

Die Zukunft des Getränkekarton-Recyclings

Analyse mittels Ökobilanz und Fuzzy Set Theorie

Auftraggeber

Verein Getränkekarton-Recycling Schweiz

Verfasser

Dr. Fredy Dinkel, Thomas Kägi

Carbotech AG

f.dinkel@carbotech.ch

Hinweis



Bei diesem Folien-Set handelt es sich um einen Auszug aus dem Gesamtbericht «die Zukunft des Getränkekarton-Recyclings». Dieses Folien-Set wurden 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 Bewertungsmethoden, auf welchen dieses Folie-Set basiert, können ändern. Danach sind die Schlussfolgerungen nicht mehr uneingeschränkt gültig und vom Auftraggeber nur noch auf eigene Verantwortung verwendbar. Aus dem Inhalt dieses Folien-Sets hervorgehende Veröffentlichungen, welche Resultate und Schlussfolgerungen daraus nur teilweise und nicht im Sinne der Gesamtaussage darstellen, sind nicht erlaubt. Insbesondere dürfen solche Veröffentlichungen dieses Folien-Set nicht als Quelle angeben oder es darf nicht anderweitig eine Verbindung mit diesem Folien-Set oder der Carbotech AG hergestellt werden können. Für Forderungen ausserhalb des oben genannten Rahmens lehnen wir jegliche Verantwortung gegenüber dem Auftraggeber sowie Dritten ab. Dieses Folien-Set ist ausschliesslich für den Auftraggeber erstellt worden und wir übernehmen keine Verantwortung gegenüber Dritten, welche Kenntnis erlangen über dieses Folien-Set oder Teile davon.

- Auftrag und Ziel
- Teil Ökobilanz
 - Rahmenbedingungen & Grundlagen
 - Methodik
 - Resultate & Erkenntnisse
- Teil Fuzzy Set Theorie: Gesamtnutzen
 - Grundlagen
 - Methodik
 - Resultate & Erkenntnisse

Auftrag und Ziel



- Aufzeigen, inwiefern sich aus ökologischer Sicht ein stoffliches Recycling von Getränkekartons im Vergleich mit der Entsorgung in einer KVA mit Energienutzung lohnt.
- Zusätzlich soll mittels der Fuzzy Set Methode der Gesamtnutzen der selektiven-separaten Sammlung (Getränkekarton und PE-Hohlkörper je separat gesammelt) und der gemeinsamen Sammlung (Getränkekarton und PE-Hohlkörper gemeinsam gesammelt) betrachtet werden.

Teil Ökobilanz



Ökobilanz - Rahmenbedingungen

Systemgrenze und funktionelle Einheit



Technische Systemgrenze:

Berücksichtigt wurden alle Prozesse ab dem Zeitpunkt, ab dem die Getränkekartons als „Abfall“ anfallen, inkl. Sammeltransporte, Aufbereitung oder Verwertung sowie Gutschriften für Einsparungen von Primärmaterial und Energie. Ebenfalls berücksichtigt wurde die Herstellung der Getränkekartons, um den relativen Umweltnutzen des Recyclings in einem sinnvollen Kontext darzustellen.

Räumliche Systemgrenze:

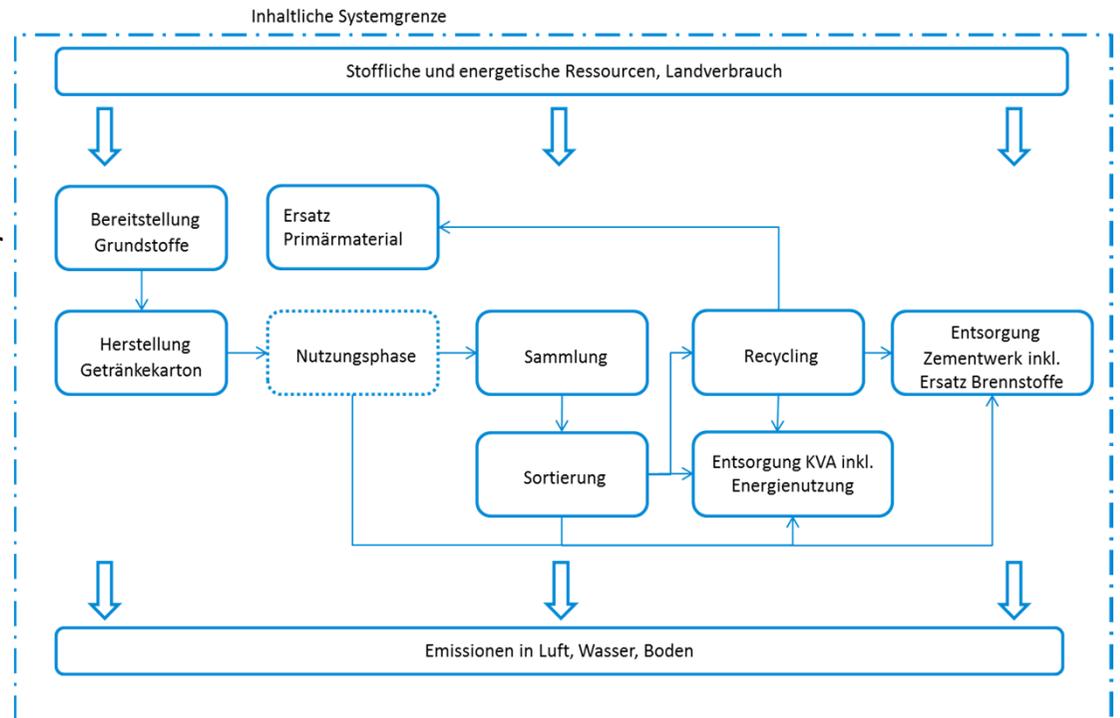
Es wurde die Situation in der Schweiz betrachtet.

Zeitliche Systemgrenze:

Es wurde das Jahr 2014 betrachtet.

Funktionelle Einheit:

1000 kg Getränkekartons mit durchschnittlicher Zusammensetzung.



Ökobilanz - Rahmenbedingungen

Unterschiede zur Studie aus dem Jahr 2009



Avoided Burden statt Basket of Benefit

In der damaligen Studie wurden die Systeme jeweils ergänzt mit der entsprechenden Menge Sekundärmaterial oder der entsprechenden Menge Primärmaterialien, welche hergestellt werden müssen („Basket of Benefit“), damit alle Varianten denselben Nutzen aufweisen und überhaupt vergleichbar sind.

In diesem Update wird das Avoided Burden Prinzip verwendet und ausgehend von der Getränkekartonherstellung die Verwertungsemissionen einerseits und die Gutschriften für Material- und Energieersatz andererseits dargestellt.

Beide Ansätze führen zum genau gleichen Ergebnis. Die Darstellung mit dem Avoided Burden Prinzip führt jedoch zu nachvollziehbareren und verständlicheren Abbildungen.

Bewertung der Waldnutzungssysteme

Zum Zeitpunkt der damaligen Studie gab es keine Bewertung, welche die Auswirkung der Waldnutzungssysteme (naturnah, FSC, Plantagen etc.) angemessen berücksichtigte. Daher wurde damals ein Konzept angewendet, in dem angenommen wurde, dass das durch Recycling eingesparte Holz einer energetischen Verwertung zugeführt werden kann und dadurch fossile Energieträger eingespart werden können.

Mittlerweile ist es mit der Methode der ökologischen Knappheit 2013, welche wir um diese Waldnutzungsbewertung ergänzt haben, möglich, die verschiedenen Waldnutzungssysteme und deren Auswirkungen zu berücksichtigen (siehe auch Kägi & Dinkel 2014: Kurzbericht – Einfluss der Waldbewertung auf den Umweltfussabdruck von Getränkekartons, zuhanden von Tetra Pak (Schweiz) AG. Daher braucht es das Konzept, welches damals eine sinnvolle Ergänzung war, jedoch nicht der Realität entspricht, nicht mehr.

Das hat den Vorteil,

- dass die Herstellung von Frischfasern, welche dank dem Recycling von Kartonfasern substituiert werden, inklusive der entsprechenden Waldnutzung adäquat berücksichtigt werden kann.
- dass indirekt der Nutzen der Verwendung von FSC-Holz bei der Getränkekartonherstellung berücksichtigt wird (Ohne FSC würde die Herstellung eine höhere Grundbelastung und die Recyclingvarianten kleinere relative Einsparungen aufweisen).

Bewertungsmethoden

In der damaligen Studie wurde neben der Methode der ökologischen Knappheit 2006 noch die Methode Eco-Indicator 99 betrachtet.

Neu verwenden wir die Methode der ökologischen Knappheit 2013 sowie die ILCD v1.06 Methode. Diese hat sich mittlerweile in Europa etabliert. Sie basiert auf den neuesten Erkenntnissen zu den einzelnen Umweltwirkungen, Normalisierungen und Gewichtung und wird von der Europäischen Kommission im Rahmen der PEF (Product Environmental Footprint)-Aktivitäten laufend weiterentwickelt.

Energetische Gutschriften - Grenzenienergemix

In der damaligen Studie wurde als Basis für die Nebenprodukte Strom und Wärme der jeweilige Schweizer Mix gutgeschrieben sowie beim Zementwerk mit Kohleersatz gerechnet.

Aufgrund von neueren Erkenntnissen und Entwicklungen wird als Basis der Grenzstrommix sowie der Grenzwärmemix gutgeschrieben sowie beim Zementwerk mit Ölersatz gerechnet. Damit wird die Realität besser abgebildet.

