik, die Trennung, Reinigung und Aufbereitung zu neuen Werkstoffen auch für Altstoffe lohnt, bei denen ein tendenziell höherer Aufwand für die Aufarbeitung notwendig ist als für die bereits gesammelten Wertstoffe.

Eine weitere Erkenntnis bestehender Studien ist, dass die Kosten der Sammlung typischerweise wesentlich höher sind als diejenige der Entsorgung in einer KVA. Damit stellt sich die Frage, ob die finanziellen Mittel gut eingesetzt sind. Um diese Frage zu beantworten, ist es wichtig, nicht nur bei der Ökologie sondern auch bei der Ökonomie die gesamten Systemkosten zu betrachten.

PE-Folien dienen in der Landwirtschaft, der Industrie und dem Gewerbe als Verpackungsmaterial für verschiedenste Anwendungen wie z.B.: Foliensäcke, Silagefolien, Verbundfoliensäcke, Big Bags, Gewerbesäcke, Stretch- und Schrumpffolien. Heute fallen in den Agglomerationen wie auch in den entlegeneren Regionen der Schweiz grosse Mengen an gebrauchten PE-Folien an, die verwertet werden könnten bzw. einer Entsorgung zugeführt werden müssen. Der grösste Anteil stammt dabei aus Industrie und Gewerbe. Auf Grund der mit der Verwertung verbundenen Umtriebe und Kostenfolgen oder weil konkrete Anreize für die Rückführung fehlen, wird ein wesentlicher Anteil dieses Materials nicht einer werkstofflichen Wiederverwertung zugeführt, sondern in einer KVA entsorgt, wobei eine Nutzung der enthaltenen Energie zumindest teilweise stattfindet. Ebenso kann PE im Zementwerk energetisch oder durch die Herstellung von Öl rohstofflich genutzt werden.

Der Politik und den Entsorgern stellt sich die Frage, welche Art der Verwertung am effizientesten ist. Ziel dieser Studie ist es, diese Frage aus ökologischer und ökonomischer Sicht zu klären.

Es sollen dabei im Wesentlichen folgende zwei Fragen geklärt werden:

- Ist es sinnvoll, PE zu recyceln anstatt in einer KVA zu entsorgen und energetisch zu verwerten?
- Wie hoch ist der ökologische Nutzen bzw. Schaden durch andere Verwertungen, wie:
 - rohstoffliche Verwertung durch Verölung,
 - energetische Nutzung durch die Verbrennung im Zementwerk?

Zu beachten ist, dass die Firma plastOil AG, welche die Verölungsanlage betreibt, in einem ersten Schritt diejenigen Kunststoffe aussortiert, welche für ein werkstoffliches Recycling geeignet sind. Gemäss Aussage der Firma gelangen PE Folien nur in Ausnahmefällen in die Verölung, z.B. wenn diese auf Grund von Verschmutzungen nicht mehr für ein werkstoffliches Recycling geeignet sind.

Übersicht Stoffflüsse und verwendete Methodik

Die Stoffflüsse der werkstofflichen, rohstofflichen und energetischen Verwertungsmöglichkeiten von PE-Folien aus LDPE und LLDPE sind im nachfolgenden Stoffflussdiagramm dargestellt. Dieses orientiert sich an den aktuellen Verwertungswegen in der Schweiz. Der Grossteil der Folien besteht aus LDPE, daher wird dieses Material im Basisszenario verwendet. Silagefolien aus der Landwirtschaft werden meist aus LLDPE hergestellt.

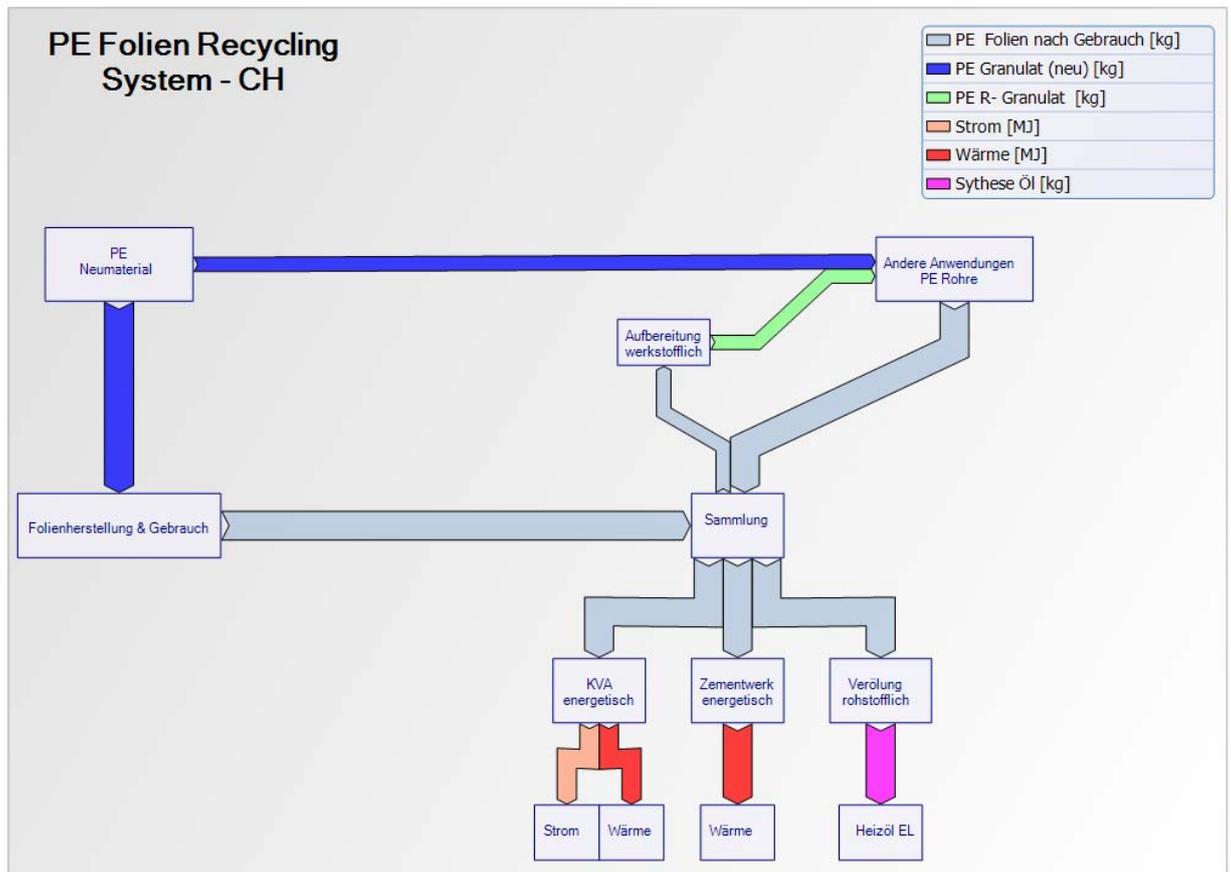


Abb. 1 Stoffkreislauf des PE-Folien Recyclings in der Schweiz „Open Loop“

Für den ökologischen Vergleich der verschiedenen Verwertungswege wird die Methode der Ökobilanz verwendet. Dies ist die umfassendste und aussagekräftigste Methode, um die Umweltauswirkungen von Produkten und Systemen zu beurteilen. Die Resultate werden zudem mit ökonomischen Kennzahlen erweitert. Damit wird auch die Effizienz der eingesetzten finanziellen Mittel betrachtet.

Die Systemgrenze der betrachteten Verwertungen erfolgt „von der gebrauchten Folie zum gewonnenen Granulat (Recycling), Rohstoff Öl (Verölung) oder den energetischen Produkten Strom und Wärme (KVA, Zementwerk)“.

Die Art der weiteren Nutzung des Granulates, des Öls respektive der produzierten Wärme/Strom ist für den Basisvergleich ausserhalb der Systemgrenzen. Im Falle des Recyclings stellt diese Betrachtung einen Zyklus dar in einem System, welches grundsätzlich sehr viele Zyklen umfassen kann.

Als Vergleichsbasis (funktionelle Einheit) dient die

Verwertung bzw. Entsorgung von 1 Tonne PE-Folien .

Um dem Umstand Rechnung zu tragen, dass die verschiedenen Verwertungs-/Entsorgungswege zu ungleichen, nicht direkt vergleichbaren Produkten führen, müssen die Systemgrenzen entsprechend erweitert werden. Dies wird in der vorliegenden Studie durch eine Mischform aus den Ansätzen

„Basket of Benefits“ und „Avoided Burdens“ gelöst. Konkret wird den Systemen ohne werkstoffliche Weiterverwertung eine Neuproduktion von LDPE-Granulat belastet, in der Höhe wie es beim Recycling bereitgestellt wird. Umgekehrt wird den energetischen und rohstofflichen Verwertungswegen eine Gutschrift für den erzielten energetischen oder stofflichen Nutzen erteilt (Ersatz von Heizöl oder Kohle, Wärme aus Heizöl/Gas, Strom Verbrauchermix CH).

Aktuell besteht in der Schweiz ein offener Kreislauf („Open Loop“): das PE-Recyclat aus Folien wird nicht für Folien sondern für andere Produkte, wie z.B. Kabelschutzrohre, Eimer, Töpfe oder Kästen, eingesetzt. Das Recyclinggranulat ersetzt dabei neues PE vollwertig. Eine Wiederverwertung als PE-Folie wäre möglich, findet aber momentan in der Praxis nicht statt. Als Basisszenario wird in der Studie aufgrund des Einsatzes in Kabelschutzrohren mit einem 100 % Ersatz von Neumaterial gerechnet. Im Rahmen der Sensitivitätsanalyse wird ergänzend dargestellt, welche Veränderungen zu erwarten sind, falls kein vollständiger Ersatz von Neumaterial erzielt wird, zum Beispiel wenn auf Grund von reduzierten technischen Eigenschaften des R-PE eine höhere Menge verwendet werden muss, um denselben Nutzen zu erzielen. Dies wird in den Vergleichssystemen so berücksichtigt, dass eine geringere Menge neues PE Granulat hergestellt werden muss.

Die verwendeten Daten in der vorliegenden Studie basieren auf Betriebsdaten, welche teilweise im Rahmen dieses Projektes erhoben wurden, sowie Publikationen wie z.B. [3] und Datengrundlagen aus ecoinvent Version 2.2 [6]. Um die Resultate abzustützen, wurden verschiedene Sensitivitätsanalysen berechnet, welche den Einfluss von veränderten Rahmenbedingungen abbilden. Zudem erlauben diese Analysen, zu erkennen, unter welchen Bedingungen das eine oder andere System ökologische Vorteile bietet.

Zur Beurteilung der Auswirkungen auf die Umwelt werden sowohl verschiedene Wirkungen auf die Umwelt nach CML [8], als auch verschiedene vollaggregierende Bewertungsmethoden berechnet und für die Schlussfolgerungen verwendet. Aus Gründen der Übersichtlichkeit werden nur die Wirkungskategorien Treibhauspotential (GWP) und Kumulierter Energieaufwand (KEA) sowie die gesamt-aggregierenden Methoden ReCiPe und Ökologische Knappheit (UBP 06) dargestellt.

Resultate

In den folgenden Abschnitten sind die Resultate des Basisvergleichs sowie Ergebnisse der Detailanalysen und Sensitivitätsanalysen aufgeführt. Für die darauffolgende Betrachtung der Ökoeffizienz wurden die ökologischen Auswertungen mit ökonomischen Aspekten ergänzt. Insgesamt ergeben sich aus der ökologischen und ökonomischen Auswertung die Schlussfolgerungen und Empfehlungen.

Verwertungsoptionen im relativen Vergleich zur KVA (Basisszenario)

In Abb. 2 sind die Umweltauswirkungen der verschiedenen analysierten Verwertungsoptionen relativ zum Referenzsystem (PE in KVA mit durchschnittlicher Energienutzung in der CH) dargestellt. Berücksichtigt sind alle Prozesse der verschiedenen Verwertungswege inklusive der Systemerweiterungen. Im Basisszenario wird davon ausgegangen, dass mit dem R-PE neues PE zu 100 % ersetzt wird. Dies entspricht der aktuellen Situation in der Schweiz. Beim Zementwerk wurde neben dem Ersatz von Kohle ebenfalls der Ersatz von Heizöl S und EL aufgeführt. Dieser Vergleich zeigt, dass der Ersatz von Kohle zu einer höheren Reduktion der Umweltauswirkungen führt als der Ersatz von Heizöl. Eine Reduktion der Umweltauswirkungen der Zementherstellung könnte durch den Einsatz von Heizöl erreicht werden, unabhängig von der Verwertung von Kunststoffen. Kohle wird in erster Linie aus Kostengründen eingesetzt. Aus diesen Gründen erachten wir es als sinnvoll, Heizöl als Vergleichsbasis zu wählen. Da Heizöl El aus Kostengründen nicht für die Herstellung von Zement verwendet wird, wurde als Standardvergleich Heizöl S gewählt.

Die Darstellung zeigt, dass alle untersuchten Verwertungsoptionen im Vergleich zur KVA zu einer signifikanten Reduktion der Umweltauswirkungen führen. Die dargestellten Indikatoren zeigen, dass die höchsten Reduktionen durch ein werkstoffliches Recycling oder eine energetische Verwertung in einem Zementwerk erreicht werden. Während die drei Indikatoren KEA, GWP und ReCiPe eine signifikant geringere Umweltauswirkungen des werkstofflichen Recyclings verglichen mit dem Zementwerk mit Heizöl S zeigen, weist der Indikator UBP eine vergleichbare Umweltauswirkung aus. Im Gesamten wird das werkstoffliche Recycling daher als tendenziell besser als die energetische Nutzung im Zementwerk beurteilt. Die rohstoffliche Verwertung in einer Verölung führt zu einem geringeren Nutzen.

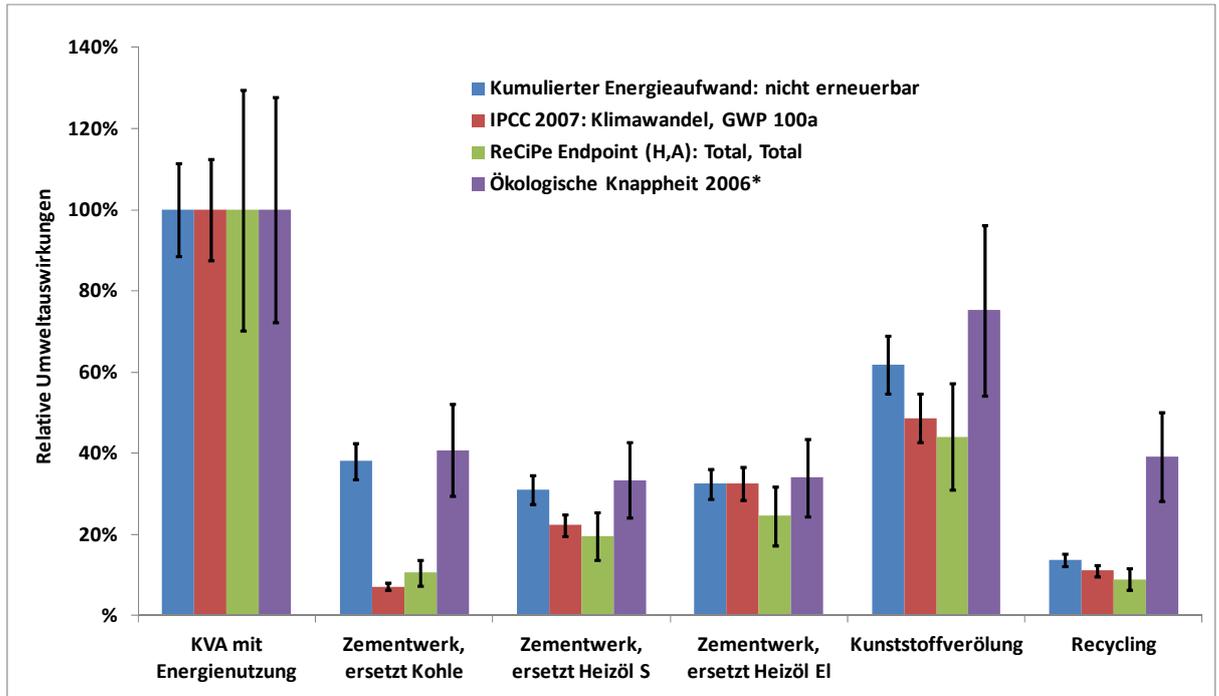


Abb. 2 Vergleich zwischen dem Basisszenario und dem IST-Zustand in der Schweiz anhand der ausgewählten Indikatoren und Bewertungsmethoden. Die Ausdehnung der Balken zeigt die Unsicherheit der Ergebnisse.

Detailanalyse der Teilprozesse

In Abb. 3 und 4 sind am Beispiel des Treibhauspotentials (GWP, 2007) und der Ökologischen Knappheit (UBP, 2006) die differenzierten Auswirkungen auf die Umwelt abgebildet. Für jede Variante sind auf der linken Seite die Auswirkungen der verschiedenen Teilprozesse dargestellt, wobei die Belastungen als positive Werte (Umweltbelastungen) und die Entlastungen, welche sich durch den Nutzen des Ersatzes ergeben, als negative Werte (Umweltentlastungen) dargestellt werden. Zudem ist für jede Variante auf der rechten Seite die Summe aus den einzelnen Teilprozessen als dunkelblauer Balken dargestellt. Die Umweltauswirkungen der KVA wurden jeweils auf 100% normiert. Damit zeigt die Differenz zu 100% den Nutzen, der sich aus der jeweiligen Verwertung ergibt. Dieser wird hellgrün mit einer schraffierten Linie dargestellt.

Bei der Verbrennung in der KVA und im Zementwerk wird aufgrund der gewählten Systemerweiterung eine Gutschrift für die Produktion von Strom und Wärme angerechnet. Dazu wird der Ersatz von Heizöl S bzw. die Wärme ab Heizöl/Erdgas sowie beim Strom der Ersatz des CH-Verbrauchermix verwendet. Belastet wird umgekehrt die entsprechende Menge Werkstoff, welche im werkstofflichen Recycling erhalten bleibt und bei einer Verbrennung neu produziert werden muss. Die Aufwände für das werkstoffliche Recycling - Sammlung und Aufarbeitung zu Recycling PE [R-PE] - beträgt nur einen Bruchteil der Aufwände einer Neuherstellung und verursacht insgesamt nur einen geringen Teil der Umweltauswirkungen. Zudem reduziert sich die Entsorgungsmenge und somit die Emissionen der KVA sowie die Gutschriften für Wärme und Strom.

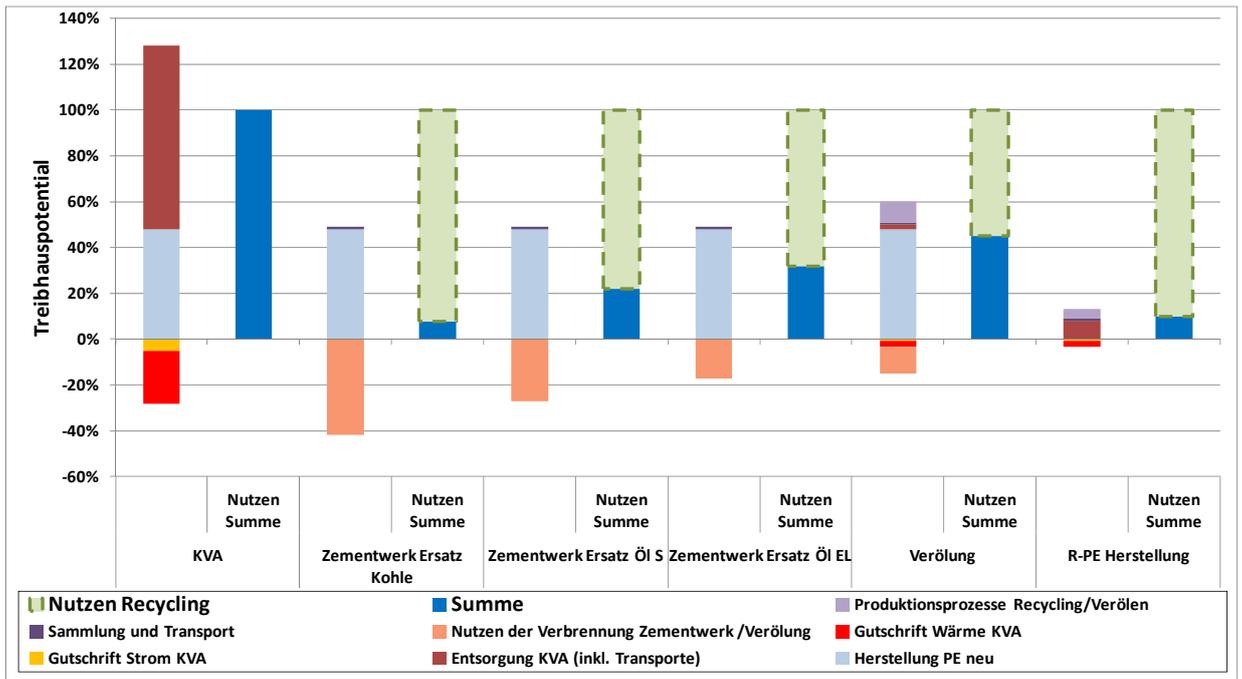


Abb. 3 Relative Auswirkungen auf das Klima der verschiedenen Verwertungen im Vergleich zur KVA. Dargestellt werden jeweils die Beiträge der Teilprozesse sowie blau die Summe daraus und grün der Nutzen im Vergleich zur KVA (Basisszenario).

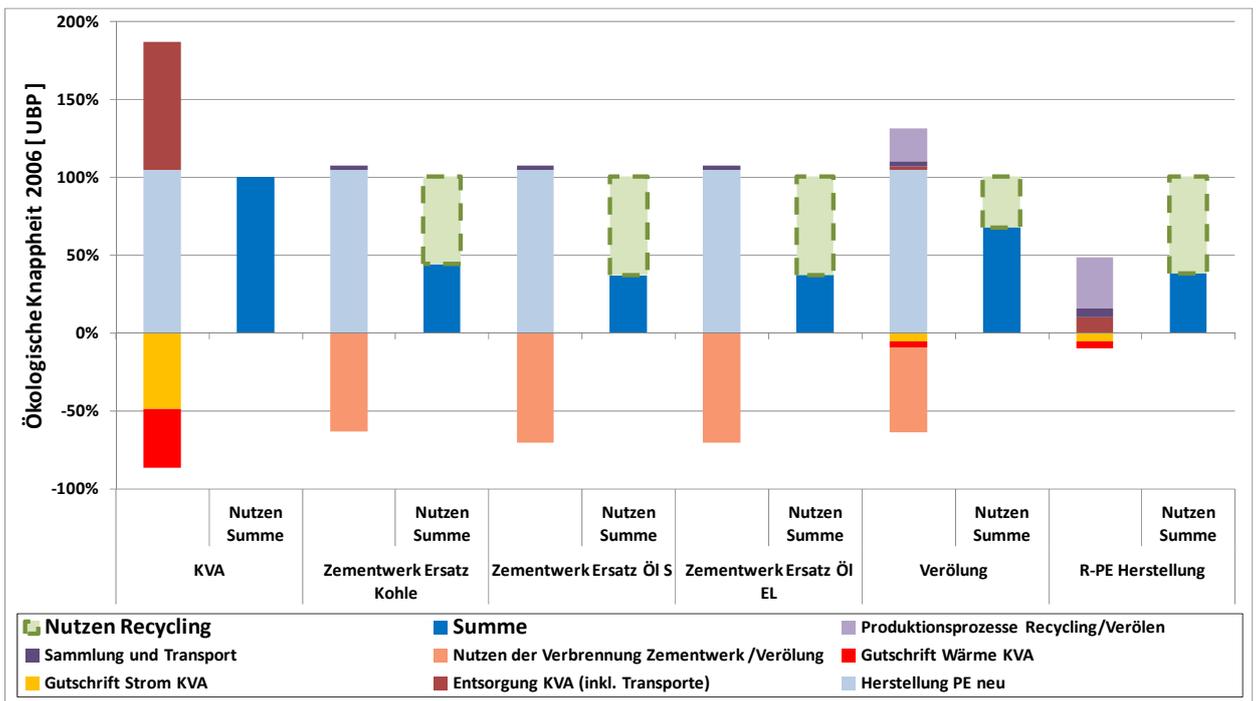


Abb. 4 Relative Umweltauswirkungen gemessen mit der Methode ökologische Knappheit der verschiedenen Verwertungen im Vergleich zur KVA. Dargestellt werden jeweils die Beiträge der Teilprozesse sowie die Summe daraus und der Nutzen im Vergleich zur KVA (Basisszenario).

Sensitivitätsanalysen

Auf der Basis einer Relevanz-Analyse wurden Haupteinflussgrößen eruiert, diese wurden mit den Auftraggebern diskutiert und daraus die folgenden Sensitivitätsanalysen definiert. Das Ziel dieser Sensitivitätsanalysen bestand darin, die Stabilität der Resultate zu überprüfen sowie mögliche Optimierungspotentiale abzuklären.

Tabelle 1 Aufstellungen der relevanten Sensitivitäten	Annahmen 1	Annahmen 2
Energienutzung der KVA	Strom 7% Wärme 73% / 65%*	Strom 25% Wärme 15%
Anteil des Ersatzes von Neumaterial	100%	55%
Menge Produktionsabfall: LDPE	7% Ausschuss	28% Ausschuss
LLDPE	14% Ausschuss	28% Ausschuss
Stromeffizienz des Recyclings	50%	100%

* 73% Gesamtenergienutzungsgrad / 65% Energienutzungsgrad verwendet für die Berechnung der Brennstoffsubstitution

Die Sensitivitätsanalysen haben gezeigt, dass die folgenden Einflussgrößen einen wesentlichen Einfluss auf die Resultate haben:

- Ersatz von Neu-PE durch R-PE
- Energienutzung der KVA
- Art der Folien, LDPE oder LLDPE

Diese können zu einer anderen Rangfolge in der ökologischen Beurteilung der Verwertungen führen, siehe auch Abb. 5. Die Veränderungen sind in der nachfolgenden Tabelle 2 zusammengestellt.

Tabelle 2 Rangfolge der ökologischen Beurteilung der verschiedenen Verwertungen

	Anteil Ersatz Neu-LDPE durch R-LDPE			LLDPE Ausschuss	Energienutzung KVA	
	100%	80%	60%		Aktuell	Optimiert Annahme 1
Geringste Auswirkungen	Recycling	Zementwerk	Zementwerk	Zementwerk Recycling	Recycling	Recycling
	Zementwerk	Recycling	Verölung		Zementwerk	Zementwerk
	Verölung	Verölung	Recycling	Verölung	Verölung	KVA
Höchste Auswirkungen	KVA	KVA	KVA	KVA	KVA	Verölung

Ein werkstoffliches Recycling ist unabhängig von der energetischen Nutzung in der KVA mit den geringsten Umweltauswirkungen verbunden. Falls jedoch die benötigten Eigenschaften von R-PE abnehmen, so dass neues PE nicht mehr zu 100% ersetzt werden kann, können andere Verwertungen wie die energetische Nutzung im Zementwerk oder die Verölung ökologische Vorteile bieten. Dies kann z.B. dann der Fall sein, wenn die PE Folien eine hohe Verschmutzung aufweisen.

Zu beachten ist, dass es sich beim Szenario LLDPE um ein theoretisches Szenario handelt, welches auf Annahmen und nicht auf realen Daten beruht.

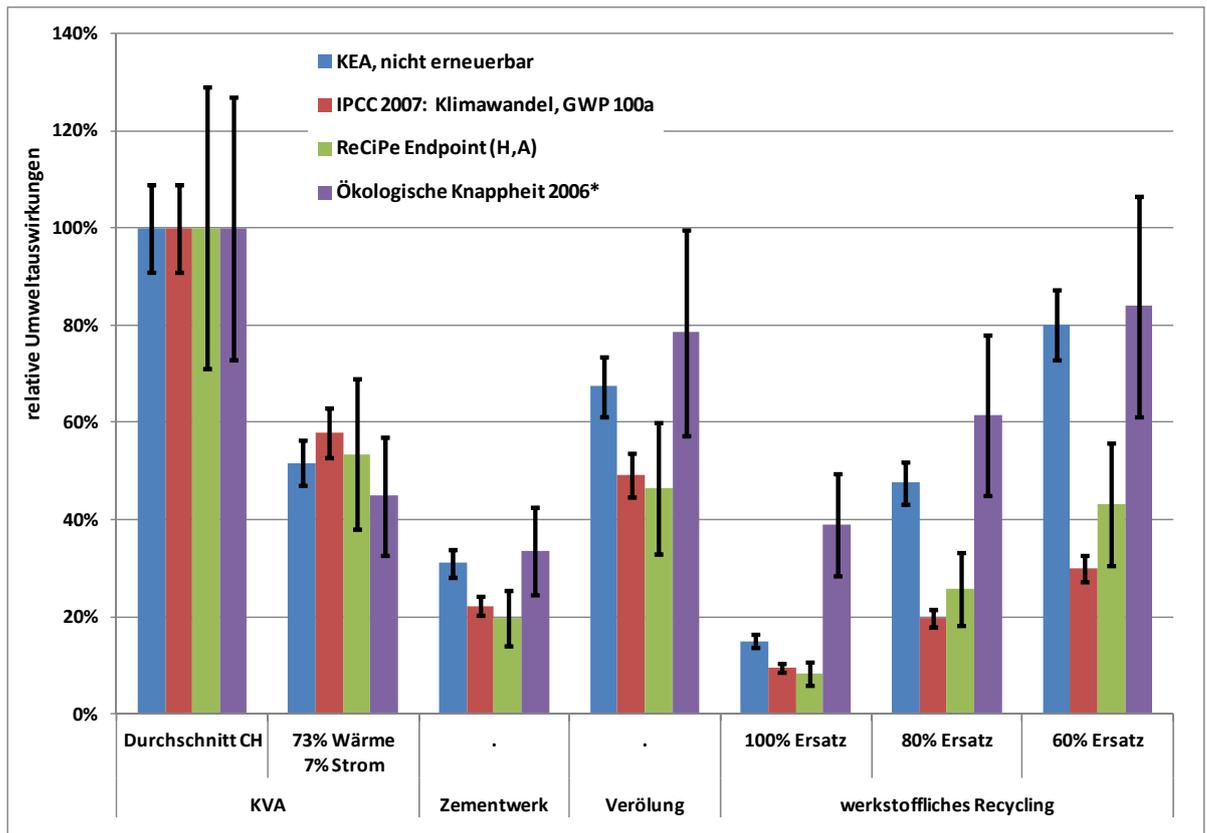


Abb. 5 Vergleich zwischen der Umweltauswirkungen verschiedener Szenarien anhand der ausgewählten Indikatoren und Bewertungsmethoden.
Die Ausdehnung der Balken zeigt die Unsicherheit der Ergebnisse.

Ökoeffizienz des PE-Folien Recycling

Ein System wird als öko-effizient bezeichnet, wenn möglichst geringe Umweltauswirkungen bei möglichst geringen Kosten entstehen. Entsprechend zeigt ein niedriger Wert für jeweils Kosten und Wirkung eine gute Effizienz an. Für die Auswertung der Ökoeffizienz wurden die Ergebnisse der Umweltbelastungspunkte des Basisszenarios mit Lebenswegkosten (Kosten der Logistik, Verwertung und Kosten der Wiederbeschaffung des Rohmaterials) ergänzt. Die Analyse der Lebenswegkosten zeigen, dass diese im Wesentlichen von den Logistikkosten und dem Preis des R-PE abhängen. Bei geringen Logistikkosten sind die Lebenswegkosten der alternativen Verwertungen geringer als diejenigen der KVA, wobei das werkstoffliche Recycling die geringsten Gesamtkosten verursacht. Bei hohen Logistikkosten, Sammlung mit Sammelsäcken, sind die Gesamtkosten des werkstofflichen Recyclings etwas tiefer als diejenigen der KVA, können jedoch auch dieselbe Höhe erreichen. Die anderen alternativen Verwertungen verursachen in diesem Falle tendenziell höhere Gesamtkosten als die KVA. Entsprechend hängt auch die Öko-Effizienz von diesen Faktoren ab. Für die Kosten wurden zwei Szenarien berechnet und dargestellt eines mit tiefen Sammelkosten und eines mit hohen Sammelkosten.

Die verwendete Portfolio-Illustration in Abb. 6 (tiefe Sammelkosten und tiefer R-PE Preis) und Abb. 7 (hohe Sammelkosten und hoher R-PE Preis) teilt sich in vier Sektoren auf. Die öko-effizienteste Variante findet sich dabei im Sektor „Optimum“, die schlechteste im Sektor „Pessimum“. Nach rechts (X-Achse) sinken die Kosten, nach oben (Y-Achse) sinken die Umweltwirkungen.

Die Öko-Effizienz Analyse hat gezeigt, dass

- ein werkstoffliches Recycling die höchste Öko-Effizienz aufweist.
- eine zusätzliche Nutzung durch ein vorgängiges Recycling bei den untersuchten thermischen und rohstofflichen Verwertungen jeweils zu einer Erhöhung der Öko-Effizienz führt.
- nach dem werkstofflichen Recycling die thermische Verwertung in einem Zementwerk die höchste Öko-Effizienz aufweist, danach kommt die Verölung und anschliessend die KVA.

Dies bedeutet, dass mit dem werkstofflichen Recycling sowohl aus ökonomischer wie auch aus ökologischer Sicht der höchste Nutzen erzielt werden kann. Diese Analyse wurde für das Basisszenario gemacht. Zu beachten ist, dass sich gemäss Sensitivitätsanalyse ein anderes Resultat zeigen kann, falls mit dem R-PE nur ein geringerer Anteil Neu-PE ersetzt wird¹. Ebenfalls einen Einfluss auf dieses Resultat kann die Verwertung von LLDPE-Folien (Silagefolien) haben. Bezüglich der anderen Einflussfaktoren ist dieses Resultat jedoch stabil und damit aussagekräftig.

Ein wesentlicher Grund für dieses Resultat ist die Tatsache, dass ein Produzent, der R-PE einsetzt, dieses Material zu einem wesentlich tieferen Preis einkaufen kann verglichen mit neuem PE. Bedingung ist natürlich, dass dieses R-PE die Spezifikationen für seine Produkte in dem Masse erfüllt, dass neues PE ersetzt werden kann.

¹ Das heisst, dass für die Herstellung eines Produktes entweder mehr neues PE beigemischt werden muss, oder dass insgesamt mehr PE-Material (z.B. dickere Wände oder dickere Folie) verwendet werden muss, um dieselben Anforderungen zu erfüllen.

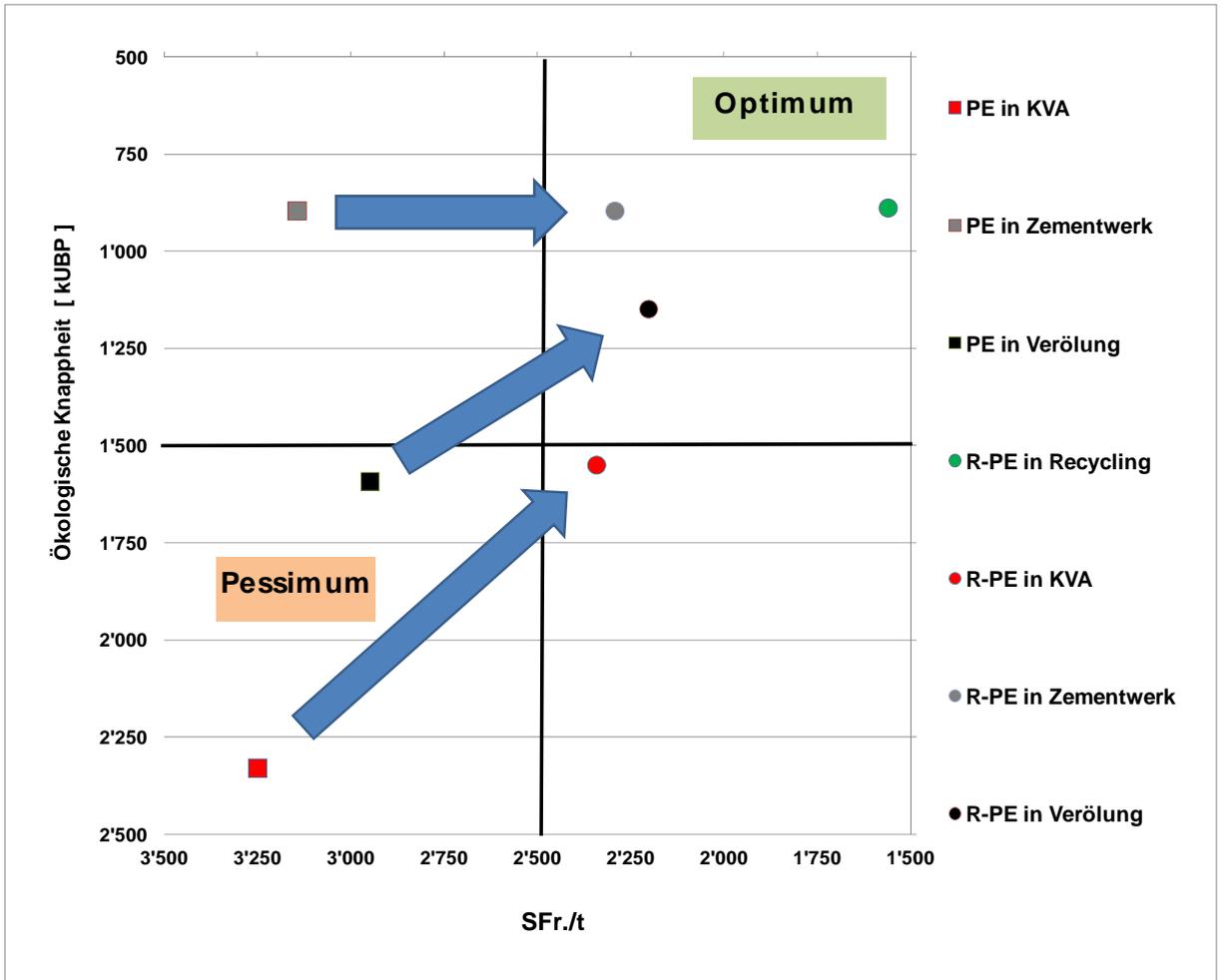


Abb. 6 Portfolio Analyse Ökoeffizienz, Annahmen: R-PE tiefer Preis und tiefe Sammelkosten (X-Achse Lebenswegkosten , Y-Achse Umweltwirkungen)

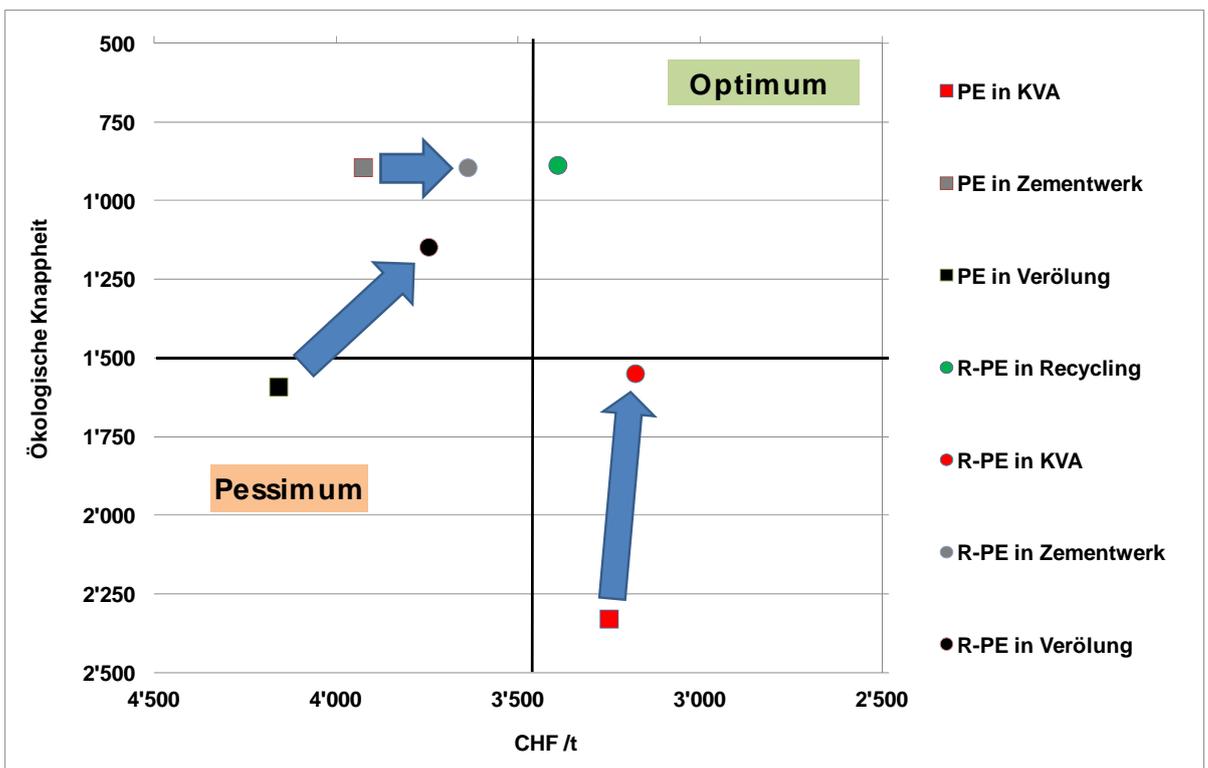


Abb. 7 Portfolio Analyse Ökoeffizienz, Annahmen: R-PE hoher Preis und hohe Sammelkosten
(X-Achse Lebenswegkosten, Y-Achse Umweltwirkungen)

Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Die erstellten Auswertungen und Analysen zeigen, dass alle alternativen Verwertungen von PE-Folien (Zementwerk, Verölung, werkstoffliches Recycling) geringere Umweltauswirkungen aufweisen als diejenigen in einer KVA mit durchschnittlicher und energetischer Nutzung. Dasselbe gilt für die Öko-Effizienz der alternativen Verwertungen. Die Unterschiede der verschiedenen Verwertungen hängen sehr stark von den Umständen und Rahmenbedingungen ab, wie z.B. bis zu welchem Grad R-PE neues PE ersetzt, ob die Folien aus LDPE (höchster Anteil bei den Folien) oder aus LLDPE (Silagefolien) bestehen oder von der Energieeffizienz der KVA.

Folgende Einsparungen können mit den alternativen Verwertungen von 1t gesammelter Folien, bezogen auf die Verwertung in der KVA, erreicht werden:

	Energetische Ressourcen [Liter Erdöl-Äquivalente]	Treibhausgasemissionen [t CO ₂ -Äquivalente]
Recycling	-940	-3.1
Zementwerk, Ersatz Kohle	-740	-3.3
Zementwerk, Ersatz Heizöl S	-790	-2.8
Verölung	-380	-1.7

Ein wesentlicher Unterschied zwischen dem werkstofflichen Recycling und den andern Verwertungswegen besteht darin, dass beim werkstofflichen Recycling das Material, wenn auch auf Grund von Verlusten in etwas geringeren Mengen, nach einem oder mehreren Lebenszyklen immer noch vorliegt und damit für die anderen Verwertungswege zur Verfügung steht. Berechnungen in dieser Studie haben gezeigt, dass es aus Sicht der Ökologie wie auch der Öko-Effizienz sinnvoller ist, das Material so lange wie möglich stofflich zu verwerten und erst wenn dies z.B. auf Grund von Verschmutzungen oder Vermischungen mit anderen Kunststoffen nicht mehr möglich ist, eine rohstoffliche oder energetische Verwertung durchzuführen. Diese sogenannte Kaskadennutzung ist genau das, was die plastOil AG (Verölungsanlage) durchführt. Zuerst werden diejenigen Kunststoffe aussortiert, welche einer werkstofflichen Verwertung zugeführt werden können. Anschliessend werden diejenigen Kunststoffe aussortiert, welche verölt werden können. Die restliche Fraktion wird in einer KVA oder ev. in einem Zementwerk energetisch genutzt.

