

# Ökobilanz des Farbsack-Trennsystems der Stadt Bern



**Verfasser**

Thomas Pohl

**Verantwortlich**

Prof. Dr. Rainer Bunge

Institut für Umwelt- und Verfahrenstechnik

Oberseestrasse 10

8640 Rapperswil

Tel: 055 222 48 60

Datum: 06.08.2019

Im Auftrag der Direktion für Tiefbau, Verkehr und Stadtgrün, Entsorgung + Recycling Stadt Bern  
(ERB)



Entsorgung + Recycling  
**Stadt Bern**



## Zusammenfassung

Um die ökologische Wirkung des Farbsack-Trennsystems FSTS abzuschätzen, wurde eine Ökobilanz erstellt. Vor dem Pilotversuch hatte die Firma Sustainable System Solutions GmbH "3s" bereits eine umfassende Ökobilanz für das Farbsack-Trennsystem erstellt – dies jedoch basierend auf damaligen Erkenntnissen und Annahmen aus dem Jahr 2014. Mit den von ERB und UMTEC während den Wirkversuchen an Sack-, Container- sowie Quartierentsorgungsstellen-Analysen gesammelten Daten wurde die bestehende Ökobilanz aktualisiert und ergänzt. Folgende Szenarien wurden ökologisch bewertet:

- Referenzszenario: Abfallentsorgung 2018: Das Referenzszenario beschreibt den Zustand der Abfallsammlung im Jahr 2018.
- Alternativszenario "WS80": 80% FSTS, 20% Sammelstelle: Das Alternativszenario "WS80" beinhaltet das Farbsack-Trennsystem FSTS. Das Farbsack-Trennsystem FSTS erlaubt die gemeinsame Sammlung mehrerer Wertstofffraktionen in einem Container. Der Kehrichtsack wird in einem separaten Container gesammelt um sicher zu stellen, dass keine Verschmutzung der Wertstoffsäcke erfolgt. Die einzelnen Fraktionen werden in unterschiedlich gefärbten Sammelsäcken gesammelt und danach in Sammelcontainer am Strassenrand bereitgestellt. Die folgenden Fraktionen werden im FSTS gesammelt: PET, übrige Kunststoffe, Büchsen/Aluminium, Papier/Karton und Glas. In diesem Szenario wird davon ausgegangen, dass 80% der Büchsen/Aluminium, PET und Glas via FSTS und 20% via Entsorgungshöfe, Detailhändler und Wertstoffsammelstellen sowie Quartierentsorgungsstellen gesammelt werden. Nicht von der Aufteilung betroffen sind Papier/Karton und übrige Kunststoffe, da sie nur via FSTS gesammelt werden.
- Alternativszenario "WS20": 80% Sammelstelle, 20% FSTS: Das Alternativszenario "WS20" beinhaltet das Farbsack-Trennsystem FSTS analog zum "WS80", jedoch mit umgekehrten Mengen. In diesem Szenario wird davon ausgegangen, dass 80% der Büchsen/Aluminium, PET und Glas via Wertstoffsammelstellen/Entsorgungshöfe und lediglich 20% via FSTS gesammelt werden. Nicht von der Aufteilung betroffen sind Papier/Karton und übrige Kunststoffe, da sie nur via FSTS gesammelt werden.

Abb. 0-1 zeigt das Resultat der Ökobilanz. In dieser Analyse wurden alle Sammel- und Transportleistungen von ERB für die weiter unten definierten Fraktionen, sowie alle Sammel- und Transportleistungen der Detailhändler für Kunststoffhohlkörper (inkl. PET), berücksichtigt. Dies beinhaltet alle notwendigen Transporte von den Haushalten bis zu den verschiedenen Verwertern bzw. zur KVA und die notwendigen Sammeleinrichtungen wie Container oder Sortieranlagen. Zusätzlich wurde der Privattransport der Bürger und Bürgerinnen der Stadt Bern zu den Wertstoffsammelstellen sowie zu den Entsorgungshöfen miteinbezogen.

Aufgrund der Umweltbilanz des Farbsack-Trennsystems im Vergleich zur ökologischen Bewertung der Situation 2018 als Referenzszenario bietet die Einführung des FSTS ökologische Vorteile. Bei einer Beteiligung von 80% der Haushalte schafft die Stadt Bern einen Umwelt-

nutzen gegenüber der aktuellen Situation. Diese Aussage wird einerseits durch die Auswertung mittels zwei Ökobilanzmethoden (Umweltbelastungspunkte UBP, Treibhauspotenzial CO<sub>2</sub>) abgestützt und andererseits durch eine ausgiebige Sensitivitätsanalyse erhärtet. Das Alternativszenario WS80 schloss in allen UBP-Betrachtungen ökologisch besser ab als das Referenzszenario.

**Der Umweltnutzen ergibt sich aus der Reduktion des privaten Transports zu Sammelstellen bzw. zu den Entsorgungshöfen. Wir gehen davon aus, dass durch die Einführung des Farbsack-Trennsystems mit einer Beteiligung von 80% der Haushalte der Stadt Bern rund 20% der Umweltbelastung eingespart werden kann.**

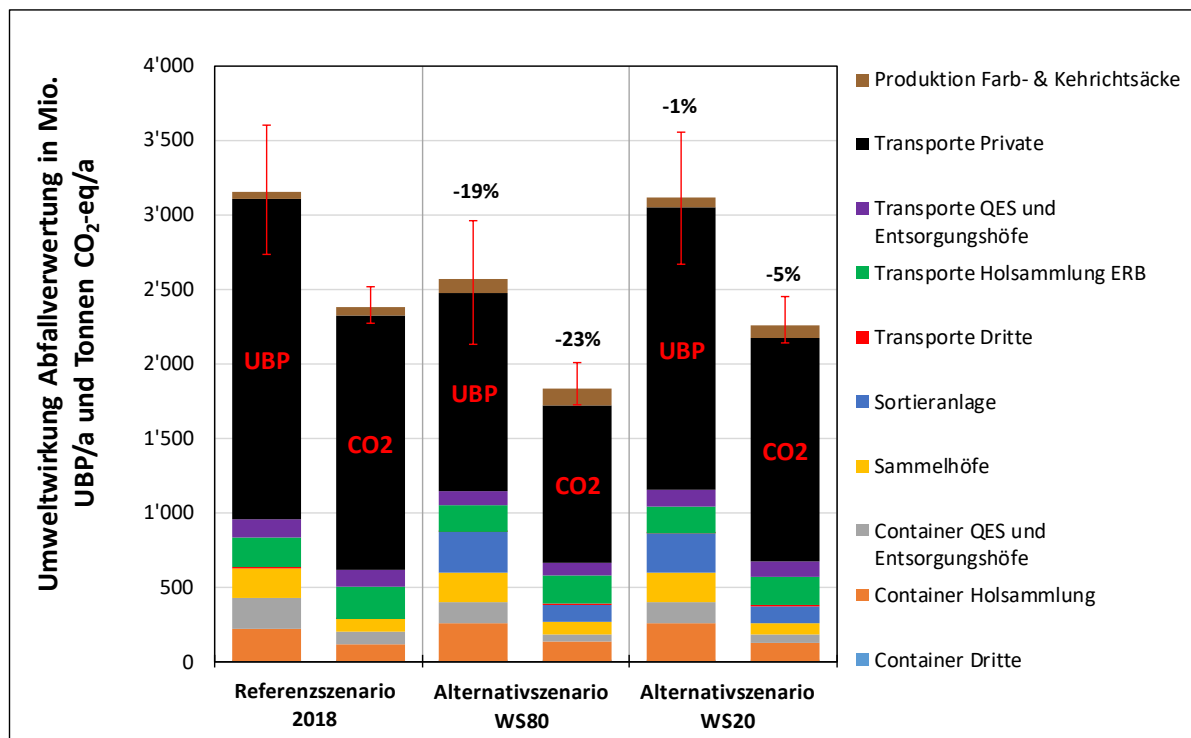


Abb. 0-1: Umweltwirkung der Abfallwertung aus Haushalten der Stadt Bern dargestellt in Mio. Umweltbelastungspunkte "UBP" pro Jahr und als Treibhauspotenzial in Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro Jahr und Szenario. Im Alternativszenario "WS80" können 19% bzw. 23% eingespart werden. Im Alternativszenario "WS20" können gegenüber dem Referenzszenario nur 1% (UBP) und 5% (CO<sub>2</sub>) eingespart werden. Die roten Fehlerindikatoren geben das 95%-Konfidenzintervall der Unsicherheitsanalyse an.

Neben der Aktualisierung der bestehenden Ökobilanz wurde zusätzlich ermittelt, ob es aus ökologischer Sicht sinnvoller ist separat gesammeltes Altglas zu Schaumglas zu verarbeiten oder zu neuen Flaschen zu rezyklieren. Unsere Analyse ergab: Die Altglasverwertung zu neuen Flaschen schneidet ökologisch besser ab und spart gegenüber der Altglasverwertung zu Schaumglas rund 13% der Umweltbelastung ein. Pro Tonne Altglas, aus dem wieder neue Flaschen produziert werden, anstelle zu Schaumglas verarbeitet zu werden, werden rund



# HSR

HOCHSCHULE FÜR TECHNIK  
RAPPERSWIL

FHO Fachhochschule Ostschweiz

120'000 UBP eingespart. Für die Stadt Bern macht das bei einer im 2018 separat gesammelten Menge Altglas von 4'364 Tonnen  $\times$  120'000 UBP/t = 524 Mio. vermiedene UBP. Das entspricht an 1'600'000km Autofahrt (=11km pro Einwohner und Jahr) mit einem durchschnittlichen PW oder an 6'500 kg Rindfleisch (= 26'000 Steaks oder 1/5 Steak pro Einwohner und Jahr).