Ökobilanz

Grundlagen



Grundlagen der wichtigsten Kennzahlen

- Die Getränkekartonzusammensetzung entspricht dem aktuellen durchschnittlichen Getränkekarton in der Schweiz.
- Daten zum Sammeltransport wurden aus aktuellen Daten zur PET-Sammellogistik extrahiert (2014).
- Daten zum Sortieren und Kartonrecycling wurden neu erhoben (2014/2015).
- Daten zur Netto Energieeffizienz der KVAs gelten für das Jahr 2014 (Daten für 2015 sind noch nicht publiziert).
- Aufgrund der Entwicklung der Brennstoffanteile in den Schweizer Zementwerken über die letzten 17 Jahre wurde als Basisszenario der Ersatz von Schweröl (und nicht Kohle) festgelegt.

Berechnung der Gutschriften

Stoffliches Recycling

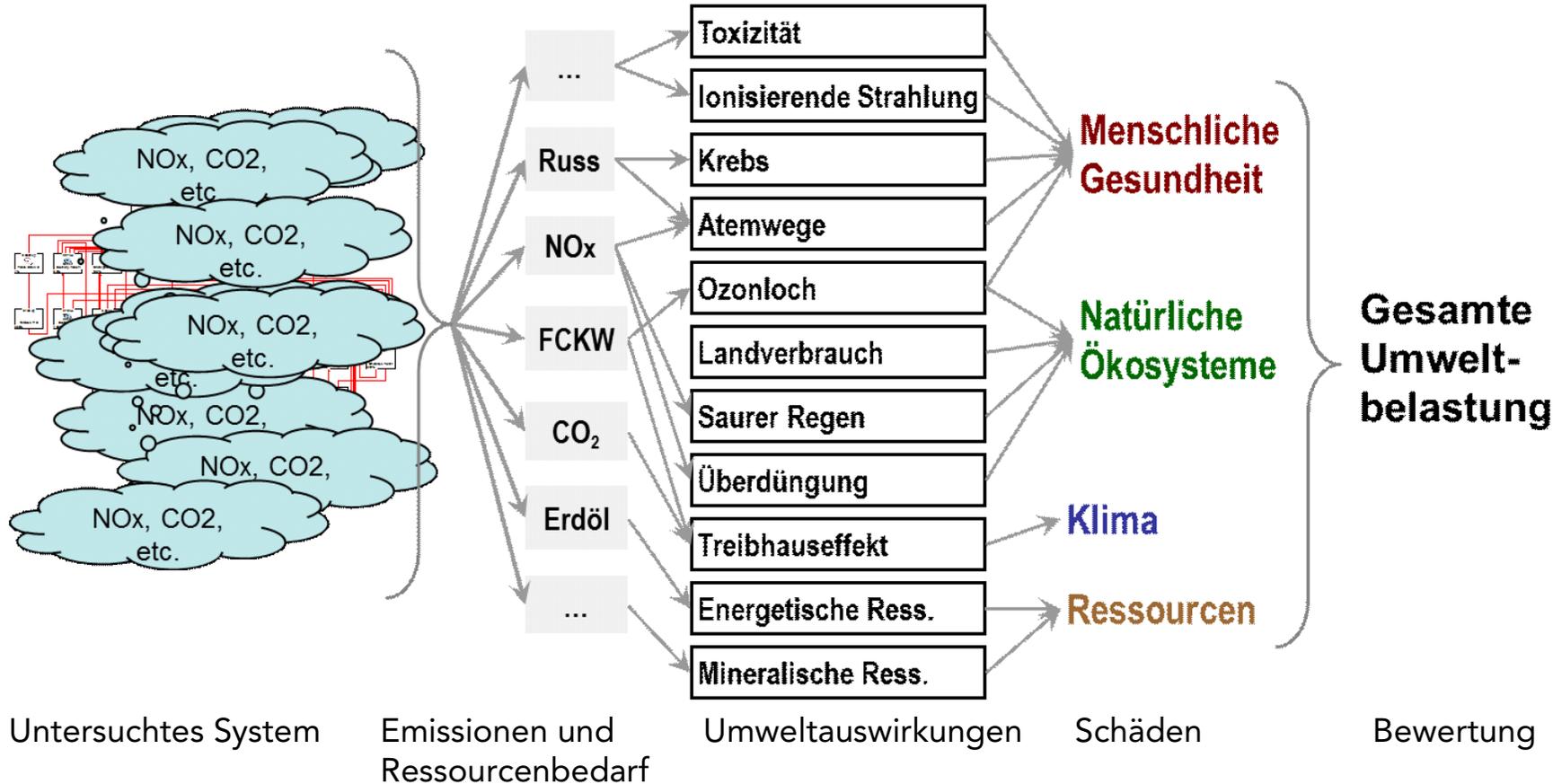
- Beim Recycling von Wertstoffen werden Primärrohstoffe ersetzt.
- Für den Ersatz von Primärrohstoffen wird eine Gutschrift gegeben.

Energetische Verwertung

- Bei der thermischen Verwertung wird Strom und/oder Wärme generiert, welche die entsprechende Menge anderweitig produzierter Strom und Wärme ersetzt.
- Dabei wird davon ausgegangen, dass der entsprechende Grenzstrom- respektive Grenzwärmemix ersetzt wird.
- Für den Ersatz der Grenzenergie wird eine Gutschrift gegeben.
- Als Grenzenergie wird diejenige Energie bezeichnet, die auf dem Markt ersetzt wird, wenn eine zusätzliche Einheit Energie dank der energetischen Verwertung von Getränkekarton produziert wird.

Methodik Ökobilanz

Schematische Darstellung



Methodik Ökobilanz

Bewertungsmethoden



Methode der ökologischen Knappheit 2013

Die Methode der ökologischen Knappheit (UBP 2013) ermöglicht im Rahmen einer Ökobilanzierung die Bewertung der Wirkung von Schadstoffemissionen und der Entnahme von Ressourcen auf die Umwelt (Wirkungsabschätzung). Der resultierende Umweltfussabdruck wird in Umweltbelastungspunkten (UBP) angegeben.

Diese Methode (BUWAL 1990, Überarbeitung 1997, 2006 und 2013) 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.

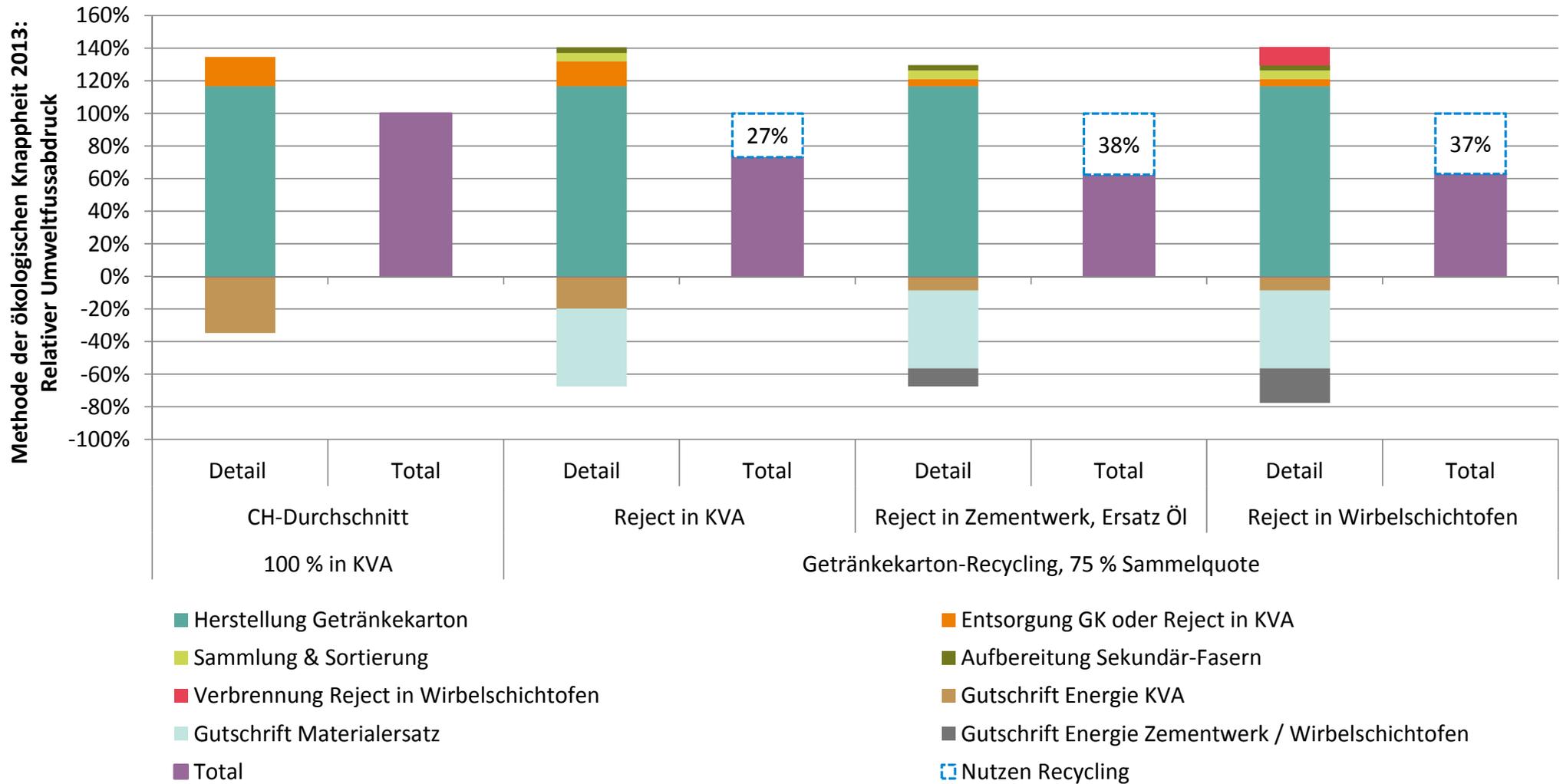
Methode ILCD v1.06

Das ILCD (International Reference Life Cycle Data System) Handbook (European Commission-Joint Research Centre 2011) basiert auf den ISO Standards 14'040/44 und liefert Empfehlung für Behörden und Unternehmen hinsichtlich Ökobilanzdaten, -methoden- und -bewertungen mit hoher Qualität und Konsistenz. Die Empfehlungen beinhalten eine Auswahl von 16 Wirkkategorien basierend auf aktuellsten neuesten Erkenntnissen. ILCD v1.06 beinhaltet auch einen Normalisierungs- (Joint research Center, European Commission 2014) und Gewichtungsschritt. Für die Gewichtung wurde der Vorschlag einer Studie des Joint Research Center der Europäischen Kommission verwendet (Huppes und van Oers 2011). Aufgrund ähnlicher Resultate wie mit der Methode der ökologischen Knappheit werden sie in dieser Präsentation nicht dargestellt.