Auf Grund der Ergebnisse dieser Studie können aus ökologischer Sicht die folgenden Empfehlungen abgegeben werden:

- In der Schweiz schneidet das werkstoffliche Recycling im Vergleich zur Verwertung von PE in der KVA aus Sicht der Öko-Effizienz deutlich besser ab und sollte, soweit Einsatzmöglichkeiten für das PE-Recyclinggranulat vorhanden sind, ausgebaut werden.
- Durch ein vorgängiges werkstoffliches Recycling kann die Öko-Effizienz der anderen Verwertungswege erhöht werden. Entsprechend ist eine Kaskadennutzung, wie sie von der Firma plastOil AG betrieben wird, zu empfehlen.
- Da die Verwendung des PE-Recyclinggranulat im Bereich Folien eingeschränkt ist, ist zu prüfen, in welchen Anwendungen ein Kreislauf mit Recyclinggranulat aus Folien möglich ist.
- Die ökologisch effizienteste Endverwertung ist gemäss Basisszenario die energetische Nutzung von R-PE/PE im Zementwerk.
- Falls eine werkstoffliche Verwertung nicht möglich ist, z.B. auf Grund von Verschmutzungen oder bei Verbundstoffen, so scheint eine energetische Verwertung in einem Zementwerk sinnvoll zu sein.
- Da eine möglichst sortenreine Sammlung im Allgemeinen zu besseren Recycling-Qualitäten führt, ist eine sortenreine Sammlung zu empfehlen, insofern eine solche möglich ist.

Résumé

La Suisse a déjà une longue tradition de tri des matières valorisables, telles que le verre, le papier, l'aluminium ou le PET, et les consommateurs sont bien habitués à cette collecte sélective. De même, les entreprises pratiquent depuis des décennies le recyclage interne, ne serait-ce que pour des raisons d'économie. Cela n'empêche pas les lacunes dans le système de recyclage des produits après usage; par exemple, les films provenant de l'agriculture, de l'artisanat ou de l'industrie, ou les corps creux à base de polyoléfinés; ces matériaux sont rarement voire pas du tout recyclés sur le plan matière. Leur sort est aujourd'hui d'être éliminés dans une usine d'incinération des ordures ménagères (UIOM), ce qui permet au moins de les valoriser partiellement sur le plan énergétique.

Toutefois, plusieurs études basées sur des écobilans ayant pris sous la loupe ces systèmes de recyclage ces dernières années ont démontré qu'on pourrait réduire les impacts sur l'environnement si l'on procédait à une collecte sélective et à un traitement spécifique de ces matières. A noter que celles actuellement collectées sont typiquement peu souillées et facilement triables. Bref, est-il opportun de collecter, en sus des matières valorisables déjà récupérées actuellement, d'autres matières usagées pour produire de nouveaux matériaux, en dépit des efforts supplémentaires de logistique, de tri, de nettoyage et de conditionnement que cela implique?

Les études menées jusqu'ici ont montré qu'en général, les coûts de collecte sélective de ces matériaux sont bien plus importants que ceux d'une simple élimination dans une UIOM, ce qui invite à se demander si les moyens investis dans une telle collecte sélective sont vraiment adéquats. Pour apporter une réponse à cette question, il est capital d'examiner les coûts financiers de l'ensemble du système, et pas seulement les avantages écologiques.

Les films en polyéthylène (PE) utilisés comme matériau d'emballage dans l'agriculture, l'artisanat et l'industrie servent à de nombreux usages, tels que: sacs (monomatériaux ou composites), films d'ensilage, conteneurs souples (big bags), films d'emballage étirables ou rétractables. Aujourd'hui en Suisse, de grandes quantités de films en PE sont éliminées après usage alors qu'elles pourraient être valorisées. Le phénomène touche autant les agglomérations que les régions périphériques les plus éloignées. La plus grande partie de ces déchets provient de l'industrie et de l'artisanat. Aujourd'hui, ces déchets sont incinérés en UIOM, ce qui permet au moins de récupérer une partie de l'énergie qu'ils contiennent. Toutefois, une part importante de ces matières pourrait être valorisée, mais ne l'est pas pour des raisons de difficultés d'organisation ou de coûts prohibitifs, ou encore parce que la filière de récupération n'est pas concrètement encouragée. De même, le PE peut être valorisé sur le plan énergétique dans les cimenteries, ou sur le plan matière, par retransformation en pétrole (matière première secondaire).

Les décideurs politiques et les entreprises d'élimination souhaitent savoir quelle valorisation du PE est la plus efficace.

Le but de la présente étude est d'analyser ce problème, à la fois sur le plan écologique et sur le plan économique.

Il s'agit de répondre aux deux questions principales suivantes:

- Est-ce judicieux de recycler le PE au lieu de le valoriser sur le plan énergétique en l'incinérant dans une UIOM?
- Sur le plan écologique, quels sont les bénéfices – ou les préjudices – à attendre des autres procédés de valorisation tels que:
 - valorisation matière par dépolymérisation (retour au pétrole),
 - valorisation énergétique par incinération dans une cimenterie?

A noter que l'entreprise plastOil AG, exploitante de l'installation de dépolymérisation, sépare dans une première étape tous les plastiques qu'elle peut envoyer dans une filière de valorisation matière.

Elle affirme que le traitement par dépolymérisation des films en PE constitue l'exception, par exemple lorsque ceux-ci sont trop contaminés pour la valorisation matière.

Vue d'ensemble des flux de matières et présentation de la méthodologie

Le diagramme qui suit présente les flux de matières pour plusieurs filières de valorisation des films en PE (comme matière, matière première secondaire ou énergie), qu'il s'agisse de PE à basse densité (LDPE) ou de PE à basse densité linéaire (LLDPE). Ce diagramme se base sur les filières de valorisation actuellement disponibles en Suisse. La grande majorité des films utilisés par le commerce et l'industrie sont constitués de LDPE, raison pour laquelle le scénario de base ne prend en compte que ce matériau. Par contre, dans l'agriculture, les films d'ensilage sont surtout constitués de LLDPE.

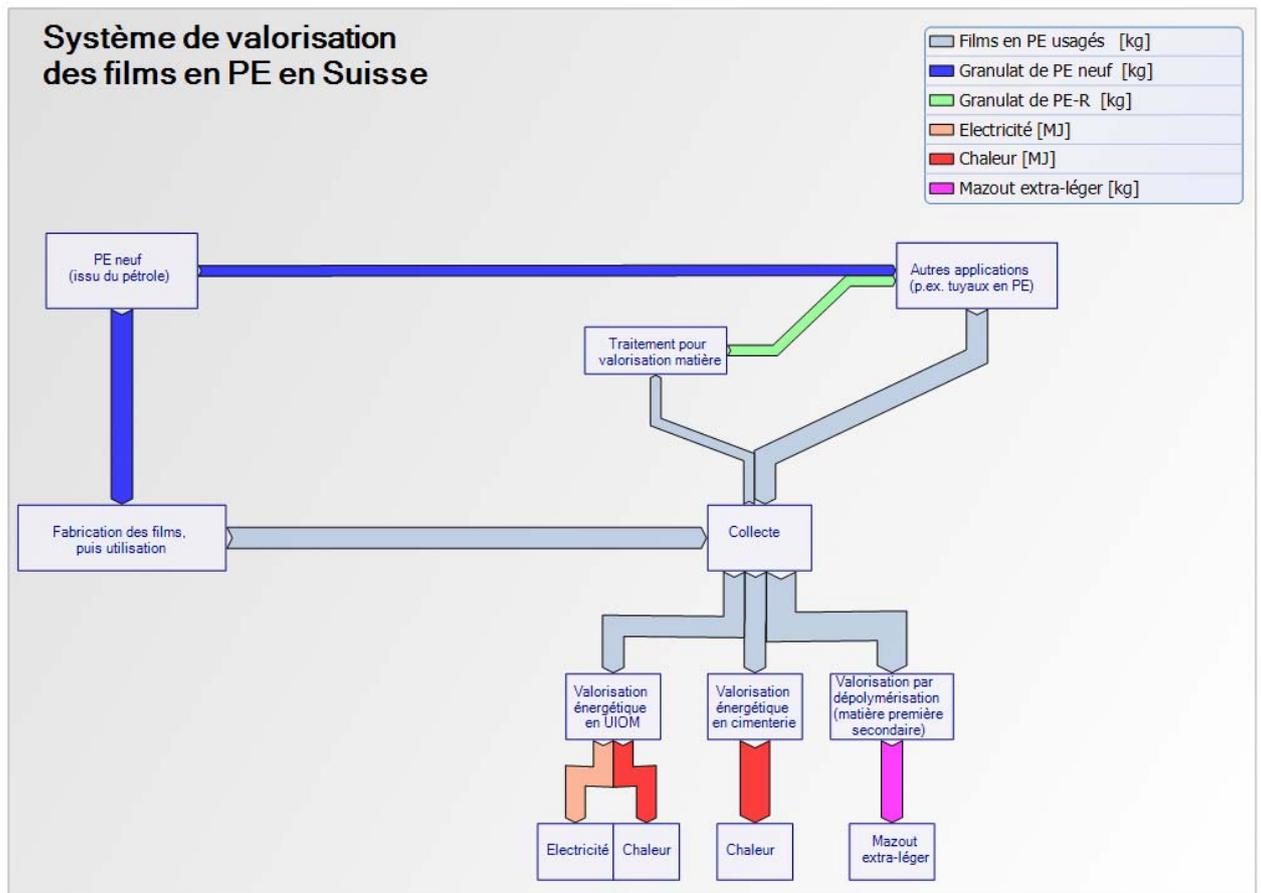


Fig. 1 Cycle des matières dans les filières de valorisation des films PE en Suisse, filières dites « Open Loop » (en boucle ouverte)

Pour comparer les différentes filières sur le plan écologique, la méthode des écobilans a été appliquée. Cette méthode est à la fois la plus globale et la plus explicite pour évaluer les impacts de produits ou de systèmes sur l'environnement. Les résultats qu'on peut en tirer seront en outre complétés par des indicateurs économiques, ce qui permettra d'analyser l'efficacité des moyens financiers investis.

Le système soumis à l'évaluation va du film usagé jusqu'aux « produits » de la récupération, à savoir le granulat de PE obtenu par recyclage (PE-R), le pétrole obtenu par dépolymérisation ou encore l'électricité ou la chaleur produite par l'incinération du PE dans une UIOM ou une cimenterie. En revanche, la méthode de comparaison ne prend pas en compte les diverses utilisations possibles du granulat, du pétrole reconstitué ou de la chaleur ou de l'électricité produites, qu'elle considère ne pas faire partie du système étudié. Dans la variante du recyclage matière, le système comprend une partie cyclique, dans laquelle la matière peut circuler plusieurs fois.

L'unité fonctionnelle utilisée pour la comparaison est la suivante:

1 tonne de films PE valoriser ou éliminé.

Sur le plan méthodologique, il est nécessaire d'élargir les limites du système étudié, et ce, pour tenir compte du fait que les différentes filières (valorisation ou élimination) ne débouchent pas sur des « produits » directement comparables entre eux. La présente étude propose d'utiliser une méthodologie mixte, basée sur les principes dits « Basket of Benefits² » et « Avoided Burdens³ ». Concrètement, on impute à un système dépourvu de valorisation matière une charge correspondant à la production d'une quantité de granulats de LDPE neufs équivalente à celle de granulats recyclés qu'on obtiendrait si la filière comprenait du recyclage. Inversement, on accorde à une filière de valorisation énergétique ou de production de matière première secondaire une « note de crédit » pour le bénéfice supplémentaire obtenu (substitution d'huile lourde, de charbon, d'électricité du mix de consommation suisse, ou de chaleur produite par un chauffage à huile ou au gaz).

La Suisse connaît actuellement un système à cycle ouvert (« Open Loop »): le granulat de PE-R, issu de la récupération des films en PE usagés, n'est pas utilisé pour la reconstitution de ces mêmes films, mais pour la production d'autres objets, tels que des gaines de protection pour câbles électriques, des seaux, des pots de fleurs ou des caissettes. Dans de tels procédés, le granulat de recyclage remplace parfaitement le granulat de PE neuf. Il serait envisageable de recréer des films en PE avec ces granulats recyclés, mais cette filière n'existe pas pour le moment. Dans la présente étude, le scénario de base postule que les granulats recyclés substituent à 100 % les granulats neufs dans le cadre d'une production de fourreaux pour câbles électriques. Une analyse de sensibilité montre quelles seraient les conséquences au cas où le granulat recyclé ne pourrait pas remplacer complètement le granulat neuf. Ce serait le cas notamment si le granulat recyclé présentait des propriétés techniques moindres par rapport au granulat neuf, ce qui nécessiterait d'en utiliser une plus grande quantité pour obtenir un résultat de qualité équivalente. On reflètera cet état de fait en réduisant la quantité de PE neuf à fabriquer dans les autres systèmes objets de la comparaison.

La présente étude se fonde sur des données d'exploitation réelles, dont une partie a été recueillie dans le cadre de ce projet, mais également sur des données disponibles dans la littérature spécialisée (p. ex [3]) ou sur des données tirées d'*ecoinvent*, version 2.2 [6]. Pour étayer ces résultats, les chercheurs ont procédé à diverses analyses de sensibilité permettant de se faire une idée de l'influence de changements dans les conditions générales. Ces analyses permettent aussi d'identifier les conditions sous lesquelles tel ou tel système ou filière apporte de réels avantages sur le plan écologique.

Afin d'évaluer les impacts sur l'environnement, les chercheurs ont utilisé plusieurs méthodes de calcul, à savoir la méthode CML⁴ ainsi que diverses méthodes d'évaluation basées sur l'agrégation systématique de tous les critères; ils se sont basés sur les résultats obtenus pour tirer leurs conclusions. Cependant, afin de conserver une lisibilité suffisante à l'étude, seules seront représentées les catégories d'impact suivantes: le potentiel de réchauffement global (PRG)⁵, l'énergie grise⁶, ainsi que les ré-

² NdT: Somme de tous les avantages possibles. Il s'agit d'un moyen d'intégrer des sous-produits dans un écobilan, ce qui permet, en élargissant les limites du système étudié, de comparer des produits ou des prestations équivalentes sur le plan de leurs bénéfices (d'après le glossaire de la présente étude).

³ NdT: Impacts sur l'environnement évités. Il s'agit d'un moyen d'intégrer les sous-produits d'une filière dans un écobilan, en leur attribuant des crédits (d'après le glossaire de la présente étude).

⁴ NdT: Méthode mise au point en 1992 par le « *Centrum voor Milieukunde Leiden* » (CML) pour évaluer l'effet sur l'environnement de divers flux de matières ou d'énergie (d'après Wikipedia deutsch).

⁵ NdT: Global Warming Potential (GWP).

sultats des deux méthodes d'évaluation à agrégation totale: la méthode ReCiPe⁷ et la méthode de la saturation écologique basée sur les unités de charge écologique (UCE 06).

Résultats

Dans les paragraphes ci-après sont présentés les résultats de la comparaison de base ainsi que ceux des analyses détaillées et des analyses de sensibilité. Suit une présentation de l'éco-efficacité, où l'évaluation sur le plan écologique a été complétée par des critères économiques. Enfin, les auteurs de l'étude présentent leurs conclusions et recommandations sur la base des évaluations écologiques et économiques effectuées.

Comparaison relative entre les filières de valorisation et l'incinération en UIOM (pour le scénario de base)

La figure 2 représente les impacts environnementaux des différentes possibilités de valorisation étudiées, en comparaison avec la filière de référence (incinération du PE dans une UIOM, avec récupération de l'énergie conforme à la moyenne suisse). Tous les processus impliqués dans chacune des filières ont été pris en considération, y compris ceux qu'il a fallu intégrer dans les systèmes dont les limites ont été élargies. Le scénario de base considère que le PE-R peut remplacer à 100 % le PE neuf, ce qui correspond à la situation réelle en Suisse aujourd'hui. Pour l'incinération dans une cimenterie, on a considéré trois variantes distinctes: substitution du charbon, substitution de l'huile lourde (à forte teneur en soufre) et substitution de l'huile extra-légère (EL). Cette comparaison montre que la substitution du charbon permet de réduire plus drastiquement les impacts environnementaux que le remplacement de l'huile de chauffage. On peut donc affirmer que si une cimenterie substitue le charbon par de l'huile de chauffage, elle peut réduire ses impacts sur l'environnement, indépendamment de la valorisation ou non de matières plastiques. Si le charbon est utilisé, c'est en priorité pour des raisons financières. Il nous paraît donc judicieux de choisir l'huile de chauffage comme base de comparaison. Etant donné que l'huile extra-légère n'entre pas en ligne de compte pour la fabrication de ciment pour des raisons de coûts prohibitifs, nous avons opté pour l'huile lourde dans le cadre de la comparaison standard.

L'illustration montre qu'il est possible d'obtenir une réduction significative des impacts environnementaux en comparaison de l'incinération dans une UIOM, et ce, quelle que soit la filière de valorisation choisie. D'après les indicateurs observés, cette réduction est la plus importante pour la valorisation par recyclage matière (production de PE-R), de même que pour la valorisation énergétique dans une cimenterie. Si les trois indicateurs énergie grise, potentiel de réchauffement global et ReCiPe font apparaître des impacts environnementaux significativement plus faibles du recyclage matière (en comparaison avec l'utilisation du PE comme substitut de l'huile lourde), l'indicateur « unités de charge écologique » présente des impacts comparables pour les deux options. Pour cette raison, les auteurs estiment que le recyclage représente globalement une meilleure solution que la valorisation énergétique dans une cimenterie. Quant à la valorisation matière par transformation inverse en pétrole, elle présente un bénéfice environnemental moindre.

⁶ NdT: L'énergie grise est la quantité d'énergie nécessaire au cycle de vie d'un matériau ou d'un produit: la production, l'extraction, la transformation, la fabrication, le transport, la mise en œuvre, l'utilisation, l'entretien et à la fin le recyclage (wikipédia). Dans cette étude, seule la part non renouvelable de l'énergie grise est prise en compte.

⁷ NdT: ReCiPe est une méthode d'évaluation qui ramène tous les impacts sur l'environnement à un seul indicateur agrégé.

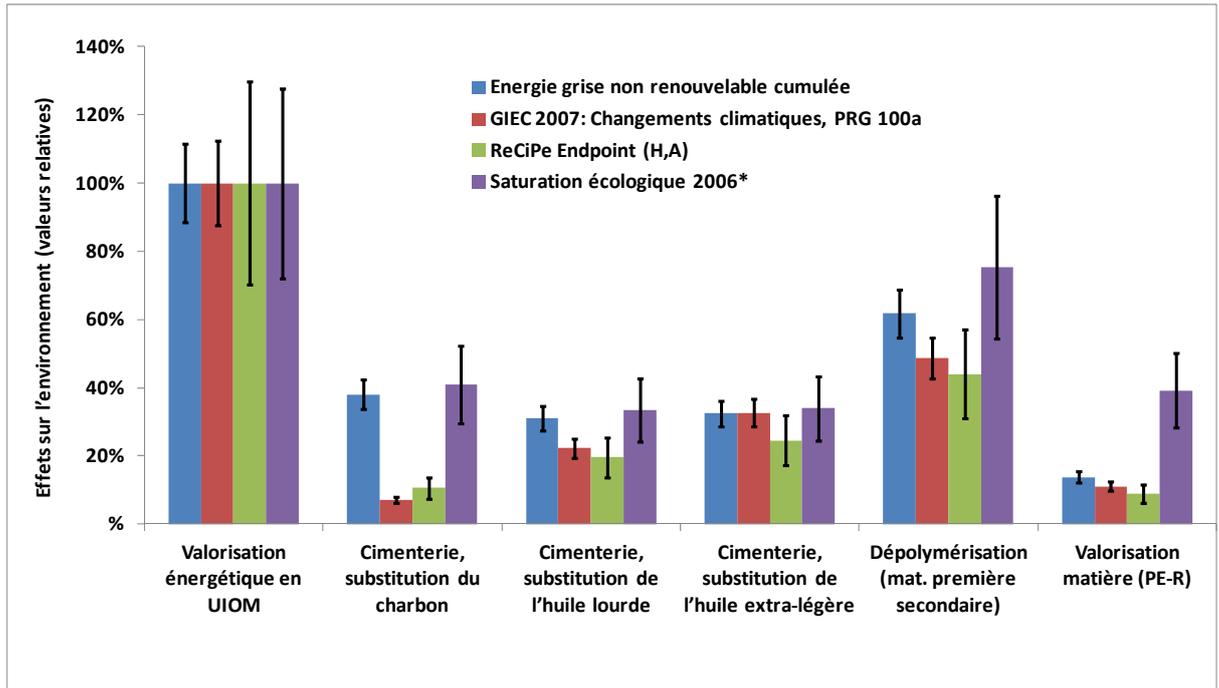


Fig. 2 Comparaison entre situation actuelle en Suisse (UIOM) et les diverses possibilités de valorisation (scénario de base avec PE-R substituant à 100 % granulat neuf). Pour chaque possibilité, 4 méthodes d'évaluation ont été utilisées, avec leurs indicateurs respectifs. Les barrettes noires indiquent la marge d'incertitude des résultats.

Analyse détaillée des processus partiels

Les figures 3 et 4 représentent de manière différenciée les impacts sur l'environnement des diverses possibilités de valorisation du PE, selon deux méthodes d'analyse: le potentiel de réchauffement global (PRG, 2007) et la méthode de la saturation écologique basée sur les unités de charge écologique (UCE 06). Chaque option est représentée en deux colonnes:

- Colonne de gauche: impacts sur l'environnement de tous les processus partiels (attention: les charges sont indiquées en valeurs positives et les bénéfiques en valeurs négatives),
- Colonne de droite: somme de tous les processus partiels.

La somme des impacts sur l'environnement de l'incinération a été normée à 100 %. Ainsi, le bénéfice de chacune des autres filières de valorisation du PE est indiqué par la différence entre la somme de ses impacts et 100 % (barres vertes à bord pointillé).

Dans les variantes prévoyant l'incinération du PE en UIOM et en cimenterie, la production d'électricité et de chaleur donne droit à un « crédit » qui résulte d'un élargissement du système analysé. Ce crédit tient compte de l'huile lourde (combustible de substitution), de l'huile de chauffage ou du gaz naturel (chaleur de substitution) que le PE remplace, ou, s'agissant de l'électricité, de la quantité d'électricité qu'il remplace dans le mix de consommation suisse. Inversement, on compte comme charge la quantité de PE qui disparaît dans le procédé envisagé (par incinération) et dont le stock doit être reconstitué par du PE neuf (alors que la filière de recyclage conserve la matière). Dans l'option du recyclage matière – visant à obtenir du PE-R –, les opérations de collecte et de traitement ne représentent qu'une charge minime sur l'environnement, en comparaison de la fabrication de PE neuf. De plus, cette option réduit la quantité des ordures ménagères, et donc les émissions des UIOM, mais aussi les crédits pour les quantités de chaleur ou d'électricité récupérées.

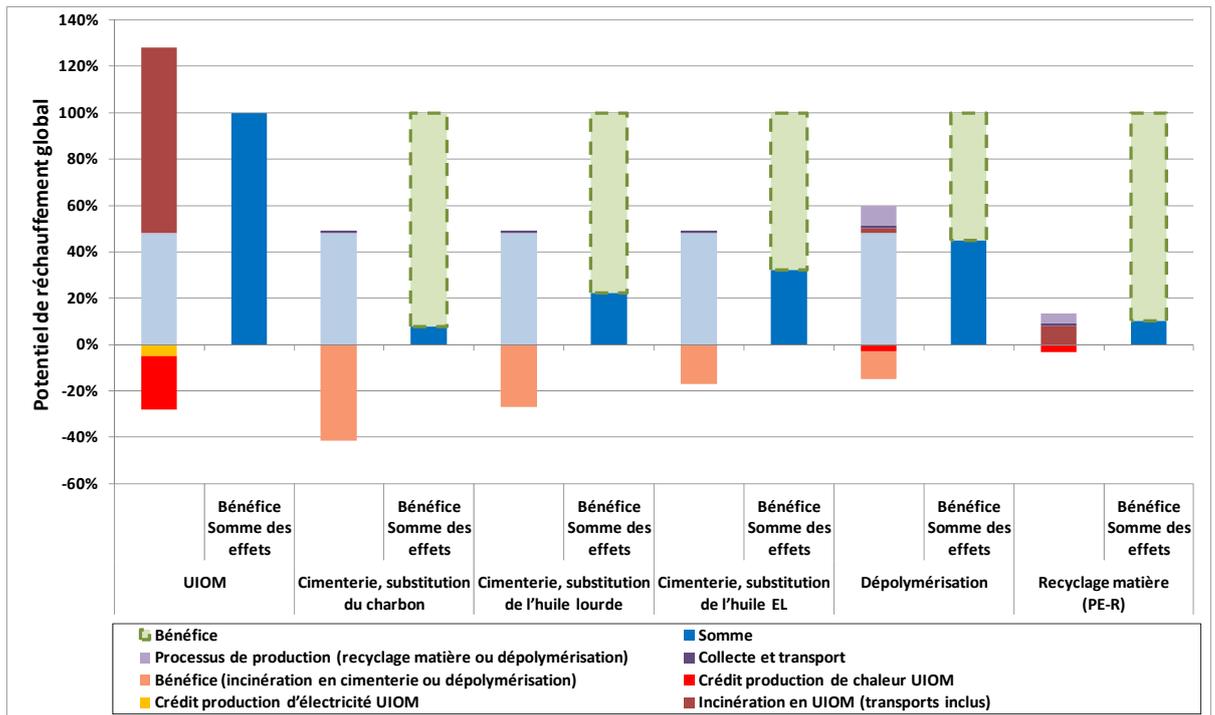


Fig. 3 Impacts relatifs sur le climat des différentes filières de valorisation, comparées à l'incinération en UIOM. Sont représentées les contributions des différents processus partiels, ainsi que leur somme (en bleu foncé), de même que le bénéfice (en vert) par rapport à l'incinération en UIOM (pour le scénario de base).

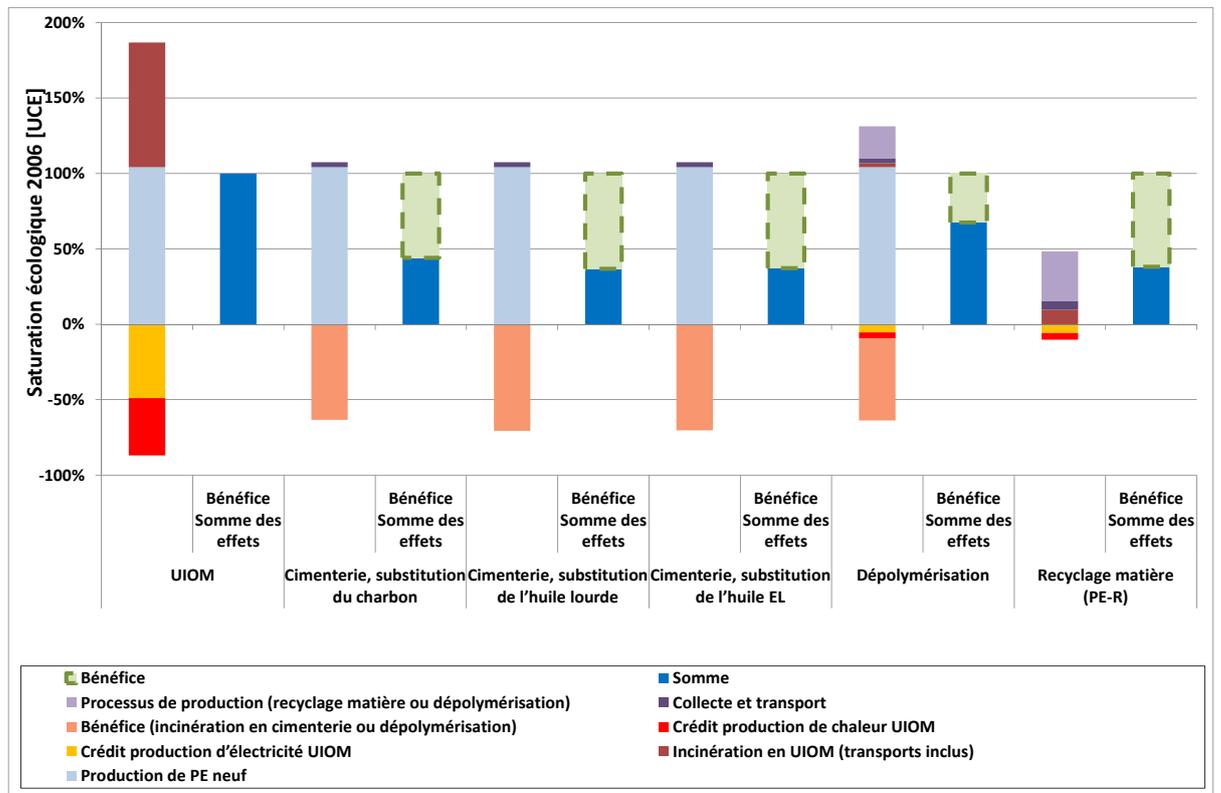


Fig. 4 Impacts relatifs sur l'environnement, mesurés au moyen de la méthode de la saturation écologique, des différentes filières de valorisation, comparées à l'incinération en UIOM. Sont représentées les contributions des différents processus partiels, ainsi que leur somme (en bleu foncé), de même que le bénéfice (en vert) par rapport à l'incinération en UIOM (pour le scénario de base).

Analyses de sensibilité

Une analyse de pertinence a permis d'identifier les paramètres principaux influençant les processus. Ces paramètres ont été discutés avec les mandants, ce qui a permis de définir les analyses de sensibilité présentées ci-dessous. Ces analyses avaient pour but de vérifier la stabilité des résultats et d'identifier d'éventuels potentiels d'optimisation.

Tableau 1 Liste des facteurs de sensibilité pertinents

	Hypothèse 1	Hypothèse 2
Valorisation de l'énergie issue des UIOM	Electricité 7 %	Electricité 25 %
	Chaleur 73 % / 65 % *	Chaleur 15 %
Taux de substitution de PE neuf	100 %	55 %
Taux de rebut lors du recyclage: LDPE	7 %	28 %
LLDPE	14 %	28 %
Efficacité de l'utilisation de l'électricité lors du recyclage matière	50 %	100 %

* 73 %: rendement énergétique total

65 %: rendement énergétique utilisé pour le calcul de la substitution de combustible

Les analyses de sensibilité ont démontré que les facteurs ci-après pouvaient influencer notablement les résultats:

- Remplacement du PE neuf par du PE-R
- Valorisation de l'énergie issue des UIOM
- Type de film (LDPE ou LLDPE)

Ces facteurs peuvent perturber le classement obtenu par les filières de valorisation lors de l'analyse écologique (cf. également: fig. 5). Ces changements sont synthétisés dans le tableau 2.

Tableau 2 Classement obtenus par les différents filières en variant les facteurs de sensibilité

	Taux de substitution du LDPE neuf par du LDPE recyclé (LDPE-R)			Valorisation de films en LLDPE	Valorisation de l'énergie issue des UIOM	
	100%	80%	60%		28% de rebut	Actuelle
Impacts les plus faibles sur l'environnement	Recyclage	Incinération en cimenterie	Incinération en cimenterie	Incinération en cimenterie ou recyclage	Recyclage	Recyclage
	Incinération en cimenterie	Recyclage	Dépolymérisation (retour au pétrole)		Incinération en cimenterie	Incinération en cimenterie
	Dépolymérisation	Dépolymérisation	Recyclage	Dépolymérisation	Dépolymérisation	Incinération en UIOM
Impacts les plus importants sur l'environnement	Incinération en UIOM	Incinération en UIOM	Incinération en UIOM	Incinération en UIOM	Incinération en UIOM	Dépolymérisation

Comparé à la valorisation en UIOM, le recyclage matière du PE induit toujours les impacts les plus faibles sur l'environnement, quelle que soit l'efficacité énergétique de l'UIOM. Par contre, s'agissant des autres filières, comme la valorisation énergétique dans une cimenterie ou la retransformation en

pétrole par dépolymérisation, elles peuvent s'avérer tout d'un coup plus intéressantes si les propriétés du PE-R diminuent et que celui-ci ne peut plus substituer complètement le PE neuf

Il faut aussi signaler que la variante prévoyant la valorisation du LLDPE est un scénario théorique basé sur des hypothèses et non sur des données réelles mesurées.

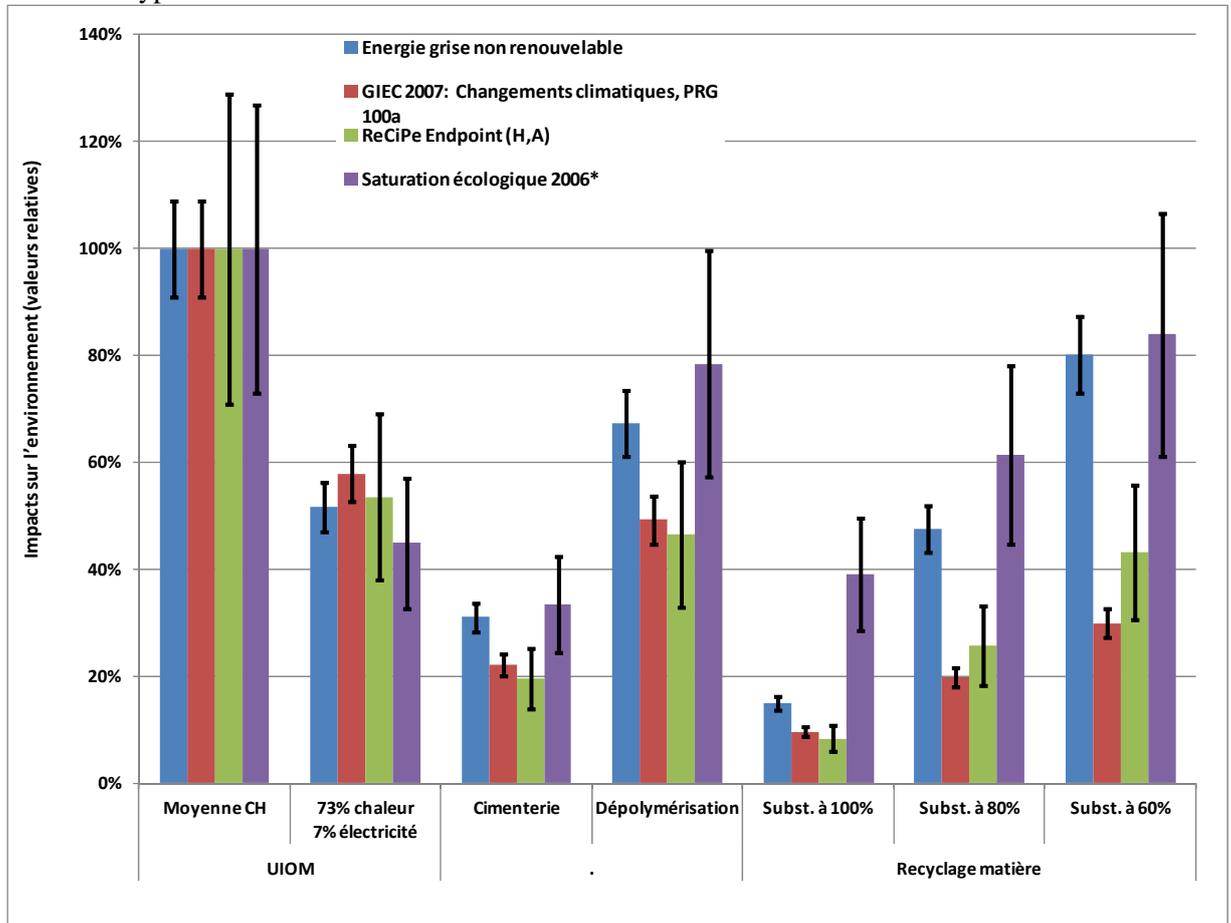


Fig. 5 Comparaison des impacts sur l'environnement de divers scénarios, sur la base des indicateurs choisis et des diverses méthodes d'évaluation utilisées. Les barrettes noires indiquent la marge d'incertitude des résultats.

Eco-efficacité du recyclage des films en PE

On considère qu'un système est éco-efficace s'il est en mesure de créer une valeur ajoutée avec un minimum de ressources, de déchets et d'émissions polluantes. Ainsi l'efficacité sera considérée comme bonne si les coûts et les impacts sont tous les deux faibles. Pour évaluer l'éco-efficacité, on a complété les résultats obtenus avec la méthode de la saturation écologique (mesurés en UCE) avec les coûts induits durant tout le cycle de vie du PE (coûts de logistique, coûts de valorisation et coûts d'achat de la matière première de remplacement). Une analyse fine de ces coûts fait apparaître qu'ils dépendent surtout des frais de logistique et du prix de vente du PE-R.

- Pour des frais de logistique **peu élevés**, si l'on considère tout le cycle de vie du PE, les filières alternatives de valorisation induisent toutes des coûts globaux de cycle de vie inférieurs à l'incinération dans une UIOM. La championne toutes catégories, sur le plan des coûts, reste la filière de valorisation matière directe du PE.
- Si les frais de logistique sont **élevés** – ce qui est le cas lorsque la collecte se fait par sacs – les coûts globaux de la filière de valorisation matière du PE sont généralement à peine inférieurs à ceux de l'incinération en UIOM, mais peuvent aussi les dépasser de peu. En pareil cas, les coûts globaux induits par les autres filières de valorisation ont tendance à être plus élevés que pour l'incinération en UIOM.

L'éco-efficacité de chacune des filières dépend donc aussi de ces facteurs. Les auteurs de l'étude ont choisi deux cas extrêmes, le premier caractérisé par des coûts de collecte bas, le second par des coûts de collecte élevé. Ils ont représenté ces deux scénarios en conséquence.

Les figures 6 (prix de vente du PE-R et coûts de collecte bas) et 7 (prix de vente du PE-R et coûts de collecte élevés) sont subdivisées en quatre quadrants. La filière la plus éco-efficace se situe dans le quadrant supérieur droit (« cas le plus favorable »), tandis que la variante la moins bonne est figurée dans le quadrant inférieur gauche (« cas le plus défavorable »). L'axe horizontal (x) représente les coûts (dans le sens dégressif) et l'axe vertical (y) les impacts sur l'environnement (également dans le sens dégressif).

L'analyse de l'éco-efficacité permet de tirer les conclusions suivantes:

- Le recyclage direct du PE en tant que matériau présente l'éco-efficacité la meilleure.
- Il est possible d'améliorer encore cette éco-efficacité en combinant plusieurs filières, c'est-à-dire en recyclant d'abord le PE avant de l'incinérer (valorisation énergétique) ou de le dépolymériser (production de matières premières secondaires).
- Par ordre décroissant d'éco-efficacité, on trouve le recyclage matière, la valorisation thermique en cimenterie, la dépolymérisation, et enfin, en queue de classement, l'incinération dans une UIOM.

En d'autres termes, le recyclage matière du PE présente le plus grand bénéfice, tant sur le plan économique que sur le plan écologique. Cette analyse a été faite pour le scénario de base. Cependant il faut remarquer que le classement des filières de valorisation est susceptible changer si le PE-R ne peut remplacer qu'une part moindre de PE neuf⁸. Un autre facteur peut influencer ce classement: c'est la présence de films en LLDPE – utilisés pour l'ensilage en agriculture – dans le matériel à valoriser. Les autres facteurs n'ont pas une influence notable sur le résultat, qui peut donc être considéré comme robuste et pertinent.

Une des principales raisons de ce résultat est le prix nettement plus bas du PE-R par rapport au PE neuf. Naturellement, il faut que le PE-R réponde suffisamment bien aux spécifications des fabricants pour que le remplacement du PE neuf par du PE-R soit effectif.

⁸ Parce que pour que le produit réponde aux spécifications, il faut y ajouter plus de PE neuf ou utiliser plus de PE recyclé (p. ex. augmenter l'épaisseur des parois).

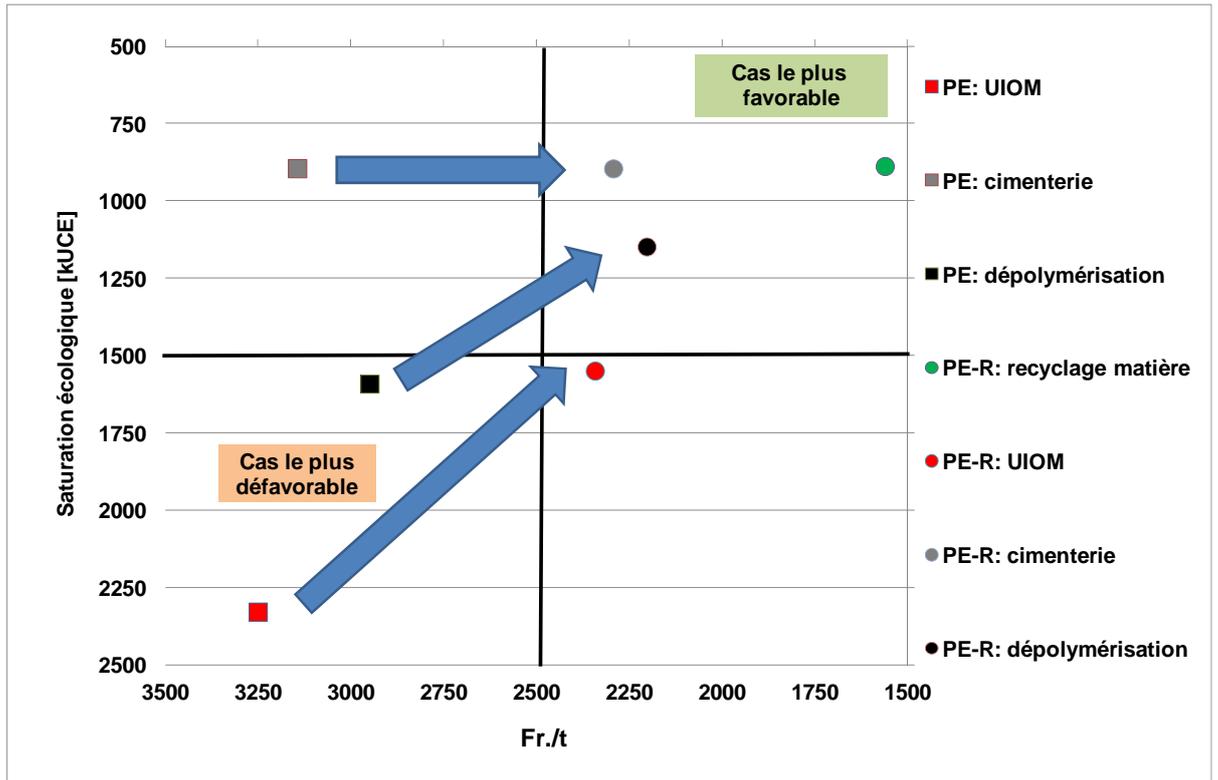


Fig. 6 Analyse de l'éco-efficacité, variante « prix de vente du PE-R et coûts de collecte bas ». Axe X: coûts du cycle de vie complet; axe Y: impacts sur l'environnement

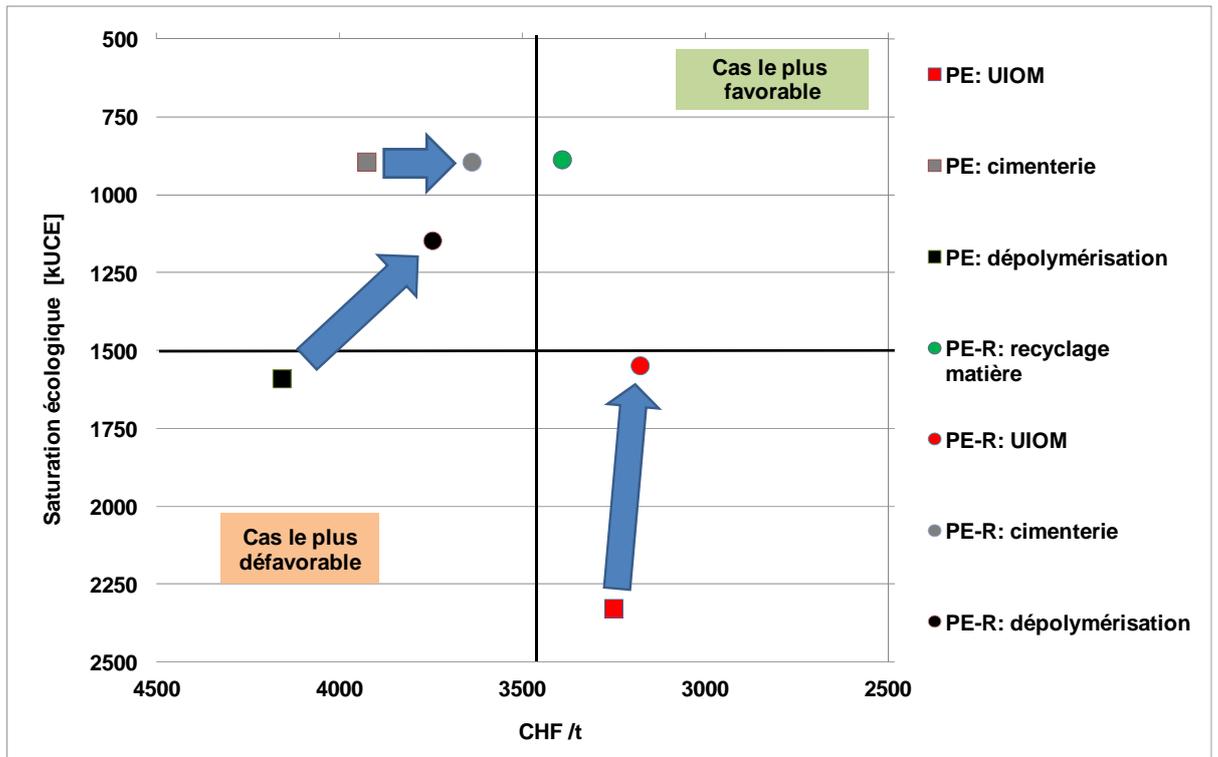


Fig. 7 Analyse de l'éco-efficacité, variante « prix de vente du PE-R et coûts de collecte élevés ». Axe X: coûts du cycle de vie complet axe Y: impacts sur l'environnement

Conclusions et recommandations

Les analyses et évaluations montrent que toutes les filières alternatives de valorisation des films en PE (incinération en cimenterie, transformation en matières premières secondaires par dépolymérisation, recyclage matière) présentent des impacts sur l'environnement moins importants que leur traitement dans une usine d'incinération des ordures ménagères (UIOM) au rendement énergétique moyen. Ce constat est aussi valable pour l'éco-efficacité. Les différences constatées entre les diverses filières de valorisation du PE sont très fortement dépendantes du contexte, comme le taux de substitution effectif du PE neuf par du PE-R, le type de plastique, LDPE (le plus fréquent) ou LLDPE (films d'ensilage), ou encore l'efficacité énergétique de l'UIOM.