Zu berücksichtigen ist allerdings, dass im Rahmen dieser Studie keine Kostenbetrachtungen einbezogen wurden. Es wäre durchaus möglich, dass das ökologisch bessere Szenario auch teurer ist, als das ökologisch schlechtere Referenzszenario.



## Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	i
1 Einleitung.....	1
1.1 Hintergrund.....	1
1.2 Ausgangslage .....	2
1.3 Zielsetzung und Leistungsumfang.....	3
1.4 Grundlagen zur Ökobilanz .....	5
2 Material und Methoden.....	11
2.1 Definition der Szenarien .....	11
2.2 Funktionelle Einheit .....	14
2.3 Systemgrenze und Randbedingungen .....	14
2.4 Betrachtete Fraktionen .....	16
2.5 Mengen, Distanzen und weitere Daten .....	16
2.6 Sammelstellen.....	19
2.7 Anzahl Container je Szenario .....	20
2.8 Transportdistanzen .....	20
2.9 Sortieranlagen.....	24
3 Resultate und Diskussion .....	25
3.1 Ökobilanz FSTS .....	25
3.2 Sensitivitätsanalyse.....	28
3.3 Ökobilanz Altglasverwertung.....	36
4 Schlussfolgerung .....	38
5 Literaturverzeichnis.....	39
6 Abbildungen .....	41
7 Tabellen.....	42
8 Anhang .....	43
8.1 Grundlagen zur Berechnung der Transportdistanzen.....	43
8.2 Daten Ökobilanz.....	44
8.3 Unsicherheitsanalysen.....	47





## Begriffe und Abkürzungen

<b>Bring-Sammlung</b>	Der Abfall und/oder die Wertstoffe müssen von den Verursachern zu lokalen oder regionalen Sammelpunkten (nicht am Strassenrand) gebracht werden
<b>EH</b>	Entsorgungshof
<b>ERB</b>	Entsorgung + Recycling Stadt Bern
<b>FSTS</b>	Spezifische Bezeichnung für das in der Stadt Bern lancierte Pilotprojekt: Farbsack-Trennsystem. Der Bevölkerung stehen neu zwei verschiedene Container zur Verfügung, einer für Kehrichtsäcke und einer für verschiedene Wertstoffsäcke. Dabei werden unterschiedlich gefärbte Sammelsäcke für die Sammlung der verschiedenen Fraktionen eingesetzt.
<b>FSTS-Säcke</b>	Synonym für Farbsack- oder Wertstoffsack. Farbige Säcke, welche der Sammlung von Wertstoffen dienen. Alle Säcke haben ein Volumen von 17l. Folgende Farben stehen für folgende Fraktionen: <b>Violett:</b> Gemischtes Glas <b>Rot:</b> PET-Getränkeflaschen (Abkürzung PET) <b>Gelb:</b> Kunststoffe gemischt <b>Grau:</b> Alu-/ Weissblechdosen und Kleinmetalle <b>Braun:</b> Papier und kleine Kartons
<b>Gew.-%</b>	Gewichts-Prozent
<b>Hol-Sammlung</b>	Der Abfall und/oder die Wertstoffe werden am Strassenrand (offen oder in Containern) von Sammelfahrzeugen abgeholt
<b>IPCC</b>	Intergovernmental Panel on Climate Change
<b>Kehricht-Säcke</b>	Säcke, in denen der Hauskehricht gesammelt wird. Diese sind in der Stadt Bern <b>blau</b> und in den Grössen 17l, 35l, 60l und 110l erhältlich.
<b>kg CO<sub>2</sub>-eq.</b>	kg CO <sub>2</sub> -Äquivalente (werden durch die Methode <i>IPCC</i> bestimmt): Indikator der LCA
<b>KVA</b>	Kehrichtverbrennungsanlage
<b>LCA</b>	Ökologische Lebenszyklusanalyse (Life Cycle Assessment): Systematische Analyse der Umweltauswirkungen von Produkten



**HSR**

HOCHSCHULE FÜR TECHNIK  
RAPPERSWIL

FHO Fachhochschule Ostschweiz

und Prozessen während deren gesamten Lebenszyklus

**LKW**

Lastkraftwagen

**OF-Container**

Oberflur-Container

**PET**

Poly-Ethylen-Terephthalat

**QES**

Quartierentsorgungsstelle

**Sammelrunde**

Einmalige Leerung aller vorhandenen Entsorgungspunkte einer spezifischen Fraktion. Die daraus resultierende Distanz entspricht der Summe aller notwendigen Fahrzeuge.

**UBP**

Umweltbelastungspunkte (werden durch die Methode der ökologischen Knappheit bestimmt): Indikator der LCA

**UF-Container**

Unterflur-Container

**WSS**

Wertstoffsammelstelle



**UMTEC**

INSTITUT FÜR UMWELT- UND  
VERFAHRENSTECHNIK

## 1 Einleitung

### 1.1 Hintergrund

Im Rahmen des Farbsack-Trennsystems (FSTS) wurde in der Stadt Bern eine neuartige Recyclinglösung erprobt, eine „kollektive Separatsammlung“. Hierbei wurden die zu entsorgenden Wertstoffe, getrennt nach Recyclingkategorien, in verschiedenfarbige Säcke verpackt und in Containern eingeworfen, die den Liegenschaften durch ERB (Entsorgung und Recycling Stadt Bern) bereitgestellt wurden. Folgende 17 Liter und 20 Liter – Farbsäcke standen der Bevölkerung während des Pilotversuchs zur Verfügung:

- **Violett** Gemischtes Glas (17 Liter)
- **Rot** PET-Getränkeflaschen (17 Liter)
- **Gelb** Kunststoffe gemischt (17 Liter)
- **Grau** Alu-/ Weissblechdosen und Kleinmetalle (17 Liter)
- **Braun** Papier und kleine Kartons (20 Liter)

Die FSTS-Container wurden von ERB in Sammelfahrzeuge entleert und deren Inhalt in einer zentralen Sortieranlage abgekippt. Hier wurden die Säcke nach Farbe separiert und dann den entsprechenden Verwertungskanälen zwecks Recycling zugeführt (z.B. Papier, Glas, Metall...). Dieser Prozess ist im Schema in der unterstehenden Abbildung (Abb. 1-1) dargestellt.

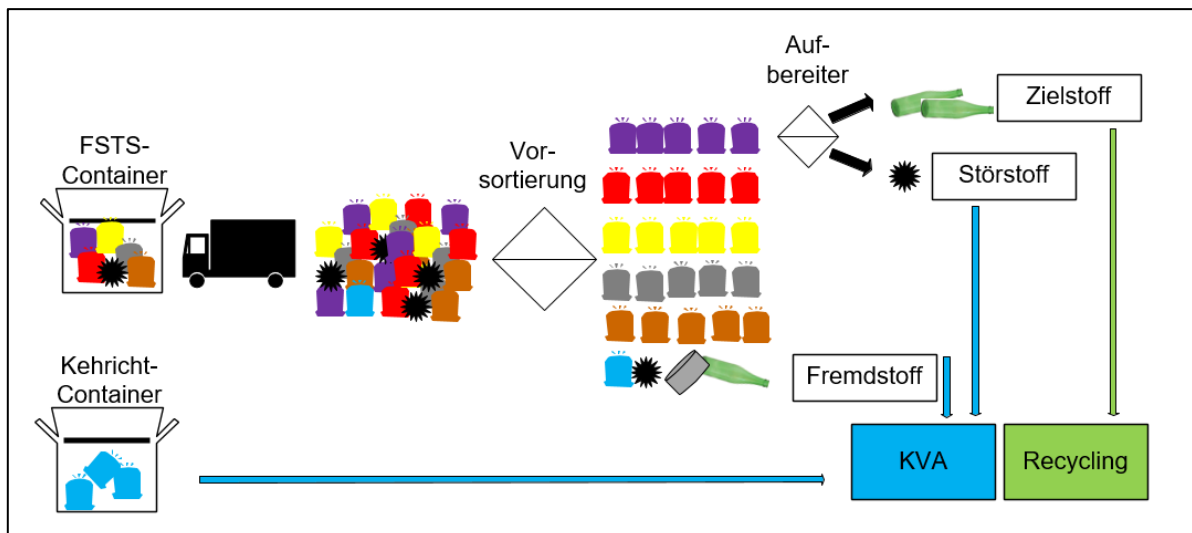


Abb. 1-1: Prozessschema der Aufbereitung der FSTS-Säcke.

Das UMTEC, ein Institut der Hochschule für Technik in Rapperswil, wurde mit der wissenschaftlichen Begleitung des Pilotversuchs beauftragt.





## 1.2 Ausgangslage

Im Jahr 2016 verfasste das Umweltberatungsbüro "Sustainable System Solutions GmbH" im Auftrag von Entsorgung + Recycling Stadt Bern ERB eine umfassende Ökobilanz zum Variantenstudium des Farbsack-Trennsystems FSTS (damals als "Sack im Behälter SaB" oder «Sack im Container SaCo» bekannt). Diese Ökobilanz sollte aufzeigen, ob und in welchem Ausmass die Veränderungen am Abfallsammelsystem einen Einfluss auf die Umweltbelastung der Abfallsammlung haben. Dabei bildete die Studie [1] von Holinger AG die Basis der genannten Ökobilanz, indem ein Variantenstudium einer effizienten und ökologisch nachhaltigen Abfallwirtschaft ausgearbeitet wurde. Im Vordergrund stand die Implementierung der Containerpflicht für die Einführung des Farbsack-Trennsystems FSTS. Die Studie zeigte auf, dass durch die Einführung einer Containerpflicht mit dem FSTS-System und der damit verbundenen Reduktion der Fahrten von Privatpersonen es zu einer Reduktion der ökologischen Gesamtbelastung kommt. Die Einführung des FSTS-Systems lohnt sich ökologisch.