Treibhauspotential, IPCC 2013 100a

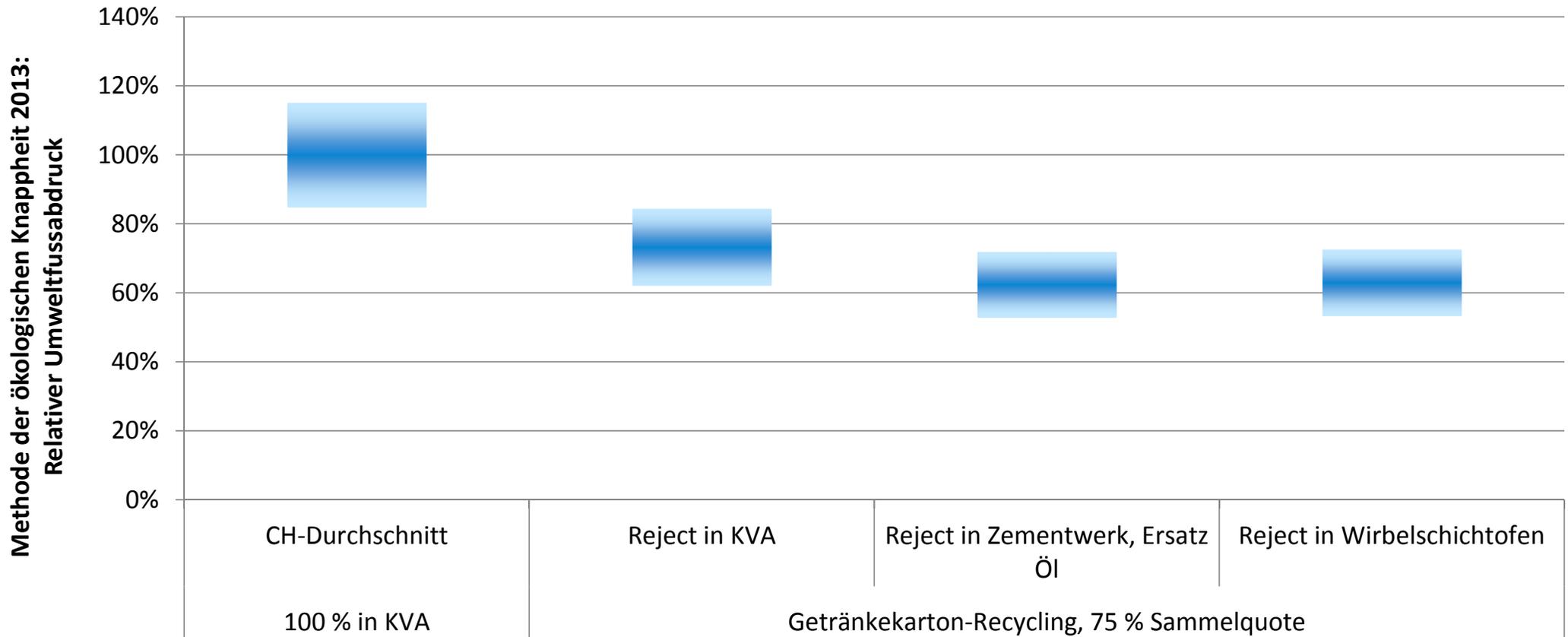
Auf Wunsch des Auftraggebers wurde neben der Gesamtbewertungsmethoden noch das Treibhauspotential betrachtet. Diese Methode betrachtet einzig die klimarelevanten Emissionen und macht keine Aussage über andere Umweltauswirkungen.

Resultate Ökobilanz - Hauptszenarien



Resultate Ökobilanz – Hauptszenarien

Recycling bringt bis 40 % Umweltnutzen



Resultate Ökobilanz - Hauptszenarien

Erkenntnisse

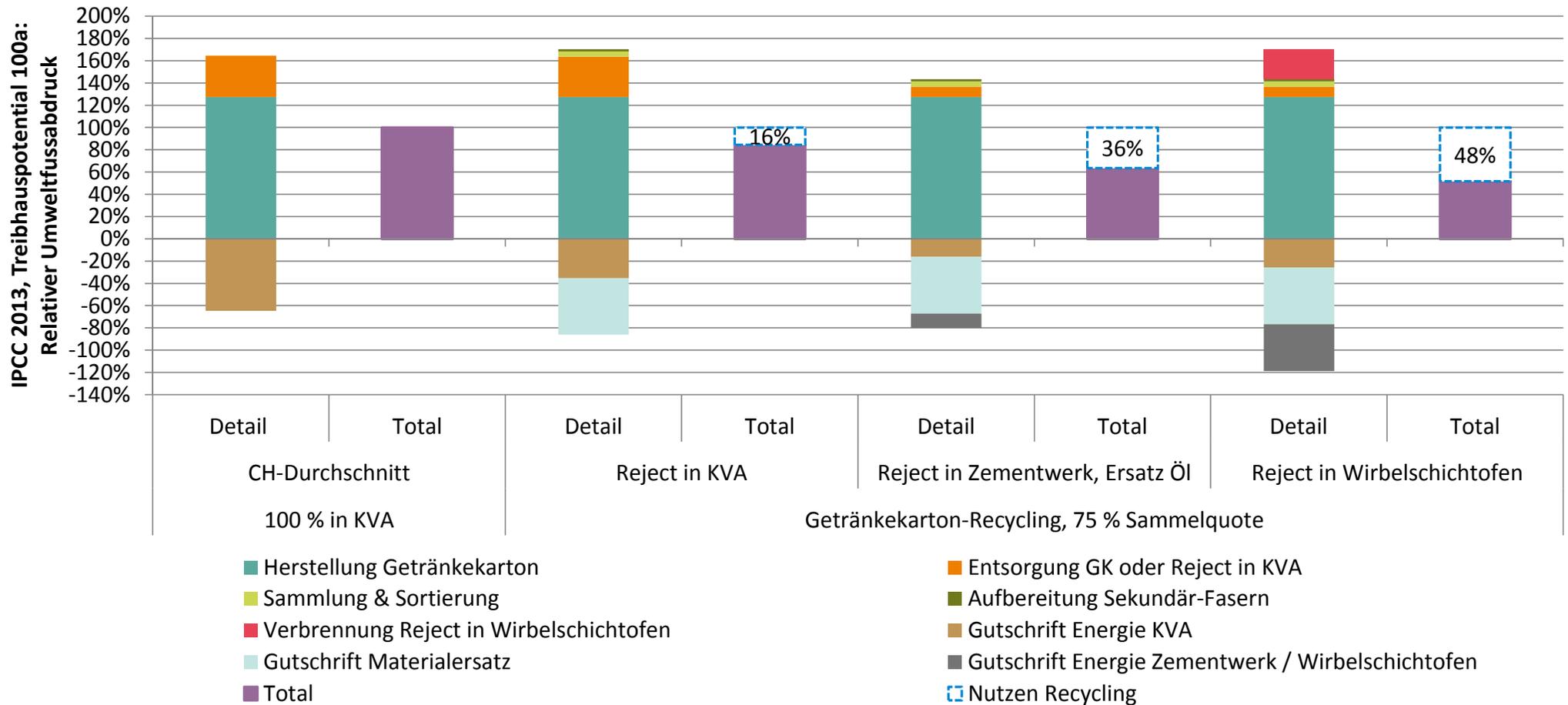


- Recycling von Getränkekarton lohnt sich aus ökologischer Sicht.
- Gegenüber der vollständigen Entsorgung in einer KVA beträgt die Reduktion der Umweltbelastung bei einer Sammelquote von 75 % zwischen 27 % für das Kartonrecycling mit Reject in KVA und rund 38 % für das Kartonrecycling mit Reject im Zementwerk.