Comparé à l'incinération dans une UIOM, voici les économies qu'il est possible de réaliser en traitant 1 tonne de PE dans des filières de valorisation alternatives:

	Ressources énergétiques [litres équivalent-pétrole]	Emissions de gaz à effets de serre [tonnes équivalent-CO ₂]
Recyclage matière	-940	-3,1
Cimenterie, substitution du charbon	-740	-3,3
Cimenterie, substitution de l'huile lourde	-790	-2,8
Dépolymérisation	-380	-1,7

Une différence significative doit être signalée à propos du recyclage matière du PE (en comparaison avec les autres filières de valorisation): le recyclage du PE conserve la matière – à de faibles pertes près – ce qui fait qu'après un ou plusieurs cycles, il est toujours là, à disposition pour les autres filières. Cette étude a permis de calculer qu'il est bien plus judicieux, tant sur le plan écologique que sur le plan économique, de conserver aussi longtemps que possible le PE dans une filière de valorisation matière, et de ne passer à un autre type de valorisation (retransformation en matières premières ou production d'énergie) que lorsqu'il n'est plus possible de procéder à un nouveau cycle de recyclage en raison d'un taux de contamination trop élevé ou d'un mélange avec d'autres types de plastique. L'entreprise plastOil AG, qui exploite une installation de dépolymérisation, applique justement ce principe de valorisation en cascade. Elle trie pour commencer les plastiques qu'elle peut envoyer dans une filière de valorisation matière. Puis elle sélectionne les plastiques qu'elle peut soumettre à une dépolymérisation pour reconstituer du pétrole, et enfin, elle envoie la fraction « inutilisable » restante, pour incinération – et valorisation énergétique – dans une UIOM ou une cimenterie.

L'étude permet de faire les recommandations suivantes du point de vue écologique:

- En Suisse, le recyclage matière du PE présente une éco-efficacité bien meilleure que son incinération dans une UIOM. Il faudrait développer cette filière, pour autant qu'il existe des débouchés pour le granulat de PE-R.
- Si l'on procède à un ou plusieurs cycles de recyclage matière avant d'envoyer le PE-R dans d'autres filières de valorisation, cela améliore l'éco-efficacité de ces dernières. Par conséquent, il faut encourager l'utilisation en cascade du PE, comme le fait l'entreprise plastOil AG.
- Etant donné que les granulats du PE-R se prêtent mal à la production de films, il faudrait examiner quelles autres applications permettraient une utilisation cyclique de ces granulats.
- Sur le plan écologique, la manière la plus efficace de valoriser le PE ou le PE-R en phase ultime (selon le scénario de base) est la valorisation énergétique en cimenterie.
- De même, s'il est impossible de valoriser directement le PE sous forme matière – p. ex. en raison de souillures ou de présence de matériaux composites – c'est la valorisation énergétique dans une cimenterie qui est la plus judicieuse.
- Pour autant que cela soit possible, la collecte doit être sélective (par type de plastique), ce qui permettra en général d'obtenir une meilleure qualité de PE-R.

Auftrag und Zielsetzung

In der Schweiz hat die getrennte Sammlung von Wertstoffen, wie Glas, Papier, Aluminium und PET, eine lange Tradition und bei den Konsumenten eine hohe Akzeptanz. Ebenso wird das betriebsinterne Recycling schon aus Kostengründen seit Jahrzehnten realisiert. Dennoch gibt es viele post consumer Materialien, wie z.B. Folien aus Landwirtschaft sowie aus gewerblichen / industriellen Anwendungen oder Hohlkörper aus Polyolefinen, welche nicht oder nur sehr beschränkt einem stofflichen Recycling zugeführt werden. Diese werden heute meistens in einer KVA entsorgt, wobei die Energie zumindest teilweise genutzt wird.

Verschiedene Ökobilanzstudien, welche in den vergangenen Jahren Recyclingsysteme untersuchten, haben gezeigt, dass durch die getrennte Sammlung und stoffliche Verwertung eine Reduktion der Umweltauswirkungen erreicht werden kann. Dabei ist zu beachten, dass typischerweise diejenigen Altstoffe gesammelt werden, welche leicht trennbar und nicht stark verschmutzt oder technisch gut rezyklierbar sind. Entsprechend stellt sich die Frage, ob sich der Aufwand für die Logistik, die Trennung, Reinigung und Aufbereitung zu neuen Werkstoffen auch für Altstoffe lohnt, bei denen ein tendenziell höherer Aufwand für die Aufarbeitung notwendig ist als für die bereits gesammelten Wertstoffe. Eine weitere Erkenntnis bestehender Studien ist, dass die Kosten der Sammellogistik typischerweise wesentlich höher sind als diejenigen der Entsorgung in einer KVA. Damit stellt sich auch die Frage, ob die finanziellen Mittel gut eingesetzt sind. Um diese Frage zu beantworten, ist es wichtig, nicht nur bei der Ökologie sondern auch bei der Ökonomie die gesamten Systemkosten zu betrachten.

Polyethylenfolien (PE-Folien) werden in Landwirtschaft, Industrie und Gewerbe für die verschiedensten Anwendungen genutzt. Beispielsweise eignen sich „Polyethylenfolien“ ausgezeichnet für die in der Landwirtschaft verwendeten Silageballen. In den Agglomerationen wie auch in den entlegeneren Regionen der Schweiz fallen dadurch grosse Mengen an gebrauchten PE-Folien an, die verwertet werden könnten bzw. entsorgt werden müssen. Schätzungen geben aber nur geringe Wiederverwertungsquote für PE-Folien aus der Landwirtschaft an. Der grössere Anteil gelangt aus Industrie und Gewerbe zur Wiederverwertung. Die recycelten Folien setzen sich aus verschiedensten Ausgangsprodukten zusammen, wie z.B. Foliensäcke, Verbundfoliensäcke, Big Bags, Gewerbesäcke, Stretch- und Schrumpffolien.

Bezüglich der Verwertung der PE-Folien stellen sich die folgenden Fragen:

- Ist es ökologisch sinnvoller, PE werkstofflich zu rezyklieren anstatt es in einer KVA zu entsorgen und die Energie zu nutzen?
- Wie hoch ist der ökologische Nutzen bzw. Schaden durch andere Verwertungen, wie:
 - rohstoffliche Verwertung durch Verölung,
 - energetische Nutzung durch die Verbrennung im Zementwerk?

Es ist das Ziel dieser Studie, welche im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) Schweiz und in Kooperation mit der InnoPlastics AG durchgeführt wird, diese Fragen sowohl aus ökologischer wie auch aus ökonomischer Sicht zu beantworten. Dabei soll es nicht darum gehen, die heutige Situation möglichst exakt abzubilden, da diese sich schnell verändern kann, vielmehr soll diese Studie grundsätzliche Erkenntnisse zu den verschiedenen Verwertungsverfahren liefern.

Dabei wird die Methode der Ökobilanzierung verwendet. Nebst der Berechnung der Umweltauswirkungen werden ebenfalls die Kosten eines Recyclingsystems betrachtet und daraus die Effizienz der eingesetzten finanziellen Mittel, Ökoeffizienz, abgeleitet.

1 Vorgehen und Methodik

Heute besteht Konsens, dass die Lebenszyklusanalyse oder Ökobilanz die umfassendste und aussagekräftigste Methode ist, um die Umweltauswirkungen von Produkten und Systemen zu beurteilen. Daher wird diese Methode verwendet, um die Umweltauswirkungen der verschiedenen Systeme, siehe Kapitel 1.3.2, zu eruieren.

In diesem Kapitel werden die verwendete Methode, das Vorgehen sowie die verwendeten Daten und die getroffene Annahmen beschrieben.

1.1 Allgemeine Beschreibung der Ökobilanzierung

Die Ökobilanzierung oder Lebenszyklusanalyse ("life cycle assessment", LCA) ist eine Methode, um die Auswirkungen menschlicher Tätigkeiten auf die Umwelt zu erfassen, zu beurteilen und daraus Optimierungspotentiale abzuleiten. Auf Grund der Komplexität der Natur und des globalen Wirtschaftssystems reicht es nicht, nur einzelne Problemstoffe oder lokale Auswirkungen zu betrachten. Für eine solide Entscheidungsbasis ist eine umfassende Bewertung notwendig, welche die folgenden Anforderungen so weit möglich erfüllt:

- Möglichst umfassende Berücksichtigung der verschiedenen Umweltauswirkungen
- Berücksichtigung des gesamten Lebensweges
- Quantifizierung der Umweltauswirkungen
- Bewertung der verschiedenen Auswirkungen als Basis für Entscheidungen
- Wissenschaftlich abgestützt, um eine hohe Zuverlässigkeit und Akzeptanz zu erreichen.

Die Ökobilanzierung ist diejenige Methode, welche heute diese Anforderungen am besten erfüllt. Die Ergebnisse einer Ökobilanz können eingesetzt werden:

- zur Erfassung der relevanten Auswirkungen
- als Entscheidungshilfe bei verschiedenen Varianten
- in der strategischen Planung zur Ermittlung von Optimierungspotentialen
- zur Ermittlung der wesentlichen Einflussfaktoren
- zur Beurteilung von Massnahmen.

Die vorliegende Studie soll vor allem als Entscheidungsgrundlage dienen, ob ein Recyclingsystem für PE-Folien aus ökologischer Sicht sinnvoll ist. Es dient jedoch auch zur Erfassung der relevanten Umweltauswirkungen und damit als Basis für Optimierungsmassnahmen.

1.2 Vorgehen bei der Ökobilanzierung

Nachdem die Fragestellung und die zu untersuchenden Systeme definiert sind, werden die Waren-, Stoff- und Energieflüsse sowie der Ressourcenbedarf erfasst. Anschliessend werden die Auswirkungen auf die Umwelt mit Hilfe von gewählten Indikatoren, welche diese Wirkungen beschreiben, bestimmt. Mit dem Ziel, die Ergebnisse mit einer Kennzahl auszudrücken und damit die Auswertung zu ermöglichen oder zumindest zu erleichtern, kann eine Bewertung der verschiedenen Umweltauswirkungen durch eine entsprechende Gewichtung erfolgen.

Nach ISO 14'040 [1] umfasst eine Ökobilanz die folgenden Schritte:

- Festlegen des Zielsystems und der Rahmenbedingungen

- Erfassen der relevanten Stoff- und Energieströme sowie den Ressourcenbedarf (Sachbilanz)
- Bestimmen der Auswirkungen auf die Umwelt (Wirkbilanz)
- Interpretation der Umweltauswirkungen aufgrund der Zielsetzungen (Bewertung)
- Erarbeiten von Empfehlungen und geeigneten Massnahmen (Optimierung).

Wie Abb. 8 zeigt, ist dies kein linearer Ablauf, sondern ein interaktiver Erkenntnis- und Optimierungsprozess.

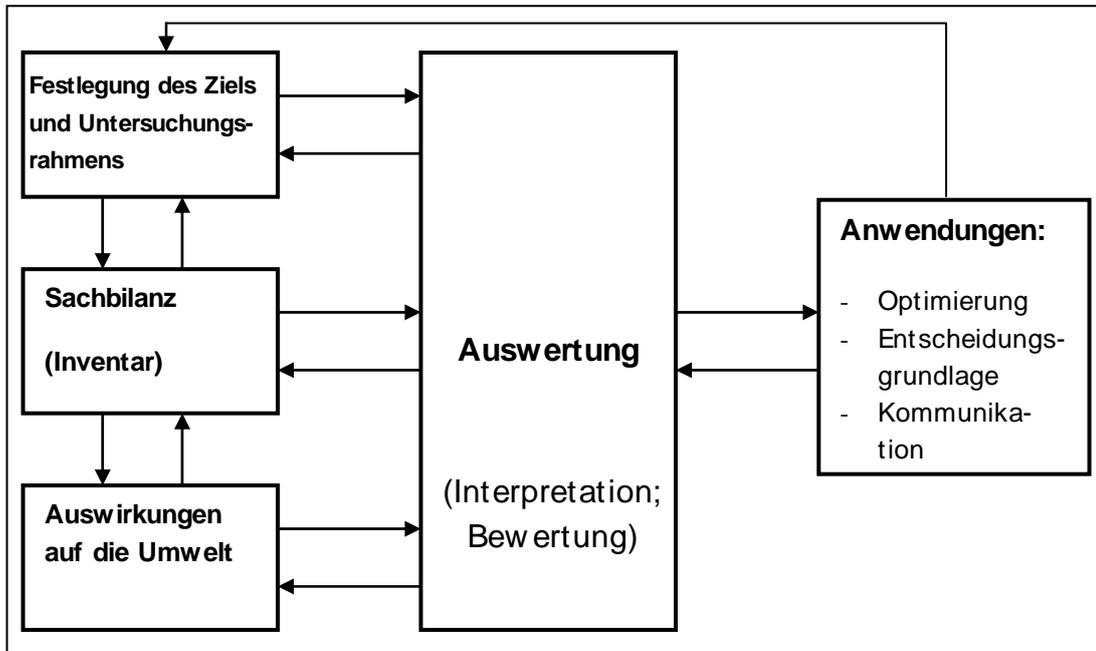


Abb. 8 Schritte einer Ökobilanz nach ISO 14'040 ff

Die vorliegende Studie richtet sich weitgehend nach der Norm ISO 14'040; das Vorgehen entspricht in den wesentlichen Aspekten deren Anforderungen. In gewissen Punkten, wie der Verwendung von gesamt aggregierenden Methoden, geht die vorliegende Studie jedoch über die Norm hinaus.

Da die Studie für die Öffentlichkeit bestimmt ist, soll sie eine hohe Glaubwürdigkeit haben. Aus diesem Grund wurde ein externes Review durch Günther Dehoust des Öko Institutes, Deutschland, durchgeführt (siehe Kapitel **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**).

1.3 Zielsetzung und Rahmenbedingungen

Die Definition der zu untersuchenden und vergleichenden Systeme hängt von der Zielsetzung bzw. Fragestellung ab. Daraus ergeben sich unterschiedliche Rahmenbedingungen und Systemgrenzen. Die Systemgrenzen definieren, welche Prozesse und vorgelagerten Prozesse berücksichtigt werden. Dabei müssen der zeitliche und geographische Rahmen der verwendeten Daten sowie die zu untersuchenden Umweltauswirkungen festgelegt werden. Dies ist der erste und sehr wichtige Schritt bei der Erstellung einer Ökobilanz.

1.3.1 Fragestellungen

Gemäss den Vorgaben und Zielen in Kapitel 0 soll mit dieser Arbeit die folgende Fragestellung beantwortet werden:

Welches ist aus ökologischer und ökonomischer Sicht in der Schweiz die sinnvollste Verwertung von gebrauchten PE-Folien?

Daraus ergeben sich die folgenden Teilfragestellungen:

- Wie hoch ist der ökologische Nutzen des PE-Folien-Recyclings in der Schweiz?
- Welche Umweltwirkungen ergeben sich für die Verwertungsszenarien:
 - *stoffliche* Verwertung von PE-Recyclat (z.B. als Kabelschutzrohr),
 - *rohstoffliche* Verwertung via Kunststoffverölung (z.B. für Nutzung als Heizöl) und
 - *energetische* Verwertung im Zementwerk oder einer KVA?
- Welche Kosten verursachen die verschiedenen Verwertungswege?
- Wie sieht die Öko-Effizienz der verschiedenen Verwertungswege aus?
- Wo treten beim PE-Recycling die höchsten Umweltauswirkungen auf?
- Welche ökologischen und ökonomischen Optimierungspotentiale bestehen beim heutigen System?
- Welche Schlussfolgerungen können daraus hergeleitet werden?

Antworten auf diese Fragen werden in Kapitel 4 gegeben.

1.3.2 Verwertungsszenarien

Folgende Verwertungsszenarien werden untersucht und verglichen:

- PE-Folien werden in der KVA mit Energienutzung entsorgt (Referenz-System)
- PE-Recycling für neue Produkte in der Schweiz
- PE-Folien werden im Zementwerk energetisch verwertet (Ersatzbrennstoff für Kohle/Erdöl).
- PE-Folien werden einem rohstofflichen Recycling mittels Kunststoffverölung zugeführt (z.B. für energetische Nutzung Heizöl-Ersatz).

Die betrachteten Szenarien entsprechen den aktuell vorhandenen Verwertungswegen in der Schweiz. Da heute die PE-Folien mehrheitlich in der KVA entsorgt werden, wird dies als Referenz-System für die Auswertungen gewählt.

1.3.3 Vergleichsbasis, die "Funktionelle Einheit"

Die Bewertung eines Produktes oder Prozesses muss immer relativ zu Alternativen erfolgen, welche denselben Nutzen erbringen bzw. dieselbe Funktion erfüllen. Die Grösse, auf welche sich der Vergleich bezieht, wird als funktionelle Einheit bezeichnet. Als funktionelle Einheit wird auf Grund der Fragestellung in dieser Untersuchung verwendet:

Die Verwertung bzw. Entsorgung von 1 Tonne gebrauchter PE-Folien

Um dem Umstand Rechnung zu tragen, dass die verschiedenen Verwertungs-/Entsorgungswege zu ungleichen, nicht direkt vergleichbaren Produkten führen, müssen die Systemgrenzen entsprechend erweitert werden, siehe Kapitel 1.3.6. Die Stoffflüsse der analysierten Verwertungswege sind in Kapitel 1.3.5 dargestellt.

1.3.4 Systemgrenzen

Entsprechend dem Ökobilanz-Ansatz werden soweit möglich alle umweltrelevanten Prozesse über den gesamten Lebensweg erfasst und bewertet.

Inhaltliche Systemgrenzen

Die vorliegende Studie umfasst im Wesentlichen die folgenden Prozesse und Dienstleistungen, siehe auch Abb. 9:

- Bedarf an Energieträgern
- Bereitstellung der Energieträger wie Erdöl, Erdgas, Kohle oder Strom etc.
- Herstellung von PE-Granulat
- Bedarf an Grund- und Hilfsstoffen sowie materiellen Ressourcen wie Wasser
- Herstellung der benötigten Grund- und Hilfsstoffe
- Transporte, inkl. der dazu benötigten Infrastruktur und Treibstoffbereitstellung
- Verwertung / Entsorgung (z.B. Verbrennung in KVA oder Zementwerk)
- Bereitstellung der (Neben-) Produkte, welche bei der Verwertung entstehen, wie z.B. Strom, Wärme, Zement oder Öl.

Für alle diese Prozesse werden die Auswirkungen durch Emissionen in Boden, Luft und Wasser sowie der Ressourcenbedarf, wie energetische Ressourcen oder Landnutzung, berücksichtigt.

Nicht berücksichtigt wird die Produktherstellung aus PE-Granulat, wie z.B. Folienblasen, Rohre extrudieren. Es wurde angenommen, dass diese in allen Systemen identisch sind (gleiche Aufwände für die Verarbeitung von Neu- und Recyclinggranulat). Die Infrastruktur der verschiedenen Verarbeitungsbetriebe wurde abgeschätzt. Erfahrungsgemäss sind deren Beiträge nicht entscheidend für das Resultat. Siehe Kapitel 3.2.1

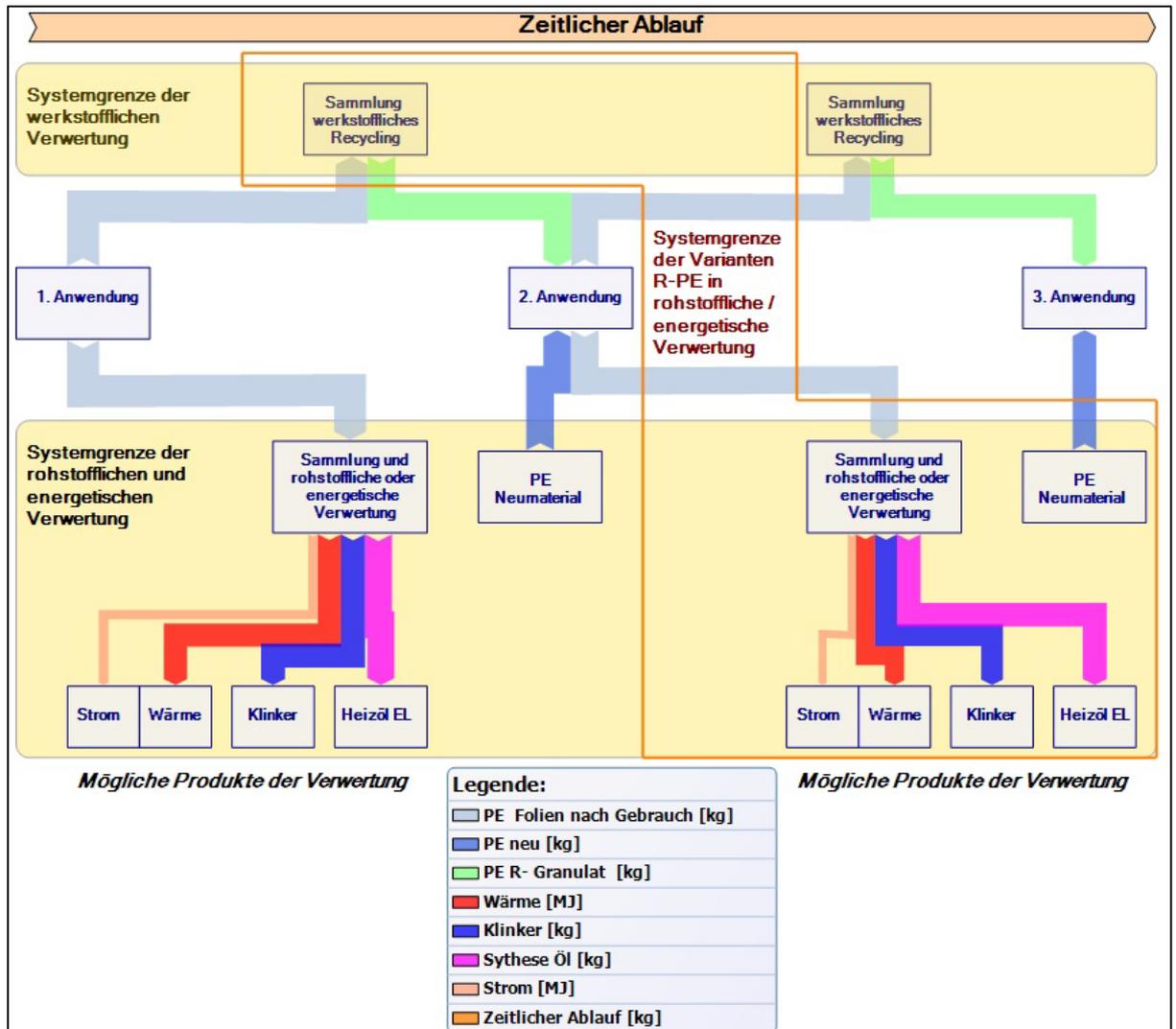


Abb. 9 Systemgrenzen der verschiedenen Verwertungen

Zeitliche Systemgrenzen

Da es sich bei den untersuchten Anwendungen (Folien) um relativ kurzlebige Produkte handelt, wird als zeitliche Systemgrenze die aktuelle Situation der Schweiz verwendet. Dies bedeutet z.B., dass der aktuelle Strom-Mix oder die aktuelle Energienutzung der KVA's in der Schweiz verwendet werden. Mögliche Veränderungen, wie z.B. eine höhere Energienutzung in der KVA oder ein anderer Strom-Mix, werden mit Sensitivitätsanalysen abgedeckt.

Räumliche Systemgrenzen

Die untersuchten Verhältnisse gelten primär für die Schweiz. Als Strom-Mix wird entsprechend für Produktionen in der Schweiz der Schweizer Versorgungs-Mix verwendet. Für die Herstellung der Grundmaterialien und der Bereitstellung der Energieträger werden soweit möglich die Gegebenheiten der entsprechenden Länder oder der europäische Mix berücksichtigt.

1.3.5 Stoffflüsse PE-Folien Recycling - Allokation

Die aktuell produzierten PE-Recyclinggranulate werden vorwiegend für Produkte wie z.B. Kabelschutzrohre, Eimer etc. eingesetzt. Eine Wiederverwertung als PE-Folie wäre möglich, findet aber momentan in der Praxis nicht statt.

In der Ökobilanzierung wird zwischen den folgenden zwei Arten von werkstofflichem Recycling unterschieden: „Closed- und Open Loop“ Recycling. Nach ISO 14'041 kennzeichnen sie sich wie folgt [2]:

- **Geschlossener Kreislauf (Closed Loop)**

Bei diesem können aus den PE-Recyclaten wieder PE-Produkte in gleicher Qualität hergestellt werden. Das PE-Recyclat ersetzt neues PE zu 100%. Heute ist ein „closed loop“ für Baufolien möglich. Baufolien können mit 100% Recyclat aus Baufolien hergestellt werden („Folie zu Folie“). Im Rahmen der Ökobilanzierung ist bei diesem Ansatz nicht wesentlich, dass dasselbe Produkt hergestellt wird, sondern ob das rezyklierte Material dieselben inhärenten Materialeigenschaften wie das ursprüngliche Material besitzt und damit Produkte von gleicher Qualität hergestellt werden können, siehe dazu auch ISO 14'040.

- **Offener Kreislauf (Open Loop)**

Bei diesem wird das PE-Recyclat einer anderen stofflichen Verwertung zugeführt, wobei das Material wesentliche Eigenschaften verändert hat. Die Qualität des PE-Recyclates erfüllt nicht die gleichen Anforderungen wie das Neugranulat und kann wegen der eingeschränkten Verwendung nicht 100% des Neugranulates ersetzen. Es ist daher notwendig, eine Allokation zur Abbildung des Minderwertes vorzunehmen. Gemäss ISO können als Basis für die Allokation physikalische Eigenschaften oder ökonomische Werte verwendet werden.

Die Systembetrachtung als geschlossener oder offener Kreislauf kann einen wesentlichen Einfluss auf das Resultat haben, da bei einem offenen Kreislauf üblicherweise dem Recyclat nicht der volle Wert für den Ersatz von Neumaterial angerechnet wird. Bei den hier untersuchten Systemen ist die Wahl der Allokationsart nicht eindeutig. Einerseits kann, gemäss Angabe des Recycling-Betriebes, das R-PE in verschiedenen Anwendungen, wie Kabelschutzrohren, neues PE zu 100% ersetzen. Dies spricht für eine 100% Allokation entsprechend den werkstofflichen Eigenschaften. Andererseits hat das R-PE einen ökonomischen Wert von 55% bis 80% gegenüber neuem PE. Dies ist ein Indikator dafür, dass R-PE sicher nicht in allen Eigenschaften neuem PE entspricht. Dies würde für eine Allokation sprechen, welche geringer als 100% ist und im schlechtesten Falle nur 55% beträgt, d.h. eine Gutschrift in der Höhe von 55% der Umweltauswirkungen, welche sich für den Ersatz von neuem PE ergeben.

In der vorliegenden Studie wurden beide Allokationen verwendet. Zum heutigen Zeitpunkt gibt es genügend Anwendungen, in denen R-PE neues PE zu 100% ersetzen kann. Daher erscheint die 100% Allokation auf Grund der werkstofflichen Eigenschaften von R-PE der aktuellen Situation zu entsprechen. Falls in Zukunft mehr R-PE hergestellt wird, so ist es möglich, dass nur noch begrenzt ein Markt für R-PE besteht, in dem 100% neues PE ersetzt werden kann. Für diese Fälle ist eine Allokation korrekter, welche dem Umstand Rechnung trägt, dass das R-PE im Vergleich zu neuem PE nicht die gewünschten Eigenschaften, wie z.B. Schlagzähigkeit, Reissfestigkeit, Farbe, Lebensmitteltauglichkeit oder Viskosität aufweisen kann. Teilweise können diese Eigenschaften mit Massnahmen wie z.B. einen vermehrten Einsatz von R-PE oder durch Zumischung von neuem PE erreicht werden. Der Preis für R-PE im Vergleich zu neuem PE widerspiegelt bis zu einem gewissen Grad diese Situation.

Die Modellierung dieses Sachverhaltes kann in der Ökobilanz erfolgen, indem entweder bei den Verbrennungsszenarien (KVA und Zementwerk) weniger PE Granulat hergestellt werden muss, um denselben Nutzen zu erreichen, oder indem beim Recyclingprozess ein zusätzlicher Anteil neues PE bereitgestellt werden muss, um den Nutzen eines 100%igen Ersatzes zu erreichen; wobei beide Ansätze bezüglich den Unterschieden der verschiedenen Verwertungswege zu denselben Resultaten führen. In dieser Studie wird der zweite Ansatz verwendet. Dies bedeutet, dass bei einer Allokation für R-PE von nur 55%, müsste zusätzlich 45% neues PE hergestellt werden, um denselben Nutzen, wie bei einem 100%igen Ersatz von neuem PE zu erreichen; wobei die 55% wohl den schlechtesten Fall darstellen. Es ist fraglich, ob für solche Anwendungen R-PE eingesetzt würde.

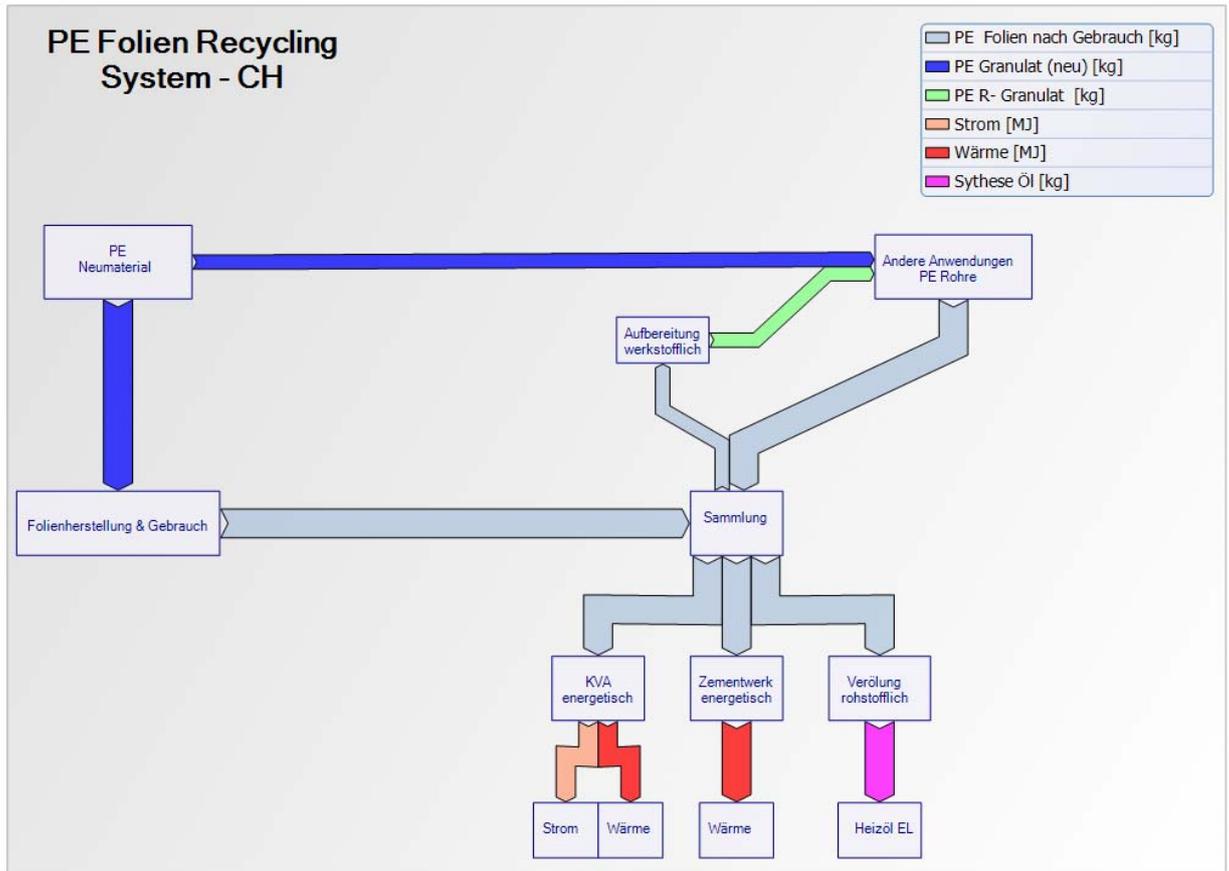


Abb. 10 Stoffkreislauf des PE-Recyclings in der Schweiz „Open Loop“. Ein „Closed Loop“ würde mit den grün eingetragenen Pfeilen erreicht.

In dieser Studie werden im Wesentlichen zwei unterschiedliche Verwertungstypen untersucht:

- **Material verlässt den Kreislauf**
PE Neumaterial (Folien, Hohlkörper) wird nach seiner ersten Nutzung einer energetischen Verwertung (KVA oder Zementwerk) oder einer rohstofflichen Verwertung zugeführt. Das Material verlässt den Kreislauf, Produkte müssen aus PE-Neumaterial hergestellt werden.
- **Material bleibt im Stoffkreislauf**
PE Neumaterial (Folien, Hohlkörper), welches nach seiner ersten Nutzung zu PE-Recyclat verarbeitet wird. Das Material steht weiterhin als Rohstoff für den Stoffkreislauf und somit PE-Produkte zur Verfügung. Eine spätere energetische oder rohstoffliche Verwertung steht weiterhin offen.

Der Nutzen der verschiedenen energetischen Verwertungen ist in Abb. 10 mit den verschiedenen, eingefärbten Pfeilen illustriert. Die Verwertung mittels Kunststoffverölung führt zu Öl, welches als zurückgewonnener Rohstoff hauptsächlich als Heizöl für Wärme oder in einem BKW für Wärme und Strom eingesetzt wird. Grundsätzlich wäre es möglich aus diesem Öl wieder PE oder einen anderen Kunststoff herzustellen, jedoch ist eine energetische Nutzung wahrscheinlicher. Auf die Berechnungen in dieser Studie hat dies keinen Einfluss.

Im Zementwerk wird der Rohstoff Klinker gewonnen, dabei können PE-Folien als Ersatzbrennstoff Kohle/Erdöl eingesetzt werden. Die Verbrennung in der KVA erzeugt Strom und Wärme.

1.3.6 Systemerweiterung

Mit der Systemerweiterung wird dem Umstand Rechnung getragen, dass die verschiedenen Verfahren zu ungleichen Produkten führen und daher nicht direkt miteinander verglichen werden können. Um die Vergleichbarkeit herzustellen, müssen die untersuchten Systeme so erweitert werden, dass sie den gleichen Nutzen haben. Hierzu ein Beispiel: Bei der Verbrennung von PE in einer KVA wird Strom und Wärme hergestellt. Wird PE recycelt, muss entsprechend Strom und Wärme anderweitig (fossile Ressourcen) hergestellt werden. Umgekehrt muss bei einer Verbrennung PE neu bereitgestellt werden, da das Material nicht mehr für den PE-Stoffkreislauf zur Verfügung steht. Durch diese Erweiterung wird die Vergleichbarkeit der verschiedenen Szenarien hergestellt (siehe auch Tabelle 3).

Methodisch kann die Vergleichbarkeit auf zwei Arten erreicht werden:

- **Basket of Benefits:**
Alle zusätzlichen Nutzen eines Systems, wie z.B. Strom und Wärme bei der KVA, müssen bei den anderen Systemen zusätzlich bereitgestellt werden. Entsprechend werden die Belastungen durch diese Bereitstellung bei den anderen Systemen berücksichtigt. Das heisst, es wird der gesamte „Korb an Nutzen“ (Basket of Benefits) berücksichtigt. Die zusätzlichen Belastungen mit diesem Ansatz sind im oberen Teil der Tabelle 3 im roten Bereich mit einem + dargestellt.
- **Avoided Burdens:**
Für die zusätzlichen Nutzen eines Systems und die damit vermiedenen Belastungen (Avoided Burdens) werden diesem System entsprechende Gutschriften gewährt. Die Gutschriften mit diesem Ansatz sind im oberen Teil der Tabelle 3 im grünen Bereich mit einem - dargestellt.

Auch wenn die absoluten Resultate der beiden Ansätze sehr unterschiedlich sein können, so sind die Differenzen der untersuchten Systeme gleich. Der Vorteil des Ansatzes Basket of Benefits besteht darin, dass die Umweltauswirkungen aller Nutzen aufgeführt sind. Dabei kann es geschehen, dass die Summen sehr gross und entsprechend die relativen Unterschiede zwischen den untersuchten Systemen sehr klein werden. Dies kann einen Vergleich und die Schlussfolgerungen erschweren. Demgegenüber werden bei der Methode „Avoided burdens“ durch die Vergabe von Gutschriften Differenzen gebildet, welche zu kleinen Werten und grossen relativen Unterschieden führen. Dies zeigt die Unterschiede zwischen den Systemen besser auf, kann jedoch auch zu Fehlinterpretationen führen, falls die relativen Unterschiede wohl gross jedoch nur scheinbar signifikant sind.

Unter anderem aus diesen Gründen wurde in dieser Studie eine Mischform gewählt. Für das R-PE Granulat wurde die Systemerweiterung (Basket of Benefit) gewählt, während die anderen Nebenprodukte, wie Wärme und Strom bei der KVA oder Heizöl bei der Verölung als Gutschriften (Avoided Burdens) ausgewiesen werden (siehe Tabelle 3 unterer Teil). Diese Form wurde auch deshalb gewählt, weil sie den Untersuchungsgegenstand dieser Studie gut abbildet, da sie ausgehend von den zur Verwertung anfallenden Folien den ganzen Stoffkreislauf, welche die Granulatherstellung und die Verwertung beinhaltet, aufzeigt.

In Tabelle 3 finden sich die wichtigsten Prozesse der untersuchten Varianten mit den entsprechenden Systemerweiterungen für die unterschiedlichen Ansätze. Der jeweilige Nutzen der Verwertungen ist bei Ansatz ‚Avoided Burdens‘ als Gutschrift mit einem "-" im grün markierten Bereich ausgewiesen. Dieser Nutzen muss beim Ansatz ‚Basket of Benefits‘ in den anderen Systemen ebenfalls erbracht werden und ist als zusätzliche Belastung mit einem "+" im rot markierten Bereich aufgeführt.

Tabella 3 Systemerweiterungen „Basket of Benefits“ und „Avoided Burdens“ sowie verwendete Mischform aus beiden Ansätzen

	Produkte	KVA	Zementwerk	Verölung	PE-Recycling
Notwendige Systemerweiterung "basket of benefits"	Granulat	+	+	+	
	Heizöl	+	+		+
	Klinker	+		+	+
	Strom		+ ab Netz	+ ab Netz	+ ab Netz
	Wärme		+ ab Erdgas/- öl	+ ab Erdgas/- öl	+ ab Erdgas/- öl
Systemerweiterung Gutschriften "avoided burdens"	Granulat				-
	Heizöl			-	
	Klinker		-		
	Strom	- ab Netz			
	Wärme	- ab Erdgas/- öl			
Gewählte Mischform der Systemerweiterung ,basket of benefits‘ für Granulat und ,avoided burdens‘ für übrige Verwertungen					
Belastungen "basket of benefits"	Granulat	+	+	+	
Gutschriften "avoided burdens"	Heizöl			-	
	Klinker		-		
	Strom	- ab Netz			
	Wärme	- ab Erdgas/- öl			

1.4 Sachbilanz

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

- die Beziehungen eines Prozesses mit anderen Prozessen der Technosphäre, wie z. B. Menge an benötigten Rohmaterialien, 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. CO₂, VOC, Methan, Stickoxide u.a..

1.4.1 Grundlage

Der grösste Teil der PE Folien wird aus LDPE hergestellt. Aus diesem Grunde werden die Berechnungen im Basisszenario mit LDPE durchgeführt. Silagefolien, welche eine hohe Haftung aufweisen müssen, werden typischerweise aus LLDPE hergestellt und zudem mit PIB gemischt und teilweise mit EVA versehen, um eine gute Haftung zu erreichen. Diese beiden Zusatzstoffe verändern die Eigenschaften von PE, jedoch beeinträchtigen sie das werkstoffliche Recycling nicht grundsätzlich, da sie mit PE mischbar sind und dadurch keine Entmischung beim R-PE stattfindet. Als Sensitivität werden die Berechnungen auch für LLDPE durchgeführt.

Da es sich bei den Zusatzstoffen PIB und EVA ebenfalls um Polyolefine handelt, welche im Wesentlichen aus Kohlenstoff und Wasserstoff bestehen, haben diese Zusätze keine wesentliche Veränderung bei der Verbrennung bzw. Verölung zu Folge.

Die Modellierung der Systeme werkstoffliches Recycling und Verölung, Beziehung der Prozesse mit anderen Prozessen der Technosphäre, wie Energiebereitstellung, benötigte Hilfsstoffe etc., basieren auf betriebsspezifischen Daten. Die Modellierung der KVA und des Zementwerkes basieren auf Literaturdaten [6] und wurden falls notwendig angepasst.