Im Jahr 2018 startete der Pilotversuch, damals mit dem Namen "SaCo – Sack im Container". Der Pilotversuch lief von September 2018 bis August 2019 über einen Zeitraum von einem Jahr und wurde durch uns vom Institut für Umwelt- und Verfahrenstechnik UMTEC von der Hochschule für Technik Rapperswil HSR wissenschaftlich begleitet. Das zentrale Element der wissenschaftlichen Begleitung war das Herausarbeiten von Unterschieden zwischen Wirk- und Ursprungszustand der separat gesammelten Fraktionen und den Sammelmengen betreffend der Zielstoffqualität. Basis hierfür war der Vergleich von Daten aus den Wirk- und den Nullversuchen auf den drei Ebenen "Sack", "Container" und "Vollstrom". Im Zuge dessen wurden verschiedene Analysekampagnen durchgeführt:

- Analyse der Kehrriechtsäcke: Zusammensetzung
  - Nullversuch vor der Pilotphase
  - 3 Wirkversuche während der Pilotphase
- Analyse der Farbsäcke: Zusammensetzung und Wertstoffqualität
  - 4 Wirkversuche während der Pilotphase, davon 3 Einzelsackanalysen
- Analyse der Container: Verteilung & Zustand der Säcke, Erfassen von losem Material
  - 3 Analysen während der Pilotphase
- Beprobung von 3 Quartierentsorgungsstellen: Wertstoffqualität
- Analyse von Brennpunkt-Container (unsachgemäss befüllt, viel Fremdmaterial)
- Analyse der Restfraktion

Hauptziel der wissenschaftlichen Begleitung bestand darin, aufzuzeigen, ob sich das Farbsack-Trennsystem als Recyclinglösung bewährt und eine stadtweite Einführung empfohlen werden kann.

Im Rahmen des FSTS-Pilots wurden Liegenschaften in der Stadt Bern aus zwei von drei Abfuhrkreisen (Kreis A und Kreis B) ausgewählt. Der Pilotversuch startete im September 2018 mit zwei

verschiedenen Varianten, Pilot 1 und Pilot 2. Bei dem Pilot 1 standen der Bevölkerung zwei verschiedene Container zur Verfügung, einer für Kehrichtsäcke und einer für FSTS-Säcke. Der Pilot 1 wurde im Abfuhrkreis A durchgeführt. Beim Pilot 2 wurden beide Sackarten, Kehrichtsäcke und FSTS-Säcke in den gleichen Container entsorgt (Kreis B). Die beiden Varianten sind in Abb. 1.2 dargestellt. Pilot 2 wurde im Februar 2019 eingestellt, weil die zum Teil feuchten Kehrichtsäcke das Papier zu stark verschmutzten und durchnässten. Die Pilotphase wurde für beide Abfuhrkreise mit dem Modell des Pilot 1 wie geplant bis im August 2019 weitergeführt.

Eine weitere Änderung des Versuchsdesigns des FSTS-Piloten betraf die Papiersammlung. Das Papier wurde in der Endphase lose, zusammen mit den anderen vier verbleibenden Farbsäcken in den FSTS-Containern gesammelt.

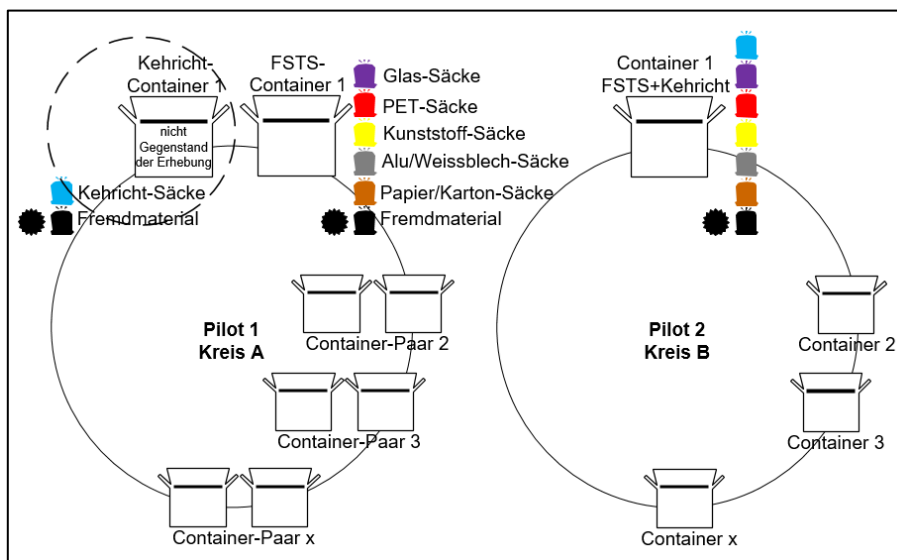


Abb. 1.2: Illustration von Pilot 1 (2 getrennte Container für Kehricht- und FSTS-Säcke) und 2 (ein Container für beide Sackarten).

### 1.3 Zielsetzung und Leistungsumfang

Um die ökologische Wirkung des Farbsack-Trennsystems abzuschätzen, soll eine Ökobilanz erstellt werden. Vor dem Pilotversuch hat die Firma "Sustainable System Solutions" bereits eine umfassende Ökobilanz für das Farbsack-Trennsystem erstellt – dies jedoch basierend auf damaligen Erkenntnissen und Annahmen aus dem Jahr 2014. Mit den von ERB und UMTEC während den Wirkversuchen an Sack-, Container- sowie Quartierentsorgungsstellen-Analysen gesammelten Daten, soll die bestehende Ökobilanz aktualisiert werden. Neben der Aktualisierung der bestehenden Ökobilanz soll zusätzlich ermittelt werden, ob es aus ökologischer Sicht sinnvoller ist die gesammelten Flaschen zu Schaumglas zu verarbeiten oder zu neuen Flaschen zu rezyklieren.

Der Leistungsumfang ist in folgende vier Arbeitsschritte gegliedert.

**1. Extraktion der Rohdaten aus der bestehenden Ökobilanz**

Die von der Firma "Sustainable System Solutions GmbH" erstellte Ökobilanz stellt die Ausgangslage der angedachten Aktualisierung dar. In einem ersten Schritt werden die Daten aus der vorhandenen Studie extrahiert und als Gerüst für die Aktualisierung verwendet.

**2. Konsolidierung der durch ERB und UMTEC erhobenen Daten und Aktualisierung der Ökobilanz**

Im Rahmen des Nullversuchs und der Wirkversuche der Farbsackbeprobungen, sowie der Container- und Quartierentsorgungsstellen-Analysen, wurden grosse Datenmengen erhoben. Diese gilt es nun zu konsolidieren und in das bestehende Gerüst der Ökobilanz einzubauen.

**3. Berechnung der Ökobilanz Altglas "Schaumglas vs. Flasche"**

Neben der Aktualisierung der bestehenden Ökobilanz soll die ökologische Wirkung der Verwertung von Altglas zu Schaumglas, sowie die Verwertung von Altglas zu neuen Glasflaschen, bestimmt und miteinander verglichen werden.

**4. Zusammentragen der Resultate und Verfassen eines kurzen Berichtes**

Die Dokumentation der Aktualisierung der Ökobilanz sowie des Vergleichs der Altglasverwertung erfolgt in Form des vorliegenden Berichtes.

## 1.4 Grundlagen zur Ökobilanz

### 1.4.1 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 14.040/44 [2] & [3] umfasst eine Ökobilanz die folgenden Schritte:

- Festlegen der Zielsetzungen und Systemgrenzen (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 Massnahmen (Optimierung)

Wie Abb. 1-2 zeigt, ist dies kein linearer Prozess, sondern ein interaktiver Erkenntnis- und Optimierungsprozess.

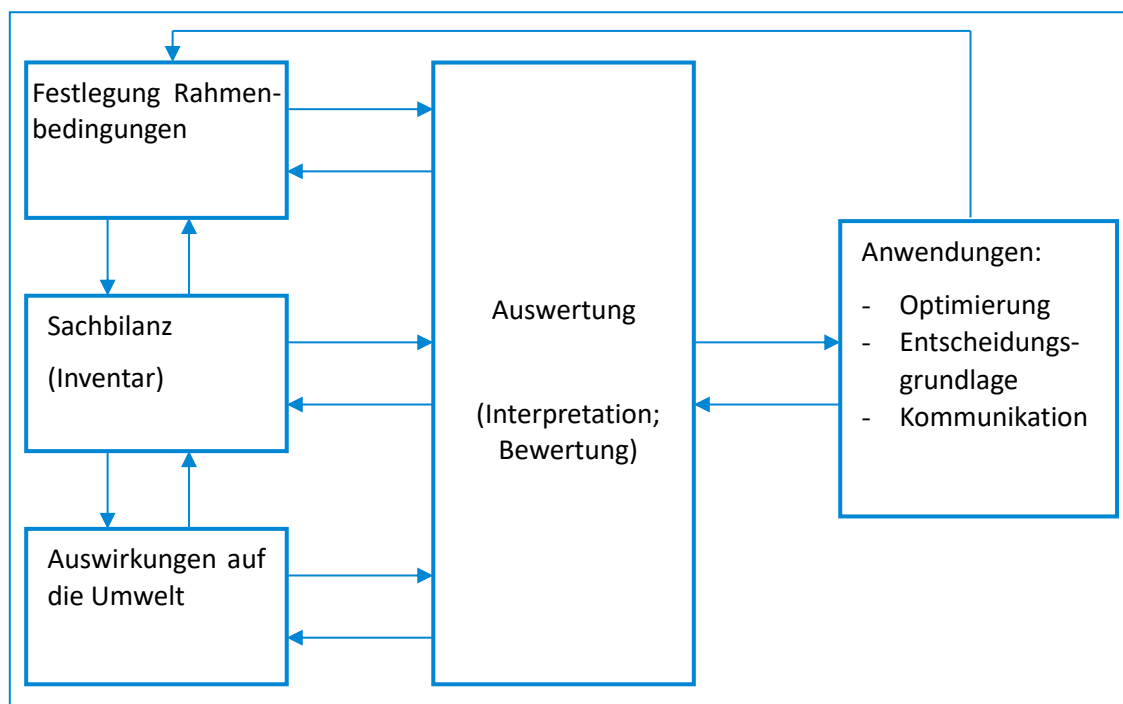


Abb. 1-2: Schritte einer Ökobilanz nach ISO 14.040ff.