Resultate Ökobilanz - Hauptszenarien



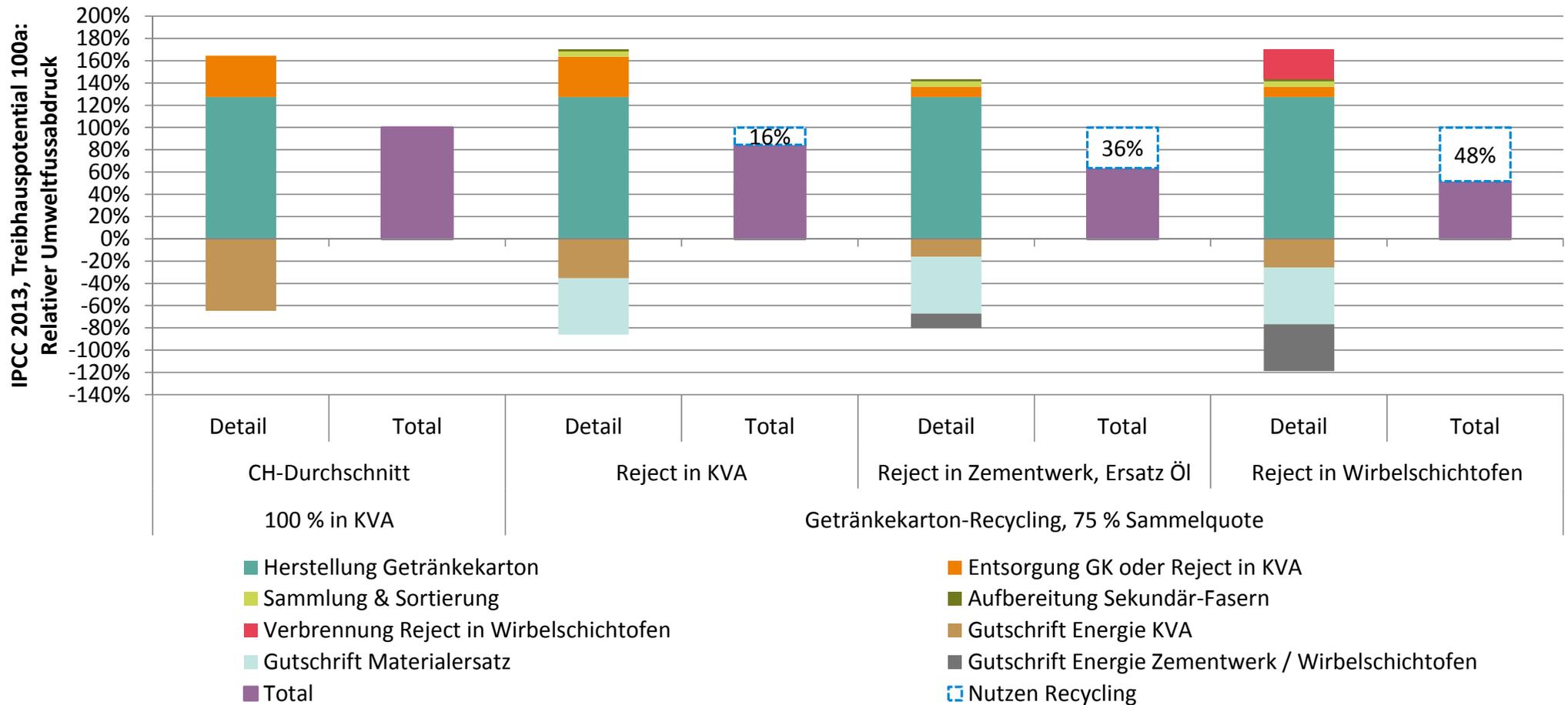
CO₂-Fussabdruck (IPCC 2013) – Ohne Konzept «energetische Verwertung eingesparter Ressourcen»



Resultate Ökobilanz - Hauptszenarien



CO₂-Fussabdruck (IPCC 2013) – Mit Konzept «energetische Verwertung eingesparter Ressourcen»



Resultate Ökobilanz – Hauptszenarien

CO₂-Fussabdruck (IPCC 2013)- Unterschiede



Unterschiede zur Methode der ökologischen Knappheit 2013

- Die Recyclingvarianten weisen beim CO₂-Fussabdruck keinen signifikanten Vorteil auf. Der Grund liegt darin, dass diese Methode die Bewertung der Waldnutzungssysteme nicht berücksichtigen kann und somit in einem wesentlichen Punkt «blind» ist.
- Erst wenn das damalige Konzept der zusätzlichen energetischen Verwertung von durch das Recycling eingespartem Holz angewandt wird, weisen die Recyclingvarianten einen entsprechenden Vorteil auf.
- Diese Systemerweiterung macht heutzutage jedoch insofern keinen Sinn, als dass sie nicht der Realität entspricht und mit anderen Methoden nicht notwendig ist.
- Daher erachten wir die Methode der ökologischen Knappheit 2013 als wesentlich sinnvoller für die Bewertung der Waldnutzung im Speziellen und für die Bewertung der Varianten im Allgemeinen.

Unterschiede zur damaligen Studie

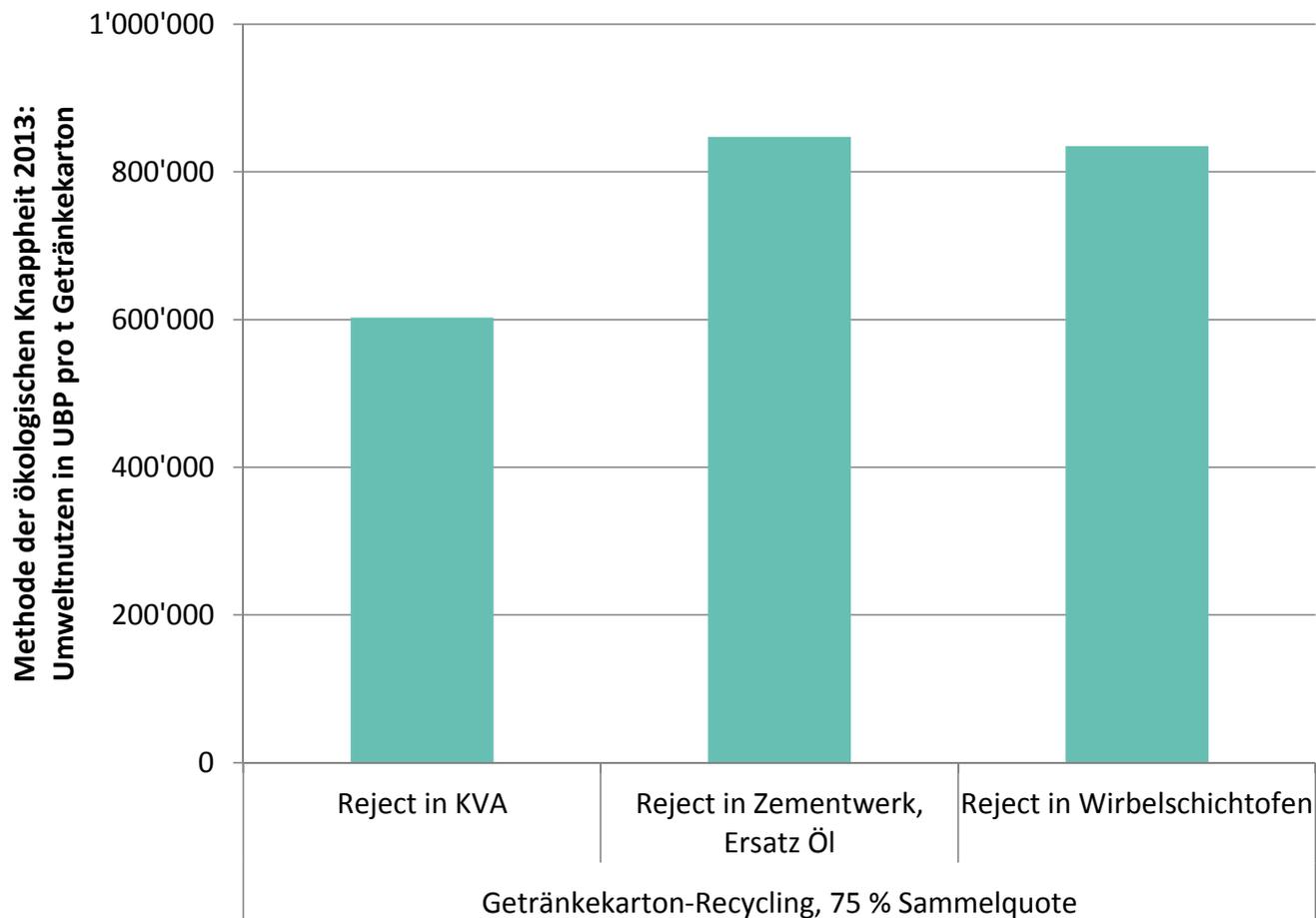
Auch wenn mit dem Konzept der zusätzlichen energetischen Verwertung von durch das Recycling eingespartem Holz gerechnet wird, ist die Einsparung der Recyclingvarianten tiefer als in der damaligen Studie.

Dafür sind vor allem die folgenden Gründe verantwortlich:

- Die durchschnittliche KVA hat ihre Netto Energieeffizienz wesentlich erhöht: Die Stromnutzung stieg um rund die Hälfte von 11.4 auf 17.2 %, die Wärmenutzung um rund einen Sechstel von 23.3 % auf 26.7 %.
- Als Basisszenario wurde jeweils mit dem Ersatz von Grenzstrommix (grösstenteils Gas) und von Grenzwärmemix (2/3 Gas, 1/3 Öl) gerechnet.
- Somit hat sich die energetische Gutschrift bei einer Entsorgung in der KVA wesentlich erhöht, was sich vermindern auf die Differenz zu den Recyclingvarianten auswirkt.