1.4.2 Datenherkunft

Angaben zum PE-Recycling, Verölung und Zementwerk:

- Daten bezüglich der Sammlung, Sortierung und Verarbeitung zu Granulat wurden direkt bei den betreffenden Firmen erhoben.
- Für Verschmutzungen, welche als Ausschuss anfallen, werden Durchschnittswerte verwendet, welche von der Firma InnoPlastics zur Verfügung gestellt wurden. Es handelt sich dabei um 5% Papier und 9% Anhaftungen und kunststoffähnliche Stoffe. Diese werden in einer KVA entsorgt, bzw. im Zementwerk verbrannt.
- Die Angaben zu Transportdistanzen seitens InnoPlastics werden durch Schätzungen der durchschnittlich verwendeten Transportmittel ergänzt.
- Die Daten zu den verbrauchten Sammelsäcken und -behältern beruhen auf Expertenschätzungen.
- Die Daten zur Verölung von PE wurden von der Firma plastOil zur Verfügung gestellt. Sie beruhen auf Messungen und Analysen, welche im Rahmen der Erstellung einer Ökobilanz [3] durchgeführt wurden. Diese Daten wurden mit Angaben zur geplanten Verölungsanlage der Ökoenergie Umweltfonds GmbH & Co. KG überprüft [4], [5].
- Die Angaben zur Zementherstellung basieren auf Angaben der Holcim AG.

Für die Durchführung der Ökobilanz wird ein Durchschnitt der Angaben berechnet, um den momentanen schweizerischen Ist-Zustand besser abbilden zu können.

1.4.3 Annahmen und Berechnungsgrundlagen

Da keine detaillierten Angaben zu den Verschmutzungen vorlagen, wurde angenommen, dass diese keine erhöhte Verschmutzung von Schwermetallen oder Halogenen enthalten, welche bei der Verbrennung zu Problemen führen können.

Für die Basisprozesse wie z.B. Bereitstellung der fossilen Energieträger und des Stromes, Transporte, Entsorgung in der KVA sowie für die Erstellung der Sachbilanz, Beziehung der Prozesse mit der natürlichen Umwelt sowie die Modellierung aller Grundlagenprozesse werden meistens bestehende Grundlagedaten weitgehend aus ecoinvent Version 2.2 [6] verwendet. Dabei handelt es sich um Daten, welche einen sehr hohen Qualitätsstandard haben und auch international anerkannt sind.

Bei der Verbrennung in der KVA wurden die chemischen Zusammensetzungen und die entsprechenden Transferkoeffizienten berücksichtigt.

Dabei wurden die Folien als PE (Kohlenwasserstoffe) betrachtet. Der Sauerstoffgehalt in EVA wurde vernachlässigt, jedoch wurde berücksichtigt, dass diese Folien z.B. keinen Schwefel enthalten, welcher zu SO_2 -Emissionen führen würde. Die Verschmutzung wurde einerseits als Papier behandelt und mit einem durchschnittlichen Siedungsabfall angenähert [10].

Die Datengrundlagen in ecoinvent berücksichtigen, dass gewisse Emissionen, wie NO_x , Staub oder auch Dioxin bis zu einem bestimmten Grad immer bei Verbrennungsprozessen in der KVA auftreten, unabhängig vom zu entsorgenden Material. In ecoinvent wird dies im Prozess „Prozessspezifisches Kehrichtverbrennung“ berücksichtigt. Dieser wurde ebenfalls verwendet, jedoch wurde eine für dieses Projekt wesentliche Anpassung an diesem Prozess aus ecoinvent v2.2 vorgenommen. Die in diesem Prozess angegebenen Dioxin-Emissionen (TCDD-Äquivalente, als 2,3,7,8-tetrachlorodibenzo-p-dioxin) betragen 7.5 ng/kg Abfall. Dies entspricht bei einem Abluftstrom von 6 Nm^3 einer Konzentration von 1.25 ng/Nm^3 . Dieser Wert liegt weit über dem heute gültigen Grenzwert von 0.1 ng/Nm^3 . Entsprechend wurde der Wert auf $0.6 \text{ ng Dioxin / kg Abfall}$ reduziert. Dieser Wert kann bei heutigen KVAs als maximaler Wert angesehen werden.

Es gibt Studien, welche eine Reduktion der NO_x Emissionen bei der Co-Verbrennung von Kunststoffen in Zementwerken zeigen; dies vor allem im Vergleich zu Gas-befeuerten Öfen. In der Schweiz ersetzt der Kunststoff Kohle oder Schweröl. Eine Rücksprache mit Holcim für ein anderes Projekt hat ergeben, dass keine signifikante Reduktion der NO_x Emissionen durch den Einsatz von Kunststoffen nachgewiesen werden konnte. Entsprechend wurden die NO_x -Emissionen des Zementwerkes nicht angepasst.

1.5 Bestimmung der Umweltauswirkungen (Wirkbilanz)

Selbst die Beschränkung auf die "wichtigsten" Stoffe 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, wird folgendermassen vorgegangen:

- Klassifizierung (Einteilung der Einflüsse bezüglich ihrer Auswirkungen):
Die Stoffe werden nach ihren unterschiedlichen Wirkungen auf die Umwelt gruppiert.
- Charakterisierung (Berechnung der Auswirkungen auf die Umwelt):
Dabei werden die einzelnen Substanzen entsprechend ihres Schädigungspotentials bezüglich einer Leitsubstanz gegeneinander gewichtet. Daraus ergeben sich die Schädigungspotentiale bezüglich einer bestimmten Umweltauswirkung.

Folgende Wirkungen bzw. Aspekte werden berechnet und für die Schlussfolgerungen und Diskussionen verwendet:

- **Treibhauspotential (GWP)**
Einfluss auf das Klima infolge der Emission von klimawirksamen Stoffen wie Kohlendioxid (CO₂), Lachgas (N₂O) oder Methan (CH₄). Diese Auswirkung wird gemäss IPCC aus dem Jahre 2007 berechnet und in diesem Bericht ausgewiesen. [10]
- **Kumulierter Energieaufwand (KEA)**
graue Energie oder Verbrauch an nicht erneuerbaren energetischen Ressourcen wie z. B. Erdöl oder Erdgas. [13]
- **Säurebildungspotential**
Beitrag zur Versauerung von Böden und Gewässern zum Beispiel durch Stickoxide und Schwefeldioxid. Die Berechnung erfolgt auf der Basis der Methode CML [8].
- **Eutrophierung oder Überdüngung**
Veränderung des Nährstoffgleichgewichtes in Boden und Wasser durch den Eintrag von Verbindungen, die Stickstoff und Phosphor enthalten. Die Berechnung erfolgt auf der Basis der Methode CML [8].
- **Ozonbildungspotential**
Beitrag zur Bildung von Ozon (Sommersmog) infolge der Emission von Stoffen wie z.B. Kohlenwasserstoffe und Stickoxide (NO_x). Die Berechnung erfolgt auf der Basis der Methode CML [8].
- **Menschliche Gesundheit**
Auswirkungen von Emissionen auf die menschliche Gesundheit bewertet nach der Methode IMPACT [7].
- **Ökosystemqualität**
Auswirkungen auf Tiere und Pflanzen durch die Emission von Stoffen. Dabei wird zwischen der Toxizität in Boden und Wasser unterschieden. Die Berechnung erfolgt auf der Basis der Methode IMPACT [7].

Die verschiedenen Wirkungen bilden zusammen mit den Bewertungsmethoden (siehe Kapitel 1.6) die Basis für die Beurteilung. Aus Gründen der Übersichtlichkeit werden nicht alle Wirkungen in diesem Bericht ausgewiesen, sondern auf Grund der Aktualität nur die beiden Indikatoren:

- Kumulierter Energieaufwand (KEA)
- Treibhausgaspotential (GWP)

Die Ergebnisse der anderen Auswirkungen sind im Anhang zu finden.

1.5.1 Kumulierter Energieaufwand (KEA)

Der KEA ist - entsprechend der Definition in der VDI-Richtlinie 4600 [13] - die Gesamtheit aller primärenergetisch bewerteten, direkten und indirekten Energieaufwendungen entlang eines Produktlebensweges. Primärenergetisch bedeutet dabei vereinfacht "bis zur Lagerstätte"; anschaulich: Nicht der Stromverbrauch, sondern die zur Stromproduktion verfeuerte Kohle inkl. der Kohle zur Stromerzeugung für die Kohleförderung gehen in den KEA ein. Der KEA unterscheidet u.a. zwischen erneuerbaren und nicht erneuerbaren Ressourcen. In dieser Studie wird als Indikator der Teil der nicht erneuerbaren energetischen Ressourcen verwendet, da diese entscheidend sind für die untersuchten Systeme.

1.5.2 Treibhauspotential - Global Warming Potential (GWP)

Die Charakterisierung verschiedener Gasemissionen gemäss ihrem Beitrag zum Klimawandel und deren Aggregation zum Indikator Treibhauspotential gehört heute zu den am meisten verwendeten Kennzahlen der Umweltauswirkungen. Im Wesentlichen handelt es sich dabei um die Gase CO₂, Methan, Lachgas, FKW und FCKW. Die Berechnung des GWP erfolgt, indem die potentielle Wirksamkeit der verschiedenen Gase relativ zur Leitsubstanz CO₂ bestimmt wird. Eine Multiplikation der Wirkfaktoren mit den Emissionsmengen der verschiedenen Substanzen sowie die anschliessende Addition ergibt den Indikator mit der Einheit kg CO₂ Äquivalent. Die verwendeten Faktoren basieren auf den Forschungen des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) aus dem Jahre 2007. Dieser Indikator berücksichtigt nur den Einfluss auf das Klima. Andere Auswirkungen wie Versauerung, Überdüngung, Landbeanspruchung, Toxizität, Ressourcenverbrauch etc. werden nicht berücksichtigt. Diese werden in den anderen Indikatoren bzw. in den gesamtaggregierenden Methoden berücksichtigt.

1.6 Bewertung der Umweltbelastungen

Jeder der in Kapitel 1.5 aufgeführten Indikatoren der Wirkungsbilanz deckt nur einen Teilbereich der gesamten Umweltauswirkungen ab. Erst die Berücksichtigung der verschiedenen Auswirkungen gibt jedoch 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. Während die Wirkungsbilanz prinzipiell auf objektiven, wissenschaftlichen Modellen beruht, ist die Bewertung der verschiedenen Umweltauswirkungen von Wertmassstäben abhängig. Aus diesem Grunde werden diese gesamtaggregierenden Methoden teilweise abgelehnt. Dabei ist zu beachten, dass auch die Auswahl der Umweltauswirkungen subjektiv ist. Falls nur ein Teil der Auswirkungen, z.B. Kumulierter Energieaufwand (KEA) und Treibhauspotential betrachtet werden, kommt dies einer Gewichtung der anderen Auswirkungen mit Null gleich, was sicher falsch ist. Siehe dazu auch [12]. Als Entscheidungshilfe für die Beurteilung werden in dieser Arbeit die folgenden beiden Methoden verwendet, welche die Umweltauswirkungen zu einer Kennzahl (Indikator) zusammenfassen:

- Methode der ökologischen Knappheit, überarbeitete Ausgabe 2006
- ReCiPe

Die Verwendung verschiedener Bewertungsmethoden erlaubt es, die Aussagekraft der Resultate abzusichern.

1.6.1 Methode Ökologische Knappheit 2006 ("Umweltbelastungspunkte" - UBP)

Diese Methode (BUWAL 1990, Überarbeitung 1997 und 2006) [9] wurde mit dem Ziel entwickelt, die verschiedenen Umweltauswirkungen zu einer einzigen Kenngrösse (Umweltbelastungspunkte) zusammenzufassen. Es handelt sich um eine Stoffflussmethode, bei der neben den bereits bestehenden Belastungen die umweltpolitischen Ziele der Schweiz berücksichtigt werden. Je grösser die Umweltbelastung eines Produktes ist, desto mehr Umweltbelastungspunkte erzeugt seine Bewertung. In diesem Projekt wurde die überarbeitete Version des BAFU aus dem Jahre 2006 verwendet.

Eine für dieses Projekt relevante Anpassung wurde betreffend der Bewertung von Austrägen an organischen Stoffen ins Grundwasser vorgenommen (TOC, Total organischer Kohlenstoff). Dabei wurde die Methode ohne den Teil TOC ins Grundwasser verwendet (siehe Illustration im Anhang). Diese Anpassung betrifft ausschliesslich die Bewertung von deponierten Rückständen und erfolgt aus folgenden Überlegungen:

Die Verbrennung von Abfällen in der KVA und anschliessende Deponierung von Rückständen mit einem minimalen Gehalt an organischer Substanz entspricht den Schweizer Zielvorgaben. Obwohl nach den gesetzlichen Vorgaben entsorgt wird, bewertet die Methode den minimalen verbleibenden Wert in der Schlacke stark. Dabei wird mangels gesetzlichen Grenzwerten für die Bewertung von Einträgen ins Grundwasser die Vorschrift der Deponierung beigezogen (max. 5% organisches Material). Die daraus folgende hohe Gewichtung der gesetzeskonformen Entsorgung wird als nicht sinnvoll erachtet.

1.6.2 ReCiPe

Beim ReCiPe (Goedkoop M.J. 2009) 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. Das Ziel der ReCiPe Methode ist die lange Inventarliste (Emissionen, Ressourcen etc.) in eine begrenzte Zahl von Indikatorbewertungspunkten zu transformieren. Die Bewertung mittels dieses Indikators drückt die relative Gewichtung einer Umweltwirkungskategorie aus [14].

1.7 Grenzen der vorliegenden Untersuchung

1.7.1 Inhaltlich

Sollten sich an der Art und Ausprägung des PE-Recyclings sowie alternativen Verwertungswegen grundlegende Änderungen ergeben, so muss allenfalls überprüft werden, ob die für diese Erhebung getroffenen Annahmen und Berechnungen weiterhin Gültigkeit haben.

Die verwendeten Daten beziehen sich auf die Schweiz, deshalb müssten die Szenarien bei einer Übertragung auf das Ausland überprüft werden.

Die vorliegende Ökoeffizienzanalyse beschränkt sich auf die ökologischen und ökonomischen Wirkungen der PE-Verwertungsoptionen. Andere Aspekte wie zum Beispiel soziale Auswirkungen oder technische Machbarkeiten sind nicht Umfang der vorliegenden Studie.

In dem Sinne handelt es sich bei der vorliegenden Studie nicht um eine umfassende Entscheidungsanalyse, sondern um eine umfassende Analyse des Teilaspektes Umwelt und Ökonomie. Diese muss ggf. durch weitere Aspekte entsprechend ergänzt werden.

1.7.2 Methodisch

In dieser Studie wurden neben den Wirkindikatoren auch gesamt-aggregierende Bewertungsmethoden verwendet. Die zwei in dieser Studie verwendeten Methoden ReCiPe und UBP zur gesamt-aggregierenden Bewertung haben auch international eine hohe Akzeptanz. Dennoch muss darauf hingewiesen werden, dass die Bewertungen der verschiedenen Auswirkungen nicht auf wissenschaftlicher Basis allein beruhen können, sondern auch auf gesellschaftlichen Zielen, Prioritäten und Erkenntnissen. Daher werden diese Methoden teilweise auch abgelehnt, bzw. ISO 14'040 empfiehlt, diese nicht für vergleichende Ökobilanzen, die für die Öffentlichkeit bestimmt sind, zu verwenden. Trotz der Empfehlung der ISO-Norm entschieden wir uns, aus den folgenden Gründen diese beiden Methoden zu verwenden, siehe dazu auch [12]:

- Die Ergebnisse von gesamtaggrierenden Methoden erlauben eine Gewichtung der verschiedenen Auswirkungen und geben dadurch eine gute Entscheidungsbasis.
- Auch wenn die Gewichtungen nicht „absolut“ sind, so sind deren Ergebnisse aussagekräftiger, als die Beschränkung auf einige wenige Auswirkungen.
- Die Darstellung von allen Auswirkungen ist geeignet für die Schwachstellenanalyse und das Finden von Optimierungen. Jedoch lassen sich oft keine Entscheide daraus ableiten, da die verschiedenen Auswirkungen im Allgemeinen unterschiedliche Resultate zeigen.
- Um bei einer Beschränkung auf die verschiedenen Wirkungen (Mid Point Indikatoren) dennoch zu einer Aussage zu kommen, wird oft eine Beschränkung auf wenige Auswirkungen vorgenommen oder eine verbal argumentative Bewertung der verschiedenen Auswirkungen gemacht. Dabei besteht zumindest die Gefahr von Beliebigkeit oder sogar der Manipulation.
- Die Resultate der gesamtaggrierenden Methoden lassen sich gut kommunizieren.

Wesentlich ist, dass mehr als eine gesamtaggrierende Methode verwendet wird. Durch die Verwendung von mehr als einer Methode kann die Aussagekraft überprüft werden, da sich daraus eine Sensitivität bezüglich der unterschiedlichen Gewichtungen ergibt. Zudem werden die Ergebnisse dieser gesamtaggrierenden Methoden mit den Ergebnissen der Wirkungen hinterfragt und deren Aussage überprüft.

1.8 Unsicherheit und Signifikanz

Jede Ökobilanz ist mit Unsicherheiten behaftet, welche sich unter anderem aus Unsicherheiten bei der Datenerhebung, wie auch bei der Berechnung der Einwirkungen und Auswirkungen auf die Umwelt ergeben. Diese Unsicherheiten werden soweit möglich erfasst oder zumindest abgeschätzt und ausgewertet. Diese Unsicherheiten werden in den Übersichtsgrafiken als Spannbreiten der Ergebnisse entsprechend ausgewiesen. Bei diesen Spannbreiten handelt es sich um berechnete Werte aufgrund der errechneten Fehlerfortpflanzung der Datenfehler (Gauss-Verteilung, statistisch unabhängige Werte). Hier ist zu beachten, dass die Berechnungen nur die Unsicherheiten der Sachbilanz beinhalten. Die Unsicherheiten der Modelle zur Berechnung der Umweltauswirkungen und der Bewertung sind nicht bekannt. Um dennoch eine Grössenordnung anzugeben, wurden die Unsicherheiten der Bewertungsmethoden auf 25% geschätzt und entsprechend zusätzlich angegeben. Voraussichtlich werden damit die ausgewiesenen Unsicherheiten dennoch unterschätzt.

Zudem treten in Ökobilanzen Unsicherheiten auf Grund der gewählten Rahmenbedingungen auf, wie z.B. Energienutzung der KVA, Art des Brennstoffes, welcher im Zementwerk ersetzt wird, oder Anzahl der Recyclingzyklen. Diese Art der Unsicherheit wird berücksichtigt, indem die Aussagekraft der Ergebnisse mit Hilfe von Relevanz- und Sensitivitätsanalysen überprüft wird.

1.9 Sensitivitätsanalysen

Die Vergleichsbasis der Szenarien ist die Verwertung und Entsorgung von 1 t gesammeltem PE-Folienmaterial. Als Basisszenario dient der aktuelle Zustand des PE-Recyclings in der Schweiz im Jahr 2009. Aus folgenden Gründen sind Sensitivitätsanalysen notwendig:

- Selbst präzise Datensätze spiegeln die Wirklichkeit nur beschränkt wieder.
- Auch die Grundannahmen für die Untersuchung selbst bedürfen einer Prüfung.

Deshalb werden Zukunftsszenarien und Sensitivitätsanalysen berechnet, um die Ergebnisse abzustützen sowie um den Einfluss von veränderten Rahmenbedingungen abzuklären.

Um eine Sensitivitätsanalyse herzustellen, wird wie folgt verfahren:

1. Mittels einer Relevanzanalyse werden die Parameter mit dem höchsten Einfluss auf das betrachtete Grundscenario bestimmt. Konkret wird eine Übersicht der Ergebnisse der in der Studie verwendeten Wirkungen und Indikatoren erstellt. So können gemeinsam ausgeprägte Einflüsse isoliert werden (siehe Kap. 2.2).
2. Diese Parameter werden einer Sensitivitätsanalyse unterzogen (siehe Kap. 2.3).
3. Das Ergebnis zeigt, welche Variationen von Parametern zu signifikanten Änderungen des Szenarios führen. Mit anderen Worten, sie erlauben zu erkennen, unter welchen Bedingungen das eine oder andere System ökologische Vorteile bietet und welche Potentiale noch ausgeschöpft werden können.

Um mit diesem Instrument maßvoll zu verfahren, gelten zwei Prinzipien:

- Ceteris paribus – Prinzip:
Es wird immer nur ein Parameter unter konstanten Kostenverhältnissen variiert. Somit wird nicht berücksichtigt, dass es teilweise erst durch eine Gruppierung von Parametern zu ernsthaften Veränderungen kommen kann.
- Linearität:
Es wird angenommen, dass zwischen den In- und Outputgrößen lineare Zusammenhänge existieren, was nicht immer der Fall ist.

2 Vergleichsbasis und Datengrundlagen

Die Stoffflüsse der aktuell in der Schweiz möglichen Verwertungsszenarien sind in Abb. 11 schematisch dargestellt. Es handelt sich dabei um die folgenden Verfahren zur Verwertung von PE / R-PE Folien:

- **Energetische Verwertung:**
 - PE/ R-PE in KVA mit Energienutzung (Referenzszenario)
 - PE/ R-PE in Zementwerk (PE ersetzt Kohle)
 - PE/ R-PE in Zementwerk (PE ersetzt Öl)
- **Rohstoffliche Verwertung:**
 - PE/ R-PE in Kunststoffverölung (Ersatz Rohstoff Öl, dieses Öl kann anschliessend z.B. in einem BHKW oder als Rohstoff für Treibstoffe oder neue Kunststoffe verwendet werden.)
- **Werkstoffliche Verwertung:**
 - PE/ R-PE in stoffliches Recycling, Produktion Recyclinggranulat

PE oder PE Recycling Produkte können einmalig oder mehrfach werkstofflich genutzt werden und anschliessend am Ende ihres Lebenswegs einer energetischen Verwertung zugeführt werden.

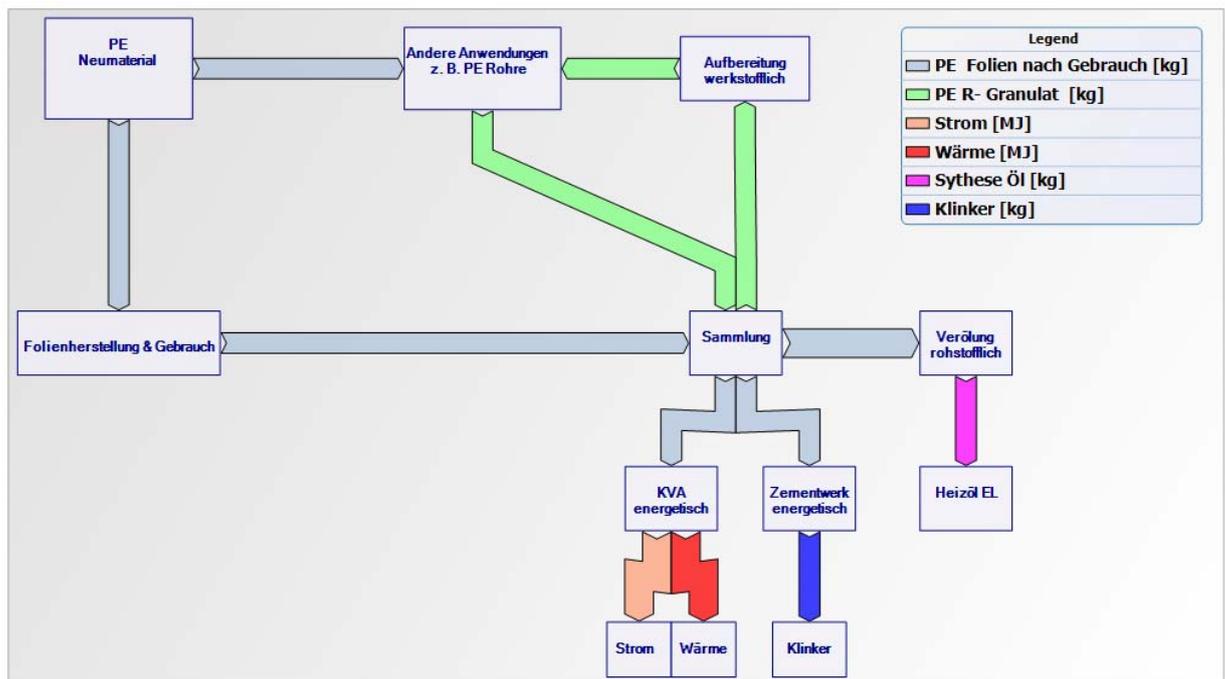


Abb. 11 Übersicht über die betrachteten Verwertungswege und Stoffkreisläufe, inkl. „end of pipe“ Produktverwertung.

In Folgenden wird zuerst das Referenzszenario definiert, an welchem die verschiedenen Verwertungsszenarien gemessen werden. Ebenso wird das Basisszenario für das Recyclingsystem sowie die weiteren Verwertungsmöglichkeiten festgelegt, siehe Kapitel 2.1. Um den Einfluss von veränderten Rahmenbedingungen abzuklären und um die Ergebnisse abzustützen, werden zusätzlich Zukunftsszenarien und Sensitivitätsanalysen berechnet. Diese Analysen erlauben es, zu erkennen, unter welchen Bedingungen das eine oder andere System ökologische Vorteile bietet und welche Potentiale noch aus-

geschöpft werden können. Als Basis für die Auswahl der Sensitivitäten dient eine erste Auswertung bezüglich der Relevanz der verschiedenen Teilprozesse, welche in Kapitel 2.2 gegeben wird. In Kapitel 2.3 werden die verschiedenen Sensitivitäten definiert.

2.1 Referenzsystem und Basisszenario PE Recycling

Entsprechend der Fragestellung und auf Grund der heute üblichen Verwertung / Entsorgung von PE-Folien wird als Referenz die thermische Verwertung von 1 t Folien in einer KVA verwendet. Aufgrund der Systemerweiterung wird dem Referenzsystem eine ergänzende Neuproduktion PE-Granulat belastet, entsprechend der Materialmenge, welche im werkstofflichen Recycling erhalten bleibt. Da heutzutage die meisten KVAs ihre Energie in Form von Wärme und Strom verkaufen, wird in diesem Szenario der KVA eine Gutschrift entsprechend dem schweizerischen Durchschnitt der bereitgestellten Energie gewährt. Dabei wird die effektiv genutzte Nettoenergie berücksichtigt, welche zum Ersatz von fossilen oder anderen Energieträgern führt. In Ingenieurkreisen wird die höhere Wertigkeit des Stromes berücksichtigt, indem dieser gegenüber von Wärmeenergie mit einem Faktor, typischerweise 3, gewichtet wird. Bei der Ökobilanzierung erfolgt die Berücksichtigung der Wertigkeit implizit. Durch die Berücksichtigung des gesamten Lebensweges werden die gesamten energetischen Ressourcen berücksichtigt, welche benötigt werden, um die entsprechende Strommenge bereitzustellen. Je nach Art der Strombereitstellung ergibt sich dadurch ein Faktor der kleiner als 3, z.B. bei der Wasserkraft, oder grösser als 3, z.B. bei der Kernenergie, ist. Die Ökobilanz berücksichtigt damit die Wertigkeit viel differenzierter und der Situation angepasster als die Verwendung eines Faktors.

Um die Umweltauswirkungen des Basisszenarios für das PE-Recycling zu berechnen, werden die in Tabelle 4 zusammengefassten Daten verwendet. Diese orientieren sich bezüglich Sammellogistik und Energiegewinn in der KVA am IST-Zustand. Für das Basisszenario wurde aufgrund der Tatsache, dass bei den heutigen Anwendungen, z.B. für Kabelrohre, 100% Neumaterial ersetzt wird, mit einem vollen Ersatz PE-Neumaterial gerechnet.

Eine ökonomische Allokation würde beim heutigen Preisniveau zu einer geringeren Gutschrift führen. Der geringere Preis von R-PE ergibt sich aus der Tatsache, dass R-PE im Vergleich zu neuem PE unterschiedliche Eigenschaften wie z.B. Farbe, Oberfläche oder Verarbeitbarkeit aufweist. Bei den heutigen Anwendungen von R-PE sind diese Eigenschaften nicht oder von untergeordneter Bedeutung. Falls auf Grund dieser Unterschiede R-PE nur begrenzt oder in höheren Mengen eingesetzt werden müsste, so wäre ggf. eine andere Allokation, z.B. eine ökonomische oder eine physikalische, zu prüfen. Der Einfluss auf die Resultate unter der Annahme, dass R-PE nicht zu 100% Neumaterial ersetzt, wird im Rahmen der Sensitivitätsanalysen untersucht (siehe Kapitel 4.2.1).

Tabelle 4 Übersicht über die Charakteristiken des Basisszenarios

	Menge	Quelle / Begründung / Bemerkung
Mittlere Transportdistanz (Sammellogistik)	115 km	Angabe InnoPlastics
Ausbeute im Recycling	85.5%	Angabe InnoPlastic 14.5% Produktionsabfälle (9.5% PE oder kunststoffähnliche Stoffe und 5% Papier)
Einsatz des Recyklaten	100% Ersatz Neu PE	Verschiedene Verwertungsoptionen z.B. Rohre 100% Ersatz von Neumaterial => Bilanzierungsansatz „Geschlossener Kreislauf“
Recyclingzyklen	1	Keine Erfahrungswerte vorhanden. Die gewählte Systemgrenze „von der gebrauchten Folie zum Granulat“ (Art der Nutzung ausserhalb der Systemgrenzen) stellt einen Zyklus dar in einem System, welches grundsätzlich sehr viele Zyklen haben kann. Es stellt damit den Grenznutzen eines Systems mit hohen Zyklen dar.
Energienutzung KVA	10.6% Strom	Durchschnitt schweizerischer Konsum-Mix
	23.4% Wärme	Durchschnitt Schweiz
Zementwerk		PE ersetzt Kohle oder Öl
Rohstoffliche Verwertung		Produktion von Öl, welches Erdöl EL ersetzt. Die Art der Nutzung dieses Öls ist ausserhalb der Systemgrenzen.
Produktionsabfälle Recycling und Verölung		Entsorgung in einer KVA mit der durchschnittlichen Energienutzung in der Schweiz

2.2 Relevanzanalyse

Um zu entscheiden, welche Parameter in einer Sensitivitätsanalyse untersucht werden sollen, werden die verschiedenen Verwertungsvarianten daraufhin untersucht, welche der verschiedenen Prozesse die stärksten Einflüsse auf die Resultate haben.

In Kapitel 2.2.1 werden die relevanten Prozesse der R-PE Aufbereitung inkl. Sammellogistik untersucht. Um die Relevanz der Entsorgung und der damit verbundenen Energiegewinnung zu bestimmen, wird in Kapitel 2.2.2 die Aufbereitung und Entsorgung in einer KVA untersucht. In Kapitel 2.2.3 werden die relevanten Prozesse der Verölung dargestellt. Auf die Verwertung im Zementwerk wird nicht detailliert eingegangen, da mit den untersuchten Varianten Ersatz Kohle, Heizöl S und EL die wesentlichen Einflussfaktoren bereits erkannt werden können.

2.2.1 R-PE Herstellung

In den folgenden Abbildungen sind die relevanten Prozesse der Aufbereitung von R-PE dargestellt. Diese Darstellungen umfassen die Sammlung und Sortierung der PE-Folien sowie die Aufbereitung zu R-Granulat.

In Abb. 12 sind die Quellen der wesentlichen Belastungen für das Treibhauspotential (CO₂-eq.) abgebildet. Die Hauptbeiträge bezüglich Treibhauspotentials ergeben sich aus der Entsorgung von Produktionsabfällen (45%) und aus dem Energiebedarf (38%). Die Logistik, welche für das Einsammeln der PE-Folien benötigt wird, ist von untergeordneter Bedeutung, sie macht etwas mehr als 10% des Treibhauspotentials aus.

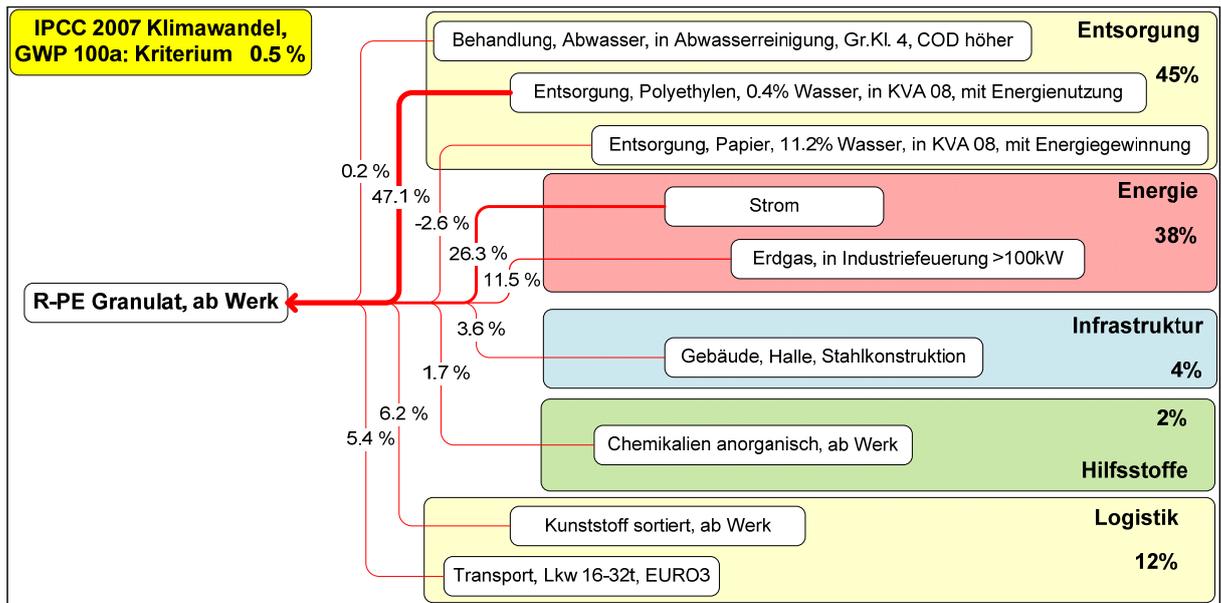


Abb. 12 Klimabelastung der Herstellung von PE-Recyclat in CO₂ Äquivalenten.

In Abb. 13 sind die Umweltauswirkungen gemessen in UBP und in Abb. 14 gemessen in ReCiPe Punkten dargestellt. Im Gegensatz zur Klimabelastung ist die Entsorgung bei diesen Indikatoren von untergeordneter Bedeutung. Bei diesen Indikatoren ist der Energiebedarf mit 80% bzw. 60% am relevantesten. Gefolgt von der Logistik mit Beiträgen unter 20%. Während beim Indikator UBP die Umweltauswirkungen der Strombereitstellung mit rund $\frac{3}{4}$ dominant ist, so beurteilt der Indikator ReCiPe die Strombereitstellung weniger stark, etwas weniger als 45%. Ein wesentlicher Grund dafür ist, dass der Indikator ReCiPe die Strombereitstellung durch Kernenergie sehr gut bewertet, da er weder die Ressource Uran noch die radioaktiven Abfälle berücksichtigt. Dafür bewertet ReCiPe die energetische Ressource Erdgas stärker als die Methode UBP.

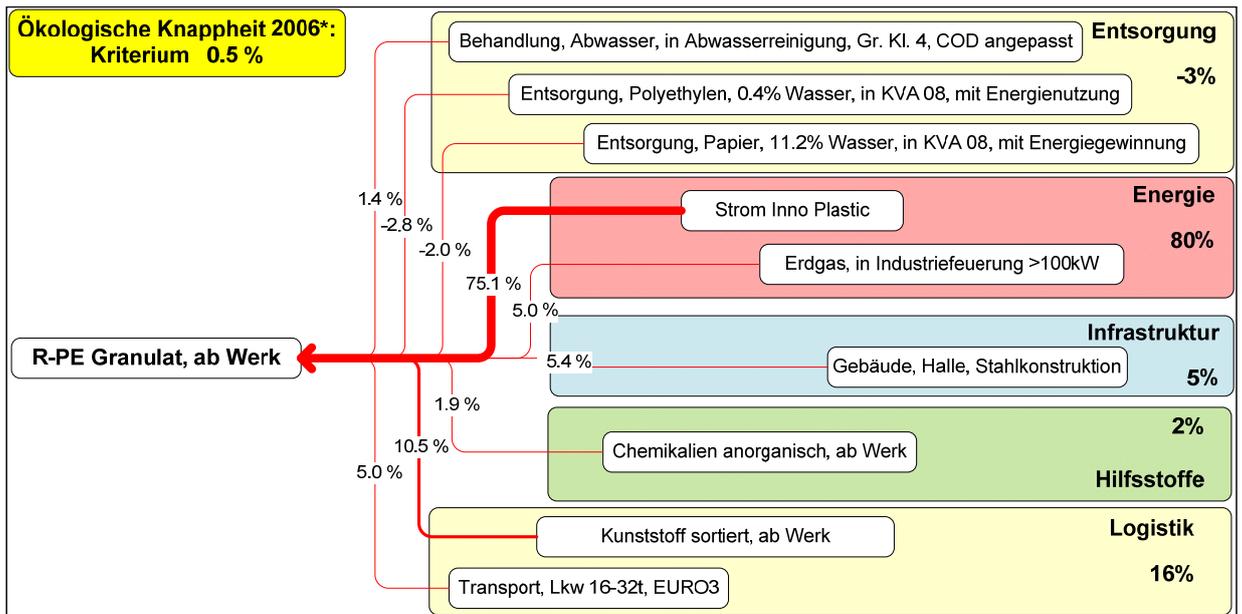


Abb. 13 Umweltbelastung in UBP der Herstellung von PE-Recyclat.

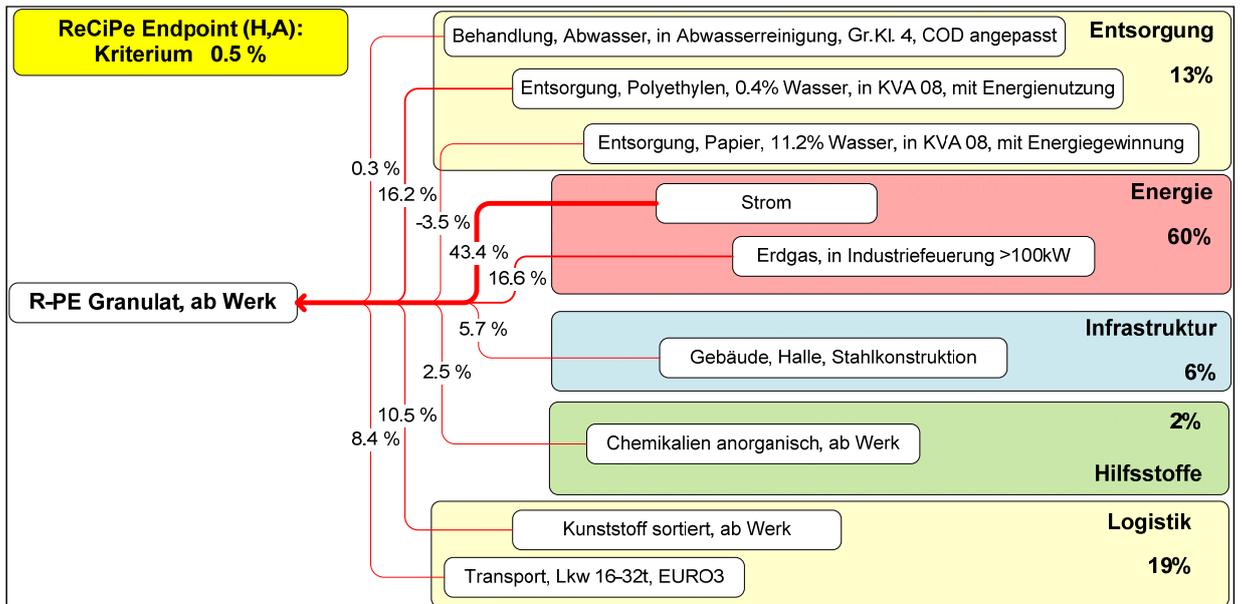


Abb. 14 Umweltbelastung in ReCiPe Punkten der Herstellung von PE-Recyclat.

2.2.2 R-PE Herstellung inkl. Entsorgung

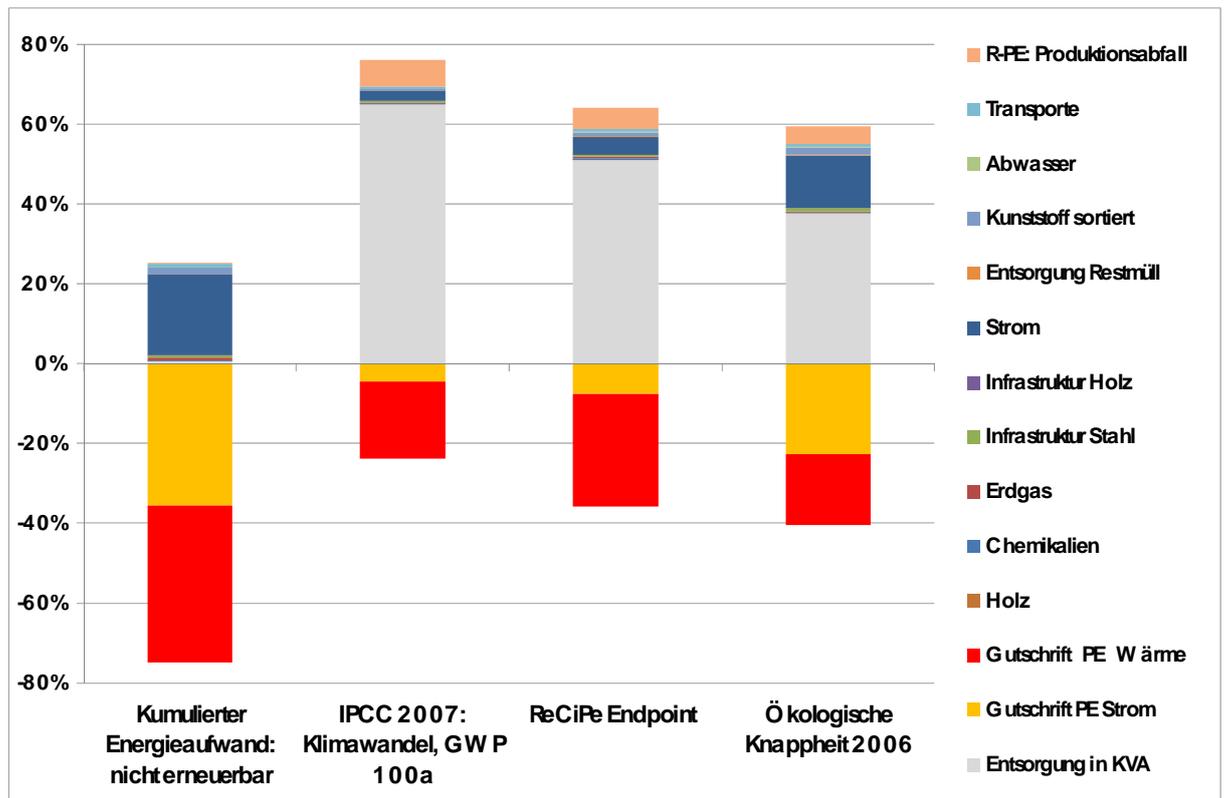


Abb. 15 Recycling der PE Folien und Entsorgung des R-PE Produktes in einer KVA (Basisszenario).