Die Lebenszyklusanalyse oder Ökobilanz ist eine umfassende und aussagekräftige Methode, um die Umweltauswirkungen von Produkten und Systemen zu beurteilen<sup>1</sup>. Die Umweltwirkung im Rahmen dieses Projekts wurde daher durch eine Ökobilanz (Life Cycle Assessment, LCA) modelliert. Dabei richtete sich das Vorgehen im Wesentlichen an die Norm ISO 14.040/44 Norm [2] [3]. Bezüglich der Verwendung von gesamtaggregierenden Bewertungsmethoden, wie dies die Umweltbelastungspunkte (UBP) sind, geht die Studie über die Norm hinaus.

#### 1.4.2 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.

#### 1.4.3 Funktionale Einheit

Die funktionale Einheit (Vergleichsbasis) wurde spezifisch je Umweltmassnahme definiert.

#### 1.4.4 Systemgrenzen

##### *Inhaltliche Systemgrenze*

In das System der Ökobilanz werden alle als relevant betrachteten Stoff- und Energieflüsse der betrachteten Umweltmassnahmen inkl. vor- und nachgelagerte Prozesse („cradle to grave“) mit einbezogen.

Dabei wurde folgendes berücksichtigt:

- Sämtliche Transporte zu Behandlungs- und Aufbereitungswerke werden berücksichtigt.
- Deponieemissionen: Es werden die kumulierten Langzeitemissionen über eine Zeitdauer von 60.000 Jahren (bis zur nächsten Eiszeit und die Deponie damit ganz zerstört wird) betrachtet. Sämtliche Informationen und Modellierungsannahmen stammen aus [4] und [5].
- Ökoinventardaten für die Schweiz werden bevorzugt verwendet.

##### *Zeitliche Systemgrenze*

Da es sich bei dem untersuchten Abfallwirtschaftssystem um kurzlebige Produkte handelt, wurde als zeitliche Systemgrenze die aktuelle Situation im 2018/2019 betrachtet. Dies bedeutet einerseits, dass für alle Vordergrunddaten aktuelle Daten aus dem Jahr 2018 resp. 2017 verwendet wurden.

---

<sup>1</sup> Zur Erfassung der Umweltwirkung eines Produkts oder System gehört die Berechnung des Verbrauchs an Energie und Ressourcen sowie die Quantifizierung der verursachten Emissionen (z.B. CO<sub>2</sub>). Im Rahmen der Ökobilanz werden diese Einflussgrößen normiert und dadurch auf einen „gemeinsamen Nenner“ gebracht, z.B. Umweltbelastungspunkte UBPs.



#### 1.4.5 Sachbilanz

In der Sachbilanz wird ein Modell für das zu bilanzierende Produktsystem entworfen und es 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, Transporte oder Verwertungs-, beziehungsweise Entsorgungssysteme
- Die Beziehungen eines Prozesses mit seiner natürlichen Umwelt der Ökosphäre, wie z. B. Bedarf an Ressourcen (fossile Energieträger, Landressourcen etc.) und Emissionen, wie z. B. CO<sub>2</sub>, VOC, Methan, Stickoxide u. a.

Die Sachbilanz wurde mit der Ökobilanz-Software SimaPro V8.5 [6] berechnet und für die Wirkbilanz verwendet. Als Datengrundlage für vorgelagerte Prozesse wurde auf Standarddaten aus ecoinvent V3.4 [7] oder eigene Prozesse zurückgegriffen.

#### Datengrundlagen

- Emissionen wurden basierend HBEFA (Handbuch Emissionsfaktoren für Strassenverkehr) für die Sammeltransporte mit „Stop-and-Go“-Betrieb modelliert [8].

#### 1.4.6 Wirkbilanz

In diesem Schritt wird die Sachbilanz bezüglich den Auswirkungen auf die Umwelt bewertet. 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.

Es wurden verschiedene Wirkungen berechnet, jedoch nur die folgenden Wirkungen bzw. Aspekte separat ausgewiesen:

#### Treibhauspotential (THP)

Einfluss auf das Klima infolge der Emission von klimawirksamen Stoffen wie Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>), Lachgas (N<sub>2</sub>O) oder Methan (CH<sub>4</sub>). Diese Auswirkung wird gemäss IPCC aus dem Jahr 2013 berechnet und in diesem Bericht ausgewiesen [9].

Indikatoren der Wirkungsbilanz wie z.B. das Treibhauspotential oder der kumulierte Energieaufwand (KEA), decken jeweils nur einen Teilbereich der gesamten Umweltauswirkungen ab. Erst die Berücksichtigung der verschiedenen Auswirkungen gibt jedoch ein umfassendes Bild der ökologischen Auswirkungen. Die Berechnung dieser Indikatoren basiert auf wissenschaftlichen





Modellen, daher haben diese Indikatoren, auch wenn sie nur einen Teil der Wirkungen abbilden, eine hohe Akzeptanz.

Ein Interpretationsproblem besteht dann, wenn die verschiedenen Auswirkungen unterschiedliche Schlüsse zulassen. So kann zum Beispiel ein untersuchtes Produkt wesentlich geringere Auswirkungen auf das Klima haben als ein anderes, jedoch viel grössere Auswirkungen auf die Gewässer und es stellt sich die Frage, was bei den untersuchten Produkten oder Systemen entscheidend ist. Problematisch dabei ist, dass die Ergebnisse der verschiedenen Wirkkategorien nicht direkt miteinander verglichen werden können. Einerseits sind die Einheiten und damit die Dimensionen unterschiedlich und andererseits wird keine Aussage gemacht, wie problematisch die betreffende Wirkung relativ zur anderen ist.

Um schlussendlich einen eindimensionalen und aussagekräftigen Wert der Umweltwirkung zu erhalten, wird die Wirkungsbilanz mit einer vollaggregierten Methode durchgeführt. Als vollaggregierte Wirkungsbilanzmethode wurde „die Methode der ökologischen Knappheit 2013“ berücksichtigt. Zusätzlich wurde als Plausibilitätscheck die Wirkungskategorie „Treibhauspotenzial“, auch als „CO<sub>2</sub>-Äquivalente“ bekannt, betrachtet. Die Methode der ökologischen Knappheit erwies sich in EconEcol [10] als die geeignetste, da sie gesellschaftspolitische Ziele der Schweiz in der Gewichtung miteinbezieht und somit repräsentativ ist für die Politik in der Schweiz. Zudem wurde dieser Methode vom Bundesamt für Umwelt (BAFU) eine Schlüsselrolle im Bereich der Entscheidungsunterstützung für umweltrelevante Fragestellungen zugeordnet [11]. Da sich die Schweiz in der Umweltgesetzgebung nicht vollumfänglich von den deutschen Umweltschutzziele unterscheidet, wurde diese Methode als erste Näherung auch in diesem Projekt verwendet.

Da die Bewertung der verschiedenen Umweltauswirkungen von Wertmassstäben abhängig ist, werden diese gesamttaggregierenden Methoden teilweise abgelehnt, z. B. auch von der ISO Norm 14.044 für Vergleiche, welche für die Öffentlichkeit bestimmt sind. 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. Die Betrachtung der einzelnen Wirkkategorien kann durchaus hilfreich sein, z. B. zur Ermittlung der Ursachen von spezifischen Auswirkungen und Erarbeitung von möglichen Optimierungspotentialen. Als Entscheidungsgrundlage oder für die Betrachtung der gesamten Umweltauswirkungen dürfen jedoch nicht einzelne Umweltaspekte ausgeklammert werden. Dafür sind gesamt aggregierende Bewertungsmethoden nicht nur hilfreich sondern notwendig [12]. Betreffend der Verwendung der gesamttaggregierenden Methoden richtet sich die vorliegende Studie nicht nach der ISO Norm 14.040, sondern geht über diese hinaus. Die Verwendung verschiedener Bewertungsmethoden erlaubt es, die Aussagekraft der Resultate abzusichern.