Resultate Ökobilanz – Hauptszenarien

Umweltnutzen pro Tonne Getränkekarton



Der Umwelt Nutzen der Recyclingvarianten liegt zwischen 600'000 UBP und 850'000 UBP pro Tonne Getränkekarton.

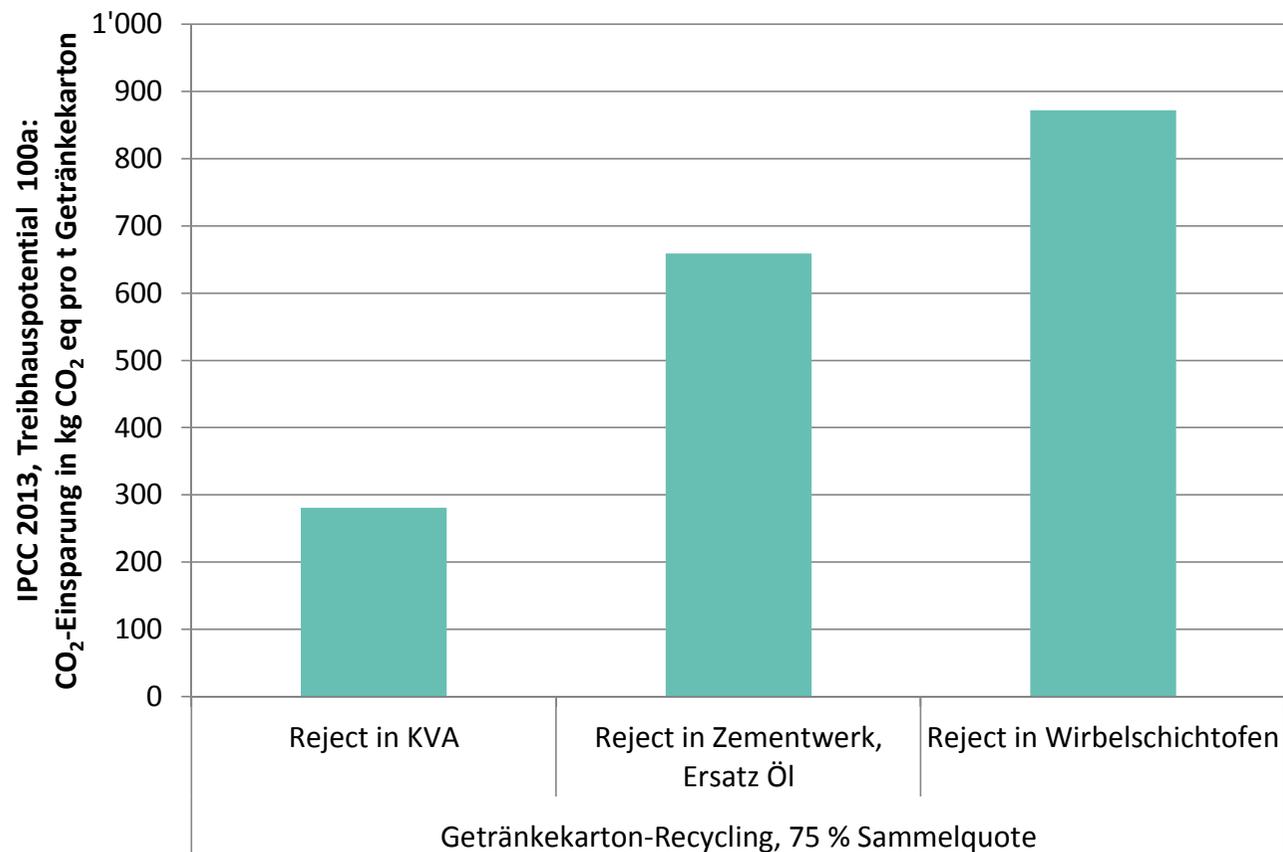
600'000 UBP entsprechen ungefähr:

- 1800 km Autofahrt
- 1600 kWh CH-Strom
- Wärme von 200 kg Heizöl

Dank dem Recycling wird pro Tonne Getränkekarton so viel Holz eingespart, wie jährlich auf einer Fläche von 0.3 Fussballfeldern nachwächst.

Resultate Ökobilanz – Hauptszenarien

CO₂-Einsparung pro Tonne Getränkekarton

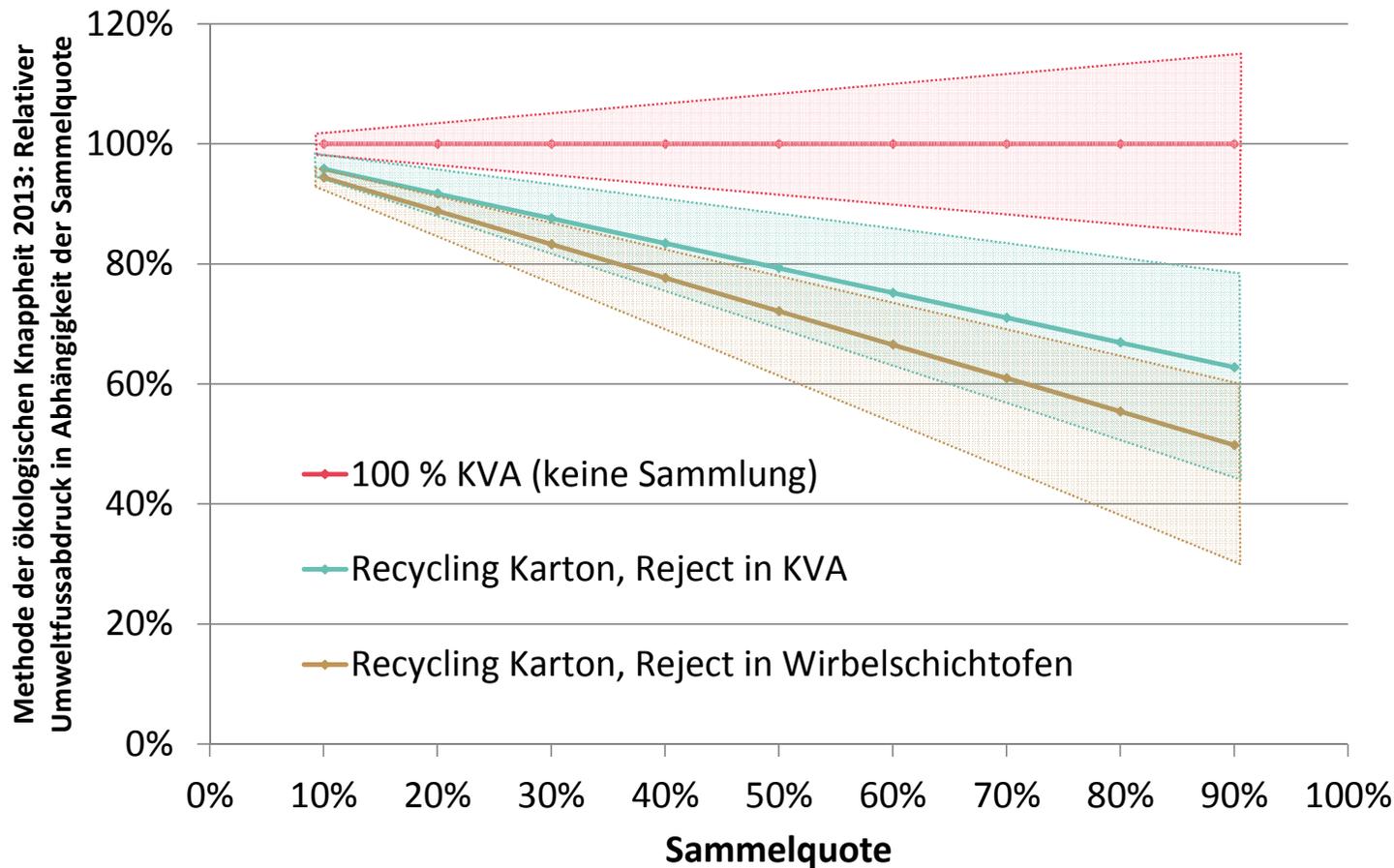


Die CO₂-Einsparung der Recyclingvarianten liegt zwischen 280 kg CO₂eq und 870 kg CO₂eq pro Tonne Getränkekarton.

Resultate Ökobilanz - Einfluss Sammelquote



Recycling immer besser als die Entsorgung in der KVA



Die rote Linie «100 % KVA» bedeutet, dass Getränkekartons nicht gesammelt und in einer KVA entsorgt werden.

Die gestrichelten Linien stellen den unabhängigen Unsicherheitsbereich dar. Voneinander abhängige Unsicherheiten wurden eliminiert.

Recycling schneidet signifikant besser ab als 100 % Entsorgung in einer KVA.

Zwischen den beiden Varianten Reject in KVA oder Zementwerk gibt es keinen signifikanten Unterschied.