In Abb. 15 sind die Auswirkungen der wesentlichen Prozesse aufgeführt für das werkstoffliche Recycling der PE-Folien. Um ebenfalls die Relevanz der Entsorgung in einer KVA zu erfassen, wurde zudem die anschließende Entsorgung in einer KVA mit Energienutzung mit bilanziert. Aufgeführt sind die Indikatoren Treibhauspotential, KME sowie diejenigen der vollaggregierenden Methoden ReCiPe und ökologische Knappheit. Aus dieser Analyse lässt sich erkennen, dass folgende Einflussfaktoren wesentlich sind:

- Art und Anteil der Energienutzen bei der Verbrennung in der KVA; Gutschriften für Strom (Gelb) und Wärme (Rot),
- Strombedarf (dunkelblau) für die Aufbereitung zu R-PE
- Emissionen der Entsorgung in der KVA (hellgrau)
- Entsorgung des Produktionsabfalls (Lachsrot).

2.2.3 Verölung und Verwertung im Zementwerk

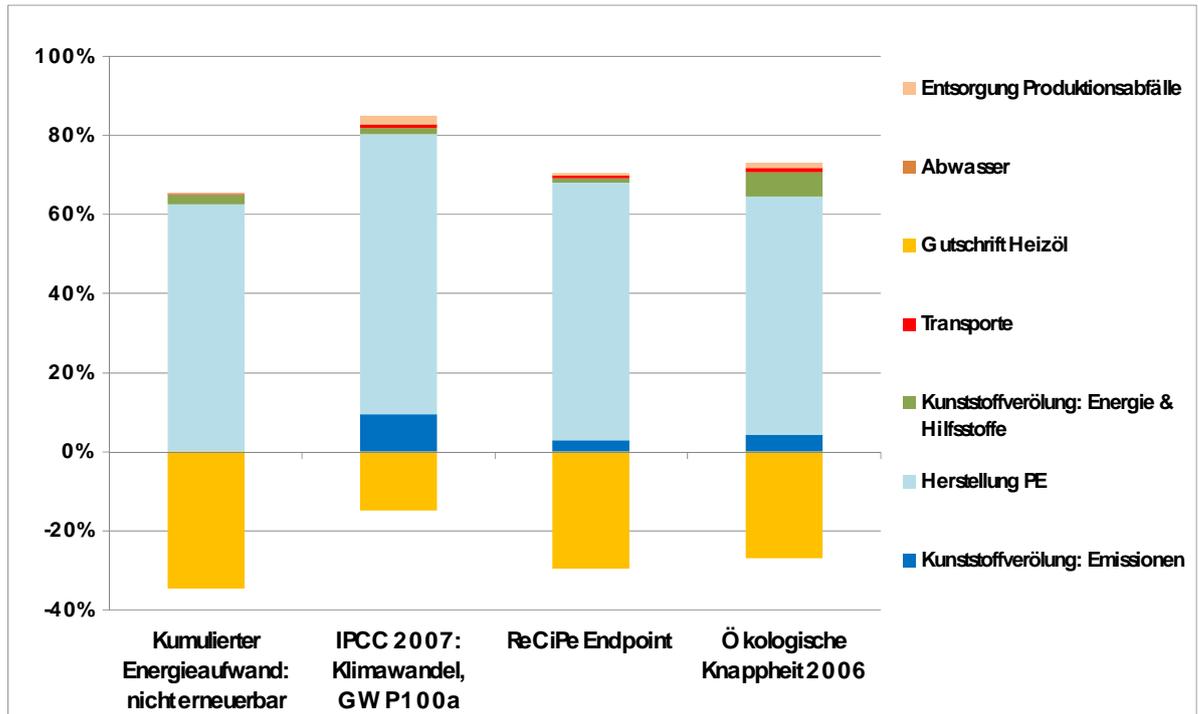


Abb. 16 Relevante Prozessschritte bei der rohstofflichen Verwertung der PE-Folien.

In Abb. 16 sind die Auswirkungen der wesentlichen Prozesse aufgeführt für die rohstoffliche Verwertung der PE Folien in einer Kunststoffverölung mit den Gutschriften und Belastungen der Systemerweiterung (siehe Kap. 1.3.6). Aufgeführt sind die Indikatoren Treibhauspotential, KME sowie diejenigen der vollaggregierenden Methoden ReCiPe und ökologische Knappheit. Aus dieser Analyse lässt sich erkennen, dass folgende Einflussfaktoren wesentlich sind:

- Belastung der Herstellung von neuem PE Granulates (hellblau),
- Gutschrift für das produzierte Öl (gelb).

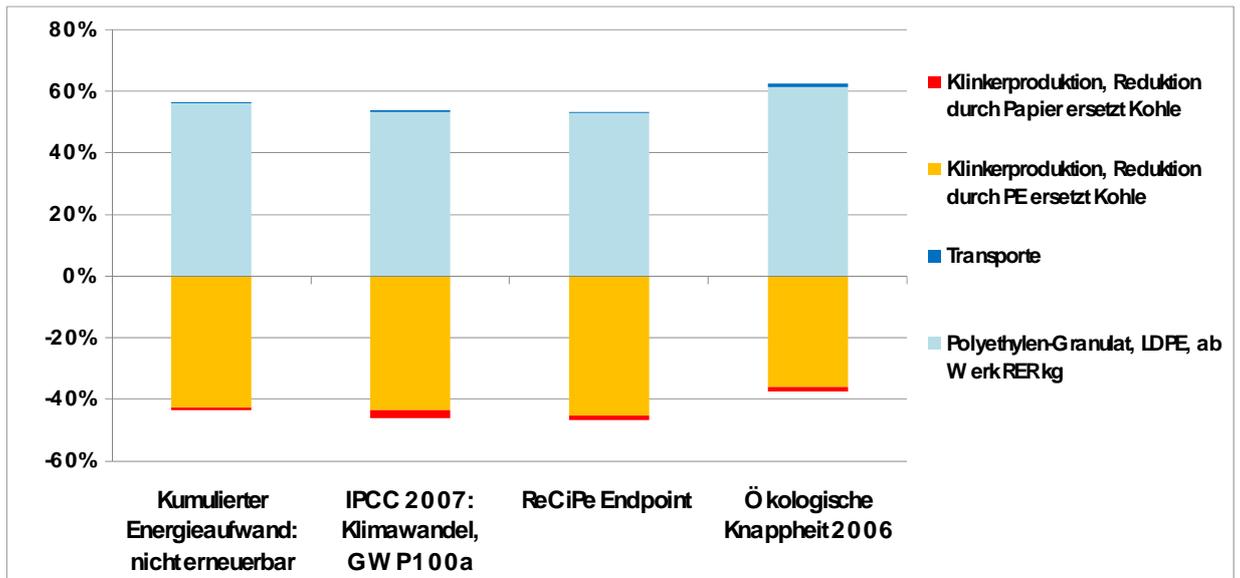


Abb. 17 Relevante Prozessschritte bei der energetischen Verwertung der PE-Folie in einem Zementwerk.

In Abb. 17 sind die Auswirkungen der wesentlichen Prozesse für die energetische Verwertung der PE Folien in einem Zementwerk dargestellt mit den Gutschriften und Belastungen der Systemerweiterung (siehe Kap. 1.3.6). Aufgeführt sind die Indikatoren Treibhauspotential, KME sowie diejenigen der vollaggregierenden Methoden ReCiPe und ökologische Knappheit. Aus dieser Analyse lässt sich erkennen, dass folgende Einflussfaktoren wesentlich sind:

- Belastung der Herstellung von neuem PE Granulates (hellblau),
- Gutschrift für den Ersatz von Kohle durch PE. Die Ursachen dafür sind im Wesentlichen:
 - Geringere CO₂-Emissionen durch die Verbrennung von PE anstatt von Kohle
 - Wegfallen des Abbaus und der Bereitstellung der Kohle

Die aus diesen Analysen folgenden Sensitivitätsanalysen werden im nächsten Kapitel beschrieben.

2.3 Sensitivitätsanalysen

Auf Basis der Relevanzanalysen und Rückmeldungen der Auftraggeber werden die folgenden Sensitivitäten untersucht:

- R-PE ersetzt neues PE nicht zu 100%
- Variation der Wärme- und Strombereitstellung der KVA
- Recycling von Folien aus LLDPE (landwirtschaftliche Folien)
- Anteil Ausschuss beim PE-Recycling
- Energieeffizienz bei der Aufarbeitung zu R-PE
- Anzahl Recyclingzyklen

Zudem wird bereits im Basisszenario untersucht, wie die Resultate bei der energetischen Verwertung im Zementwerk davon abhängen, welcher fossile Brennstoff ersetzt wird. Derzeit verwenden Zementwerke in der Schweiz aus Kostengründen zumeist Kohle und Heizöl S als Brennstoff.

Durch deren Ersatz ist, neben der Reduktion durch das Wegfallen der Bereitstellung, u.a. mit folgenden Reduktionen zu rechnen:

- Beim Ersatz von Kohle durch PE ist zu erwarten, dass die CO₂-Emissionen relevant reduziert werden, da die Verbrennung von Kohle mit relativ hohen CO₂-Emissionen pro Energie verbunden ist.
- Beim Ersatz von Heizöl S durch PE ist zu erwarten, dass die SO₂-Emissionen reduziert werden, da Heizöl S einen hohen Anteil an Schwefel aufweist.

Ebenso wäre es möglich, für die Zementproduktion Erdöl EL anstelle von Kohle oder Erdöl S zu verwenden. Falls mit dem PE Erdöl EL ersetzt werden würde, so ergäbe sich weder ein Nutzen durch geringere CO₂-, noch einer auf Grund geringerer SO₂-Emissionen. Jedoch ergibt sich ein höherer Nutzen durch den Wegfall der Bereitstellung von Heizöl EL. Um abzuklären, wie stark sich der Nutzen im Zementwerk durch den gewählten Ersatz verändert, wurde ebenfalls untersucht, wie hoch der Nutzen ist, wenn die PE-Folien nicht Kohle sondern Heizöl S oder Heizöl EL ersetzen würden. Die Untersuchung weiterer alternativer Brennstoffe für Zementwerke ist nicht Ziel der Studie und wurde deshalb nicht untersucht.

2.3.1 R-PE ersetzt neues PE nicht zu 100%

Heute wird R-PE vorwiegend in Anwendungen eingesetzt, in denen R-PE neues PE zu 100% ersetzt. Entsprechend wird im Basisszenario das Recyclingsystem einem geschlossenen PE-Kreislauf gleichgesetzt und in Folge dessen eine Allokation von 100% für den Ersatz PE-Neumaterial durch Recyclinggranulat verrechnet. Die Tatsache, dass R-PE einen ökonomischen Wert hat, welcher nur 55% bis 80% von neuem PE entspricht, zeigt, dass sicher nicht alle Eigenschaften von R-PE denjenigen von Neu-PE entsprechen. Dazu zählen z.B. Farbe, Oberflächenbeschaffenheit, Lebensmitteltauglichkeit. Auch bei technischen Eigenschaften, wie Viskosität oder Schlagzähigkeit, können Unterschiede auftreten. Je nach Anwendung kann R-PE neues PE nur zu einem gewissen Teil ersetzen. In dieser Sensitivitätsanalyse werden verschiedene Allokationen von 100% bis zu 55% als worst case untersucht. Die Variation bildet ab, dass PE-Rezyklat in gewissen Anwendungen nicht die gleichen Anforderungen wie das Neugranulat erfüllt. Die ökonomische Allokation via Preis beschreibt in der Folge, dass je nach Anteilen Recyclat und Neumaterial die Qualität des Produkts variiert:

- Wird Neumaterial hinzugegeben, kann ein Produkt von höherer Qualität erzeugt werden, welches nun auch für andere Anwendungen offen steht.
- Wird weniger Material hinzugegeben, nimmt die Qualität des Produkts ab.

Die Sensitivitätsanalyse wird in Schritten von 10% durchgeführt. Damit soll auch bestimmt werden, ob es einen Prozentsatz der Allokation gibt, unterhalb welchem eine andere Verwertung sinnvoller ist als das Recycling. Die Resultate werden in Kapitel 4.2.1 dargestellt.

2.3.2 Variation der Wärme- und Strombereitstellung der KVA

Wie aus Abb. 18 ersichtlich ist, bestehen heute grosse Unterschiede bezüglich der Energienutzung der verschiedenen KVAs in der Schweiz. In Zukunft wird sich die durchschnittliche Energienutzung noch erhöhen. Um die Frage zu beantworten, ob es ebenfalls zukünftig aus ökologischer Sicht sinnvoller ist, PE stofflich oder energetisch zu verwerten, werden Szenarien mit unterschiedlicher Energienutzung (Strom und Wärme) in einer KVA berechnet. Auf der Basis des Abfallwirtschaftsberichtes des BAFU wurden die durchschnittlichen und die maximalen Energienutzungen bestimmt, siehe Abb. 18. Dabei ist zu beachten, dass die in Abb. 18 dargestellten Werte den Gesamtnutzungsgrad darstellen. Für den heutigen Durchschnitt wurde die effektiv verkaufte Wärme als Gutschrift verwendet. Diese liegt etwas tiefer als die in der Abbildung angegebenen Werte, da die KVAs für ihren Betrieb ebenfalls Energie benötigen.

Aus diesen Angaben wurden die folgenden Szenarien für die Auswertung einer optimalen Wärmeproduktion und einer optimalen Stromproduktion gewählt:

Variante 1:	Strom 7%,	Wärme 73%,
Variante 2:	Strom 25%,	Wärme 15%

Für die Berechnung der Gutschriften wurden folgende Annahmen gemacht:

- 73% entspricht dem Gesamtenergienutzungsgrad, der Energienutzungsgrad, welcher für die Berechnung der Brennstoffsubstitution verwendet wird beträgt nur 65%
- Wärme aus KVA ersetzt: 36% Erdgas und 64% Erdöl
- Strom aus KVA ersetzt: Schweizer Strom-Mix ab Netz (CH-Verbraucher - Mix)
- Strom aus KVA ersetzt: Europäischen Strom-Mix ab Netz (UCTE-Mix)

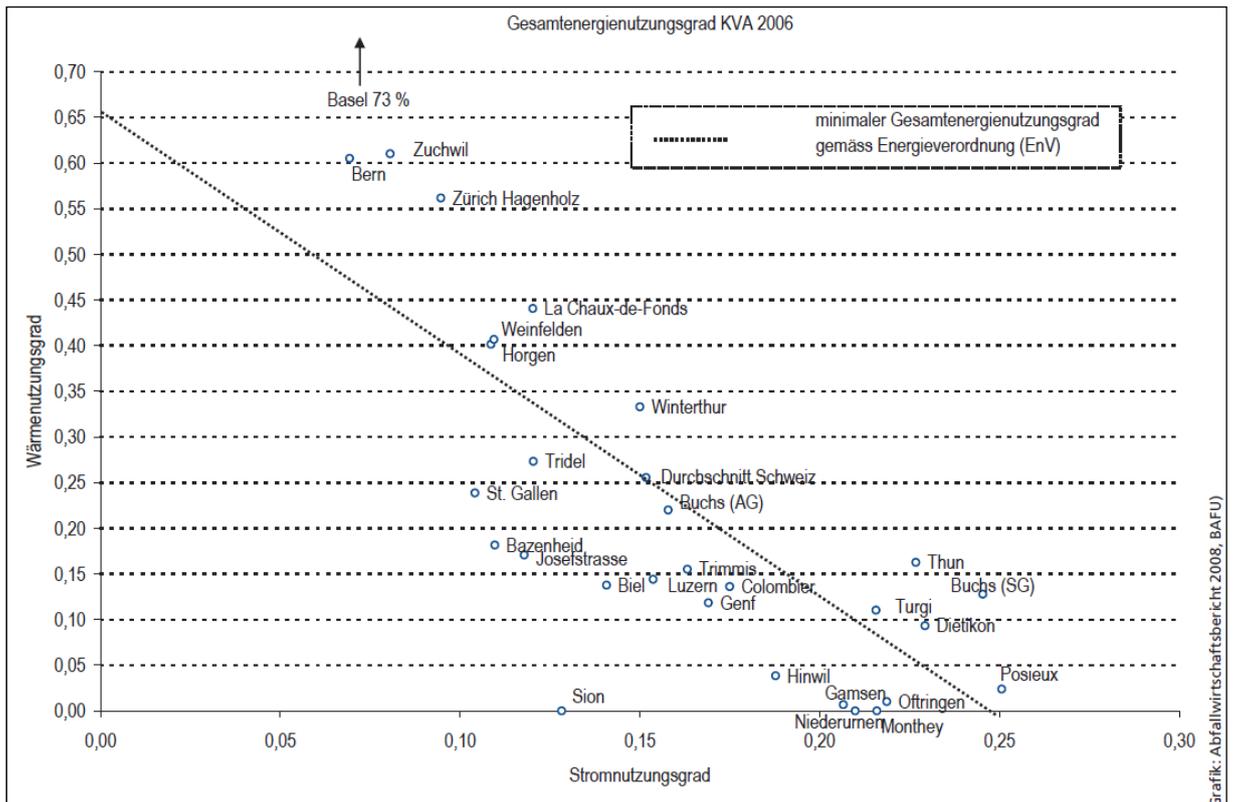


Abb. 18 Energienutzungen der schweizerischen KVAs, gemäss [16].

Im Rahmen dieser Sensitivitätsanalysen werden die in Tabelle 5 aufgeführten Einflussgrössen variiert:

Tabelle 5 Szenarien der Energienutzung in der KVA

Energienutzung der KVA, heute		
Durchschnitt Schweiz	Strom ersetzt CH-Mix	11.4% Strom
	Fernwärme ersetzt 64% Öl / 36% Gas	23.4% Fernwärme
Variante Ersatz EU Strom	Strom ersetzt EU-Mix (UCTE)	11.4% Strom
	Fernwärme ersetzt 64% Öl / 36% Gas	23.4% Fernwärme
Energienutzung der KVA, zukünftig		
Optimale Wärmenutzung	Strom ersetzt CH-Mix	7% Strom
	Fernwärme ersetzt 64% Öl / 36% Gas	73% Fernwärme 65% Energienutzung
Optimale Stromnutzung	Strom ersetzt CH-Mix	25% Strom
	Fernwärme ersetzt 64% Öl / 36% Gas	15% Fernwärme

2.3.3 Variation der Materialverluste PE-Recycling (Entsorgung PE-Abfälle und Papier)

Bei der Produktion von R-PE fällt Ausschuss als Abfall an, wodurch sich mit zunehmender Anzahl Recyclingzyklen die Materialmenge der betrachteten Tonne Sammelgut im Stoffkreislauf verkleinert. Derzeit liegen in der Schweiz die Verluste bei der Produktion von R-PE bei rund 14% (9 % PE und 5% Papier).

Um die Sensitivität der Resultate zu prüfen, werden für das Basisszenario eine Zu-/Abnahme des Ausschussmaterials um 50% untersucht (siehe Tabelle 6). Dies ergibt eine Spannbreite von 7-21% Produktionsabfällen. Mit dieser Grösse verändert sich ebenfalls die Menge im Stoffkreislauf und umgekehrt die zusätzliche Neuproduktion/Entsorgung in den Vergleichssystemen.

2.3.4 Recycling von Folien aus LLDPE

Vor allem landwirtschaftliche Silage-Folien werden vorwiegend aus LLDPE hergestellt. Da sich die Herstellung von LLDPE von derjenigen von LDPE unterscheidet, wird eine Sensitivitätsanalyse gemacht, in der anstatt LDPE als Grundmaterial LLDPE eingesetzt wird. Da bei den landwirtschaftlichen Folien teilweise sehr hohe Verschmutzungen auftreten, wurde ebenfalls eine Sensitivität mit einer doppelt so hohen Verschmutzung (28%) wie im Basisszenario (14%) gerechnet.

2.3.5 Variation der Stromeffizienz bei der Aufbereitung

Aufgrund der relativ hohen Stromanteilen in der Aufarbeitung (siehe Abb. 15) wird auch die Effizienz des Stromverbrauchs variiert (siehe Tabelle 6). Dazu wird der Stromverbrauch nur während der Aufarbeitung von PE-Material auf Grund von Erfahrungswerten in anderen Bereichen mit bis zu 50% Einsparungen gerechnet. Damit kann die Frage beantwortet werden, ob sich durch einen effizienteren Stromverbrauch deutliche Einsparungen erzielen lassen. Für die Variation der Stromeffizienz wurde der Strom-Mix Schweiz verwendet.

2.3.6 Logistik

InnoPlastics gibt durchschnittliche Lieferentfernungen von 115 km an. Da die Umweltauswirkungen durch die Sammellogistik und die Transporte jedoch „nur“ einen geringen Teil an den gesamten Umweltauswirkungen ausmachen (siehe Kap.2.2), wird auf ein Szenario mit veränderten Transportdistanzen und Transportmitteln (z.B. Exporte ins Ausland) verzichtet.

2.3.7 Anzahl Recyclingzyklen

Grundsätzlich kann bei gleichen Rahmenbedingungen mit jedem weiteren Recyclingzyklus, proportional zur verbleibenden Materialmenge, der gleiche Nutzen wie im ersten Durchlauf erzielt werden. Einen Einfluss auf den Nutzen haben dabei in erster Linie Veränderungen der Materialqualität und der Einsatzmöglichkeiten. Daneben spielen höhere Aufwände und Ausschussmengen in der Aufbereitung eine Rolle. Das Ausmass solcher Veränderung konnten im Rahmen dieser Studie nicht untersucht werden. Der Einfluss von höheren Aufwänden, Ausschussmengen und eingeschränkten Einsatzmöglichkeiten wird in den verschiedenen Unterkapiteln der Sensitivitätsanalysen behandelt.

Ein wesentlicher Unterschied zwischen dem werkstofflichen Recycling und den anderen Verwertungswegen besteht darin, dass beim werkstofflichen Recycling das Material immer noch, wenn auch auf Grund der Verluste in geringeren Mengen, vorhanden ist und somit für eine rohstoffliche Verwertung oder energetische Nutzung zur Verfügung steht. Um abzuklären, ob es grundsätzlich sinnvoll wä-

re zuerst ein werkstoffliches Recycling zu machen und erst anschliessend eine energetische oder rohstoffliche Verwertung durchzuführen, werden im Kapitel Öko-Effizienz zwei Zyklen untersucht. Dabei wird zuerst ein werkstoffliches Recycling und anschliessend eine rohstoffliche bzw. energetische Verwertung betrachtet. Bei dieser Betrachtung geht es nicht darum, ein reales System abzubilden, bei den heutigen Recycling-Raten und Einsatzgebieten von R-PE ist dies keine Realität, für welche Daten vorliegen. Bei dieser Betrachtung geht es vielmehr darum, zu untersuchen, ob ein werkstoffliches Recycling immer sinnvoll ist, falls die Qualität der Kunststoffabfälle dies zulässt.

2.3.8 Zusammenfassung der untersuchten Sensitivitäten

Im Rahmen dieser Sensitivitätsanalysen werden die folgenden relevanten Einflussgrössen innerhalb der Szenarien und Sensitivitäten überprüft (siehe Begründung Kap.2.2 ff).

Tabelle 6 Aufstellung aller relevanten Sensitivitäten

	Annahmen 1	Annahmen 2
Energienutzung der KVA	Strom 7% Wärme 73% / 65%*	Strom 25% Wärme 15%
Anteil des Ersatzes von Neumaterial	100%	55%
Menge Produktionsabfall (14%)	7%	28%
Verwertung von Folien aus LLDPE	14% Ausschuss	28% Ausschuss
Stromeffizienz des Recyclings	50%	100%

* 73% Gesamtenergienutzungsgrad / 65% Energienutzungsgrad verwendet für die Berechnung der Brennstoffsubstitution

3 Öko-Effizienz

Nicht nur Umweltressourcen wie Wasser, Land oder fossile Rohstoffe können knapp sein, ebenso sind die zur Verfügung stehenden finanziellen Mittel im Allgemeinen begrenzt und entsprechend ist es nicht nur sinnvoll sondern notwendig diese effizient einzusetzen. Das Konzept der Öko-Effizienz Bewertung zielt darauf ab, Entscheidungsgrundlagen zu liefern, welche Optionen sowohl aus ökonomischer wie auch aus ökologischer Sicht optimal sind. Dabei werden im Allgemeinen diese beiden Dimensionen der nachhaltigen Entwicklung gleichgewichtet behandelt.

Ein System wird als öko-effizient bezeichnet, wenn möglichst geringe Umweltauswirkungen bei möglichst geringen Kosten entstehen. Als Indikator für die Öko-Effizienz wurde in dieser Studie der reziproke Wert von Kosten und Umweltbelastungen verwendet:

$$\frac{1}{CHF * UBP} \quad \text{bzw.} \quad \frac{1}{CHF * CO_2 \text{ Äquivalente}}$$

Entsprechend zeigt ein hoher Wert dieses Indikators eine gute Effizienz an. Das heisst, je höher der Wert desto besser ist die betreffende Variante. Anders formuliert, es wird mit dem eingesetzten Geld eine hohe Reduktion der Umweltauswirkungen erreicht.

Für die Analyse der Ökoeffizienz werden die Indikatoren ökologische Knappheit, da diese die verschiedensten Umweltauswirkungen berücksichtigt, sowie das GWP, auf Grund der Aktualität und da dieser Indikator teilweise grosse Unterschiede zu den UBP zeigt, gewählt.

Für die Aufstellung der jeweiligen Verwertungskosten (PE in KVA, PE in Zementwerk Ersatz Kohle etc.) lehnt sich die Studie an die Methode des Life Cycle Costing an, siehe z.B. [17]. Die Vorgehensweise entspricht in dem Sinne einer volkswirtschaftlichen Betrachtung, indem sie aussagt, wie hoch die gesamten Kosten sind für Entsorgung, Aufbereitung und Neubeschaffung etc., welche für die verschiedenen Varianten anfallen, siehe dazu Tabelle 8. Dabei ist zu beachten, dass auch wenn die Kosten der gesamten Kette einer Variante geringer sind als bei einer anderen Variante, so können die Kosten für Einzelne innerhalb der Kette auch höher sein.

Als Grundlage wurden die Kosten verwendet, welche in Tabelle 7 zusammengestellt sind.

Weiter wurden die folgenden Angaben verwendet:

- Anteil Ausschuss, welcher beim werkstofflichen Recycling entsorgt werden muss: 14.5%
- Kosten einer Tonne neues PE: 1'670.-
- Ökonomischer Wert in Prozent von neuem PE: 55% - 80%

Um den Vergleich zwischen der Verwertung von gesammelten neuen Folien und Folien aus R-PE durchführen zu können, müssen zwei Zyklen betrachtet werden. Dabei geht es nicht darum ein real existierendes System bei dem R-PE rohstofflich oder energetisch verwertet wird, abzubilden, siehe dazu auch Kapitel 2.3.7. Die Systemgrenzen beinhalten die Sammlung, Sortierung, Verwertung und ggf. Neuherstellung von PE, jedoch nicht die Nutzung, da diese sehr vielfältig sein kann und daher nicht definiert ist, siehe Abb. 19. Entsprechend beinhalten die Kosten in Tabelle 8 eine zweimalige Sammlung und Verwertung bzw. Entsorgung, wobei berücksichtigt wurde, dass auf Grund der Verluste die zweite Sammlung eine geringere Menge umfasst. Dieselben Systemgrenzen werden auch für die ökologischen Bewertungen in der Öko-Effizienz Analyse verwendet.

Tabelle 7 Kosten pro Tonne gesammelte Folien

	Kosten pro t	Bemerkungen
Sammlung	140.-	KVA
- tiefe Kosten	100.-	Verwertung: als Ballen angeliefert
- hohe Kosten	450.- bis 675.-	Sammelsäcke RE-LOG zu 400 Liter à 13.50 [18] *
	530.- bis 800.-	Sammelsäcke PlastOil zu 400 Liter à 16.- [19] *
Verbrennung in KVA	172.-	
Verwertung in Zementwerk	155.-	Annahme 90% der Kosten der KVA
Verwertung rohstofflich	100.-	Angabe des Verwerters für Kosten ohne Transporte Annahme: Transport 50.-
Entschädigung der Firma InnoPlastics	50.-	für angeliefertes Material

* In der Informationsbroschüre von RE-LOG wird als Beispiel eine Füllmenge von 18kg pro Sack angegeben. In dieser Studie wird mit einer Füllmenge von 20 bis 30kg gerechnet.

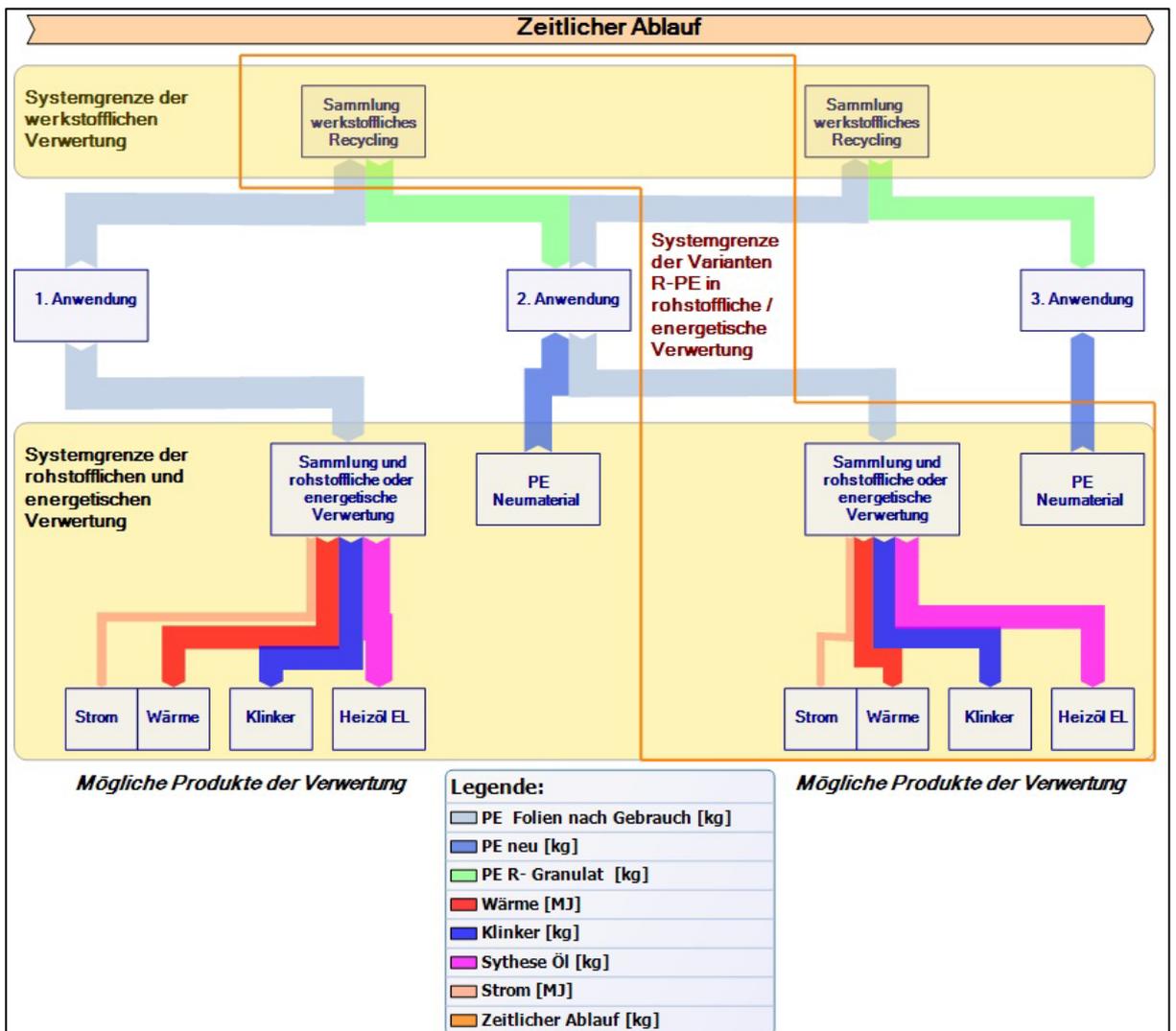


Abb. 19 Systemgrenzen der verschiedenen Verwertungen

Ausgehend von der funktionellen Einheit ist der Ausgangspunkt für alle Varianten 1 t gesammelte Folien nach der 1. Anwendung. Daraus ergeben sich 855kg R-PE für die 2. Anwendung. Anschliessend wird nur diese Menge gesammelt.

Der Erlös der verschiedenen Produkte der rohstofflichen und energetischen Verwertung, wie Heizöl, Wärme oder Strom, wurde nicht direkt berücksichtigt, da davon ausgegangen werden kann, dass diese Produkte zu marktüblichen Preisen verkauft werden und dieser Erlös in der Kostenkalkulation der entsprechenden Verwertung berücksichtigt wurde. Eine weitere Berücksichtigung würde zu einer Doppelzählung führen.

Die Preise der Sammelsäcke decken die folgenden Kosten ab:

- Herstellung und Abgabe der Gebührensäcke
- Abholung und Transport
- Pressen und Lagerung, falls dies gemacht wird
- Transport zum Verwerter
- Gegebenenfalls Entschädigung des Verwerter

Diese Kosten werden nicht einzeln ausgewiesen, da diese nicht aufgeschlüsselt angegeben wurden.

Tabelle 8 Kosten der verschiedenen Verwertungswege in CHF/t für zwei Nutzungen: 2 Mal Sammeln sowie 1 Mal Verwerten und 1 Mal Entsorgen bzw. 2 Mal Entsorgen (Näherung, Total gerundet auf 50.- CHF)

Kosten der Verwertung CHF/t	PE in KVA	PE in Zementwerk	PE in Verölung	R-PE Herstellung	R-PE in KVA	R-PE in Zementwerk	R-PE in Verölung
Entsorgungslogistik – tiefe Kosten	260	190	90	190	220	190	140
Entsorgungslogistik – hohe Kosten		840 bis 1260	990 bis 1500	840 bis 1260	570 bis 800	840 bis 1260	910 bis 1360
Betriebskosten	320	290	190		150	130	90
Recycling				-90	-50	-50	-50
Einkauf PE (55%)	2670	2670	2670	1470	2030	2030	2030
(80%)				2140	2380	2380	2380
TOTAL - Tiefe Logistikkosten							
tiefer Wert R-PE	3'250	3'150	2'950	1'550	2'350	2'300	2'200
hoher Wert R-PE				2'250	2'700	2'650	2'550
TOTAL – Hohe Logistikkosten, Sammlung mit Sammelsäcken							
tiefer Wert R-PE	3'250	3'500 bis 3'950	3'650 bis 4'150	2'300 bis 2'700	2'600 bis 2'800	2'850 bis 3'300	2'950 bis 3'400
hoher Wert R-PE				2'950 bis 3'400	2'950 bis 3'200	3'200 bis 3'650	3'300 bis 3'750

Die Kosten basieren auf statistischen Angaben und Expertenschätzungen. Die verwendeten Werte sind in Tabelle 8 zusammengefasst.

Diese Zusammenstellung zeigt den wesentlichen Einfluss der Logistikkosten. Falls diese tief sind, so sind die Verwertungen ökonomisch vorteilhafter als die thermische Verwertung in der KVA.

Falls die Logistikkosten hoch sind, so liegen die Kosten der energetischen und rohstofflichen Verwertung teilweise wesentlich höher als die Kosten der Verwertung in der KVA. Die Kosten des werkstofflichen Recycling liegen demgegenüber immer tiefer oder ungefähr gleich wie die thermische Verwertung in der KVA. Entscheidend ist bei dieser Betrachtung auch der ökonomische Wert des R-PE. Falls

dieses hoch ist, so ist der ökonomische Nutzen für denjenigen, welcher R-PE einsetzt entsprechend tiefer.

4 Ergebnisse

In den folgenden Kapiteln sind die Umweltwirkungen des PE-Recyclings sowie der weiteren analysierten Verwertungsoptionen im Vergleich zum Ist-Zustand der Entsorgung in der KVA dargestellt, Kapitel 4.1 zeigt die Umweltauswirkungen der untersuchten Verwertungswege des Basisszenarios. Ebenso werden die Ursachen dieser Ergebnisse dargestellt und diskutiert.

Anschliessend erfolgen die Darstellungen der Sensitivitätsanalysen. Damit wird die Stabilität der Resultate geprüft (siehe Kapitel 4.2).

Aus Gründen der Übersichtlichkeit werden nur die Resultate der folgenden Wirkungen und Methoden dargestellt:

- Kumulierter Energieaufwand (KEA)
- GWP, Treibhauspotential (2007.)
- Methode Ökologische Knappheit 2006 („Umweltbelastungspunkte“ – UBP 06)
- ReCiPe Endpoint H,A (2008)

Das Treibhauspotential und der KEA werden separat ausgewiesen, da diese Auswirkungen von hoher Aktualität und kostenwirksam sind bzw. unter Umständen in Bälde kostenwirksam sein können. Berechnet und im Anhang dargestellt wurden alle in Kapitel 1.5 aufgeführten Auswirkungen. Deren Resultate wurden für die Interpretation und Schlussfolgerungen verwendet.

Die anderen beiden Methoden geben die gesamten Umweltauswirkungen wieder. Die Aussagekraft dieser gesamttaggregierenden Methoden wird geprüft, indem zwei unterschiedliche Methoden verwendet und die Plausibilität auf Basis der Resultate der detaillierten Wirkbilanz, siehe Anhang, überprüft werden.

4.1 Verwertungsarten im Basisszenario

In Abb. 20 sind die Umweltauswirkungen der verschiedenen analysierten Verwertungsoptionen relativ zum Referenzsystem (PE in KVA) dargestellt. Berücksichtigt sind alle Prozesse der verschiedenen Verwertungswege inklusive der dabei getroffenen Systemerweiterungen. Die Auswertung wurde beim werkstofflichen Recycling ausgehend vom Basisszenario mit einem Recyclingzyklus und einem 100%-Ersatz PE-Neumaterial erstellt.

Die Darstellung zeigt, dass alle untersuchten Verwertungsoptionen im Vergleich zur KVA zu einer signifikanten Reduktion der Umweltauswirkungen führen. Die dargestellten Indikatoren zeigen, dass die höchsten Reduktionen durch ein werkstoffliches Recycling oder eine energetische Verwertung in einem Zementwerk erreicht werden. Die rohstoffliche Verwertung in einer Verölung führt zu einem signifikant geringeren Nutzen.

Beim Vergleich der energetischen Nutzung im Zementwerk und dem werkstofflichen Recycling zeigen nicht alle Indikatoren dieselben Resultate. In den folgenden Unterkapitel wird dies analysiert und diskutiert.

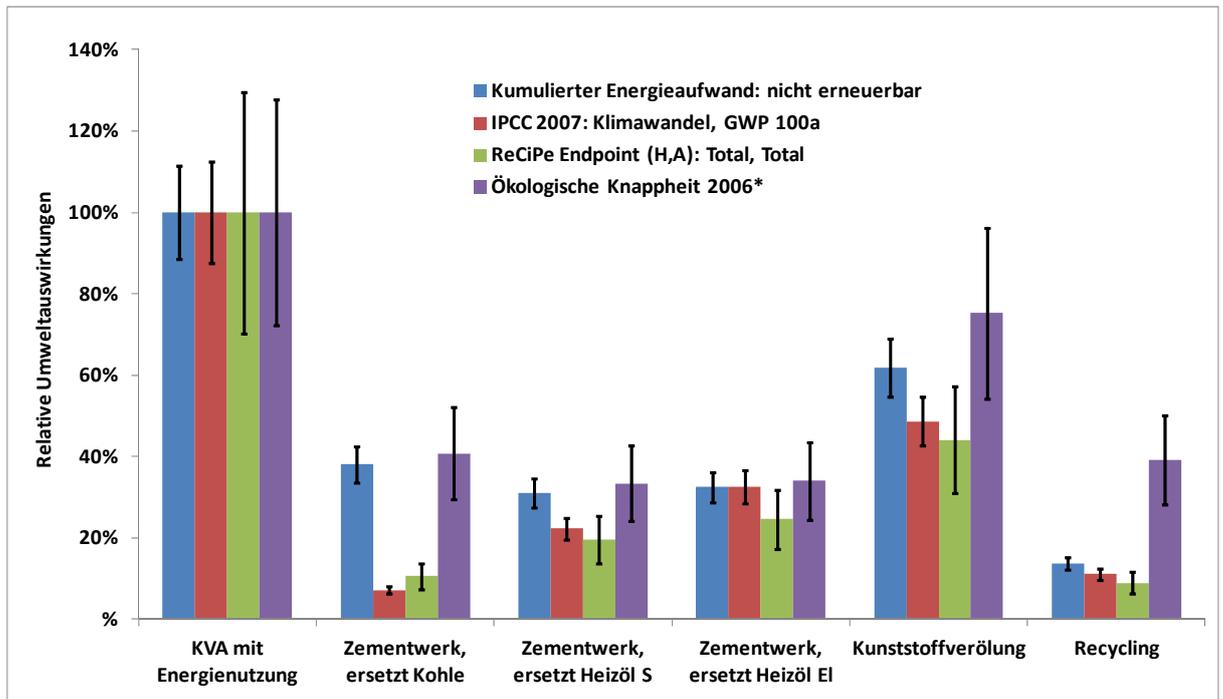


Abb. 20 Vergleich zwischen dem IST-Zustand in der Schweiz und den verschiedenen Verwertungsoptionen (PE-Recycling Basisszenario, 100% Ersatz Neugranulat). Dargestellt sind die Ergebnisse anhand der ausgewählten Indikatoren und Bewertungsmethoden. Die Ausdehnung der Fehlerbalken zeigt die Unsicherheit der Ergebnisse.

Abb. 21 bis Abb. 24 zeigen für die vier ausgewählten Kenngrößen die Ergebnisse der verschiedenen Verwertungen im Vergleich zum Ist-Zustand der Verwertung in der KVA. Dabei sind die Auswirkungen auf die Umwelt differenziert nach Ursachen abgebildet. Für jede Variante sind auf der linken Seite die Auswirkungen der verschiedenen Teilprozesse dargestellt, wobei die Belastungen als positive Werte (Umweltbelastungen) und die Entlastungen, welche sich durch den Nutzen des Ersatzes ergeben, als negative Werte (Umweltextlastungen) dargestellt werden. Zudem ist für jede Variante auf der rechten Seite die Summe aus den einzelnen Teilprozessen als dunkelblauer Balken dargestellt. Die Umweltauswirkungen der KVA wurden jeweils auf 100% normiert. Damit zeigt die Differenz zu 100% den Nutzen, der sich aus der jeweiligen Verwertung ergibt. Dieser wird hellgrün mit einer schraffierten Linie dargestellt.

Für das PE-Recycling sind dabei die Teilprozesse wie auch die daraus resultierende Summe abgebildet. Gegenüber dem Ist-Zustand ergibt sich im Basisszenario ausgehend von einem vollen Ersatz von PE-Neumaterial für alle dargestellten Kenngrößen und Verwertungsoptionen eine Einsparung von 30% bis 90%. Dieser Nutzen ist in den Diagrammen hellgrün dargestellt (Differenz der Umweltauswirkungen zur Vergleichsbasis).

4.1.1 Kumulierter Energieaufwand, nicht erneuerbar (KME)

Der Indikator „KME nicht erneuerbar“ zeigt, dass durch das werkstoffliche Recycling mehr nicht erneuerbare Ressourcen eingespart werden können als in einem Zementwerk. Abb. 21 zeigt den Grund für dieses Resultat. Die Herstellung von neuem PE benötigt mehr fossile Ressourcen als durch den Ersatz von fossilen Brennstoffen im Zementwerk eingespart werden können. Da im Zementwerk der Energieinhalt des PE vollständig genutzt wird, während bei der Verölung oder der KVA nur ein Teil der Energie genutzt werden kann, da ein Teil für den Prozess an sich benötigt wird, bzw. als Abwärme / Abfall anfällt, ist der Nutzen im Zementwerk höher als bei der Verölung oder der KVA.