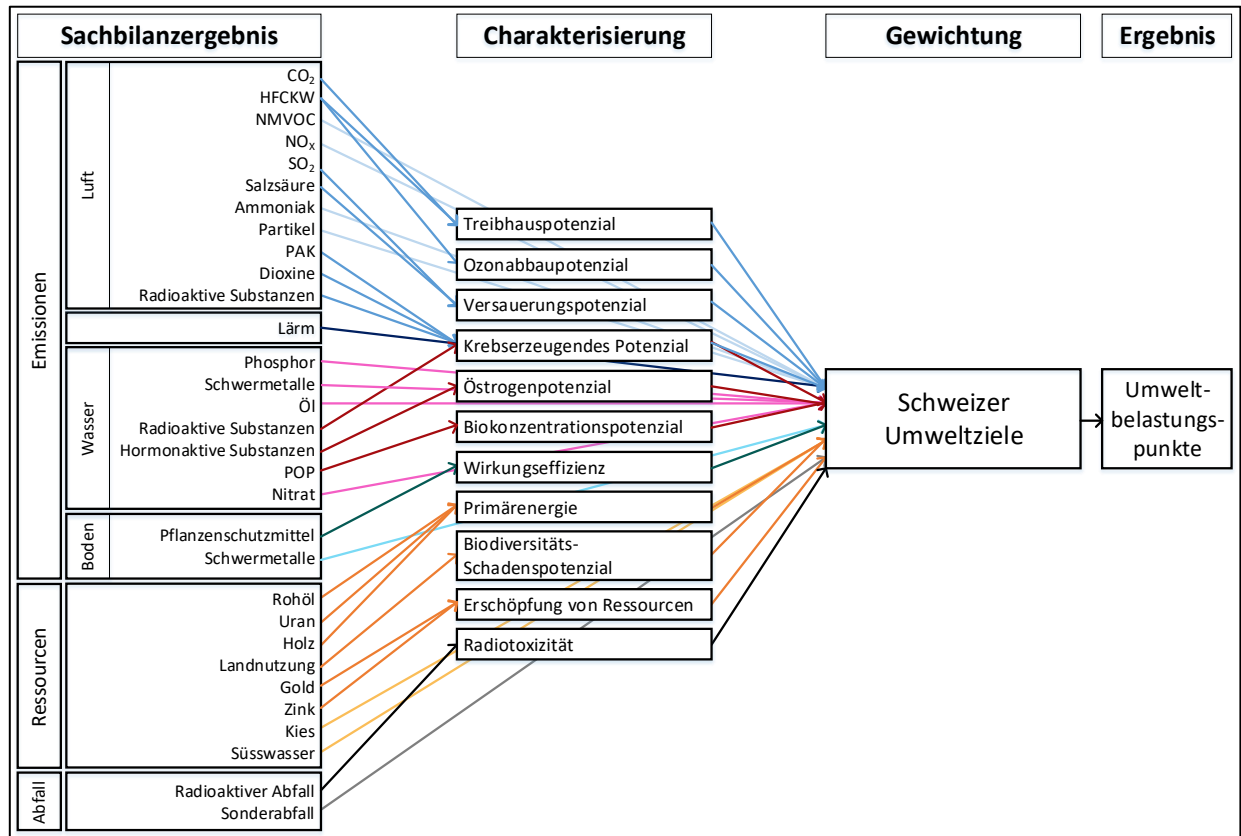


Abb. 1-3: Ablauf der Bewertung bei der Ökobilanzierung. Quelle: BAFU

### Methode der ökologischen Knappheit 2013 (Umweltbelastungspunkte – UBP)

Diese Methode 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. Diese Ökobilanzierungsmethode beruht auf dem Vergleich der aktuellen Belastung der Umwelt (aktueller Fluss, „Ist-Menge“) mit der gesellschaftspolitisch als zulässig angesehen Belastung (kritischer Fluss, „Toleranzmenge“). Das Verhältnis von aktuellem zu kritischem Fluss resp. der „Ist-Menge“ zur „Toleranzmenge“ wird als ökologische Knappheit bezeichnet. Diese Methode wird auch Umweltbelastungspunkte-Methode (kurz UBP-Methode) genannt. Denn diese Ökobilanzierungsmethode berücksichtigt eine grosse Anzahl an Wirkungskategorien, welche anhand einer Gewichtung, basierend auf politischen Zielen der Schweizer Umweltgesetzgebung abgestützt, ein gesamttaggregiertes eindimensionales Ergebnis in der Einheit UBP liefert. Sie wurde im Auftrag des BAFU erarbeitet und gilt auch besonders hilfreich als Entscheidungsgrundlage in verschiedenen Geschäftsbereichen privatwirtschaftlicher Unternehmen. In diesem Projekt wurde die Version 2013 [13] als Hauptbewertungsmethode verwendet. Ein Vorteil dieser Methode liegt in der Erfassung des Effekts von Schadstoffemissionen in die Umwelt. In der Schweiz gilt die "UBP-Methode" als Standard.





**HSR**

HOCHSCHULE FÜR TECHNIK  
RAPPERSWIL

FHO Fachhochschule Ostschweiz

### Treibhauspotenzial CO<sub>2</sub>-Äquivalente

Diese Umweltwirkungskategorie berücksichtigt vor allem klimaschutzrelevante Emissionen eines Produktes oder Prozesses über den gesamten Lebenszyklus. Die Bewertung wird anhand eines Charakterisierungsfaktors in kg CO<sub>2</sub>-Äquivalente vorgenommen. Diese Methode wird im angrenzenden Ausland häufig verwendet. Schadstoffemissionen lassen sich mit dieser Methode nur ungenügend abbilden [14].



**UMTEC**

INSTITUT FÜR UMWELT- UND  
VERFAHRENSTECHNIK

## 2 Material und Methoden

### 2.1 Definition der Szenarien

Nachfolgend werden die drei untersuchten Szenarien und deren für diese Analyse relevanten Aspekte beschrieben:

#### **Referenzszenario: Abfallentsorgung 2018**

Das Referenzszenario beschreibt den Zustand der Abfallsammlung im Jahr 2018. Dabei wird der Abfall wie folgt gesammelt:

- **Abholung am Strassenrand:**

Die Fraktionen Hauskehricht sowie Papier/Karton werden mittels Kehrichtsammel-fahrzeugen am Strassenrand abgeholt. Hauskehricht wird offen oder in Containern (240l bis 770 l OF-Container bzw. 5 m<sup>3</sup> UF-Container) gesammelt und direkt zur KVA transportiert. Papier/Karton wird in Bündeln oder lose und ebenfalls in Containern am Strassenrand bereitgestellt und direkt zur AlpaBern AG in Bern transportiert. Grüngut wird ebenfalls ab Strassenrand gesammelt. Durch die Einführung des FSTS käme es zu keiner Änderung der Grünabfuhr, weshalb diese in der vorliegenden Studie nicht berücksichtigt wird.
- **Sammlung auf Wertstoffsammelstellen:**

Im Einzugsgebiet von ERB stehen insgesamt 46 Sammelstellen für Wertstoffe zur Verfügung. Es werden Büchsen/Aluminium, PET, Papier/Karton und Glas mit UF- & OF-Containern gesammelt. Die Wertstoffe werden von der Bevölkerung zu den Sammelstellen transportiert. Mit LKWs werden die Wertstoffe den verschiedenen Verwertern zugeführt.
- **Sammlung auf Entsorgungshöfen:**

Auf insgesamt zwei Entsorgungshöfen (seit Oktober 2015) werden die Fraktionen Büchsen/Aluminium, PET und Kunststoffhohlkörper in 1 m<sup>3</sup> Paloxen (EH Fellerstrasse) oder in UF-Containern mit 5 m<sup>3</sup> Volumen (EH Schermen), sowie Papier/Karton in 36 m<sup>3</sup> Mulden gesammelt. Die Wertstoffe werden von den Entsorgungshöfen direkt zu den verschiedenen Verwertern transportiert.
- **Sammlung von PET und übriger Kunststoffe:**

PET- und Kunststoffhohlkörper können bei diversen Detailhändler sowie an unzähligen weiteren Standorten abgegeben werden (für die Simulationen wird nur die Sammlung via Detailhändler berücksichtigt). Der Transport zu den Verwertern wird mittels Lastkraftwagen simuliert. Die Angaben basieren auf Daten des Migros-Genossenschafts-Bundes.

**Alternativszenario "WS80": 80% FSTS, 20% Sammelstelle**

Das Alternativszenario "WS80" beinhaltet das Farbsack-Trennsystem FSTS. Das Farbsack-Trennsystem FSTS erlaubt die gemeinsame Sammlung mehrerer Wertstofffraktionen in einem Container. Der Kehrichtsack wird in einem separaten Container gesammelt um keine Verschmutzung der Wertstoffsäcke sicher zu stellen. Die einzelnen Fraktionen werden in unterschiedlich gefärbten Sammelsäcken gesammelt und danach in Sammelcontainer am Strassenrand bereitgestellt. Die folgenden Fraktionen werden im FSTS gesammelt: PET, übrige Kunststoffe, Büchsen/Aluminium, Papier/Karton und Glas. In diesem Szenario wird davon ausgegangen, dass 80% der Büchsen/Aluminium, PET und Glas via FSTS und 20% via Entsorgungshöfe, Detailhändler und Quartierentsorgungsstellen gesammelt werden. Nicht von der Aufteilung betroffen sind Papier/Karton und übrige Kunststoffe, da sie nur via FSTS gesammelt werden.

- Abholung am Strassenrand:

Der Hauskehricht sowie die FSTS-Fraktionen werden mittels Kehrichtsammel Fahrzeugen am Strassenrand abgeholt. Diese werden in Containern (240 l – 770 l OF-Container bzw. 5 m<sup>3</sup> UF-Container) gesammelt und direkt zur KVA bzw. zu einer optischen Sortieranlage transportiert. Nach einer optischen Sortierung der Wertstoffsammelsäcke werden die sortierten Fraktionen direkt mittels LKWs zu den einzelnen Verwertern transportiert. Grüngut wird ebenfalls ab Strassenrand gesammelt. Durch die Einführung des FSTS käme es zu keiner Änderung der Grünabfuhr, weshalb diese in der vorliegenden Studie nicht berücksichtigt wird.

- Sammlung auf Wertstoffsammelstellen:

Die Wertstoffsammelstellen bleiben bestehen, da Glas und Alu/Büchsen weiterhin auf Wertstoffsammelstellen gesammelt werden. Da bei den Unterflursammelstellen aber keine PET-Getränkeflaschen mehr gesammelt werden und das Papier und der Karton nur noch in den Farbsack-Behältern entsorgt werden dürfen, ist mit einer Abnahme der Entleerungsfahrten bei diesen Sammelstellen zu rechnen.