Resultate Ökobilanz - Einfluss Sammelquote

Erkenntnisse

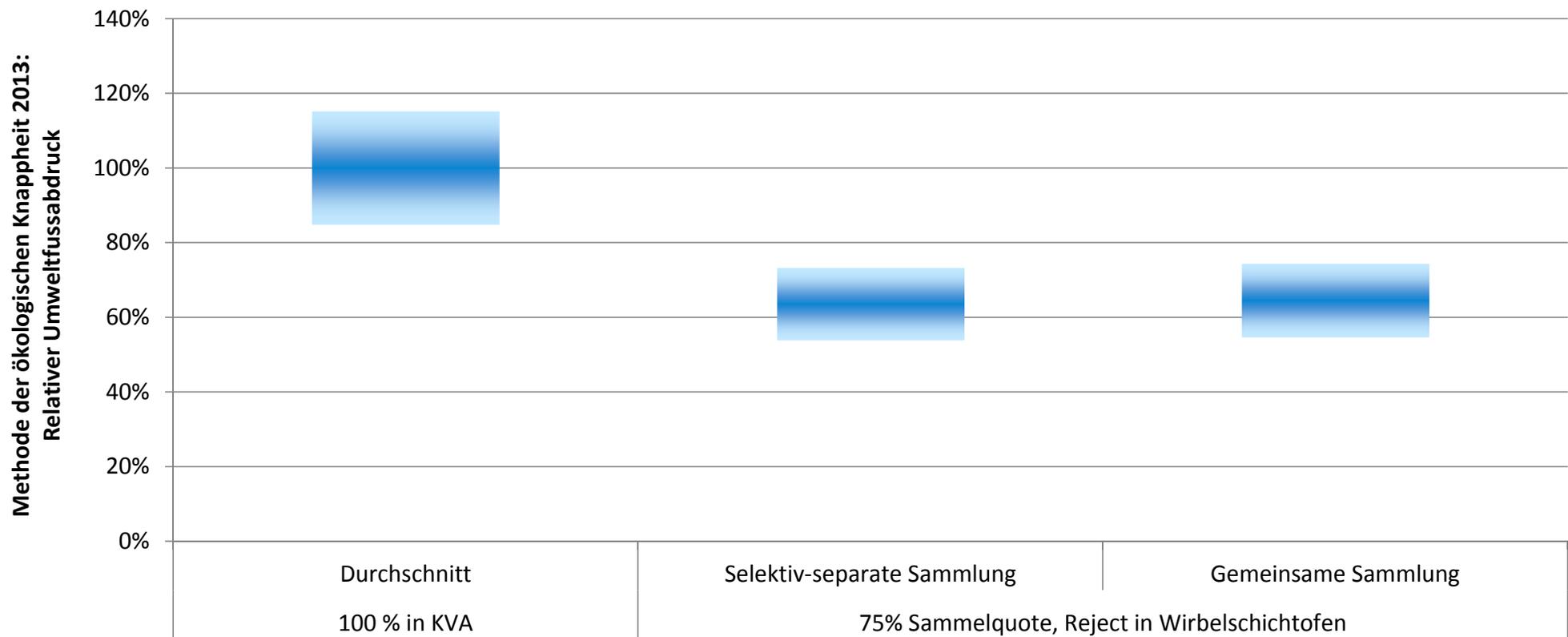


- Aus ökologischer Sicht lohnt sich die Sammlung und das Recycling der Getränkekartons unabhängig von der Sammelquote (im Bereich von 10 % bis 90 %).

Resultate Ökobilanz - Einfluss Sammelsystem

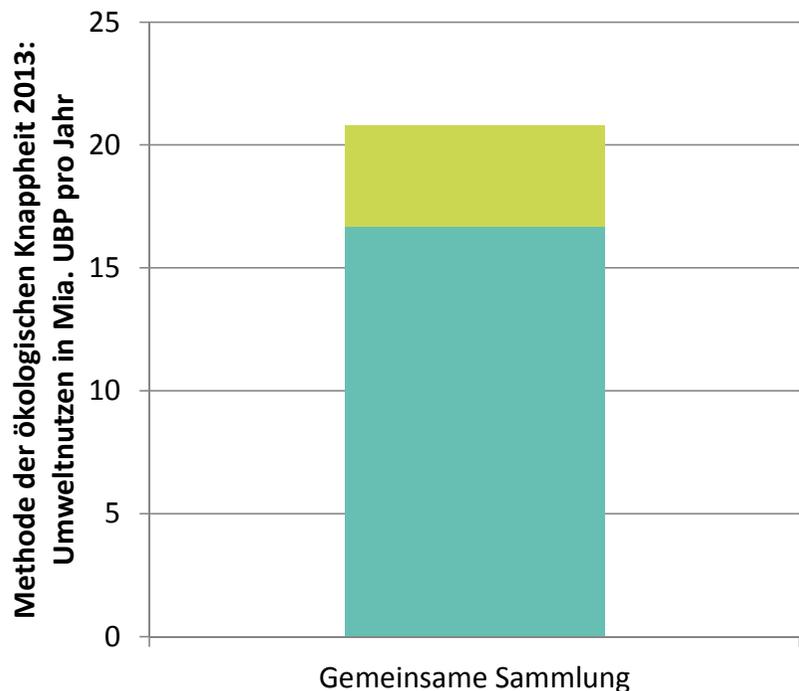


Gleicher Umweltnutzen bei selektiv-separater und gemeinsamer Sammlung



Resultate Ökobilanz – Gemeinsame Sammlung

Potential gesamter Umweltnutzen pro Jahr



■ PE-Hohlkörper-Recycling: Anfallende Menge 15'000 t, 60 %
Sammelquote *

■ Getränkekarton-Recycling: Anfallende Menge 20'000 t, 75 %
Sammelquote

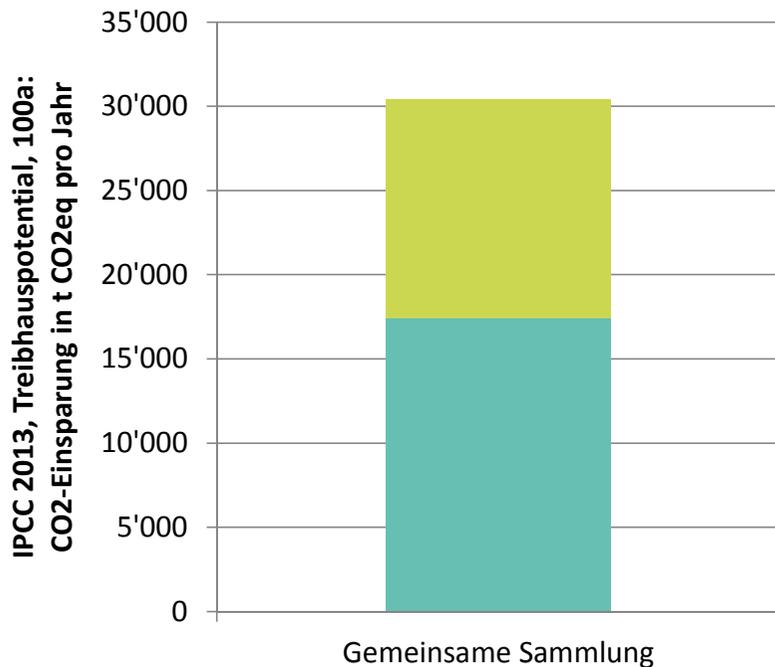
Der absolute Umwelt Nutzen der gemeinsamen Sammlung liegt bei rund 21 Mia. UBP pro Jahr. Der Umwelt Nutzen des Getränkekarton-Recycling liegt dabei bei rund 17 Mia. UBP pro Jahr.

Dank dem Getränkekarton-Recycling wird pro Jahr so viel Holz eingespart, wie jährlich auf einer Fläche von 11'000 Fussballfeldern nachwächst.

* Resultate des PE-Hohlkörper-Recycling stammen aus der Studie Dinkel & Kägi 2013: Ökologischer Nutzen von Recyclingsystemen in der Schweiz im Auftrag von Swiss Recycling.

Resultate Ökobilanz – Gemeinsame Sammlung

Potential gesamte CO₂-Einsparungen pro Jahr



- PE-Hohlkörper-Recycling: Anfallende Menge 15'000 t, 60 % Sammelquote *
- Getränkekarton-Recycling: Anfallende Menge 20'000 t, 75 % Sammelquote

Die CO₂-Einsparung der gemeinsamen Sammlung liegt bei rund 30'000 t CO₂eq pro Jahr.

Die CO₂-Einsparung des Getränkekarton-Recycling liegt dabei bei rund 17'000 t CO₂eq pro Jahr.

30'000 t CO₂eq entsprechen:

- 4'000 Erdumrundungen mit einem Auto oder
- 9'500 Tonnen Heizölverbrauch

* Resultate des PE-Hohlkörper-Recycling stammen aus der Studie Dinkel & Kägi 2013: Ökologischer Nutzen von Recyclingsystemen in der Schweiz im Auftrag von Swiss Recycling.

Teil Fuzzy Set Theorie



Grenzen der Ökobilanzbetrachtung



Im Wesentlichen handelt es sich bei den durchgeführten Ökobilanzanalysen um statische Betrachtungen, welche auf der Basis von festgelegten Annahmen wie z.B. Sammelquote, Kosten der Sammlung und der Sortierung, Wärmerückgewinnung der KVA etc. die entsprechende Umweltbelastung respektive -nutzen berechnen.

Diese eher «starre» Betrachtung kann durch Szenarienrechnungen etwas «aufgeweicht» werden, indem relevante Einflussgrößen variiert und deren Einfluss auf die Resultate dargestellt wird. So führten z.B. die vorigen Berechnungen zu folgender Schlussfolgerung: «Eine gemeinsame Sammlung führt zu einem vergleichbaren Umweltnutzen wie die selektiv-separate Sammlung.»

Dies trägt jedoch z.B. den folgenden Zusammenhängen keine Rechnung:

- Erhöhung der Sammelquote durch eine höhere Convenience bei einer gemeinsamen Sammlung.
- Geringere Fehlwürfe bei einer gemeinsamen Sammlung.

Es bleibt die Frage, ob diese unberücksichtigten Zusammenhänge zu einer anderen Schlussfolgerung führen.

Die funktionellen Zusammenhänge sind jedoch nicht mathematisch bekannt.