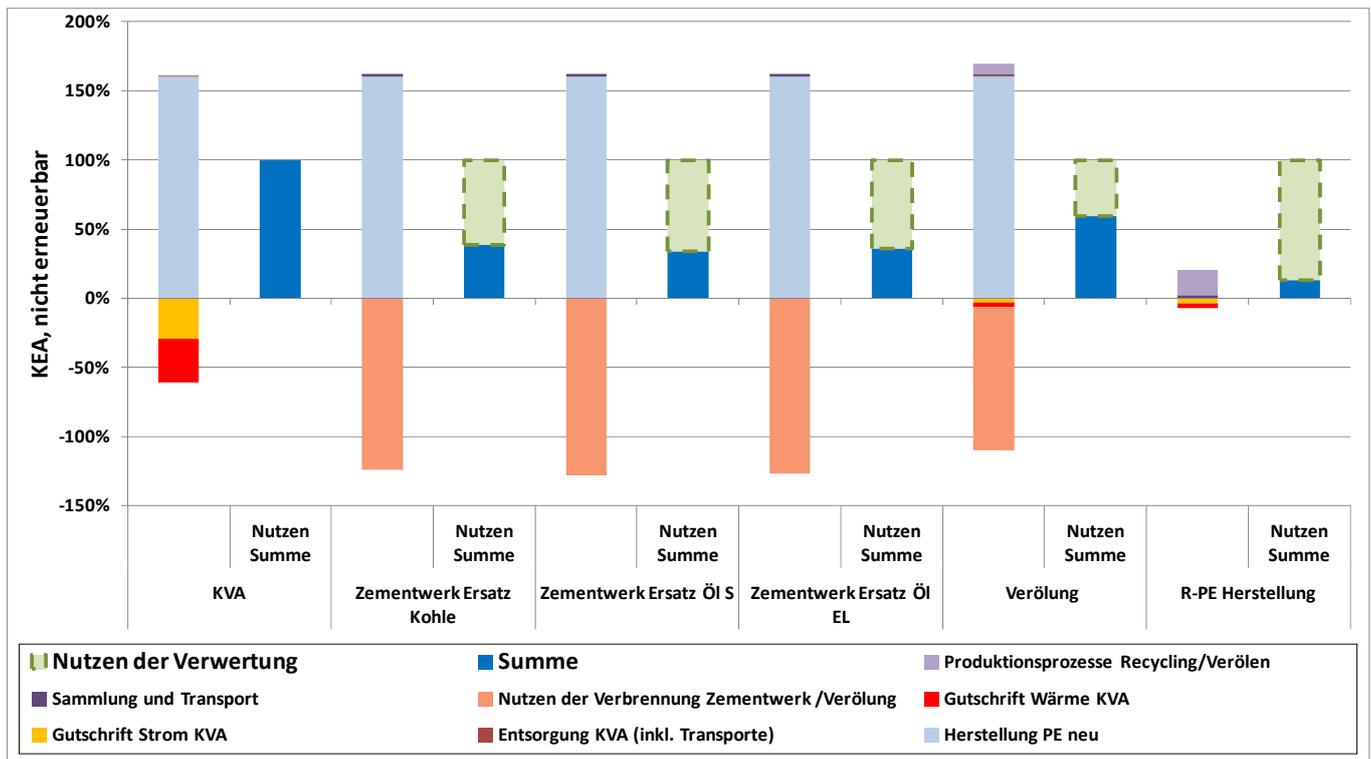


Abb. 21 Relativer Bedarf an nicht erneuerbarer Primärenergie (KEA) der verschiedenen Verwertungen im Vergleich zur KVA. Dargestellt werden jeweils die Beiträge der Teilprozesse sowie blau die Summe daraus und grün der Nutzen im Vergleich zur KVA (Basisszenario).

4.1.2 Klimarelevante Auswirkungen

Bezüglich der Auswirkungen auf das Klima hängt das Resultat davon ab, welcher Brennstoff im Zementwerk ersetzt wird. Falls angenommen wird, dass Kohle ersetzt wird, so ergeben sich tendenziell die höchsten Reduktionen bei den klimarelevanten Emissionen bei der energetischen Verwertung im Zementwerk. Falls angenommen wird, dass mit dem PE Schweröl ersetzt wird, so ergibt sich die höchste Reduktion durch das werkstoffliche Recycling. Da die Herstellung von Zement sowohl mit Kohle wie auch mit Öl oder einem anderen Brennstoff möglich ist, kann die Reduktion der klimarelevanten Emissionen nicht einfach dem Einsatz von PE gutgeschrieben werden. Eine Reduktion dieser Emissionen wäre ebenso möglich, falls Kohle z.B. durch Öl ersetzt würde. Wir sind daher der Ansicht, dass für die Fragestellung der vorliegenden Studie der Vergleich mit Erdöl angepasster ist. Im Vergleich mit diesem Brennstoff zeigt sich ein höherer Nutzen durch das werkstoffliche Recycling.

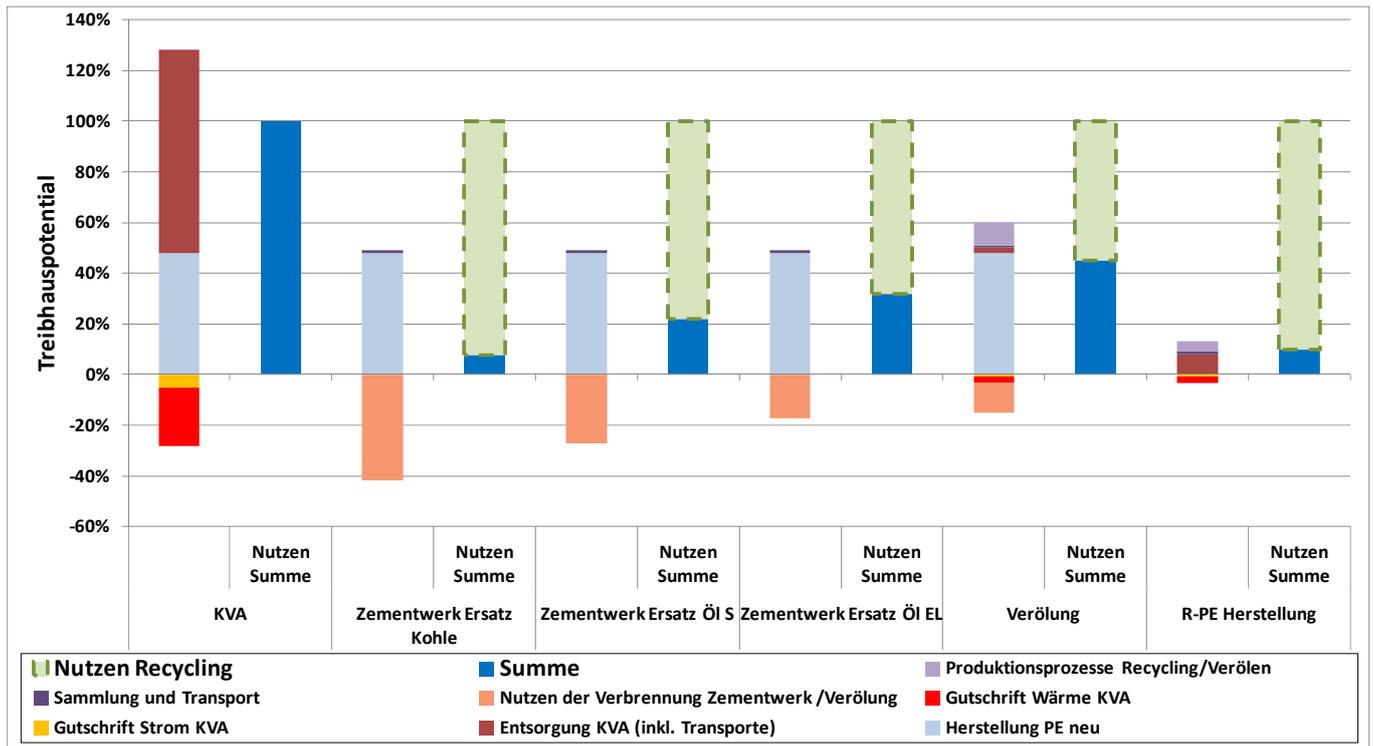


Abb. 22 Relative Auswirkungen auf das Klima der verschiedenen Verwertungen im Vergleich zur KVA. Dargestellt werden jeweils die Beiträge der Teilprozesse sowie blau die Summe daraus und grün der Nutzen im Vergleich zur KVA (Basisszenario).

4.1.3 ReCiPe

Der Indikator ReCiPe zeigt vergleichbare Resultate wie der Indikator des Treibhauspotentials. Falls mit PE Kohle ersetzt wird, so ist der höchste Nutzen durch das werkstoffliche Recycling und im Zementwerk gegeben, wobei das Recycling tendenziell etwas geringere Auswirkungen hat. Beim Vergleich mit dem Ersatz von Erdöl im Zementwerk hat das werkstoffliche Recycling den höchsten Nutzen, gefolgt von der energetischen Verwertung im Zementwerk. Der Grund dafür liegt in der unterschiedlichen Bewertung der Ressourcen Erdöl resp. Kohle bei dieser Methode. Die Verölung führt auch zu einem Nutzen im Vergleich zur KVA, welcher jedoch geringer ist als derjenige der anderen Verwertungen.

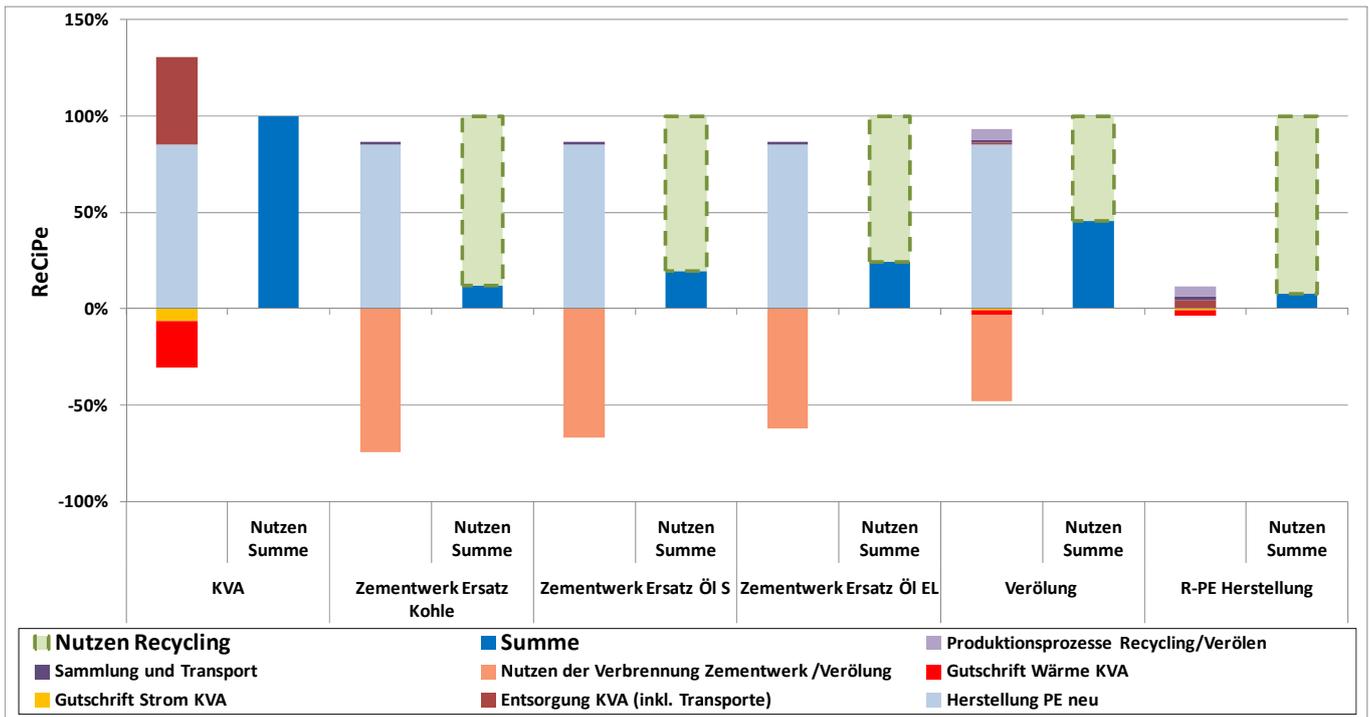


Abb. 23 Relative Umweltauswirkungen gemessen mit der Methode ReCiPe der verschiedenen Verwertungen im Vergleich zur KVA. Dargestellt werden jeweils die Beiträge der Teilprozesse sowie die Summe daraus und der Nutzen im Vergleich zur KVA (Basisszenario).

4.1.4 Ökologische Knappheit (UBP 2006)

Der Indikator UBP 2006 zeigt keinen signifikanten Unterschied zwischen der energetischen Verwertung im Zementwerk und dem werkstofflichen Recycling. Dieses Resultat ist unabhängig vom Brennstoff, der ersetzt wird. Jedoch ist der Nutzen dieser beiden Verwertungen höher als derjenige durch die Verölung.

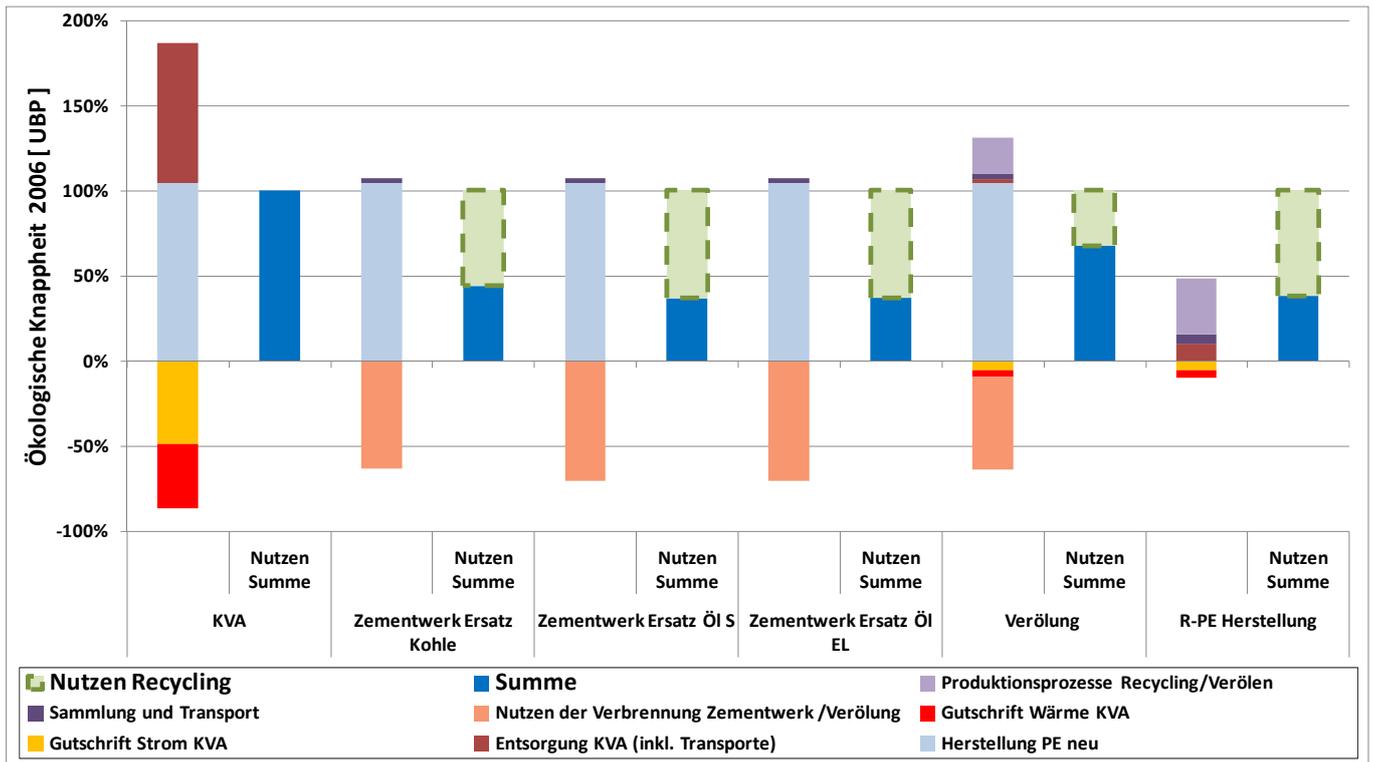


Abb. 24 Relative Umweltauswirkungen gemessen mit der Methode ökologische Knappheit der verschiedenen Verwertungen im Vergleich zur KVA. Dargestellt werden jeweils die Beiträge der Teilprozesse sowie die Summe daraus und der Nutzen im Vergleich zur KVA (Basisszenario).

4.1.5 Schlussfolgerung

Drei der vier Indikatoren zeigen, dass das werkstoffliche Recycling mit den geringsten Umweltauswirkungen der untersuchten Verwertungen verbunden ist. Ein Indikator (UBP) zeigt im Rahmen der Unsicherheit ein vergleichbares Resultat. Die weiteren Indikatoren, welche berechnet wurden und für die Schlussfolgerungen verwendet werden können, zeigen alle vergleichbare Resultate, siehe Anhang. Gewisse Toxizitätsindikatoren kommen zu anderen Ergebnissen. Eine detaillierte Analyse, welche im Anhang gegeben wird, hat gezeigt, dass diese unterschiedlichen Ergebnisse ihre Ursache in den verschiedenen Datengrundlagen haben. Daher können diese Indikatoren nicht für die Interpretation verwendet werden, da dies zu falschen Schlussfolgerungen führen könnte. Sie werden daher nicht weiter berücksichtigt.

Weiter ist zu beachten, dass auf Grund der zur Verfügung stehenden Grundlagedaten, siehe Anhang „Daten für Polyethylen (PE)“, diejenigen Verwertungen, welche zu einem energetischen Nutzen oder energetischen Energieträger führen (KVA, Zementwerk und Verölung) im Vergleich zum werkstofflichen Recycling tendenziell zu gut bewertet werden. Diese Tatsache erhöht die Aussagekraft des Resultates, welches dem werkstofflichen Recycling die geringsten Umweltauswirkungen attestiert.

Diese Resultate zeigen, dass das werkstoffliche Recycling aus ökologischer Sicht zu empfehlen ist. An zweiter Stelle kommt die energetische Verwertung im Zementwerk und anschliessend die rohstoffliche Verwertung in der Verölung.

Dieses Ergebnis ist in Übereinstimmung mit den Resultaten der Studie von Martin Kilga [3], welche im Auftrag der Verölungsanlage plastOil AG durchgeführt wurde. Die Resultate und Darstellungen in der plastOil Studie sind nicht direkt mit denjenigen in dieser Studie zu vergleichen, unter anderem da in der plastOil Studie die Verwertung von gemischten KS Abfällen untersucht wurde. Sie zeigen jedoch ebenfalls, dass ein werkstoffliches Recycling am sinnvollsten ist und die Verölung geringere Umweltauswirkungen hat als die Verwertung in der KVA. Zudem zeigt die Studie, dass eine Verwer-

tung im Zementwerk im Vergleich zur KVA zu einer wesentlichen Reduktion der Umweltauswirkungen führt. Diese Hierarchie der Verwertung entspricht auch dem Vorgehen der plastOil AG, indem zuerst diejenigen Kunststofffraktionen abgetrennt werden, welche werkstofflich verwertet werden können. Anschliessend werden diejenigen Fraktionen abgetrennt, welche in der Verölungsanlage verwertet werden können. Die Restfraktion wird in einer KVA oder optional im Zementwerk verwertet. Gemäss Aussage der plastOil AG würden saubere PE Folien bei ihnen aussortiert und werkstofflich verwertet.

Um die Aussagekraft der Resultate zu prüfen, werden im Folgenden die Resultate der in Kapitel 2.3 aufgeführten Szenarien dargestellt und diskutiert.

4.2 Sensitivitätsanalysen

Aufgrund der Relevanzanalyse sowie der Rücksprache mit dem Auftraggeber wurden neben den Szenarien die nachfolgenden Sensitivitätsanalysen erstellt. In der folgenden Übersicht sind wesentlichen Variationen, welche in der Sensitivitätsanalyse betrachtet werden, zusammengefasst. Aufgeführt sind die Darstellungen von folgenden Parametern:

1. Variation des technischen Nutzen des R-Granulates
2. Variation der Strom- und Wärmebereitstellung der KVA
3. Variation der zu entsorgenden Menge Ausschuss beim Recyclingprozess
4. Folien aus LLDPE anstatt LDPE
5. Variation der Energieeffizienz der PE-Aufarbeitung

4.2.1 Szenario – R-PE ersetzt neues PE nicht zu 100%

Auch wenn heute in den meisten Anwendungen, in denen R-PE eingesetzt wird, dieses neues PE zu 100% ersetzt, so gibt es auch Anwendungen, bei denen R-PE neues PE nicht zu 100% ersetzen kann. Diese Problematik wurde in Kapitel 1.3.5 beschrieben. Im Folgenden wird der Einfluss auf die Resultate bestimmt, welcher sich z.B. bei variierendem technischem Wert von R-PE ergibt. Auf Grund des ökonomischen Wertes des R-PE der rund 55% von neuem PE beträgt, wurde die Variation von 100% Ersatz bis zu 55% Ersatz für neues PE als Worst case Szenario durchgeführt.

Wie Abb. 25 zeigt, hat die Höhe des Ersatzes von neuem PE einen wesentlichen Einfluss auf das Resultat. Falls nur 90% ersetzt werden kann, so sind die Umweltauswirkungen vergleichbar mit der energetischen Verwertung in einem Zementwerk. Vergleichbare Umweltauswirkungen wie die Verölung hat das Recycling dann, wenn nur 60% bis 70% von neuem PE ersetzt werden kann. Auch im schlechtesten Fall, wenn nur 55% PE ersetzt werden kann, ist das Recycling immer noch vergleichbar oder tendenziell besser als die energetische Verwertung in der KVA.

Der Nutzen des Recycling ist somit stark von der Qualität und damit den Einsatzmöglichkeiten des R-PE abhängig. Diese sind wiederum abhängig von der Qualität der gesammelten Folien und dem Markt für R-PE Produkte, in denen ein vollwertiger oder fast vollwertiger Ersatz von neuem PE möglich ist. Falls z.B. auf Grund von Vermischungen oder starken Verschmutzungen kein hochwertiger Ersatz von neuem PE möglich ist, so kann eine Verwertung in einem Zementwerk sinnvoller sein.

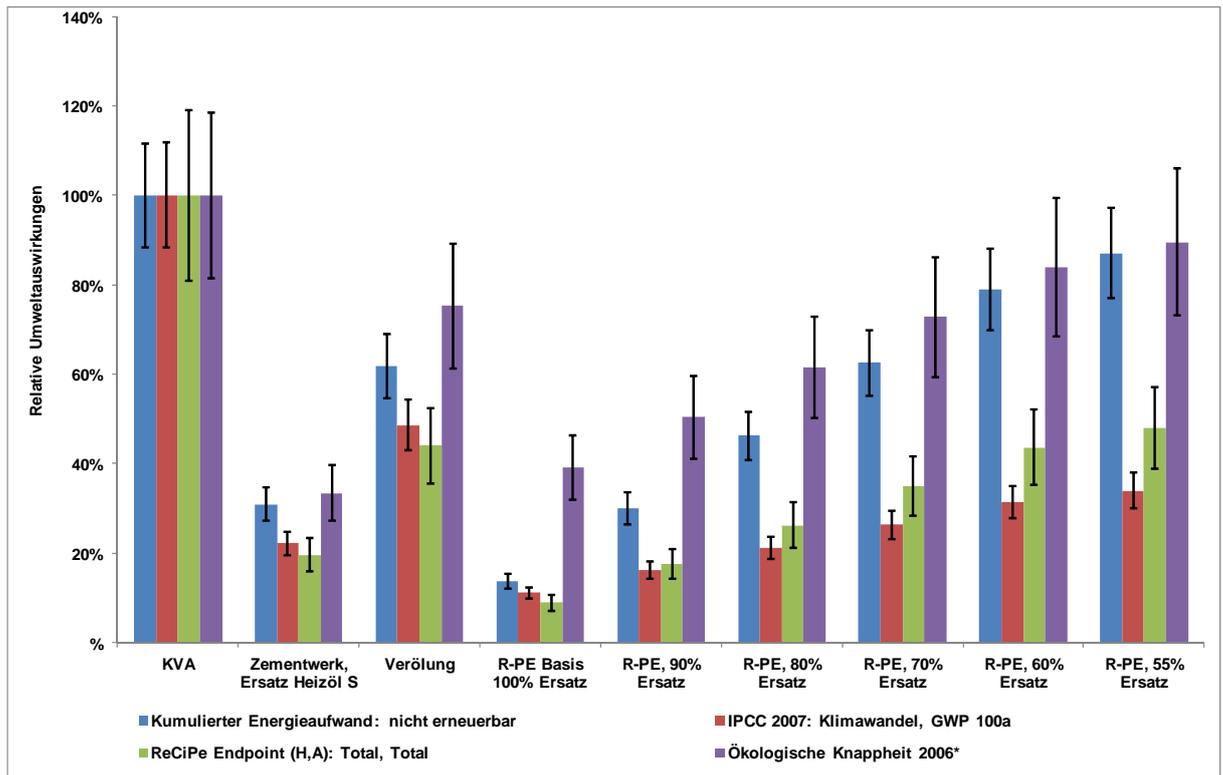


Abb. 25 Umweltauswirkungen der Verwertungsszenarien, falls R-PE neues PE nur zu einem gewissen Anteil ersetzen kann. Die höchste Auswirkung wurde jeweils auf 100% normiert.

4.2.2 Variation der Strom- und Wärmebereitstellung der KVA

In Abb. 26 und Abb. 27 sind die Ergebnisse des Recyclings im Vergleich zur KVA dargestellt. Um aufzuzeigen, wie gross der Nutzen einer optimierten KVA ist, wurden folgenden Varianten dargestellt:

- **1. PE Folien in KVA:**
Entsorgung von PE Folien in einer KVA mit Berücksichtigung der Energienutzung. Um gleich viele Nutzungen wie beim Recycling zu betrachten, wurde Folgendes betrachtet:
 - Energetische Verwertung der PE Folien in der KVA
 - Herstellung der entsprechenden Menge PE
 - Nutzung (ausserhalb der Systemgrenzen)
 - Energetische Verwertung in der KVA
- **2. PE Folien in Recycling und anschliessend in die KVA:**
Bei diesen Varianten wird die PE Folie zuerst rezykliert und anschliessend in einer KVA energetisch verwertet. Um gleich viele Nutzungen wie beim Recycling zu betrachten, wurde Folgendes betrachtet:
 - Recycling der PE Folien
 - Nutzung des R-PE (ausserhalb der Systemgrenzen)
 - Energetische Verwertung in der KVA

Bei diesen Darstellungen zeigen die unterschiedlichen Energienutzungsvarianten den direkten Nutzen der sich durch eine optimierte Energienutzung ergibt.

Ein Recycling ist genau dann ökologisch vorteilhaft, wenn die Varianten 2 eine tiefere Umweltbelastung aufweisen als die entsprechenden Varianten 1. Vergleichbare Varianten sind in derselben Farbe dargestellt.

In den Abb. 26 und Abb. 27 bedeuten die Bezeichnungen folgendes:

KVA – CH-Mix:	KVA mit durchschnittlicher Energienutzung, Strom ersetzt CH-Strom-Mix
KVA – UCTE-Mix:	KVA mit durchschnittlicher Energienutzung, Strom ersetzt EU-Strom-Mix
KVA – Wärme:	KVA mit optimierter Wärmenutzung, Strom ersetzt CH-Strom-Mix
KVA – Strom:	KVA mit optimierter Stromnutzung, Strom ersetzt CH-Strom-Mix

Mit der Optimierung in der KVA verringert sich im Allgemeinen die Umweltbelastung im Referenzsystem. Diese Optimierung gilt auch für die weitere Entsorgung im Anschluss an ein Recycling. Bei einer KVA mit schlechter Energieausbeute ist der Nutzen einer geringeren Entsorgungsmenge und damit der Vorteil des Recycling am grössten. Die Differenz zwischen den Systemen fällt deshalb in den verschiedenen Szenarien unterschiedlich gross aus.

Diese Graphiken zeigen zwei Aspekte:

- Es gibt grosse Unterschiede zwischen den verschiedenen KVAs. Eine gute KVA kann die Umweltauswirkungen gegenüber einer durchschnittlichen KVA rund um den Faktor drei reduzieren.
- Ein Vorteil zugunsten des Recyclings bleibt unabhängig von der Höhe der energetischen Nutzung in der KVA erhalten. Dieser ergibt sich aus dem Ersatz Produktion PE-Neumaterial. Das heisst, es ist immer sinnvoller, PE-Folien werkstofflich zu verwerten als in der KVA energetisch zu nutzen, falls die Qualität dies zulässt.

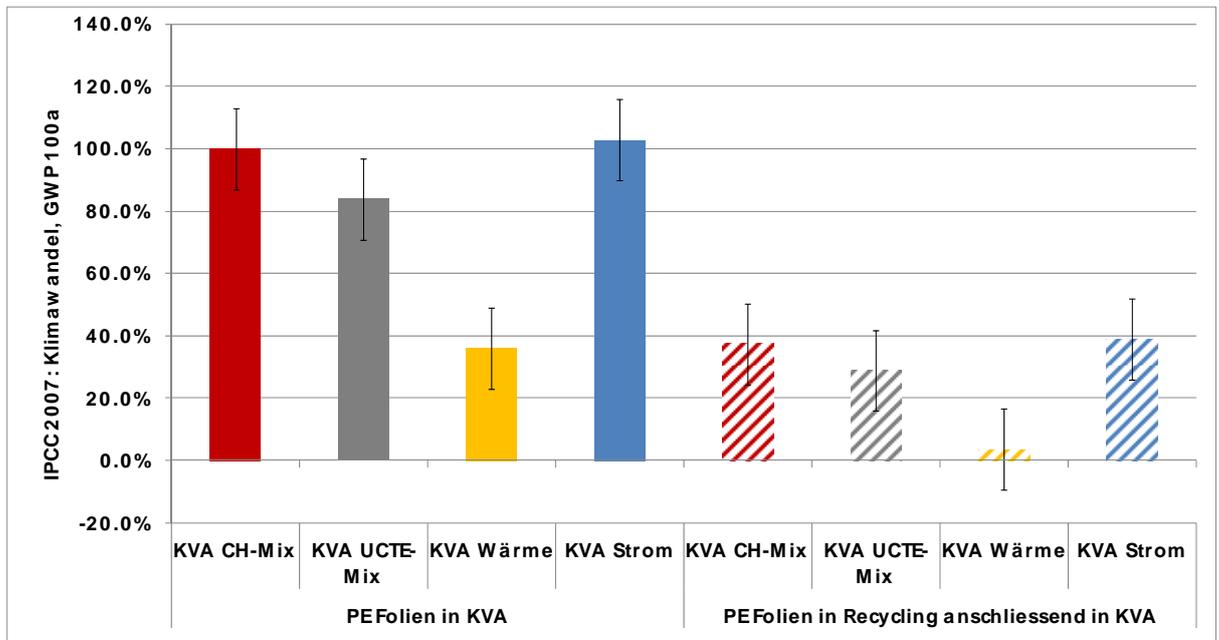


Abb. 26 Vergleich der Umweltauswirkungen mit GWP 2007 mit unterschiedlichem Strom-Mix und Energienutzen der KVA. Die höchste Auswirkung wurde jeweils auf 100% normiert.

Um abzuklären, ob es sinnvoller ist, PE Folien in einer KVA mit optimaler Wärmenutzung thermisch zu verwerten als in einem Zementwerk bzw. einer Kunststoffverölung wurden diese Varianten ebenfalls berechnet und in Abb. 28 sinngemäss zum Basisszenario aus 4.1 dargestellt.

Das Resultat dieser Szenarienrechnung mag erstaunen, da es zeigt, dass eine optimierte KVA im Rahmen der Aussagegenauigkeit der Resultate vergleichbare Umweltauswirkungen wie die Verölung aufweist. Eine Analyse hat gezeigt, dass diese Ergebnisse durchaus plausibel sind. Die untersuchte optimierte KVA ersetzt nur knapp weniger fossile Brennstoffe, wie die Verölung Heizöl produziert. Entsprechend sind die klimawirksamen Emissionen vergleichbar. Zudem produziert die KVA noch etwas Strom und ersetzt damit nicht erneuerbare Energieträger, was sich im tendenziell geringeren KEA und in den UBP ausdrückt. Zudem ergibt sich eine Reduktion der UBP bei der KVA aus der Tatsache, dass diese über eine sehr gute Rauchgasreinigung verfügt, im Vergleich zu einer durchschnittlichen Heizung. Der Indikator für das Klima ist bei der Verölung tendenziell etwas geringer als bei der KVA.

Zu beachten ist, dass auch im Vergleich mit einer optimierten KVA das werkstoffliche Recycling sinnvoller ist, siehe dazu auch Kapitel 4.3. Die Firma plastOil AG als Betreiberin der Verölungsanlage sortiert in einem ersten Schritt diejenigen Kunststoffe aus, welche werkstofflich recycelt werden können, wie z.B. PE Folien. Gemäss Aussage der Firma gelangen solche Kunststoffe gar nicht in die energetische oder rohstoffliche Verwertung, was ein Zusatznutzen dieser Anlage ist, welche in dieser Studie nicht direkt berücksichtigt wurde.

Interessant ist, dass die optimierte KVA beim Indikator UBP vergleichbare Werte wie das Zementwerk zeigt.

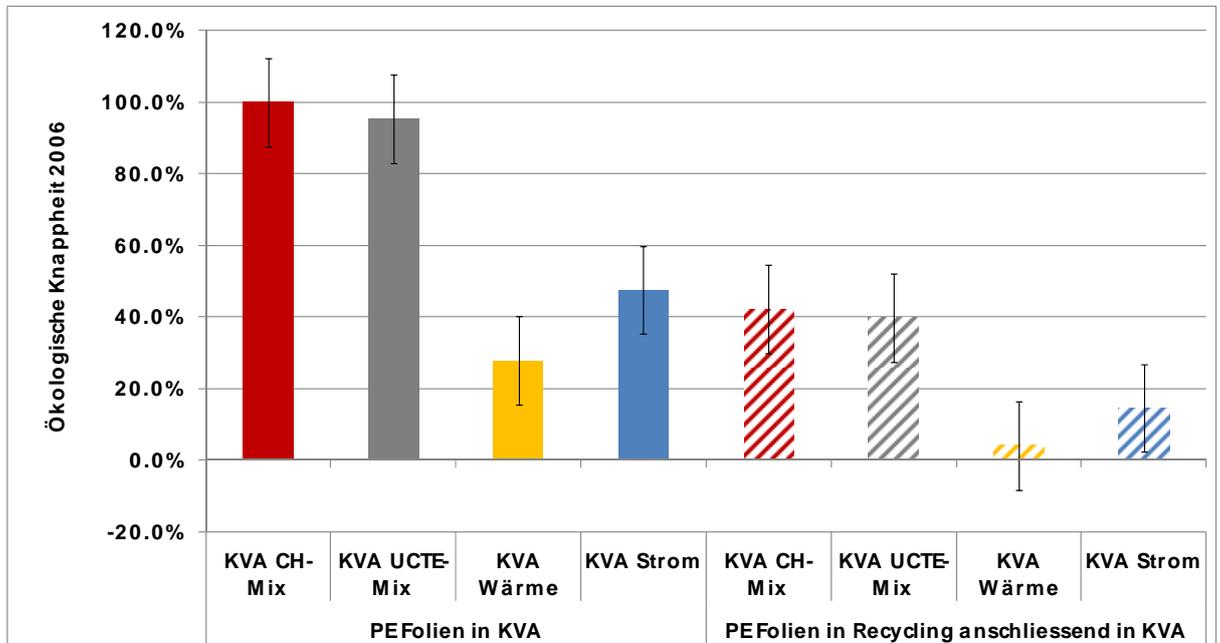


Abb. 27 Vergleich der Umweltauswirkungen mit ökologischer Knappheit mit unterschiedlichem Strom-Mix und Energienutzen der KVA. Die höchste Auswirkung wurde jeweils auf 100% normiert.

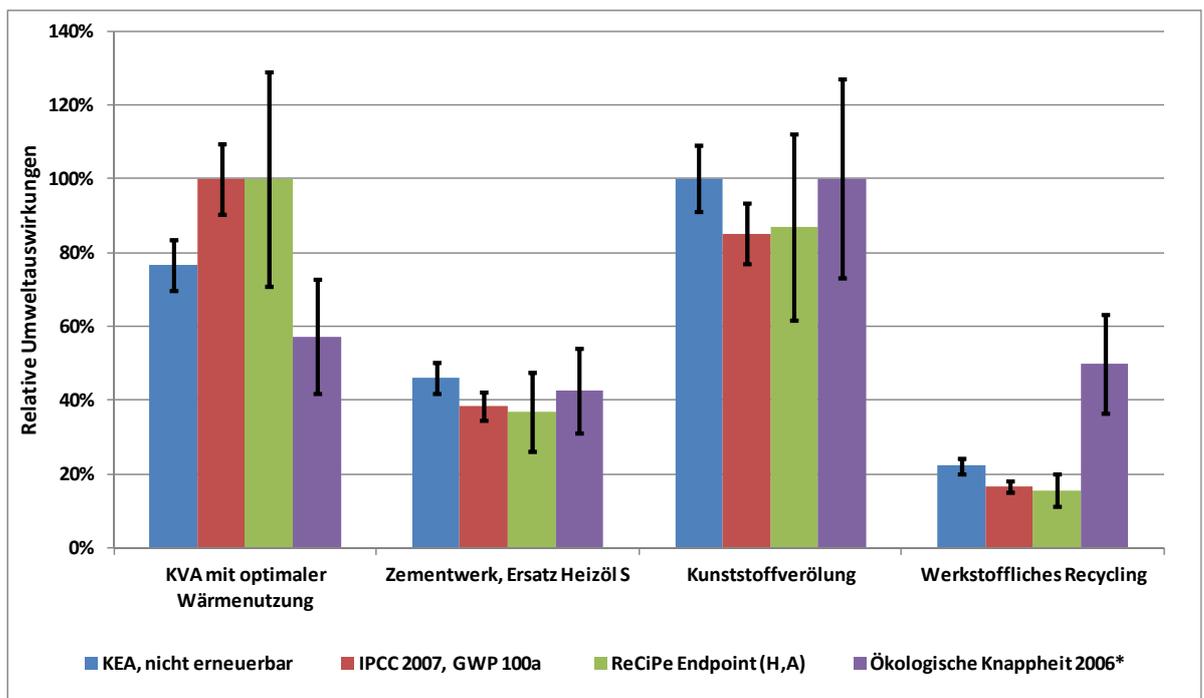


Abb. 28 Vergleich der Umweltauswirkungen falls die KVA eine optimale Wärmenutzung hat (65% Energienutzungsgrad Wärme und 7% Strom). Die höchste Auswirkung wurde jeweils auf 100% normiert.

4.2.3 Variation der zu entsorgenden Mengen an PE- und Papier

Die durchschnittlichen Verluste bei der Produktion von R-PE liegen bei rund 14% der zugeführten Materialmenge, wobei rund 9% kunststoffähnliche Stoffe und 5% Papier anfällt. Eine Variation der Ausschussmenge um -50% bis +100% wurde in Abb. 29 dargestellt. Diese Variation entspricht einer Ausschussmenge von minimal 7% und maximal 28% der zu verwertenden PE-Folien. Dabei wurde angenommen, dass es sich bei der zusätzlichen Verschmutzung um Anhaftungen handelt, welche als durchschnittlicher Siedlungsabfall modelliert werden können.

Erstaunlicherweise zeigt die Berechnung, dass bei einem höheren Ausschuss die relativen Belastungen der energetischen Verwertungen und der Verölung geringer werden. Der Grund dafür liegt darin, dass in diesem Falle im Recyclingverfahren weniger R-PE produziert wird und entsprechend in den anderen Verwertungsszenarien weniger neues PE hergestellt werden muss. Demgegenüber bleiben die Auswirkungen des werkstofflichen Recycling in etwa konstant. Eine geringe Reduktion ergibt sich bei den höheren Ausschüssen auf Grund der energetischen Nutzung der Ausschüsse in der KVA.

Diese Variation führt nicht zu wesentlich anderen Resultaten, wobei bei hohen Ausschüssen von 28% die energetische Verwertung im Zementwerk dem Recycling näher kommt.

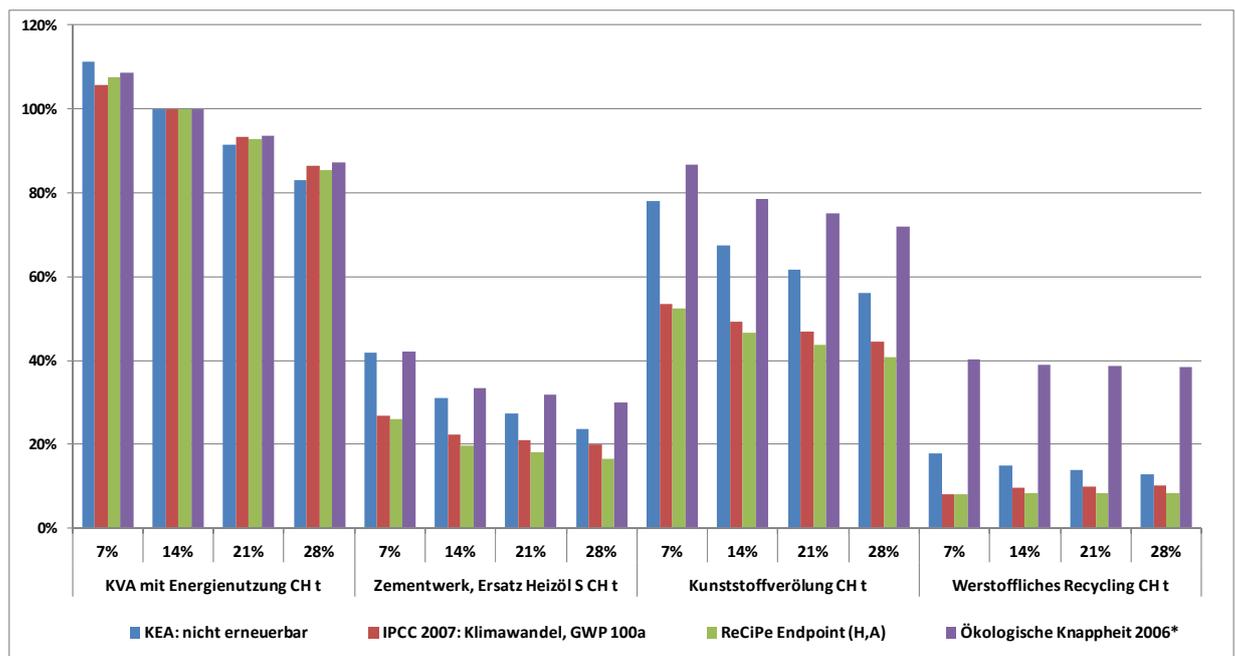


Abb. 29 Einfluss der Variation Produktionsabfälle im Recycling auf die Umweltauswirkungen. Die % Angaben geben den Anteil an Ausschuss an. Der durchschnittliche Ausschuss von 14% wurde auf 100% normiert. Für eine Diskussion dieses Resultates siehe Text. Ohne Angabe der Fehler, siehe dazu andere Abbildungen.

4.2.4 Folien aus LLDPE (Folien für Silage)

Die folgende Abb. 30 zeigt die Modellierung für Folien aus LLDPE im Vergleich zu Folien aus LDPE. Diese werden vor allem für Silagefolien in der Landwirtschaft verwendet und haben oft eine hohe Verschmutzung. Daher wurde ebenfalls ein Szenario mit einer Verschmutzung von 28% berechnet und dargestellt.