- Sammlung auf Entsorgungshöfen:

Auf insgesamt zwei Entsorgungshöfen (seit Oktober 2015) werden die Fraktionen Büchsen/Aluminium, PET und Kunststoffhohlkörper in 1 m<sup>3</sup> Paloxen (EH Fellnerstrasse) oder in UF-Containern mit 5 m<sup>3</sup> Volumen (EH Schermen), sowie Papier/Karton in 36 m<sup>3</sup> Mulden gesammelt. Die Sammelbehälter und Wertstoffmulden werden von den Entsorgungshöfen direkt zu den verschiedenen Verwertern transportiert.

- Sammlung von PET und Kunststoffhohlkörper bei Detailhändler:

PET und Kunststoffhohlkörper können weiterhin bei diversen Detailhändler sowie an unzähligen weiteren Standorten abgegeben werden (für die Simulationen wird nur die Sammlung via Detailhändler berücksichtigt). Der Transport zu den Verwertern wird mittels Lastkraftwagen simuliert. Die Angaben basieren auf Daten des Migros-Genossenschaftsbundes.



**Alternativszenario "WS20": 80% Sammelstelle, 20% FSTS**

Das Alternativszenario "WS20" beinhaltet das Farbsack-Trennsystem FSTS. Das Farbsack-Trennsystem FSTS erlaubt die gemeinsame Sammlung mehrerer Wertstofffraktionen in einem Container. Der Kehrichtsack wird in einem separaten Container gesammelt um keine Verschmutzung der Wertstoffsäcke zu gewährleisten. Die einzelnen Fraktionen werden in unterschiedlich gefärbten Sammelsäcken gesammelt und danach in Sammelcontainer am Strassenrand bereitgestellt. Die folgenden Fraktionen werden im FSTS gesammelt: PET, übrige Kunststoffe, Büchsen/Aluminium, Papier/Karton und Glas. In diesem Szenario wird davon ausgegangen, dass 80% der Büchsen/Aluminium, PET und Glas via Wertstoffsammelstellen/Entsorgungshöfe und lediglich 20% via FSTS gesammelt werden. Nicht von der Aufteilung betroffen sind Papier/Karton und übrige Kunststoffe, da sie nur via FSTS gesammelt werden.

- Abholung am Strassenrand:

Der Hauskehricht sowie die FSTS-Fraktionen werden mittels Kehrichtsammel Fahrzeugen am Strassenrand abgeholt. Diese werden in Containern (240 l bis 770 l OF-Container bzw. 5 m<sup>3</sup> UF-Container) gesammelt und direkt zur KVA bzw. zu einer optischen Sortieranlage transportiert. Nach einer optischen Sortierung der Wertstoffsammelsäcke werden die sortierten Fraktionen direkt mittels LKWs zu den einzelnen Verwertern transportiert. Grüngut wird ebenfalls ab Strassenrand gesammelt. Durch die Einführung des FSTS käme es zu keiner Änderung der Grünabfuhr, weshalb diese in der vorliegenden Studie nicht berücksichtigt wird.

- Sammlung auf Wertstoffsammelstellen:

Die Wertstoffsammelstellen bleiben bestehen, da Glas und Alu/Büchsen weiterhin auf Wertstoffsammelstellen gesammelt werden. Da bei den Unterflursammelstellen aber keine PET-Getränkeflaschen mehr gesammelt werden und das Papier und der Karton nur noch in den Farbsack-Behältern entsorgt werden dürfen, ist mit einer Abnahme der Entleerungsfahrten bei diesen Sammelstellen zu rechnen.

- Sammlung auf Entsorgungshöfen:

Auf insgesamt zwei Entsorgungshöfen (seit Oktober 2015) werden die Fraktionen Büchsen/Aluminium, PET und Kunststoffhohlkörper in 1 m<sup>3</sup> Paloxen (EH Fellnerstrasse) oder in UF-Containern mit 5 m<sup>3</sup> Volumen (EH Schermen), sowie Papier/Karton in 36 m<sup>3</sup> Mulden gesammelt. Die Sammelbehälter und Wertstoffmulden werden von den Entsorgungshöfen direkt zu den verschiedenen Verwertern transportiert.

- Sammlung von PET und Kunststoffhohlkörper bei Detailhändler:

PET und Kunststoffhohlkörper können weiterhin bei diversen Detailhändler sowie an unzähligen weiteren Standorten abgegeben werden (für die Simulationen wird nur die Sammlung via Detailhändler berücksichtigt). Der Transport zu den Verwertern wird mittels Lastkraftwagen simuliert. Die Angaben basieren auf Daten des Migros-Genossenschaftsbundes.



Nachfolgend sind die wichtigsten Eigenschaften der analysierten Varianten in Tabelle 2-1 zusammengefasst.

*Tabelle 2-1: Übersicht der Szenarien-Definitionen*

	Referenzszenario	Alternativszenario WS80	Alternativszenario WS20
Abholung am Strassenrand	Hauskehricht & Papier/Karton, Grünabfuhr	Hauskehricht & FSTS mit optischer Sortierung auf Sortieranlage, Grünabfuhr	Hauskehricht & FSTS mit optischer Sortierung auf Sortieranlage, Grünabfuhr
Sammlung auf Wertstoffsammelstellen	Büchsen/Aluminium, Glas, Papier/Karton & PET (in UF- und OF-Container)	Büchsen/Aluminium & Glas (in UF- und OF-Container)	Büchsen/Aluminium & Glas (in UF- und OF-Container)
Sammlung auf Entsorgungshöfen	Papier/Karton, Büchsen/Aluminium, PET, Kunststoffhohlkörper & Glas	Papier/Karton, Büchsen/Aluminium, PET, Kunststoffhohlkörper & Glas	Papier/Karton, Büchsen/Aluminium, PET, Kunststoffhohlkörper & Glas
Kunststoff-Sammlung bei Detailhändler	PET & Kunststoffhohlkörper	PET & Kunststoffhohlkörper	PET & Kunststoffhohlkörper

## 2.2 Funktionelle Einheit

Als funktionelle Einheit wird die Abfall- und Wertstoffsammlung der Haushalte der Stadt Bern über ein Jahr definiert.

## 2.3 Systemgrenze und Randbedingungen

Als geografische Systemgrenze wird das Einzugsgebiet von *Entsorgung + Recycling Bern* im Jahr 2018 definiert und alle damit verbundenen Anlagen und Prozesse. Eine Übersicht über das betrachtete System, die verschiedenen Anlagen, Prozesse und deren Systemgrenze ist in Abb. 2-1 zu sehen. In dieser Analyse werden alle Sammel- und Transportleistungen von ERB für die weiter unten definierten Fraktionen sowie alle Sammel- und Transportleistungen der Detailhändler für Kunststoffhohlkörper (inkl. PET) berücksichtigt. Dies beinhaltet alle notwendigen Transporte von den Haushalten bis zu den verschiedenen Verwertern bzw. zur KVA und die notwendigen Sammeleinrichtungen wie Container oder Sortieranlagen. Zusätzlich wird der Privattransport der Bürger und Bürgerinnen der Stadt Bern zu Wertstoffsammelstellen sowie zu den Entsorgungshöfen miteinbezogen. Nicht berücksichtigt werden alle Spezialdienstleistungen des ERB. Darunter fallen Dienstleistungen wie das ÖkoInfoMobil, Häckseldienst oder der Abholdienst für Grobsperrgut. Zudem werden alle übrigen Wertstoffabholdienste von Dritten (Bsp. Mr. Green) nicht berücksichtigt.

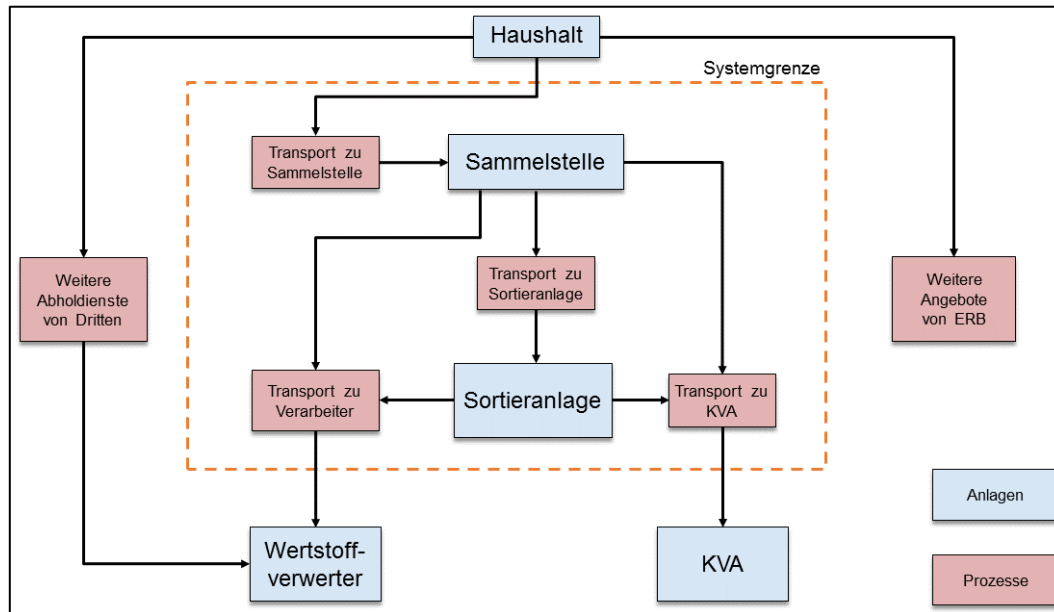


Abb. 2-1: Betrachtetes System und dessen Systemgrenze. Quelle: Sustainable System Solutions [15]. Der Begriff "Sammelstelle" beinhaltet neben den dezentralen Wertstoffsammelstellen ebenfalls die Container vor den Liegenschaften.