Zusätzlich fehlen ökonomische sowie gesellschaftliche Einflussgrößen und Zusammenhänge.

Dennoch können Experten Schätzungen zu diesen Zusammenhängen angeben.

Die Fuzzy Set Methode ermöglicht es, den Gesamtnutzen auf Basis von Expertenschätzungen zu den Zusammenhängen zu ermitteln.

Fuzzy Set Theorie

Grundlagen



Die Theorie der unscharfen Mengen

Sie wurde vor rund 50 Jahren vom persischen Mathematiker Lotfi Zadeh entwickelt mit dem Ziel sprachliche Terme mathematisch auszudrücken und damit folgendes zu realisieren:

Erweiterung der klassischen Mengenlehre, die:

- die «natürliche Realität» adäquater abbildet
- die Stärke des Menschen mit komplexen Systemen «einfach» umzugehen mathematisch und nachvollziehbar darstellt
- Expertenwissen erschliesst
- Regel- und Expertensysteme effizient modellieren lässt

Ein Zitat

“Wenn die Komplexität eines Systems zunimmt, nimmt unsere Möglichkeit ab, exakte und signifikante Aussagen über dessen Verhalten zu machen. Ab einer bestimmten Komplexität werden Exaktheit und Relevanz immer mehr zu sich ausschliessenden Eigenschaften.”

Lotfi Zadeh

Fuzzy Set Theorie

Grundlagen



Komplexes System

Die Sammlung und Verwertung von Verpackungsmaterialien ist ein komplexes System. Entsprechend ist der Nutzen von verschiedenen Faktoren abhängig, wie z.B.

- Öko-Effizienz
 - Ökologie
 - Ökonomie
- Machbarkeit
 - Handling
 - Konsumentenzufriedenheit
 - Risiko „Staatlicher Eingriff“

Wichtigste Faktoren

Öko-Effizienz

- Ökologie
 - Sammelquote
 - Qualität des R-Produktes
 - Aufwand Recycling
- Ökonomie
 - Aufwand Sammeln, Sortieren, Rezyklieren
 - Erlös

Machbarkeit

- Handling
- Konsumentenzufriedenheit
- Risiko „Staatlicher Eingriff“

Die Erfahrung zeigt

- Eine genaue Bestimmung der der Einflussgrößen und deren Auswirkungen ist sehr aufwändig.
- Dennoch können Experten relativ schnell qualitative Aussagen über die Grösse der Einflüsse und deren Auswirkungen machen.



Methodik Fuzzy Set Theorie

Unscharfe Aussagen

Im Alltag sind unscharfe Begriffe wichtiger als exakte Angaben:

- “Sehen Sie den **grossen, alten** Mann **in der Nähe** des Hauses?”
- Was bedeutet **gross, alt** oder **in der Nähe** von?
- Ist ein Mann von 1.80 m gross?
- Falls ja, ist ein Mann von 1.79 m klein?
- Wann ist ein Kind erwachsen?

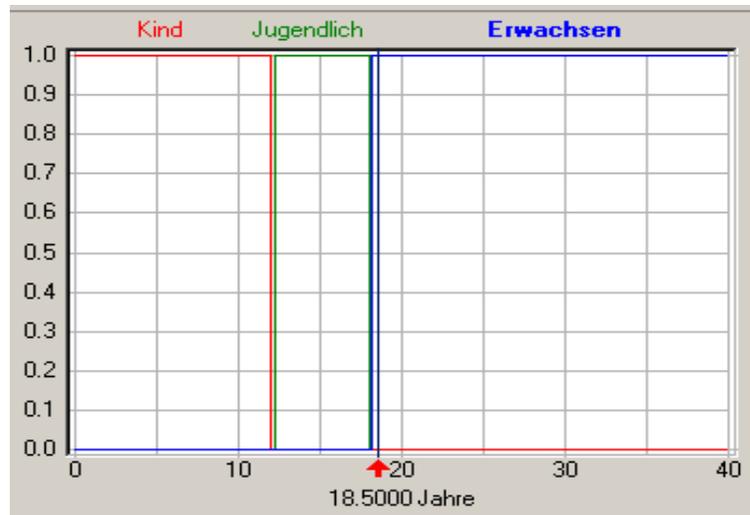
Methodik Fuzzy Set Theorie



Beispiel für Umgang mit unscharfen Aussagen

Klassische Mengenlehre

In der klassischen Mengenlehre ist jemand entweder ein Kind, ein Jugendlicher oder ein Erwachsener



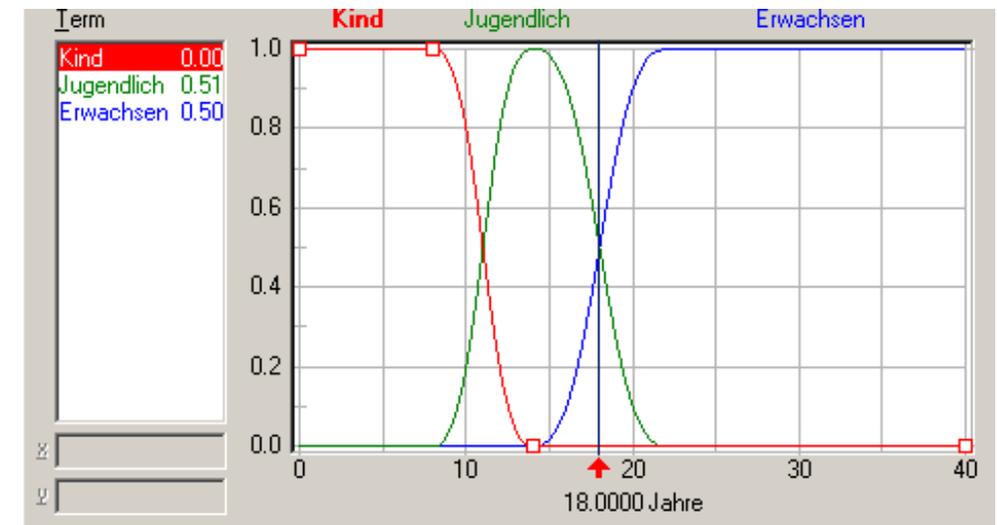
Fuzzy Set Theorie

In der Fuzzy Set Theorie kann jemand gleichzeitig zu einem gewissen Grad z. B. ein Jugendlicher und ein Erwachsener sein.

Die Mehrdeutigkeit einer realen Definition von:

- Wann ist ein Kind erwachsen?
- Wie gross ist "GROSS"? 1.60m, 1.75m oder 1.90m?

wird zu einer Frage der Zugehörigkeit



Methodik Fuzzy Set Theorie

Funktionsweise



Darstellung von Beziehungen

Beziehungen zwischen Variablen werden in der klassischen Mathematik durch Funktionen dargestellt, wie z.B.

$$y = K_p x + K_I \int x dt + K_D \frac{dx}{dt}$$

In der Fuzzy Set Theorie werden Beziehungen durch sprachliche Regeln dargestellt, wie z.B.:

Wenn

- mein Kind erwachsen ist,
- eine Ausbildung absolviert und
- eine Arbeit hat

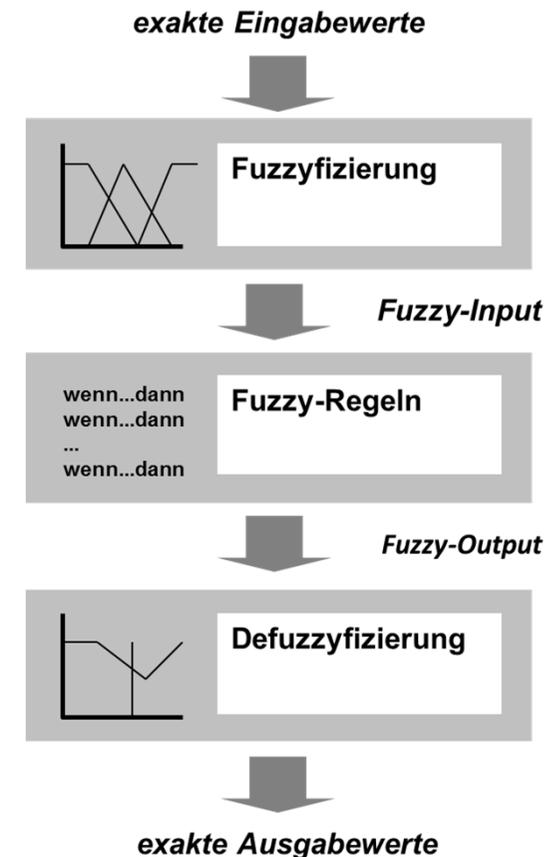
Dann

- soll es selbst für seinen Lebensunterhalt aufkommen

Ablauf

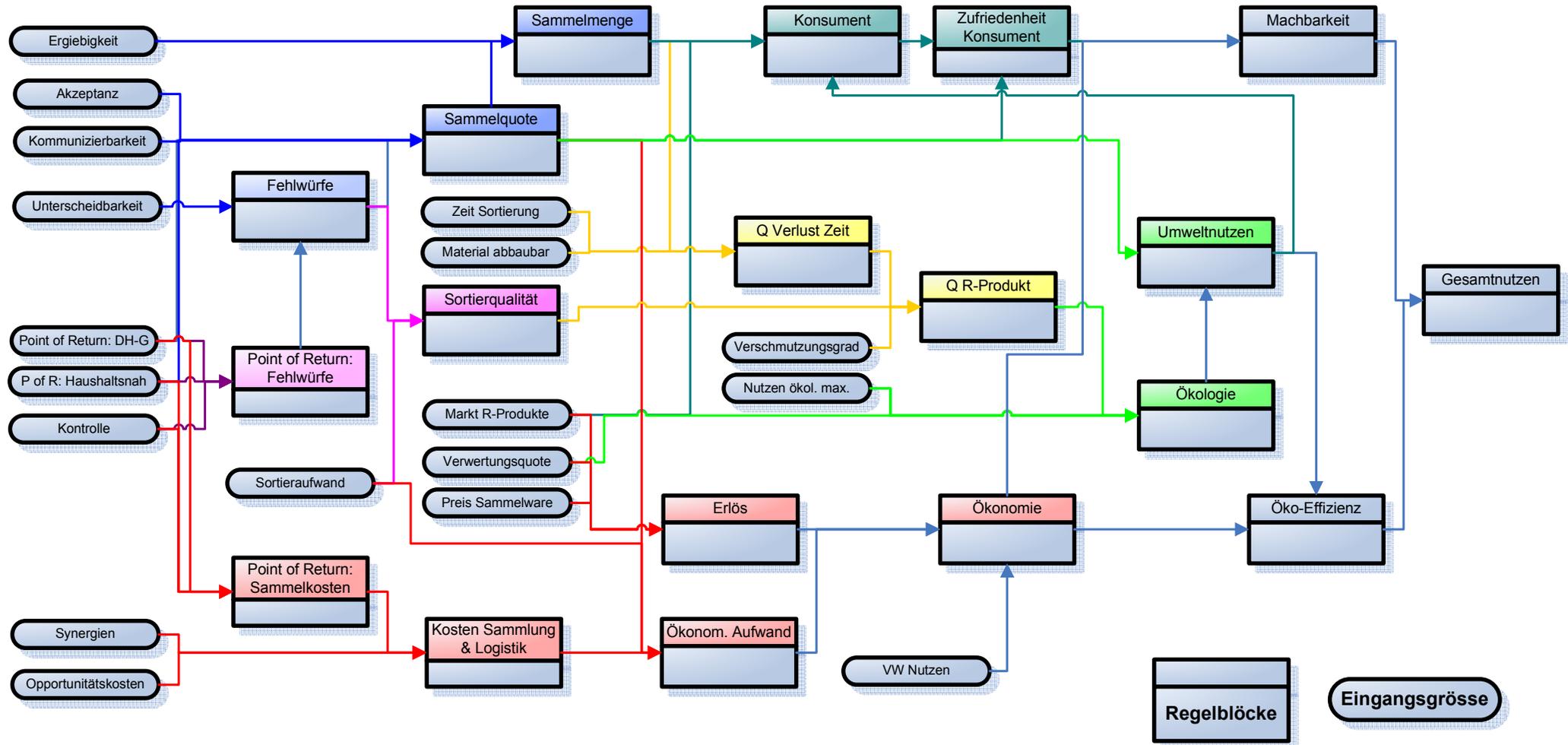
- Systembeschreibung mit sprachlichen Regeln und linguistischen Variablen
- 3-teiliger Modellaufbau
- Linguistische Variablen bestehen aus unscharfen Mengen (Fuzzy Set), definiert durch eine Membership-Funktion

Ablaufschema



Methodik Fuzzy Set Theorie

Schematische Darstellung des Modells





Methodik Fuzzy Set Theorie

Zu beachten

- Größen wie z.B. Sammelquoten, Fehlwürfe oder Qualität der Produkte, welche bei der Ökobilanzierung als Parameter fest eingegeben wurden, werden beim Fuzzy Modell auf Grund von Expertenaussagen berechnet.
- Die Resultate sind mit Unsicherheiten behaftet und entsprechend dürfen sie nicht rein quantitativ betrachtet werden.



Fuzzy Set Theorie

Grundlagen der Modellierung

Um die Zusammenhänge der Faktoren abzubilden, wurde folgendermassen vorgegangen:

1. Modellbildung, welche die Zusammenhänge darstellt
2. Diskussion der Modellbildung mit Experten
3. Überarbeitung des Modells
4. Diskussion der funktionellen Zusammenhänge im Modell mit Experten
5. Umsetzen des Expertenwissens in die Regelblöcke des Modells
6. Modellrechnungen und Diskussion der Zwischenresultate und Resultate mit Experten.

Für die Modellbildung wurden Interviews mit verschiedenen Experten aus den folgenden Bereichen geführt:

- Sammlung: Gemeinde und Handel
- Logistik
- Sortierung und Verwertung
- Systembetreiber

Fuzzy Set Theorie

Untersuchte Sammlungen



Ist-Situation:

Nur PE-Hohlkörper-Sammlung:

- Verkaufsmenge 15'000 t / Jahr
- 60 % Sammelquote

Selektiv-separate Sammlung:

PE-Hohlkörper:

- Verkaufsmenge 15'000 t / Jahr
- 60 % Sammelquote

Getränkekarton:

- Verkaufsmenge 20'000 t / Jahr
- 75 % Sammelquote

Je separat gesammelt

Gemeinsame Sammlung:

PE-Hohlkörper:

- Verkaufsmenge 15'000 t / Jahr
- 60 % Sammelquote

Getränkekarton:

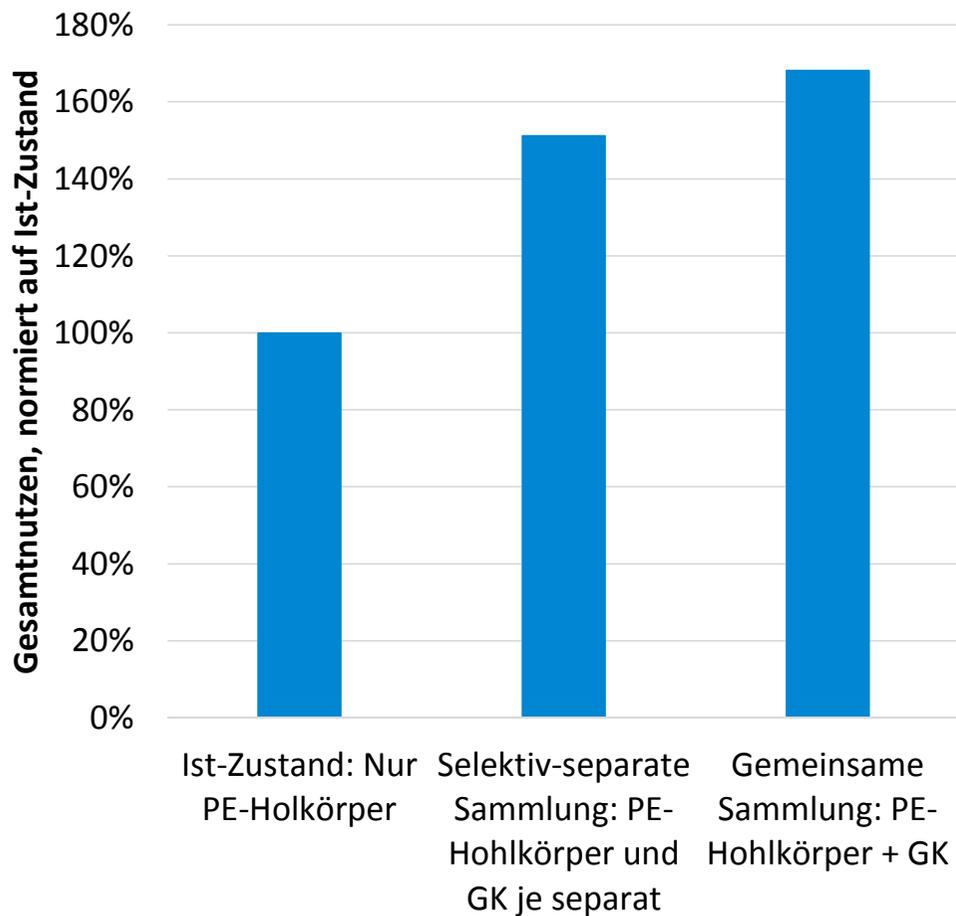
- Verkaufsmenge 20'000 t / Jahr
- 75 % Sammelquote

Insgesamt 35'000 t
gemeinsam gesammelt

Resultat Fuzzy Set: Gesamtnutzen



Höherer Gesamtnutzen bei gemeinsamer Sammlung



Der Gesamtnutzen ergibt sich aus einer Gleichgewichtung der

- Machbarkeit (Konsumentenzufriedenheit)
- Öko-Effizienz und
- Sammelmenge

Aufgrund der höheren Konsumentenzufriedenheit und der damit verbundenen höheren Sammelmenge ergibt sich ein höherer Gesamtnutzen bei der gemeinsamen Sammlung im Vergleich zur selektiv-separaten Sammlung.

Obwohl als exakte Resultate angegeben, weisen Fuzzy Set Resultate gewisse Unsicherheiten auf. Diese Unsicherheiten sind jedoch nicht quantifizierbar, weswegen auf eine Unsicherheitsangabe verzichtet wurde.

Erkenntnisse Fuzzy Set Modell



- Die gemeinsame Sammlung führt im Vergleich zur selektiv-separaten Sammlung zu:
 - Tieferen Fehlwürfen
 - Höheren Sammelquoten respektive Sammelmengen
 - u.a. dadurch zu einer vergleichbaren Öko-Effizienz trotz höheren Kosten
- Zu einer tendenziell höheren Konsumentenzufriedenheit
- Zu einem etwas höheren Gesamtnutzen (ökologisch, ökonomisch und gesellschaftlich)