Während die Umweltauswirkungen für das werkstoffliche Recycling praktisch konstant bleiben, so zeigen die anderen Verwertungen teilweise eine markante Reduktion der Umweltauswirkungen. Der Grund dafür ist die Tatsache, dass die Herstellung von LLDPE mit geringeren Umweltauswirkungen verbunden ist als diejenige von LDPE. Diese Resultate wären demnach dann anzuwenden, wenn durch das werkstoffliche Recycling LLDPE ersetzt wird, indem z.B. Silagefolien aus diesem R-PE hergestellt werden. Dies ist zumindest in der Schweiz unseres Wissens nicht der Fall. Dennoch soll das Resultat kurz diskutiert werden. Zu beachten ist, dass es sich bei diesem Szenario LLDPE um ein theoretisches Szenario handelt, welches auf Annahmen und nicht auf realen Daten beruht.

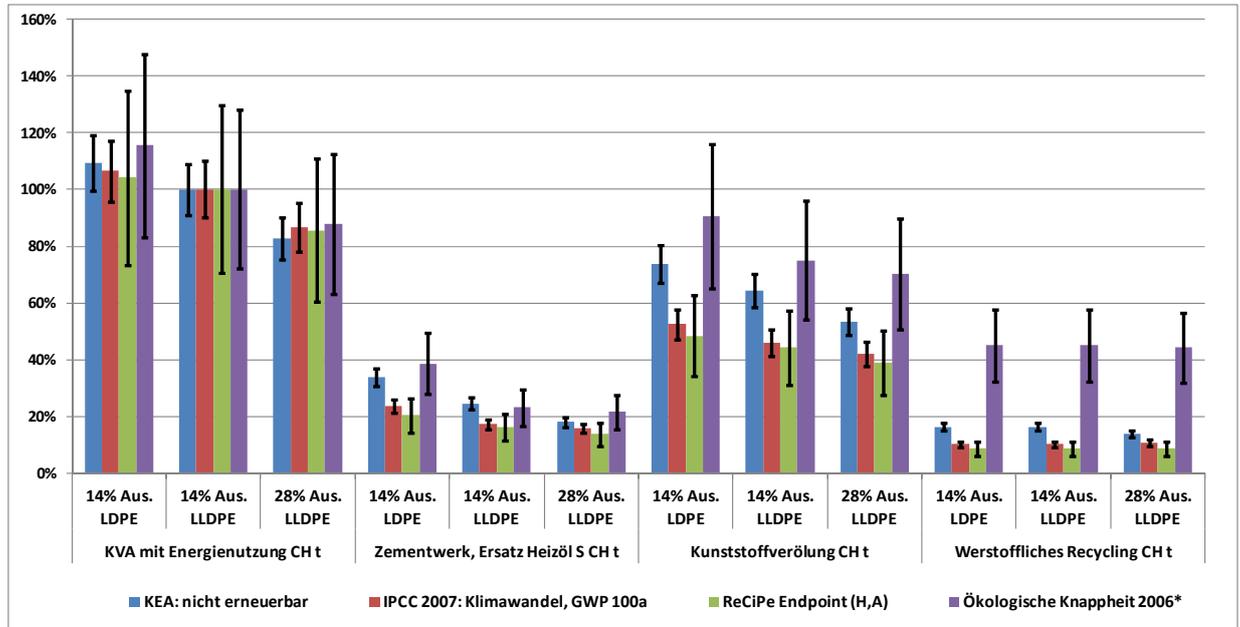


Abb. 30 Einfluss der Variation Produktionsabfälle im Recycling auf die Umweltauswirkungen. Die % Angaben geben den Anteil an Ausschuss an. Die höchste Auswirkung bei 14% Ausschuss wurde jeweils auf 100% normiert. Ohne Angabe der Fehler, siehe dazu andere Abbildungen.

Während die drei Indikatoren Energie (KEA), Klima und ReCiPe dieselbe Rangfolge zeigen, in aufsteigender Umweltbelastung:

- | | |
|------------------------------|---------------------|
| 1. Werkstoffliches Recycling | geringste Belastung |
| 2. Zementwerk | |
| 3. Verölung | |
| 4. KVA | höchste Belastung |

So zeigt der Indikator UBP die folgende Reihenfolge

- | | |
|------------------------------|---|
| 1. Zementwerk | geringste Belastung |
| 2. Werkstoffliches Recycling | kein signifikanter Unterschied zur Verölung |
| 3. Verölung | kein signifikanter Unterschied zur KVA |
| 4. KVA | höchste Belastung |

Das werkstoffliche Recycling ist auch für solche Folien der Verwertung in der Verölung oder der KVA vorzuziehen, jedoch könnte in gewissen Fällen auch die Verwertung in einem Zementwerk eine sinnvolle Option darstellen. Dies müsste jedoch noch geprüft werden, da diese Resultate auf Annahmen und nicht auf realen Daten beruhen.

4.2.5 Variation der Stromeffizienz

Wie Abb. 13 gezeigt hat, ist der Strombedarf bei der werkstofflichen Verwertung sehr relevant. Eine relevante Optimierung könnte somit durch die Senkung des Strombedarfs bei der Aufarbeitung der PE Folien erreicht werden. In Abb. 31 ist dargestellt, wie sich die Umweltauswirkungen verändern, falls der Strombedarf auf 50% des aktuellen Verbrauchs gesenkt wird.

Mit einer Energieeffizienzoptimierung könnten die Umweltauswirkungen des Recyclings relevant gesenkt werden. In diesem Falle zeigen alle Indikatoren eine geringere oder tendenziell geringere Belastung durch das werkstoffliche Recycling verglichen mit der Zementwerk.

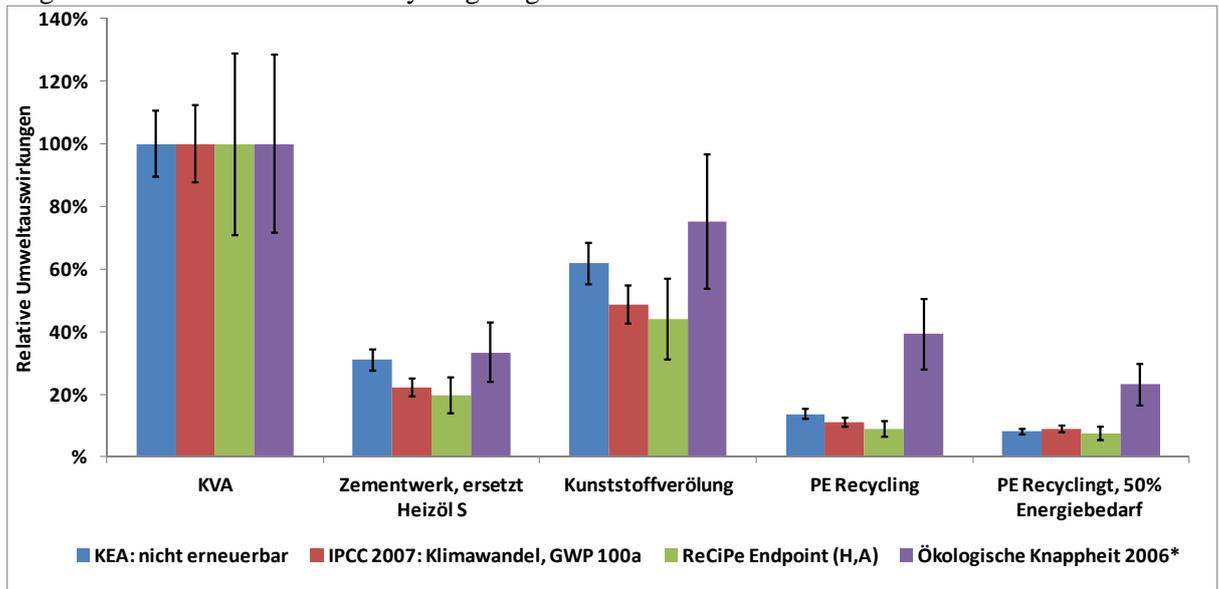


Abb. 31 Prozessanteile der Aufarbeitung von R-PE mit Fokus auf einer verbesserten Stromeffizienz (Methode der Ökologischen Knappheit). Die höchste Auswirkung wurde jeweils auf 100% normiert.

4.2.6 Schlussfolgerungen

Die Sensitivitätsanalysen haben gezeigt, dass die folgenden Einflussgrößen einen wesentlichen Einfluss auf die Resultate haben:

- Ersatz von Neu PE durch R-PE
- Energienutzung der KVA
- Art der Folien, LDPE oder LLDPE

Diese können zu einer anderen Rangfolge in der ökologischen Beurteilung der Verwertungen führen. Die Veränderungen sind in der nachfolgenden Tabelle zusammengestellt.

	Anteil Ersatz Neu-LDPE durch R-LDPE			LLDPE Ausschuss	Energienutzung KVA	
	100%	80%	60%	28%	Aktuell	Optimiert
Geringste Auswirkungen	Recycling	Zementwerk	Zementwerk	Zementwerk Recycling	Recycling	Recycling
	Zementwerk	Recycling	Verölung		Zementwerk	Zementwerk
	Verölung	Verölung	Recycling	Verölung	Verölung	KVA, Verölung
Höchste Auswirkungen	KVA	KVA	KVA	KVA	KVA	

4.3 Ergebnisse Öko-Effizienz

Ein System wird als öko-effizient bezeichnet, wenn möglichst geringe Umweltauswirkungen bei möglichst geringen Kosten entstehen. In diesem Bericht werden die folgenden zwei Arten der Öko-Effizienz Darstellung verwendet:

- Portfolio Darstellung
Diese wird verwendet um zu erkennen, ob ein werkstoffliches Recycling vor einer energetischen oder rohstofflichen Verwertung zu einer Erhöhung der Öko-Effizienz führt oder nicht.
- Kennzahlen Darstellung
Diese wird verwendet, um die Spannbreiten der Öko-Effizienz der verschiedenen Verwertungen anzugeben und damit etwas über die Signifikanz der Resultate auszusagen.

4.3.1 Portfolio Darstellung der Öko-Effizienz

Bei der Portfolio Darstellung werden auf der X-Achse die ökonomischen Kenngrößen so aufgetragen, dass die Kosten von links nach rechts sinken. Auf der Y-Achse werden die Umweltauswirkungen so aufgetragen, dass die höchsten Umweltauswirkungen unten und die geringsten Umweltauswirkungen oben sind. Diese Darstellung, wie sie Abb. 32 und Abb. 33 zeigt, kann in vier Quadranten eingeteilt werden. Die öko-effizienteste Variante findet sich dabei im Sektor oben-rechts „Optimum“, die Schlechteste im Sektor unten-links „Pessimum“.

In der dargestellten Analyse werden folgende Szenarien untersucht:

- R-PE in Recycling:
1 t PE Folien werden gesammelt und rezykliert. Nach der erneuten Nutzung (ausserhalb der Systemgrenzen) wird das PE erneut gesammelt und wieder rezykliert.
- R-PE in KVA, R-PE in Verölung und R-PE in Zementwerk:
1 t PE Folien werden gesammelt und rezykliert. Nach der erneuten Nutzung (ausserhalb der Systemgrenzen) wird das PE erneut gesammelt und einer thermischen bzw. rohstofflichen Verwertung zugeführt. Zudem wird die entsprechende Menge neues PE produziert.
- PE in KVA, PE in Verölung und PE in Zementwerk:
1 t PE Folien werden gesammelt und einer thermischen oder rohstofflichen Verwertung zugeführt und die entsprechende Menge neues PE hergestellt. Um denselben Nutzen wie bei den obigen Szenarien mit R-PE zu erhalten, wird nach der Nutzung des neuhergestellten PE nochmals eine thermische oder rohstoffliche Verwertung gemacht und entsprechende Mengen neues PE produziert.

Da die Sammel- und Verwertungskosten beim Recycling stark variieren können, wurden bezüglich der Ökonomie der Retrologistik zwei Szenarien betrachtet, siehe auch Kapitel 3. Im Szenario tiefe Sammelkosten wurde mit Kosten von 100 CHF / t PE Folien und im Szenario hohe Sammelkosten wurde mit Kosten von 800 CHF / t PE Folien gerechnet.

Diese Öko-Effizienz Analyse zeigt im Szenario tiefe Sammelkosten für das Basisszenario, dass

- durch ein vorgängiges werkstoffliches Recycling jede Verwertung öko-effizienter wird.
- die höchste Öko-Effizienz durch ein „fortlaufendes“ werkstoffliches Recycling erreicht wird.
- abgesehen vom werkstofflichen Recycling die thermische Verwertung in einem Zementwerk die höchste Öko-Effizienz aufweist, danach kommt die Verölung und die geringste Öko-Effizienz hat die KVA.

Ein wesentlicher Grund für dieses Resultat ist die Tatsache, dass ein Produzent der R-PE einsetzt, dieses Material zu einem wesentlich tieferen Preis einkaufen kann verglichen mit neuem PE. Bedingung ist natürlich, dass dieses R-PE die Spezifikationen für seine Produkte in dem Masse erfüllt, dass neues PE ersetzt werden kann.

Das Szenario hohe Logistikkosten zeigt im Wesentlichen dasselbe Resultat, auch wenn die Unterschiede aufgrund der höheren Kosten der Sammlung nicht so ausgeprägt sind.

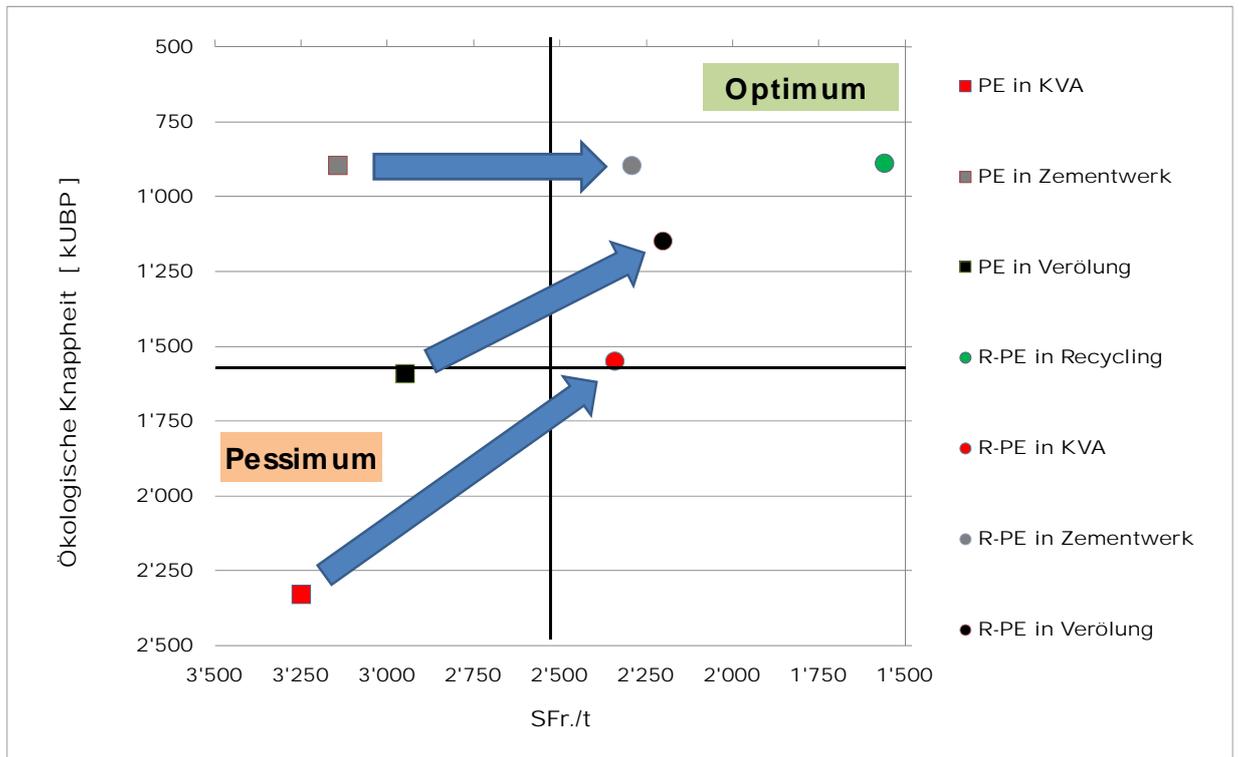


Abb. 32 Portfolio Analyse Ökoeffizienz, Annahmen: R-PE tiefer Preis und tiefe Sammelkosten (X-Achse Lebenswegkosten, Y-Achse Umweltwirkungen)

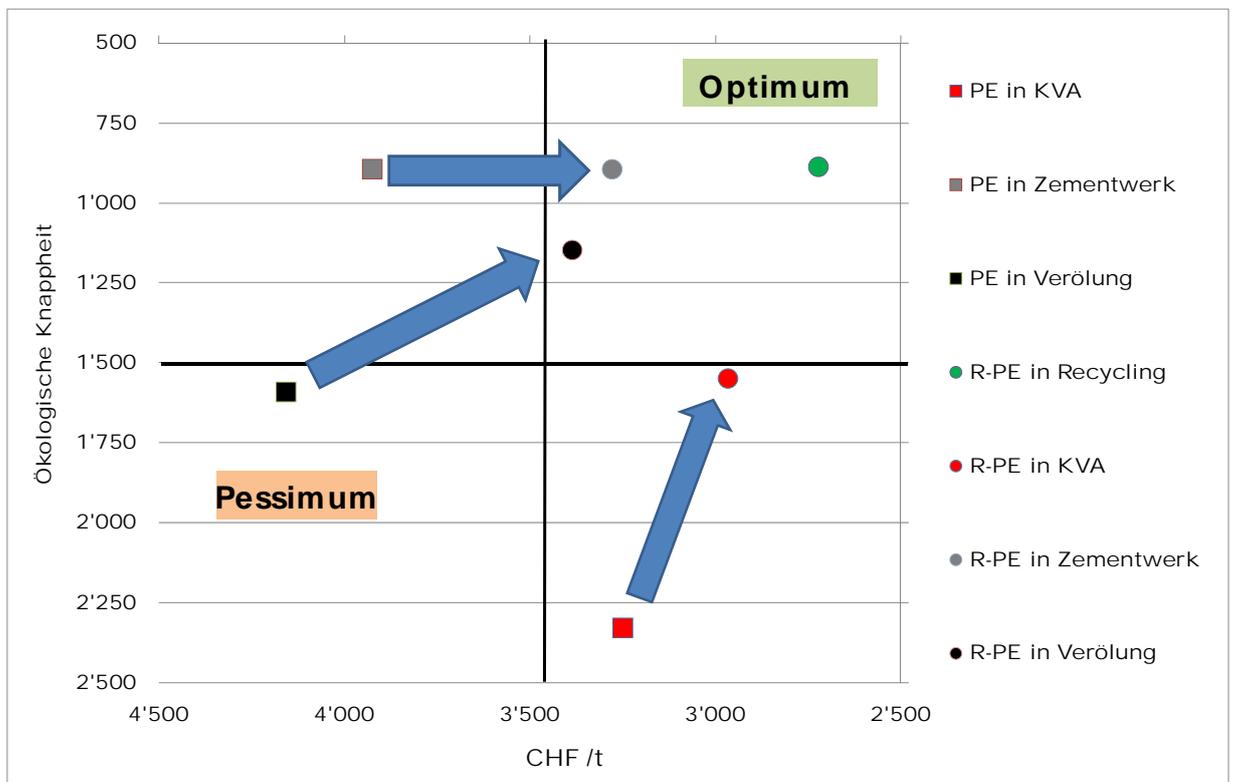


Abb. 33 Portfolio Analyse Ökoeffizienz, Annahmen: R-PE tiefer Preis und hohe Sammelkosten (X-Achse Lebenswegkosten, Y-Achse Umweltwirkungen)

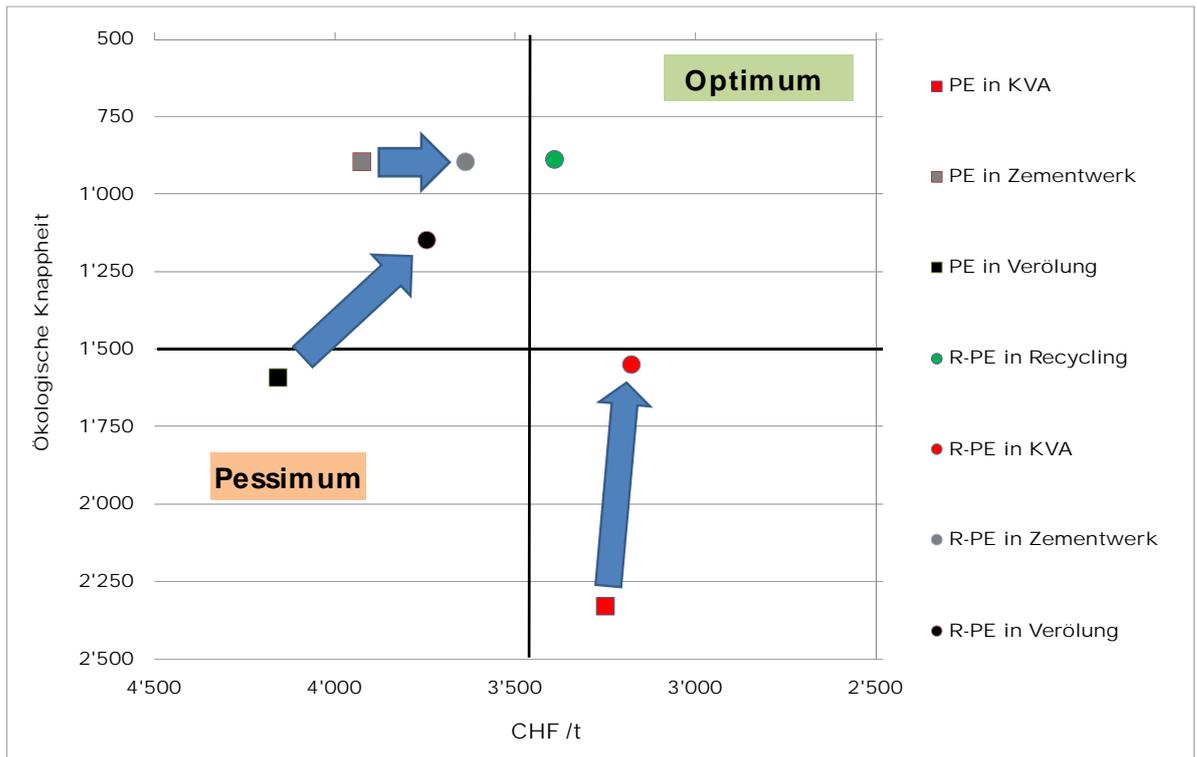


Abb. 34 Portfolio Analyse Ökoeffizienz, Annahmen: R-PE hoher Preis und hohe Sammelkosten

(X-Achse Lebenswegkosten, Y-Achse Umweltwirkungen)

4.3.2 Kennzahlen Darstellung der Öko-Effizienz

Bei dieser Darstellung wird die Öko-Effizienz als Kennzahl aus einer ökologischen Kenngrösse und einer ökonomischen Kenngrösse dargestellt, entsprechend der Definition in Kapitel 3. In Abb. 35 sind die Kennzahlen mit dem ökologischen Indikator zur Klimawirksamkeit und in Abb. 36 mit dem ökologischen Indikator UBP für die verschiedenen Verwertungswege dargestellt. Dabei werden auch die Spannbreiten und damit die Signifikanz der Ergebnisse angegeben.

Diese Spannbreiten beinhalten:

- Beim ökologischen Indikator die Unsicherheiten, welche berechnet und in den meisten Darstellungen in Kapitel 4, wie z.B. in Abb. 20, Abb. 25 oder Abb. 28, ausgewiesen werden.
- Beim ökonomischen Indikator werden die beiden Extremwerte verwendet:
 - Entsorgungslogistik tiefe Logistikkosten sowie tiefer Wert des R-PE
 - Entsorgungslogistik hohe Logistikkosten (Sammelsäcke mit 20 kg pro Sack) und hoher Wert des R-PE

Daraus ergeben sich teilweise sehr hohe Spannbreiten. Dennoch zeigt das werkstoffliche Recycling bei beiden Kennzahlen zumindest tendenziell die höchste Öko-Effizienz. Bei der Kennzahl mit dem Indikator Klima besteht nur eine geringe Überlappung mit der Verwertung von R-PE im Zementwerk. Demgegenüber zeigen die Kennzahlen mit dem ökologischen Indikator UBP praktisch mit allen Verwertungswegen eine Überlappung. Jedoch sind fast alle Verwertungen signifikant besser als diejenige in der KVA mit Energiegewinnung.

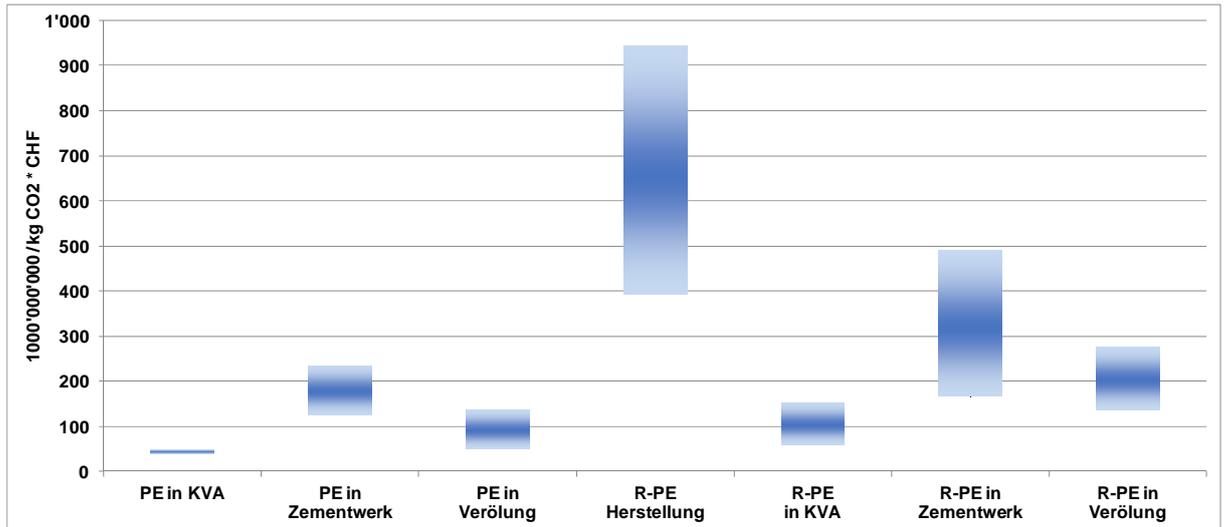


Abb. 35 Ökoeffizienz Kennzahl mit dem ökologischen Indikator Klima. Die Ausdehnung der Balken zeigt die maximale Spannbreite der Resultate.

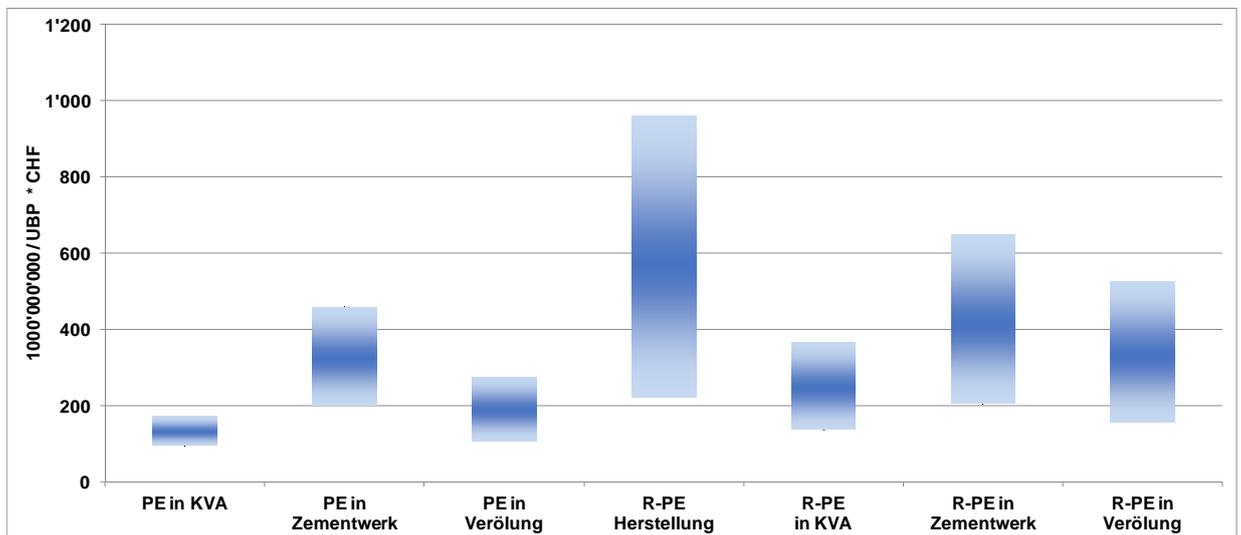


Abb. 36 Ökoeffizienz Kennzahl mit dem ökologischen Indikator UBP. Die Ausdehnung der Balken zeigt die maximale Spannbreite der Resultate.

5 Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Die erstellten Auswertungen und Analysen zeigen, dass alle alternativen Verwertungen von PE-Folien (Zementwerk, Verölung, werkstoffliches Recycling) geringere Umweltauswirkungen aufweisen als diejenige in einer KVA mit durchschnittlicher energetischer Nutzung. Dasselbe gilt auch für die Öko-Effizienz der alternativen Verwertungen. Die Unterschiede der verschiedenen Verwertungen hängen sehr stark von den Umständen und Rahmenbedingungen ab, wie z.B. bis zu welchem Grad R-PE neues PE ersetzt, ob die Folien aus LDPE (höchster Anteil bei den Folien) oder aus LLDPE (Silagefolien) bestehen oder der Energieeffizienz der KVA.

In der heutigen Situation in der Schweiz gilt, dass in den meisten Anwendungen, wie z.B. Kabelschutzrohre, R-PE neues PE zu 100% ersetzt und der grosse Teil der Folien aus LDPE besteht. Mit diesen Rahmenbedingungen wurde das Basisszenario berechnet, welches bezüglich der Umweltauswirkungen die folgende Reihenfolge ergibt:

Geringste Auswirkungen:	Werkstoffliches Recycling Thermische Verwertung in einem Zementwerk
Höchste Auswirkungen	Rohstoffliche Verwertung: Verölung Thermische Verwertung in einer KVA

Dieselbe Reihenfolge ergibt sich auch bezüglich der Öko-Effizienz.

Folgende Einsparungen können mit den verschiedenen Verwertungen bezüglich der Verwertung in der KVA erreicht werden:

	Energetische Ressourcen [Liter Erdöl Äquivalenten]	Treibhausgasemissionen [t CO ₂ Äquivalenten]
Recycling	-940	-3.1
Zementwerk, Ersatz Kohle	-740	-3.3
Zementwerk, Ersatz Heizöl S	-790	-2.8
Verölung	-380	-1.7

Ein wesentlicher Unterschied zwischen dem werkstofflichen Recycling und den andern Verwertungswegen besteht darin, dass beim werkstofflichen Recycling das Material, wenn auch auf Grund von Verlusten in etwas geringeren Mengen, immer noch vorliegt und damit für die anderen Verwertungswege offen steht. Berechnungen in dieser Studie haben gezeigt, dass es aus Sicht der Ökologie wie auch der Öko-Effizienz sinnvoller ist, das Material so lange wie möglich stofflich zu verwerten und erst wenn dies z.B. auf Grund von Verschmutzungen oder Vermischungen mit anderen Kunststoffen nicht mehr möglich ist, eine rohstoffliche oder energetische Verwertung durchzuführen. Diese sogenannte Kaskadennutzung ist genau das, was die plastOil AG (Verölungsanlage) durchführt. Zuerst werden diejenigen Kunststoffe aussortiert, welche einer werkstofflichen Verwertung zugeführt werden können. Anschliessend werden diejenigen Kunststoffe aussortiert, welche verölt werden können. Die restliche Fraktion wird in einer KVA oder ev. in einem Zementwerk energetisch genutzt.

In Sensitivitätsrechnungen wurden die relevanten Einflussfaktoren variiert und damit überprüft, ob sich bei anderen Rahmenbedingungen eine unterschiedliche Rangfolge ergibt.

5.1 Sensitivitätsanalysen

Die Sensitivitätsanalysen haben gezeigt, dass die folgenden Einflussgrößen einen wesentlichen Einfluss auf die Resultate haben:

- Ersatz von Neu PE durch R-PE
- Energienutzung der KVA
- Art der Folien, LDPE oder LLDPE

Diese können zu einer anderen Rangfolge in der ökologischen Beurteilung der Verwertungen führen. Die Veränderungen sind in der nachfolgenden Tabelle zusammengestellt.

	Anteil Ersatz Neu-LDPE durch R-LDPE			LLDPE Ausschuss	Energienutzung KVA	
	100%	80%	60%		28%	Aktuell
Geringste Auswirkungen	Recycling	Zementwerk	Zementwerk	Zementwerk Recycling	Recycling	Recycling
	Zementwerk	Recycling	Verölung		Zementwerk	Zementwerk
	Verölung	Verölung	Recycling	Verölung	Verölung	KVA
Höchste Auswirkungen	KVA	KVA	KVA	KVA	KVA	Verölung

Die weiter untersuchten Einflussgrößen, Anteil Ausschuss und Energieeffizienz beim Recycling führen nicht zu einer anderen Rangfolge und werden hier nicht weiter erläutert.

Ersatz von Neu PE durch R-PE

Falls durch R-PE nur 90% neues Material ersetzt werden kann, so ist der Nutzen des PE Recyclings vergleichbar mit der thermischen Nutzung im Zementwerk. Falls der Ersatz nur 60% bis 70% beträgt so wird der Nutzen des Recyclings vergleichbar mit demjenigen der Verölung.

Energienutzung in der KVA

Eine hohe Energienutzung in der KVA führt dazu, dass sich die Umweltauswirkungen der KVA, der thermischen Verwertung im Zementwerk und der rohstofflichen Verwertung bei der Verölung annähern. Falls die KVA eine optimale Wärmenutzung von über 70% sowie eine Stromnutzung von 7% hat (KVA Basel), so ist die thermische Nutzung in der KVA vergleichbar bis tendenziell besser als diejenige in der Verölung.

Ein werkstoffliches Recycling ist jedoch unabhängig von der energetischen Nutzung in der KVA mit den geringsten Umweltauswirkungen verbunden.

Silagefolien mit einer hohen Verschmutzung

Falls die Silagefolien aus LLDPE einen hohen Verschmutzungsgrad aufweisen, so ist die Verwertung in einem Zementwerk vergleichbar mit dem werkstofflichen Recycling. Diese beiden sind besser als die Verölung und die KVA.

5.2 Ökoeffizienz

Die Analyse der Lebenswegkosten (Kosten der Logistik, Verwertung und Kosten der Wiederbeschaffung des Rohmaterials) zeigen, dass diese im Wesentlichen von den Logistikkosten und dem Preis des R-PE abhängen. Bei geringen Logistikkosten sind die Lebenswegkosten der alternativen Verwertungen geringer als diejenigen der KVA, wobei das werkstoffliche Recycling die geringsten Gesamtkosten verursacht. Bei hohen Logistikkosten, Sammlung mit Sammelsäcken, sind die Gesamtkosten des werkstofflichen Recyclings etwas tiefer als diejenigen der KVA, können jedoch auch dieselbe Höhe erreichen. Die anderen alternativen Verwertungen verursachen in diesem Falle tendenziell höhere Gesamtkosten als die KVA. Entsprechend hängt auch die Öko-Effizienz von diesen Faktoren ab.

Die Öko-Effizienz-Analyse hat gezeigt, dass ein werkstoffliches Recycling die höchste Öko-Effizienz aufweist. Weiter konnte gezeigt werden, dass eine zusätzliche Nutzung durch ein vorgängiges werkstoffliches Recycling bei den untersuchten thermischen und rohstofflichen Verwertungen jeweils zu einer Erhöhung der Öko-Effizienz führt.

Dies bedeutet, dass mit dem werkstofflichen Recycling sowohl aus ökonomischer wie auch aus ökologischer Sicht der höchste Nutzen erzielt werden kann. Diese Analyse wurde für das Basisszenario gemacht. Zu beachten ist, dass sich gemäss Sensitivitätsanalyse ein anderes Resultat zeigen kann, falls mit dem R-PE nur ein geringer Anteil Neu-PE ersetzt wird⁹. Ebenfalls einen Einfluss auf dieses Resultat kann die Verwertung von LLDPE-Folien haben. Bezüglich der anderen Einflussfaktoren ist dieses Resultat jedoch stabil und damit aussagekräftig.

5.3 Empfehlungen

Auf Grund der Ergebnisse dieser Studie können aus ökologischer Sicht die folgenden Empfehlungen abgegeben werden:

- In der Schweiz schneidet das werkstoffliche Recycling im Vergleich zur Verwertung von PE in der KVA aus Sicht der Öko-Effizienz deutlich besser ab und sollte, soweit Einsatzmöglichkeiten für das PE-Recyclinggranulat vorhanden sind, ausgebaut werden.
- Durch ein vorgängiges werkstoffliches Recycling kann die Öko-Effizienz der anderen Verwertungswege erhöht werden. Entsprechend ist eine Kaskadennutzung, wie dies von der Firma plastOil AG betrieben wird zu empfehlen.
- Da die Verwendung des PE-Recyclinggranulats im Bereich Folien eingeschränkt ist, ist zu prüfen, in welchen Anwendungen ein Kreislauf mit Recyclinggranulat aus Folien möglich ist.
- Die ökologisch effizienteste Endverwertung ist gemäss Basisszenario die energetische Nutzung von R-PE/PE im Zementwerk.
- Falls eine werkstoffliche Verwertung nicht möglich ist, z.B. auf Grund von Verschmutzungen oder bei Verbundstoffen, so scheint eine energetische Verwertung in einem Zementwerk sinnvoll zu sein.
- Da eine möglichst sortenreine Sammlung im Allgemeinen zu besseren Recycling-Qualitäten führt, ist eine sortenreine Sammlung zu empfehlen, insofern eine solche möglich ist.

⁹ Das heisst, dass für die Herstellung eines Produktes entweder mehr neues PE beigemischt werden muss, oder dass insgesamt mehr PE-Material (z.B. dickere Wände oder dickere Folie) verwendet werden muss, um dieselben Anforderungen zu erfüllen.

5.4 Optimierungspotentiale

Bezüglich der folgenden Punkte kann mit einer weiteren Optimierung gerechnet werden. Diese führen zu weiteren Erhöhungen der Öko-Effizienz:

- Durch eine energetische Optimierung des werkstofflichen Recyclings könnten die Umweltauswirkungen dieser Verwertung wesentlich reduziert werden.
- Es ist zu erwarten, dass diese Resultate nicht nur für Folien sondern auch für andere Produkte aus PE wie z.B. Hohlkörper gelten. Entsprechend wäre es wichtig, die werkstoffliche Verwertung dieser Materialien zu fördern.
- Wesentlich für den Nutzen des werkstofflichen Recyclings ist, inwiefern das rezyklierte Material neues PE ersetzen kann. Es ist daher notwendig, sowohl die Qualität des Recyclings zu optimieren wie auch vermehrt R-PE in Anwendungen einzusetzen, bei denen neues PE zu 100% ersetzt werden kann.
- Eine Reduktion des Ausschusses beim werkstofflichen Recycling führt zu einer Reduktion der Umweltauswirkungen.
- Durch eine möglichst sortenreine Sammlung kann voraussichtlich die Qualität des R-PE erhöht und der Ausschuss reduziert werden.
- Eine effiziente Sammlung ist aus Kostengründen zu empfehlen. Möglicherweise könnte die Zusammenarbeit mit anderen Recyclingsystemen zu einer positiven Synergie führen.
- Eine Steigerung der Energienutzung in der KVA kann zu einer hohen Reduktion der Umweltauswirkungen führen. Auch wenn eine thermische Verwertung von PE in der KVA nicht primär empfohlen wird, so führt eine optimierte Energienutzung zu einer Reduktion der Umweltbelastung bei der Entsorgung von anderen Abfällen.

6 Literatur

- [1] ISO, 2006a. ISO 14040, in Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework. 2006: Geneva.
- [2] ISO, 2006b. ISO 14040, in Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines. 2006: Geneva.
- [3] Kilga Martin und Wick Guido, sinum AG: Ökobilanz – Verwertung von Kunststoffabfällen, Verölungsanlage plastOil AG, 2011 (vertraulich)
- [4] Globel-Project AG, Syntrol: Synthese aus Ökologie + Ökonomie; Nill Tech GmbH, 2011
- [5] Öko-Energie Umweltfonds 1 GmbH & Co. KG, Eine Investition in ökologisch sinnvolles Recycling, Bremen, 2009
- [6] ecoinvent 2006: Ökoinventare von Energiesystemen, Transporten und Grundmaterialien, Version 2.2, 2010.
- [7] Carbotech, F. Dinkel, A. Hauser, Ökologischer Nutzen des PET-Recycling Schweiz, 2008, PRS, Zürich
- [8] Guinée, J.B., *Life cycle assessment; An operational guide to the ISO standards; Characterisation and Normalisation Factors*. 2001, CML.
- [9] Frischknecht, R., R. Steiner, und N. Jungbluth, Ökobilanzen: Methode der ökologischen Knappheit – Ökofaktoren 2006. Methode für die Wirkungsabschätzungen in Ökobilanzen. Öbu SR 28/2008.
- [10] Gabor Doka, Waste incineration, Life Cycle Inventories of Waste Treatment Services. ecoinvent report No. 13, – part II, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, December 2007.
- [11] IPCC (2007) Climate Change 2007: The Physical Science Basis. In: Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.). IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, 2007
- [12] Dinkel Fredy und Franov Emil; Ökobilanzen zwischen Aussagekraft und blinder Normentreue Was heisst schon „korrekte Ökobilanzen“? in Umwelt Perspektiven, 2008
- [13] VDI (1997) Cumulative Energy Demand - Terms, Definitions, Methods of Calculation. In: VDI-Richtlinien 4600. Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf
- [14] Goedkoop M.J., Heijungs R., Huijbregts M., De Schryver A., Struijs J., Van Zelm R., ReCiPe 2008, A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level; First edition Report I: Characterisation; 6 January 2008
- [15] Jungbluth N. (2007) Erdöl. In: Sachbilanzen von Energiesystemen: Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Energiesystemen und den Einbezug von Energiesystemen in Ökobilan-

zen für die Schweiz (Ed. Dones R.). ecoinvent report No. 6-IV, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, CH.

- [16] BAFU: Abfallwirtschaftsbericht 2008
- [17] Zimmermann Markus, Life Cycle Costing, 2005 GRIN Verlag
- [18] RE-LOG AG, Das Poly Sack System, Flyer-RE-LOG-System.pdf, auf <http://www.redilo.ch>
- [19] www.plastoil.ch/site/saecke-bestellen.html
- [20] Dones, R., Bauer, C., Röder, A. (2007) Kohle. In: Dones, R. (Ed.) et al., Sachbilanzen von Energiesystemen: Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Energiesystemen und den Einbezug von Energiesystemen in Ökobilanzen für die Schweiz. Final report ecoinvent No. 6-VI, Paul Scherrer Institut Villigen, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, CH.
- [21] Plasticseurope: PlasticsEurope's Eco-profile Programme, publiziert auf der Website <http://www.plasticseurope.org/plastics-sustainability/eco-profiles.aspx>
- [22] Hischer R. (2007) Life Cycle Inventories of Packaging and Graphical Papers. ecoinvent-Report No. 11, part II Plastics, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, 2007.