Die Resultate der ökologischen Analysen werden in Bezug auf die jährlich anfallende Menge an Abfall im Bezugsjahr 2018, die damalige Wohnbevölkerung und die daraus folgenden szenario-spezifischen Anlagen und Prozessen berechnet. Dabei werden alle eingesetzten Transportmittel und Anlagen wie Lastwagen und Sortieranlagen in Betracht gezogen.

In dieser Studie werden nur die ökologischen Auswirkungen der oben aufgeführten Szenarios unter der Annahme eines funktionierenden und implementierten Systems beurteilt. Die Einführungsphase bzw. die praktische Umsetzung der betrachteten Szenarios ist nicht Gegenstand der vorliegenden Studie.

Die Sammel- und Entsorgungswege, sowie die dazugehörige technische Infrastruktur, werden in der vorliegenden Studie als gegeben vorausgesetzt.

**Wichtig:** Der Einfluss der betrachteten Sammelszenarios auf die Qualität der gesammelten Wertstoffe sowie deren Verwertung wird in dieser Studie nicht beurteilt. Im Rahmen der wissenschaftlichen Begleitung des Pilotversuchs des FSTS haben FSTS-Sackanalysen zur Bestimmung des Wertstoffgehalts gezeigt, dass die Wertstoffqualität und der Fremdstoffanteil vergleichbar ist mit herkömmlichen Wertstoffsammelstellen. Unsere Analysen zeigten einen nur leicht höheren Wertstoffanteil an als in den untersuchten Quartierentsorgungsstellen. Es muss allerdings beachtet werden, dass die angegebenen Werte für die Zielstoffqualität des Farbsack-Trennsystems nur bedingt auf die ganze Stadt übertragbar sind. Die Wahrscheinlichkeit ist hoch, dass überwiegend recyclingaffine Personen am Pilotversuch teilgenommen haben, was zu einer Verzerrung der Stichprobe führen kann.

Ebenfalls nicht betrachtet wird der Einfluss auf das Brennmaterial (Veränderung des Heizwertes aufgrund der Separatsammlung verschiedener Wertstoffe) und dessen Auswirkungen auf die KVA.



## 2.4 Betrachtete Fraktionen

Die folgenden Fraktionen werden in den nachfolgend beschriebenen Szenarios berücksichtigt:

- Hauskehricht
- Büchsen / Aluminium
- PET (Hohlkörper aus PET)
- Übrige Kunststoffe
- Papier / Karton
- Glas

In Absprache mit dem Auftraggeber werden im Gegensatz zur vorgehenden Ökobilanz von der Firma "Sustainable System Solutions GmbH" folgende Abfallfraktionen nicht berücksichtigt:

- Getränkekarton → kein Zielstoff im Farbsack-Trennsystem, gehören in den Kehrichtsack.
- Textilien → kein Zielstoff im Farbsack-Trennsystem, werden durch private Organisationen an verschiedenen Standorten in der Stadt Bern und bei Strassensammlungen gesammelt.

Weitere Spezifikationen zu den verschiedenen berücksichtigten Fraktionen sind in Tabelle 8-1 im Anhang aufgeführt.

## 2.5 Mengen, Distanzen und weitere Daten

### 2.5.1 Einwohnerzahlen

Die verwendeten Einwohnerzahlen können der Tabelle 2-2 entnommen werden.

*Tabelle 2-2: Einwohnerzahlen der Stadt Bern gemäss ERB*

	Anzahl
Einwohner gesamt	142'493
Einwohner pro Haushalt	1.86

### 2.5.2 Sammelmengen

Die verwendeten Abfallsammelmengen sind direkt Datenblätter von ERB sowie den Berichten [1] und [15] entnommen. Die verwendeten Abfallsammelmengen für die verschiedenen Varianten können der Tabelle 2-3 entnommen werden.

Tabelle 2-3: Übersicht Abfallsammelmengen für die verschiedenen Szenarien in Tonnen pro Jahr.

	Fraktionen	Referenz 2018	Alternative WS80	Alternative WS20
<b>Gewerbe</b>	Kehricht	9'400	9'400	9'400
	Papier / Karton	1'932	1'932	1'932
<b>Abholung am Strassenrand</b>	Haushaltkehricht	17'200	16'020	16'020
	Papier / Karton	6'262	8'163	8'163
	FSTS:			
	Büchsen/Aluminium	0	158	40
	Übrige Kunststoffe	0	564	564
	PET	0	325	283
	Glas	0	2'614	653
<b>Sammlung auf Wertstoffsam- melstellen</b>	Kehricht	814	1'358	1'358
	Papier / Karton	2'504	766	766
	Büchsen / Aluminium	254	96	214
	Übrige Kunststoffe	0	72	72
	PET	319	42	37
	Glas	3'828	1'214	3'175
<b>Sammlung auf verbleibenden Wertstoffsammel- stellen (Westside, Fellerstr., Coop B &amp; H)</b>	Papier / Karton	87	87	87
	Büchsen / Aluminium	32	32	32
	Übrige Kunststoffe	0	0	0
	PET	56	56	56
	Glas	536	536	523
<b>Sammlung auf Entsorgungshöfen</b>	Papier / Karton	1'630	1'467	1'467
	Büchsen / Aluminium	968	968	968
	Übrige Kunststoffe	7	7	7
	PET	2	2	2
	Glas	0	0	0
<b>Sammelstellen Dritter (Detailhan- del)</b>	Papier / Karton	0	0	0
	Büchsen / Aluminium	0	0	0
	Übrige Kunststoffe	178	178	178
	PET	473	425	472
	Glas	0	0	0
<b>Total</b>	Haushaltkehricht	27'414	26'778	26'778
	Papier / Karton	12'415	12'415	12'415
	Büchsen / Aluminium	1'254	1'254	1'254
	Übrige Kunststoffe	185	821	821
	PET	850	850	850
	Glas	4'364	4'364	4'364
	<b>Total</b>	<b>46'482</b>	<b>46'482</b>	<b>46'482</b>



### 2.5.3 Sammelquoten

Die Sammelquoten für die Szenarien werden anhand der Abfallsammelmengen berechnet. Dabei wird der Anteil einer Fraktion, welcher separat gesammelt wird, der Gesamtmenge dieser Fraktion (Separatsammlung + Menge in Hauskehricht) gegenübergestellt. Die Zusammensetzung des Hauskehrichts wurde der Erhebung des Bundes aus dem Jahr 2012 entnommen [16].

Eine Übersicht der Sammelquoten der verschiedenen Fraktionen ist in Tabelle 2-4 zu sehen.

*Tabelle 2-4: Sammelquoten der verschiedenen Wertstoffe. In der Tabelle werden die prozentualen Verteilung der einzelnen Fraktionen aufgeteilt nach Sammelart dargestellt.*

	<b>Fraktionen</b>	<b>Referenz 2018</b> [Gew.-%]	<b>Alternative WS80</b> [Gew.-%]	<b>Alternative WS20</b> [Gew.-%]
<b>Hauskehricht</b>	Papier / Karton	24.7	24.7	24.7
	Büchsen / Alu	32.5	32.5	32.5
	übrige Kunststoffe	95.1	78.4	78.4
	PET	14.1	14.1	14.1
	Glas	18.0	18.0	18.0
<b>Abholung am Strassenrand</b>	Papier / Karton	61.0	58.8	58.8
	Büchsen / Alu	0.0	8.5	2.2
	übrige Kunststoffe	0.0	14.8	14.8
	PET	0.0	32.9	28.7
	Glas	0.0	49.1	12.3
<b>Sammlung auf Entsorgungshöfen</b>	Papier / Karton	9.5	8.6	8.6
	Büchsen / Alu	52.1	52.1	52.1
	übrige Kunststoffe	0.2	0.2	0.2
	PET	0.0	0.0	0.0
	Glas	0.0	0.0	0.0
<b>Sammlung auf Wertstoffsammelstellen</b>	Papier / Karton	4.7	7.9	7.9
	Büchsen / Alu	15.4	6.9	13.2
	übrige Kunststoffe	0.0	1.9	1.9
	PET	38.0	9.9	9.4
	Glas	82.0	32.9	69.7
<b>Sammlung von Dritten</b>	Papier / Karton	0.0	0.0	0.0
	Büchsen / Alu	0.0	0.0	0.0
	übrige Kunststoffe	4.7	4.7	4.7
	PET	47.9	43.1	47.8
	Glas	0.0	0.0	0.0



## 2.6 Sammelstellen

Im Jahr 2018 bestehen insgesamt 196 UF-Container an Wertstoffsammelstellen und Quartierentsorgungsstellen. Durch die Einführung des Farbsack-Trennsystems werden neu die bestehenden UF-Container an Wertstoffsammel- und Quartierentsorgungsstellen für die Farbsäcke reserviert. Allerdings bleibt eine grosse Wertstoffsammelstelle mit 8 UFC-Containern sowie 2 grosse Quartierentsorgungsstellen mit 18 UF-Containern wie gehabt ohne FSTS-Container bestehen. Somit werden von den 196 anfänglich verfügbaren UF-Containern insgesamt 26 UF-Container für bisherige Abfallfraktionen bestehen bleiben. Das macht  $196 - 26 \text{ UF-Container} = 170 \text{ UF-Container}$ . Neben dem FSTS soll den Bürgern und Bürgerinnen der Stadt Bern nach wie vor die Möglichkeit geboten werden, an je 2 UF-Containern je Wertstoffsammel- und Quartierentsorgungsstelle Glas und Büchsen/Alu entsorgen zu können. Bei 16 Wertstoffsammel- und Quartierentsorgungsstellen macht das 32 UF-Container, die nicht dem FSTS zur Verfügung stehen  $\rightarrow 170 \text{ UF-Container} - 32 \text{ UF-Container} = 138 \text{ UF-Container}$ . Um genügend FSTS-Container bei den Wertstoffsammel- und Quartierentsorgungsstellen zu haben werden an insgesamt 9 neuen Standorten 40 neue UF-Container bereitgestellt, was zu 178 UF-Container ( $138 + 40$ ) führt.