Critical Review

Externes kritisches Review der Studie:

„Ökologischer Nutzen des Pe-Folien Recyclings Schweiz (Landwirtschaft, Industrie und Gewerbe)“

Verfasser:

Günter Dehoust, Öko-Institut e.V.,

Berlin, März 2012

Inhaltsverzeichnis:

1	Einleitung.....	3
2	Vorgehen	3
3	Resultat der kritischen Überprüfung.....	4
	Methode	4
	Allokationen	5
	Auswertung und Interpretation	5
	Schlussfolgerungen.....	5
	Berichterstattung	6
4	Zusammenfassende Beurteilung.....	6

1 Einleitung

Die vorliegende Ökobilanz wurde von der Carbotech AG im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt Schweiz (BAFU) und in Kooperation mit InnoPlastics Schweiz erstellt. Die Studie soll insbesondere folgende Fragen klären:

- Ist es ökologisch sinnvoller PE-Folien werkstofflich zu rezyklieren anstatt es in einer KVA zu entsorgen und die Energie zu nutzen?
- Wie hoch ist der ökologische Nutzen bzw. Schaden durch andere Nutzungen wie:
 - Rohstoffliche Verwertung durch Verölung,
 - Energetische Nutzung durch Verbrennung im Zementwerk?

Mit einem externen Review soll die Einhaltung der Vorgaben der Normenreihe ISO 14.040ff und die darin genannten Forderungen geprüft werden.

Im Wesentlichen wird dabei geprüft ob:

- die angewendete Methodik der Ökobilanz mit der ISO-Norm übereinstimmt,
- die Methodik wissenschaftlich begründet ist,
- die Methodik und die verwendeten Daten hinreichend auf das Ziel der Bilanz abgestimmt sind,
- die Auswertungen der Datenlage und dem Ziel angepasst sind und
- der Bericht ausreichend transparent dargestellt und in sich schlüssig ist.

Diesem Critical Review liegen zugrunde:

- der Bericht “Ökologischer Nutzen des Pe-Folien Recyclings Schweiz (Landwirtschaft, Industrie und Gewerbe)”, Stand: Januar 2012
- Rückfragen bei den Autoren und Einsicht in die Bilanzdateien

Die als Ergänzung zur Ökobilanz durchgeführte Ökoeffizienz-Bewertung ist nicht Bestandteil eines Critical Reviews nach der DIN Norm.

2 Vorgehen

Das Review wurde von Günter Dehoust, Rev entsprechend den Anforderungen der Norm durchgeführt. Er erfüllt auf Grund seiner langjährigen Erfahrungen auf dem Gebiet der Ökobilanzierung, in denen er selbst zahlreiche Ökobilanzen - häufig mit dem Schwerpunktthemen Abfallwirtschaft und Recycling - erstellt und verschiedene Reviews durchgeführt hat, die Bedingungen von ISO um dieses Review durchzuführen.

Es gibt zwei mögliche Vorgehensweisen der kritischen Prüfung einer LCA-Studie:

- Version I:
kontinuierlich und parallel zur Entwicklung der Ökobilanz.
- Version II:
separat nach Abschluss der Ökobilanz und getrennt von dieser.

Im vorliegenden Fall wurde als Vorgehensweise Version II gewählt.

Die grossen Datenmengen, die bei der Durchführung einer Ökobilanz verarbeitet und die sehr große Anzahl an Berechnungen die durchgeführt werden, können und sollen bei einem Critical Review nicht vollständig überprüft werden. Da die ökologischen Hintergrunddaten meist aus anerkannten Datenbanken, wie ecoinvent, stammen und die Berechnungen durch Softwaretools durchgeführt werden, ist eine detaillierte Überprüfung aller Daten und Rechnungen auch nicht notwendig. Soweit erforderlich wurden Daten, die speziell für die zu prüfende Ökobilanz erhoben wurden auf Validität geprüft. Zudem wurden die verwendeten Daten und die Verknüpfung mit den ökologischen Hintergrunddaten stichprobenweise geprüft.

Der Schwerpunkt des Reviews wird auf die Überprüfung der Vergleichsbasis, der Rahmenbedingungen, des methodischen Vorgehens sowie die korrekte Verwendung und Zuordnung der Prozessdaten gelegt. Zudem wird die Plausibilität der Daten und Resultate sowie die Transparenz und damit Nachvollziehbarkeit der Studie geprüft.

3 Resultat der kritischen Überprüfung

Methodik

Die angewendete Methodik stimmt mit den Vorgaben der DIN ISO Norm überein und ist wissenschaftlich begründet.

Nach der Norm ISO 14.040 wird ein vierstufiges Vorgehen vorgeschrieben:

1. Festlegung der Ziele und der Rahmenbedingungen
2. Sachbilanz (Datenerhebung)
3. Wirkbilanz
4. Interpretation

Dieses Vorgehen ist nicht als linearer Ablauf zu verstehen, sondern als iterativen Prozess, bei dem jeweils geprüft werden muss, ob die Ergebnisse eine Anpassung der vorigen Schritte notwendig machen. Die vorliegende Ökobilanz richtete sich nach diesem Vorgehen.

Die Methodik und die verwendeten Daten sind gut auf das Ziel der Bilanz abgestimmt. Die Definition der Ziele und die Darstellung der Ergebnisse sind umfassend und transparent.

Die Festlegungen zu den Systemgrenzen sind der Fragestellung angepasst und nachvollziehbar erklärt. Das Gleiche gilt für die Auswahl der Bewertungskriterien und -methoden. Die gewählte funktionelle Einheit, wird in Bezug auf die Fragestellung als sinnvoll erachtet. Die Systemgrenzen sind korrekt gewählt. In der vorliegenden Bilanz sind nach Einschätzung des Reviewers alle relevanten Daten eingeflossen.

Die Auswertungen der Datenlage sind dem Ziel angepasst und der Bericht ist transparent dargestellt. Die zugrunde gelegten Daten und Anlagenbilanzen sind gut hinterlegt.

Die vergleichenden ökologischen Bilanzen sind in sich schlüssig.

Besonders erwähnenswert ist die ausführliche Prüfung von Unsicherheiten, welche sich aus fehlenden Grundlagen oder situativen Unterschieden ergeben können. Zu den relevanten Einflussfaktoren wurden Szenarienrechnungen durchgeführt. Dies erhöht nochmals die Transparenz bezüglich der relevanten Einflussgrößen und deren Auswirkungen auf die Resultate. Die Aussagekraft der Ergebnisse wird hierdurch sichergestellt und in bestimmten Bereichen noch gesteigert. Durch die Untersuchungen, wie stark

die Schlussfolgerungen durch andere Annahmen beeinflusst werden, wurde die Stabilität der Ergebnisse überprüft.

Der Hinweis der Autoren auf die Grenzen der Studie ist positiv hervorzuheben.

Allokationen

In der Studie werden die gewählten Allokationen zur Bewertung von Leistungen des Recyclings bzw. der energetischen Verwertung oder thermischen Beseitigung mit Strom- und Wärmenutzung ausführlich und nachvollziehbar beschrieben. Mit umfassenden Sensitivitätsanalysen wird aufgezeigt, welchen Einfluss diese methodischen Festlegungen auf das Ergebnis haben. Besonders wertvoll wird die differenzierte Darstellung der energetischen Verwertung in Zementwerken erachtet. Hierdurch wird aufgezeigt, dass ein großer Teil der durch Ersatz von Kohle erreichbaren Gutschriften eher den schlechten Emissionsbedingungen in den Zementwerken als der Ersatzbrennstoff Nutzung zuzuschreiben ist. Die parallele Darstellung der Ergebnisse für Heizwert S und HEL verdeutlicht diese Verhältnisse für den Leser, ohne einseitige Festlegungen zu treffen.

Auswertung und Interpretation

Die Auswertung erfolgte entsprechend der Empfehlung der Norm, durch Klassifizierung der verschiedenen Einflussfaktoren und Berechnung der Auswirkungen auf die Umwelt mit Modellen, welche auf wissenschaftlichen Grundlagen basieren. Dabei wurde speziell geprüft, ob die verwendeten Methoden der Wirkungsabschätzung dem heutigen Stand des Wissens entsprechen und die wesentlichen Auswirkungen der untersuchten Systeme umfassen. Die Berechnungen basieren auf heute anerkannten Methoden. Für die Interpretation wurden die zwei gesamttaggregierenden Methoden ReCiPe und UBP verwendet. In diesem Punkt geht die Studie über die Norm hinaus, was korrekterweise im Bericht erwähnt ist.

Positiv zu beurteilen ist auch die detaillierte Darstellung der relevanten Prozessbeiträge, wie Sammlung und Transporte, werkstoffliches Recycling, energetische Verwertung oder Entsorgung sowie Neuherstellung von PE.

Die Berechnung der Unsicherheiten und die Angabe der Vertrauensgrenzen der Resultate mit Fehlerbalken hilft die „Sicherheit“ der Ergebnisse einzuschätzen.

Für die Interpretation wurden sowohl die zwei gesamttaggregierenden Methoden UBP und ReCiPe verwendet, als auch die Kriterien Global Warming Potential (GWP) und Kumulierter Energieaufwand (KEA) extra ausgewiesen. Die Bewertungsmethoden wurden umfassend und gut nachvollziehbar beschrieben.

Schlussfolgerungen

Die gezogenen Schlussfolgerungen sind ausgewogen und plausibel. Die Auswirkungen der verschiedenen Szenarien-Rechnungen und Sensitivitätsanalysen werden ausführlich diskutiert.

Das Fazit dass Kaskadennutzungen anstrebenswert sind, bei denen das Material so lange wie sinnvoll möglich werkstofflich genutzt wird (Recycling) und danach das recycelte Material energetisch oder rohstofflich genutzt wird, wird durch die Bilanzen und Ergebnisdarstellungen gut verständlich hergeleitet.

Es ist positiv zu bemerken, dass die Autoren die komplexe Abhängigkeit der Ergebnisse von einzelnen Rahmenbedingungen, wie Art und Beschaffenheit der eingesetzten Kunststoffe, Energieeffizienz der bilanzierten KVA etc. klar herausstellen und somit die z.T. konträren Ergebnisse klar zuordnen. Daraus werden plausible Empfehlungen für die beteiligten Akteure abgeleitet. Damit wird ein wesentliches Ziel einer Ökobilanz, Schwachstellen zu eruieren und Optimierungen aufzuzeigen, erfüllt. Die umfassende Darstellung von Optimierungspotenzialen greift dann auch diesen besonders wichtigen Aspekt von Ökobilanzen adäquat auf und erleichtert die Umsetzung von Systemverbesserungen.

Berichterstattung

Der Bericht entspricht den Anforderungen der Norm, ist transparent und nachvollziehbar. Damit sind die wichtigsten Forderungen an die Berichtsfassung erfüllt. Die Ökobilanz ist trotz der Komplexität des Themas verständlich und lesbar geschrieben. Die Ergebnisse werden in zahlreichen Darstellungen beleuchtet. Dies stellt an den Leser gewisse Anforderungen, ist für die Transparenz aber sehr wichtig und hilfreich.

4 Zusammenfassende Beurteilung

Der vorliegende Bericht ist eine umfassende und transparente Arbeit zum Thema PE-Folienrecycling in der Schweiz. Die vorliegende Studie stellt umfassend das aktuelle Wissen über die Umweltauswirkungen der untersuchten Systeme dar.

Alle relevanten Anforderungen der Norm werden erfüllt. Gemäß den durchgeführten Prüfungen der Rahmenbedingungen und Stichproben bezüglich Relevanz und Plausibilität bestätigen die Ergebnisse im Rahmen der genannten Unsicherheiten und der aufgeführten Einschränkungen.



Günter Dehoust

Anhang 1 Ergänzende Auswertungen und Diskussionen

Wirkbilanz

In Abb. 37 sind die verschiedenen Umweltauswirkungen der Verwertungen des Basisszenarios dargestellt. Während die Indikatoren KEA, GWP, Versauerung, Überdüngung und Sommersmog im Wesentlichen vergleichbare Resultate zeigen, ergeben die Indikatoren Humantoxizität nach CML (HTP 100a) und Ökosystemqualität nach der Methode Impact 2002+ unterschiedliche Resultate. Letztere führen zum Schluss, dass eine hohe Umweltentlastung durch die Verbrennung in der KVA oder dem Zementwerk sowie einer Verölung erreicht werden kann, während die werkstoffliche Verwertung (Recycling) eine hohe Umweltauswirkungen bezüglich dieser Indikatoren hat.

Um die Ursachen dieser Resultate zu untersuchen, wurden in den folgenden Abbildungen am Beispiel der Verölung die Auswirkungen der vorgelagerten Stufen gemessen mit den Indikatoren HTP 100a (Abb. 38) und Ökosystemqualität (Abb. 39) dargestellt. Zum Vergleich wurden ebenfalls die Auswirkungen der vorgelagerten Stufen bezüglich GWP (Abb. 41) und der gesamten Umweltauswirkungen gemessen in UBP 2006 (Abb. 40) untersucht.

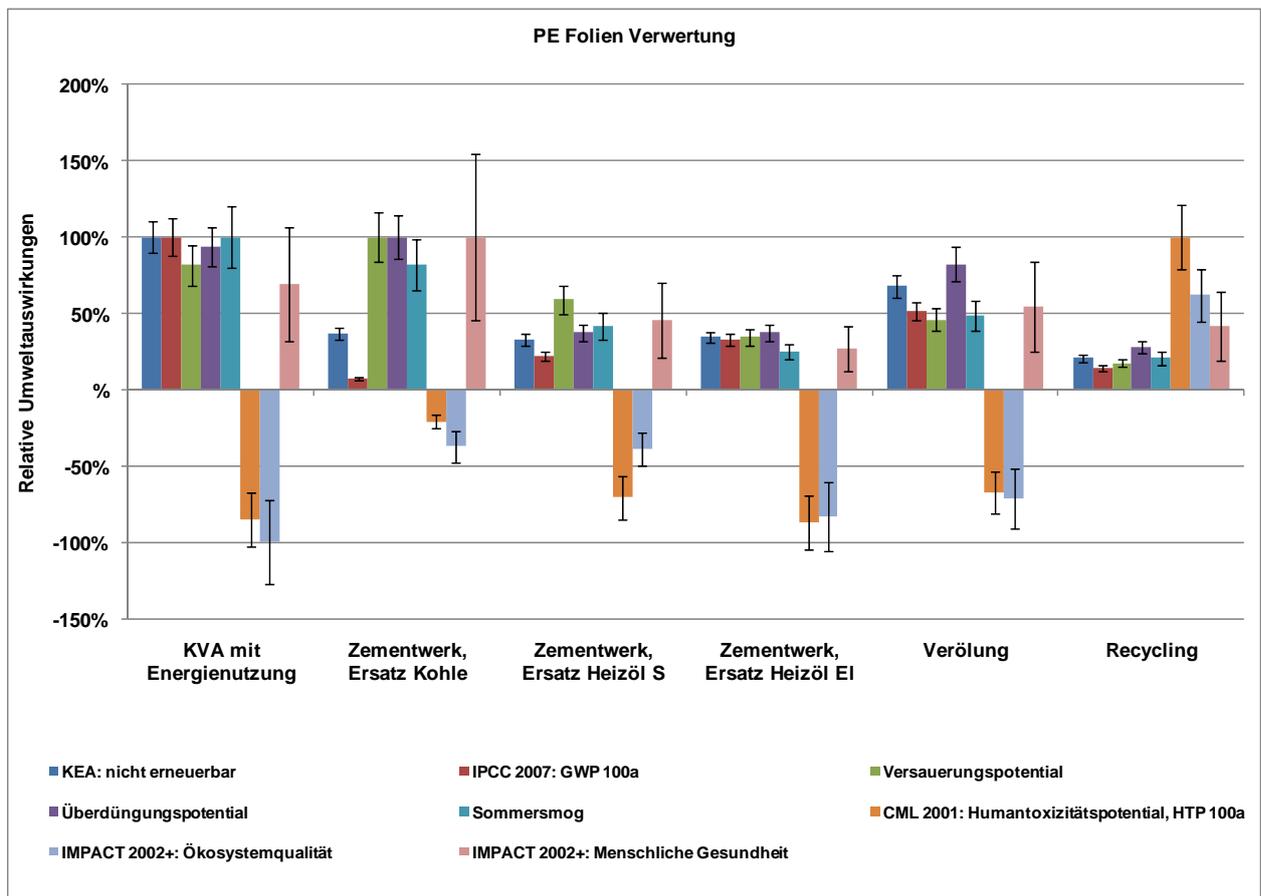


Abb. 37 Relative Umweltauswirkungen der verschiedenen Verwertungen im Basisszenario: Die höchste Auswirkung wurde jeweils auf 100% normiert.

zu zeigen z.B. die Indikatoren GWP (Abb. 41) und UBP (Abb. 40) eine wesentlich höhere Umweltauswirkungen durch die Herstellung von PE als durch die Bereitstellung von Heizöl. Auf Grund der Tatsache, dass PE aus Erdöl und Erdgas hergestellt wird, erscheint das Resultat der toxischen Indikatoren HTP und Ökosystemqualität als fragwürdig, da bei diesen Indikatoren selbst das Rohöl eine höhere Auswirkung aufweist als die gesamte PE-Herstellung inkl. Rohölbereitstellung. Im Folgenden wird diesem nachgegangen.

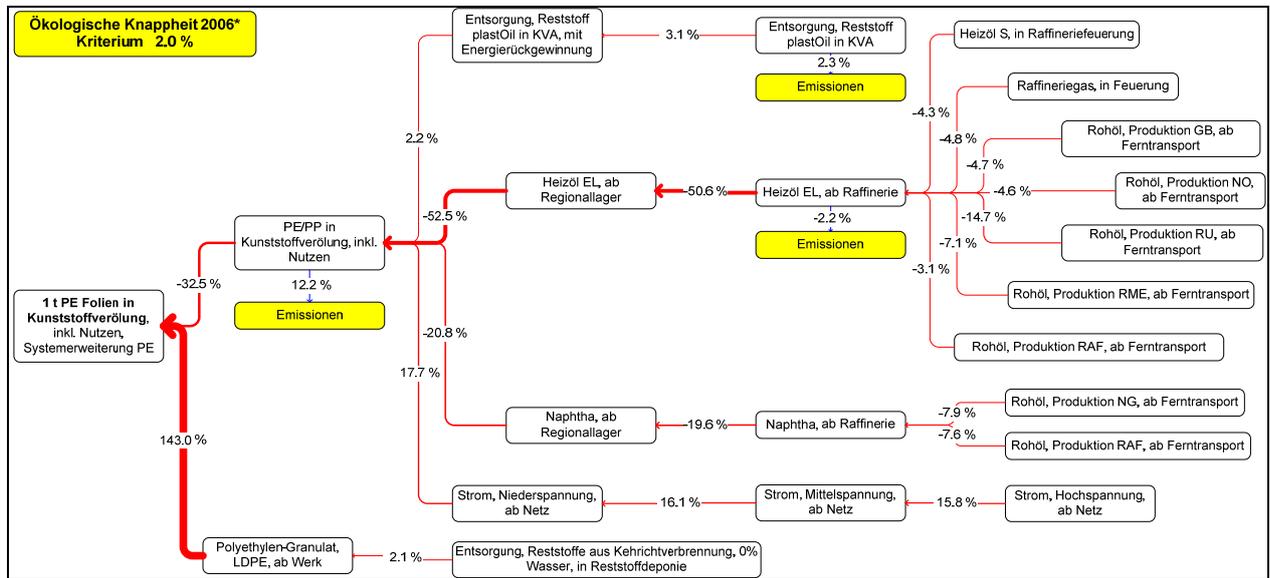


Abb. 40 Anteile der vorgelagerten Prozesse an den Umweltauswirkungen der Verölung. Dargestellt als Prozent der gesamten Umweltauswirkungen gemessen in UBP 2006. Dargestellt wurden nur diejenigen Prozesse, welche mindestens einen Anteil an der gesamten Auswirkung von 3% haben.

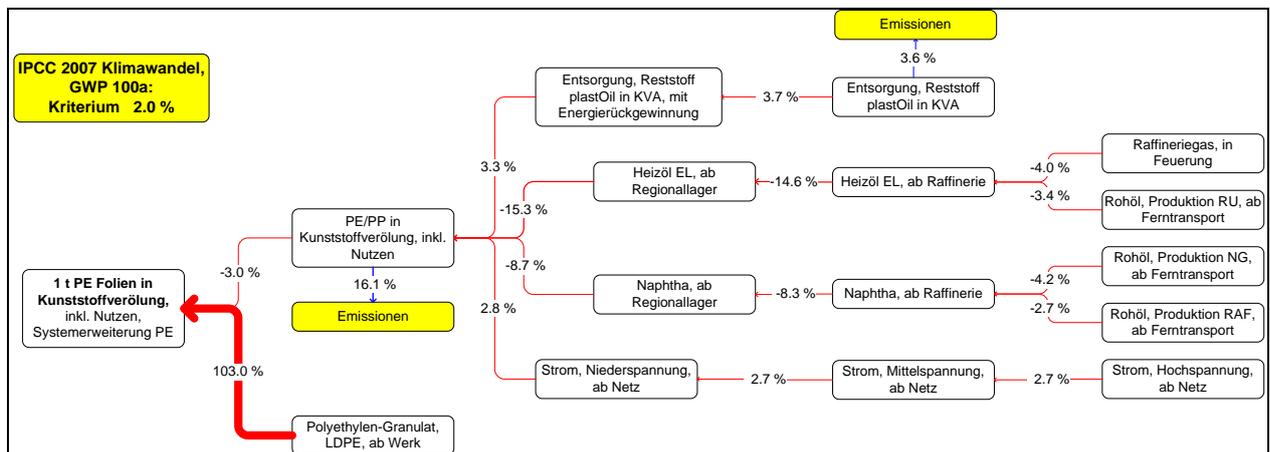


Abb. 41 Anteile der vorgelagerten Prozesse an den klimarelevanten Emissionen der Verölung. Dargestellt als Prozent der gesamten klimarelevanten Emissionen. Dargestellt wurden nur diejenigen Prozesse, welche mindestens einen Anteil an der gesamten Auswirkung von 3% haben.

Abb. 42 zeigt am Beispiel der Verölung die relevanten Einflussgrößen, welche zum Resultat der drei Indikatoren HTP, Menschliche Gesundheit und Ökosystemqualität führen. Beim Indikator HTP sind es vor allem die drei Stoffe Zink, PAH und Nickel, welche das Resultat am meisten beeinflussen. Beim Indikator Ökosystemqualität sind es im wesentlichen Aluminium und Zink, welche zu diesem Resultat führen.

Dies würde heissen, dass bei der Bereitstellung von Rohöl wesentlich geringere Mengen dieser Substanzen emittiert werden, als bei der gesamten Produktionskette von PE, obwohl diese die Förderung von Rohöl umfasst.

Der Grund für diese Inkonsistenz liegt darin, dass die Datensätze von PE und der Bereitstellung der fossilen Energieträger, im Falle dieser Studie im Wesentlichen Öl und Kohle, aus unterschiedlichen Quellen stammen, obwohl beide in der Datenbank ecoinvent enthalten sind. Der Datensatz für PE stammt von Plastics Europe [21] und die Datensätze für die Bereitstellung der fossilen Energieträger wurden im Auftrag von ecoinvent erstellt [15] und [20].

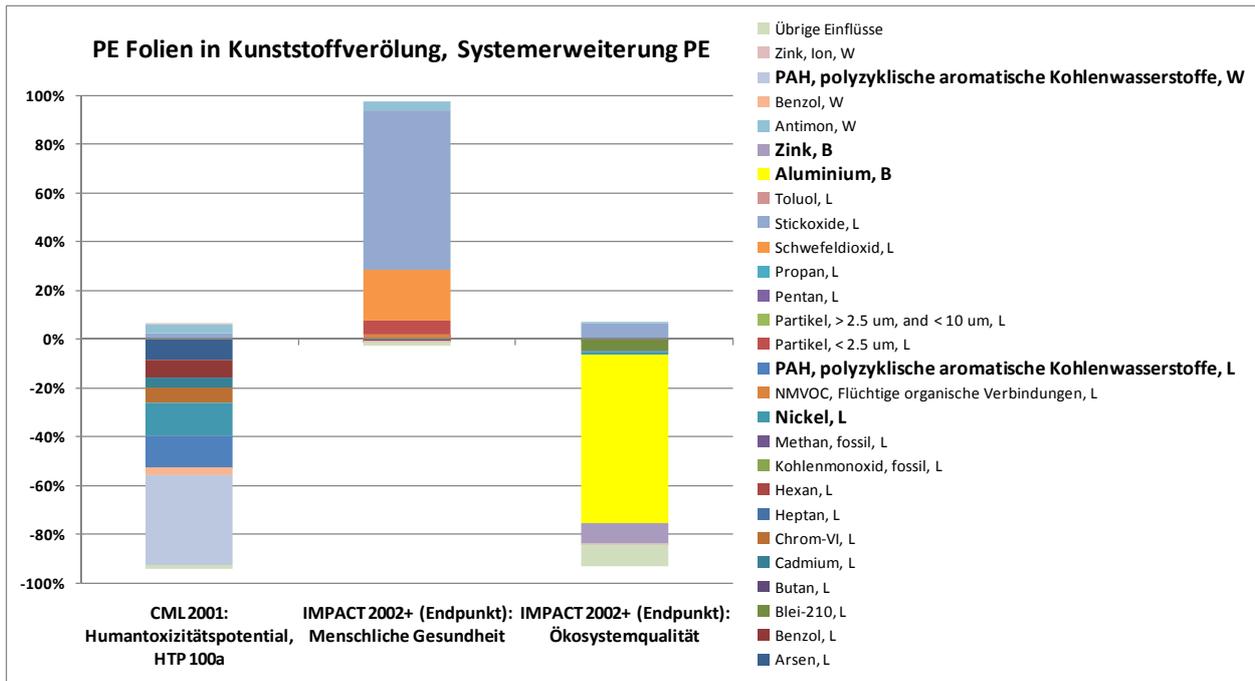


Abb. 42 Darstellung der relevanten Einflussgrössen bei den drei ausgewählten Toxizitätsindikatoren. Der letzte Buchstabe steht für das Kompartiment: L: Luft, W: Wasser, B: Boden

In Tabelle 9 sind diejenigen Emissionen zusammengestellt, welche in Abb. 42 als relevant eruiert wurden. Dabei wurde auch die Herkunft der verschiedenen Rohöle unterschieden. Die angegebenen Emissionen beziehen sich auf 1kg LDPE. Bei den Ölen beziehen sie sich auf 0.91 kg. Dies ist die Menge, welche gemäss dem Datensatz von Plastics Europe benötigt wird, um 1 kg LDPE herzustellen. Zudem wird noch Erdgas benötigt, diese zusätzlichen Emissionen sind nicht dargestellt. Diese Tabelle zeigt, dass grosse Unterschiede zwischen den verschiedenen Regionen bestehen. Weiter ist ersichtlich, dass die für die gesamte Produktion von LDPE inklusive vorgelagerte Stufen ausgewiesenen Emissionen wesentlich geringer sind als diejenigen der Rohölbereitstellung, obwohl diese nur einen Teil der gesamten Kette darstellen. Zu beachten ist, dass die Emissionen dieser Stoffe mit grossen Unsicherheiten behaftet sind. Die Gründe dafür sind u.a., dass sie nur in geringen Mengen auftreten, schwierig zu messen sind und teilweise keine Messdaten vorliegen. So weist zum Beispiel Plastics Europe für die Prozesse Rohöl und Naphta keine direkten Emissionen für Aluminium und Zink in den Boden aus oder Benzol wird nicht als Einzelstoff sondern nur in der Summenkategorie aromatische Kohlenwasserstoffe ausgewiesen.

Tabelle 9 Ausgewählte Emissionen bei der Bereitstellung von Heizöl und Rohöl aus verschiedenen Regionen: Afrika (RAF), Mittlerer Osten (RME), Niederlande (NL) und Norwegen (NO) sowie der Herstellung von Polyethylen (LDPE). Quellen: [15], [20] und [22]. Die Angaben beziehen sich bei

LDPE auf 1kg und bei den Ölen auf diejenige Menge (0.91 kg) welche für die Produktion von 1kg LDPE ausgewiesen wird.

	Einheit	Heizöl S	Heizöl EL	Rohöl, RAF	Rohöl, RME	Rohöl, NL	Rohöl, NO	LDPE
Arsen (Luft)	mg	0.0201	0.0327	0.0193	0.0124	0.0019	0.0015	0.0007
Benzol (Luft)	mg	6.3168	6.6689	0.8918	0.9646	0.5106	0.5127	0.0154
Blei-210 (Luft)	mBq	6.8515	10.4035	7.8206	4.7552	0.8037	0.4786	0.1900
Nickel (Luft)	mg	0.3396	0.5610	0.2753	0.3817	0.0336	0.0324	0.0023
PAH (Luft)	mg	0.0202	0.0349	0.0164	0.0293	0.0054	0.0043	0.0004
Aluminium (Boden)	mg	9.5165	23.9144	10.0892	4.3678	2.1893	0.1343	0.0284
Zink (Boden)	mg	0.1479	0.5291	0.1558	0.0697	0.0343	0.0026	0.0018
PAH (Wasser)	mg	0.1996	0.3257	0.1894	0.1915	0.0014	0.2563	0.0004

Diese Nachforschungen führen zu den folgenden Schlussfolgerungen:

- Die beiden Indikatoren Humantoxizitätspotential HTP 100a und Ökosystemqualität Impact 2002+ sind für diese Studie auf Grund der unterschiedlichen Datengrundlagen ungeeignet. Sie werden für die Diskussion der Resultate nicht beigezogen.
- Andere Indikatoren, bei denen diese Emissionen nicht bewertet werden, wie z.B. GWP, Säurebildung, KEA oder Überdüngung, sind von diesem Problem nicht betroffen und werden für die Interpretation der Resultate verwendet, auch wenn sie nur im Anhang ausgewiesen werden.
- Indikatoren bei denen diese Stoffe zwar bewertet werden, deren Beitrag jedoch nicht so relevant ist, wie z.B. UBP 2006 oder ReCiPe, können mit der notwendigen Sorgfalt verwendet werden. Dabei ist zu beachten, dass die Verwertungsarten, welche zu einer Gutschrift führen, KVA, Zementwerk und Verölung, auf Grund dieses Problems tendenziell zu gut bewertet werden im Vergleich zum Recycling.
- Allgemein ist es notwendig, die Resultate gut zu hinterfragen, falls die Daten aus unterschiedlichen Quellen stammen.

Da es keine anderen Daten mit vergleichbarer Qualität für die Herstellung von Kunststoffen, als diejenigen von Plastics Europe, gibt, müssen diese verwendet werden. Leider sind die Daten von Plastics Europe zu wenig transparent, so dass das erkannte Problem nicht behoben werden konnte.

Korrekturen Ecoinvent Daten und UBP

Eine Analyse der Resultate hat gezeigt, dass die folgenden beiden relevanten Anpassungen an den verwendeten Daten bzw. Bewertungsmodellen vorgenommen werden mussten:

- Ecoinvent Datensatz: „Prozessspezifisches Kehrlichtverbrennung“
- Bewertungsmethode UBP 2006: Gewichtungsfaktor für „TOC in Grundwasser Langzeit“

Ecoinvent Datensatz: „Prozessspezifisches Kehrlichtverbrennung“

Der ecoinvent Datensatz „Prozessspezifisches Kehrlichtverbrennung“ weist eine Dioxin-Emission von 0.0075 µg / kg Abfall auf. Um den heutigen LRV Grenzwert von 0.1ng/Nm³ einzuhalten, darf die Emission jedoch maximal 0.0006 µg / kg Abfall betragen. Da die heutigen KVAs diese Grenzwerte einhalten, wurde der Wert entsprechend angepasst. Dies hat nur bei der Bewertungsmethode UBP 2006 einen we-

sentlichen Einfluss. Die Auswirkungen dieser Änderungen sind in Abb. 43 dargestellt. Diese Änderung wurde mit dem Autor des betreffenden ecoinvent Datensatzes besprochen und wird in der nächsten Version von ecoinvent angepasst werden.

Bewertungsmethode UBP 2006: Gewichtungsfaktor für „TOC in Grundwasser Langzeit“

In dieser Methode wird TOC in Grundwasser Langzeit bewertet. Diese Bewertung erfolgt nicht aufgrund der Tatsache, dass TOC im Grundwasser einen ökologischen Schaden verursacht, sondern mit dem Ziel den C-Fluss aus Deponien zu bewerten. *„In der Schweiz dürfen gemäss Umweltschutzgesetz keine Abfälle in Deponien abgelagert werden, die dort zu langfristigen Problemen führen können. Als Indikator für das „Reaktionspotential“ eines Abfalls dient der darin enthaltene Kohlenstoff (C). Ziel ist, den C-Fluss auf Deponien zu minimieren.“* Siehe [9] Seite 154. Daraus wird ein Ökofaktor für den C-Fluss ermittelt. Als Hilfsgrösse für diesen C-Fluss wird der Parameter TOC verwendet. *„Die Anwendung dieses Ökofaktors ist in der ecoinvent Datenbank nicht direkt möglich, da der C-Gehalt der deponierten Abfälle nicht ausgewiesen wird. Stattdessen werden die TOC-Langzeitemissionen als Hilfsgrösse verwendet. Diese stammen in der ecoinvent Datenbank einzig aus Reaktor- und Reststoffdeponien. Der Transferkoeffizient der Reaktordeponien für Kohlenstoff im Abfall zu Kohlenstoff als Langzeit-TOC beträgt 0.244. Damit lässt sich der in der ecoinvent Datenbank anzuwendende Ökofaktor berechnen. Dieser beläuft sich auf 63 UBP/g TOC.“* Siehe [9] Seite 155.

Wie aus Abb. 43 ersichtlich ist, hat dieser Faktor einen nicht vernachlässigbaren Einfluss auf die Bewertung des Prozesses „PE in KVA“, Beitrag rund 25%.

Wir erachten diese Bewertung aus den folgenden Gründen als zu hoch:

- TOC im Grundwasser führt zu keinem ökologischen Schaden, falls die Verbindung nicht toxisch ist.
- Dem berechtigten Anliegen der schweizerischen Abfallwirtschaft, keine organischen Substanzen zu deponieren, wird Genüge getan, indem PE in einer KVA verbrannt wird. Eine zusätzliche Belastung durch das TOC der Schlacke erscheint uns nicht gerechtfertigt. Vor allem dann, wenn diese Gewichtung so relevant ist.

Aus diesen Gründen haben wir die Methode angepasst, indem wir den Gewichtungsfaktor für „TOC in Grundwasser Langzeit“ Null gesetzt haben. Um diese Änderung kenntlich zu machen, haben wir die Methode mit UBP 2006* bezeichnet. Dieses Problem wurde dem BAFU für die Überarbeitung der Methode gemeldet.

Diese Änderung hat in dieser Studie nur beim Prozess der Verbrennung von PE in der KA einen wesentlichen Einfluss.

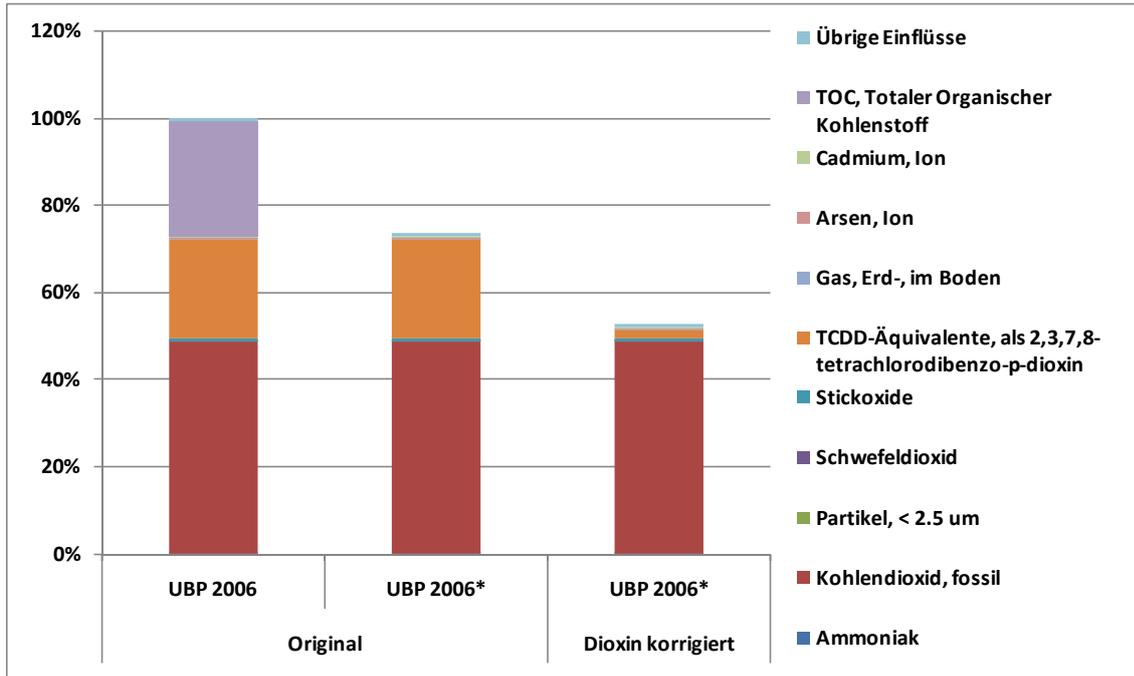


Abb. 43 Darstellung der relevanten Einflussgrößen des Prozesses PE in KVA bewertet mit der Methode der ökologischen Knappheit UBP 2006, UBP 2006* ist ohne Bewertung der langzeit TOC Emissionen im Grundwasser.

Daten für Polyethylen (PE)

Die Daten für Polyethylen in ecoinvent basieren auf den Angaben von Plastics Europe (APME) [21]. Sie wurden im Jahre 2005 publiziert und basieren auf einer Datenerhebung bei rund 30 Produzenten aus dem Jahre 1999. Diese Daten sind im Vergleich zu anderen ecoinvent Daten relativ alt. Leider ist die Transparenz bei diesen Daten nicht gegeben. In diesen Datensätzen werden nur die Summen der Emissionen und der verwendeten Ressourcen angegeben, so dass die Herkunft der entsprechenden Emissionen und Ressourcen nicht nachvollzogen werden kann. Um die Kompatibilität der Daten mit den anderen ecoinvent Daten zu prüfen, wurde folgendermassen vorgegangen:

- Es wurde ein Prozess erstellt, welcher als fossile Energieträger (Erdöl, Erdgas und Kohle) ecoinvent-Prozesse verwendet, wobei darauf geachtet wurde, dass dieselben Mengen an fossilen Primärenergieträgern benötigt werden, welche im Prozess von Plastics Europe ausgewiesen werden.
- Zudem wurden die wesentlichen Verbrennungsemissionen (CO₂, CO, Partikel und NO_x) derjenigen Energieträger, welche nicht als Feedstock im Kunststoff verbleiben, berücksichtigt.
- Die prozessspezifischen Emissionen (nur NMVOC und Methan) wurden aus dem Prozess der Plastics Europe übernommen. Dabei wurde nur die Differenz zu den bereits berücksichtigten Emissionen der Bereitstellung der Energieträger berücksichtigt.

Diese Analyse wurde nur für einen Typ Polyethylen durchgeführt. Da die Umweltauswirkungen der drei Typen LDPE, LLDPE und HDPE relativ nahe beieinanderliegen und bei den meisten Umweltauswirkungen diejenigen von HDPE zwischen denjenigen von LDPE und LLDPE liegen, wurde für diese Betrachtung HDPE verwendet, als Annäherung an die beiden Polyethylene, welche für Folien eingesetzt werden. Für die Berechnungen der Folien im Bericht wurde natürlich LDPE verwendet, da HDPE nicht für Folien sondern z.B. für Flaschen zum Einsatz kommt.

Diese Abschätzung stellt eine untere Grenze der Belastungen dar, da nur die relevantesten Prozesse berücksichtigt wurden. Wie Abb. 44 zeigt, liegen die Umweltauswirkungen dieser Abschätzung gemessen mit der Methode UBP 2006* jedoch rund 15% höher als diejenigen des Prozesses von Plastics Europe.

Der Grund liegt vor allem darin, dass in den neueren ecoinvent Prozessen mehr Schadstoffe berücksichtigt werden.

Auf Grund der mangelnden Transparenz der APME Daten war es nicht möglich einen besseren Prozess zu generieren. Daher wurde der Originalprozess verwendet. Damit werden die Verwertungswege, welche zu energetischen Produkten führen, KVA, Zementwerk und Verölung, im Vergleich zum werkstofflichen Recycling tendenziell zu gut bewertet.

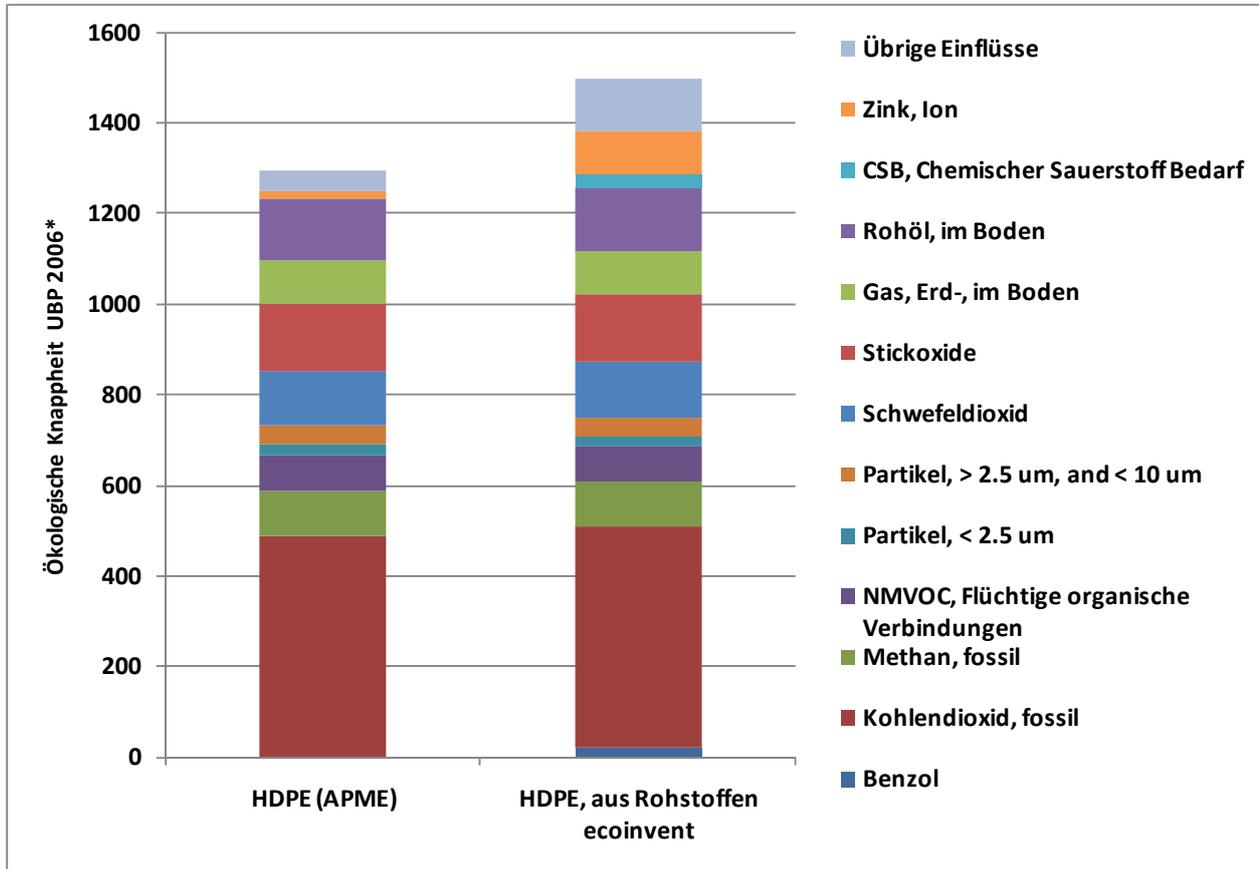


Abb. 44 Darstellung der relevanten Einflussgrößen der Prozesse HDPE Herstellung mit der Methode der ökologischen Knappheit UBP 2006*.