### Sammlung am Strassenrand

Für die Sammlung von Hauskehricht, Papier/Karton sowie der FSTS-Fraktionen am Strassenrand werden 240 l, 360 l sowie 770 l HDPE-Rollcontainer sowie 5 m<sup>3</sup> Unterflur-Container aus Stahl eingesetzt. Durch die Einführung der Containerpflicht im Alternativszenario "WS80" und "WS20" erhöht sich die benötigte Anzahl Container gegenüber dem Referenzszenario 2018.

Es wird angenommen, dass die HDPE-Rollcontainer nach 10 Jahren ersetzt werden müssen. Bei den UF-Containern wird eine Lebensdauer von 12 Jahren für den Sammelbehälter und eine Lebensdauer von 40 Jahren für die Konstruktion angenommen.

### Wertstoffsammelstelle

Die Sammlung von Wertstoffen auf Wertstoffsammelstellen findet mittels UF- und OF-Container statt. Die UF-Container werden mit einem durchschnittlichen Fassungsvermögen von durchschnittlich 5 m<sup>3</sup> und die OF-Container mit 3.5 m<sup>3</sup> (2.5 m<sup>3</sup> – 4.5 m<sup>3</sup>) simuliert.

Im Jahr 2018 (Referenzszenario) waren 12 Quartierentsorgungsstellen (QES) mit unterirdischen Sammelcontainern für die Sammlung der Fraktionen Glas, Büchsen/Aluminium, PET und Papier/Karton vorhanden. Zusätzlich waren 35 Wertstoffsammelstellen für die Sammlung der Fraktionen Glas und Büchsen/Aluminium im Einsatz. Vier dieser Wertstoffsammelstellen waren unterirdisch, alle übrigen oberirdisch. Durch die Reduktion der Anzahl gesammelten Fraktionen im Alternativszenario "WS80" und "WS20" nimmt auch die Anzahl der verwendeten Container leicht ab.

### Entsorgungshöfe

Auf den zwei Entsorgungshöfen stehen für die Sammlung von Papier/Karton, Büchsen/Alu, Kunststoffhohlkörper und Glas insgesamt 5 Mulden aus Stahl mit einem Fassungsvermögen von jeweils 36 m<sup>3</sup> zu Verfügung. Da die Mulden für die Sammlung von Büchsen/Alu fast ausschliesslich für die Sammlung von Altmetall genutzt werden, fliessen nur jeweils 3 Mulden für die Sammlung von Papier/Karton in die Simulation ein. Die Sammelcontainer der übrigen Fraktionen (5m<sup>3</sup> UF-Container & 1m<sup>3</sup> Metallpaloxen) werden durch 12 unterirdische Sammelcontainer

mit einem Sammelvolumen von 5 m<sup>3</sup> abgebildet. Die Entsorgungshöfe, mit einer Fläche von rund 6500 m<sup>2</sup>, werden als überdachte Entsorgungshöfe mit einer offenen Stahlkonstruktion simuliert.

### Sammlung von Dritten

Für die Sammlung von PET- & Kunststoffhohlkörper bei Detailhändler wird mit Angaben des Migros-Genossenschafts-Bundes gerechnet. Für die Modellierung der PET- & Kunststoffhohlkörpersammlung bei Detailhändler wurde mit einem Stahl-Rollcontainer von 800 l Fassungsvermögen gerechnet.

## 2.7 Anzahl Container je Szenario

Eine Übersicht der verwendeten Anzahl Container ist in Tabelle 2-5 zu sehen.

Tabelle 2-5: Übersicht der Anzahl verwendeten Container

Container	Standort	Referenz 2018 [Anz.]	Alternative WS80 [Anz.]	Alternative WS20 [Anz.]
240 l HDPE Container	Strassenrand	2'218	1'272	845
360 l HDPE Container	Strassenrand	1'890	1'312	929
770 l HDPE Container	Strassenrand	8'140	9'476	10'136
5 m <sup>3</sup> UF-Stahl-Container	Strassenrand	66	120	120
5 m <sup>3</sup> UF-Stahl-Container	Wertstoffsammelstellen	130	58	58
5 m <sup>3</sup> OF-Stahl-Container	Wertstoffsammelstellen	106	106	106
36 m <sup>3</sup> Stahl-Mulde	Entsorgungshöfe	3	3	3
5 m <sup>3</sup> UF-Stahl-Container	Entsorgungshöfe	12	12	12
800 l-Stahl Container	Detailhändler	8	10	41

## 2.8 Transportdistanzen

Um den Umweltauswirkungen einer heutigen Situation im Jahr 2019 gerecht zu werden, wurde angenommen, dass alle Sammelfahrzeuge dem EURO VI-Standard entsprechen. Daten zur Transportleistung der Kehrriechtsammelfahrzeuge sowie der Hakenfahrzeuge, welche zur Entleerung der UF-Container eingesetzt werden, wurden uns von ERB mitgeteilt und sind nachfolgend in Tabelle 2-6 aufgeführt. Weiter unten in Tabelle 2-8 ist eine Übersicht der in der vorliegenden Studien verwendeten Fahrleistung für alle Transporte: Holsammlung ERB (Kehrriechtsammelfahrzeuge, Hakenfahrzeuge), Wertstoffsammlung an Quartierentsorgungsstellen und Entsorgungshöfen, Transport der Wertstoffe von der Sortieranlage zu den Verwertern sowie der Privattransport der Bürgerinnen und Bürger der Stadt Bern zu den Wertstoffsammelstellen und Entsorgungshöfen.

*Tabelle 2-6: Fahrleistung der Kehrichtsammelfahrzeuge und der 4-Achser Hakenfahrzeuge mit Kran, welche zur Wertstoffsammlung eingesetzt werden. Daten stammen von ERB.*

	Referenz 2018	Alternative WS80	Alternative WS20
Kehrichtsammelfahrzeuge Fahrleistung total [km/a]	140'500	123'300	123'100
Hakenfahrzeuge 4-Achser + Kran Fahrleistung total [km/a]	53'000	37'200	45'100

### Abholung am Strassenrand

Die Transportdistanzen für die Kehrichtsammlung mittels Kehrichtsammelfahrzeugen mit einem Sammelvolumen von 18 m<sup>3</sup> wurden mit Hilfe von aufgezeichneten Daten von ERB [17] aus dem Jahr 2018 simuliert. Für das Referenzszenario 2018 wird angenommen, dass die Kehrichtsammelfahrzeuge die verschiedenen Fraktionen gepresst transportieren. Für die Alternativszenarien wird hingegen angenommen, dass die Kehrichtsammelfahrzeuge die Farbsäcke ungepresst transportieren.

### Sammlung auf Wertstoffsammelstellen

Für die Sammlung der verschiedenen Wertstoffe auf den Wertstoffsammelstellen werden 4-achsige Hakenfahrzeuge mit einem Sammelvolumen von 36 m<sup>3</sup> eingesetzt. Es wird angenommen, dass die Wertstoffe in einem losen Zustand transportiert werden.

### Sammlung auf Entsorgungshöfen und Transport ab Sortieranlage

Der Transport der verschiedenen Wertstoffe, welche auf den Entsorgungshöfen gesammelt werden, findet mittels 4-achsigen Lastwagen mit einem Ladevolumen von 36 m<sup>3</sup> statt. Dieselben Annahmen treffen auch auf den Transport von der optischen Sortieranlage zu den Verwertungsunternehmen zu. Die detaillierten, angenommenen Distanzen zu den verschiedenen Verwertungsunternehmen können der Tabelle 8-2 im Anhang entnommen werden.

Es wird angenommen, dass diese Transporte der Wertstoffe in einem losen Zustand durchgeführt werden.

### Transport zu Sammelstellen und Entsorgungshöfen

Für die Modellierung der ökologischen Belastung des privaten Transports von separat gesammelten Siedlungsabfällen existieren keine Daten für die Stadt Bern. Deshalb wurden auf Daten des Berichts [18] zurückgegriffen. Dabei handelt es sich um eine Bachelorarbeit, die an der ETH Zürich durchgeführt und von uns mitbetreut wurde. Aus der Arbeit geht hervor, dass rund 50%

der Befragtenangaben, dass der Besuch bei einer Sammelstelle respektive bei einem Sammelhof mit weiteren Aktivitäten (Einkaufen, Arbeit etc.) verbunden wird. Durchschnittlich wird eine Strecke von 5km zum Sammelhof zurückgelegt, respektive 2km wenn der Besuch zum Sammelhof mit weiteren Aktivitäten verbunden wird. Diese Daten flossen in die vorliegende Studie mit ein und sind in Tabelle 2-7 aufgeführt.

Tabelle 2-7: Übersicht der Annahmen für Transporte von Privatpersonen

		Referenz 2018	Alternative WS80	Alternative WS20
Wertstoffsammelstellen	∅ Distanz ↔ [km]	0.5	0.5	0.5
	Besuche pro Woche & Haushalt [-]	1	0.2	0.8
	Anteil PKW-Fahrten [%]	43	43	43
Entsorgungshöfe	∅ Distanz ↔ [km]	7	7	7
	total Besucher pro Jahr [-]	256'428	228'701	228'701
	Anteil PKW-Fahrten [%]	87	87	87
Sammelstellen Detailhändler	∅ Distanz ↔ [km]	1	0.6	0.9
	Besuche pro Woche & Haushalt [-]	1	1	1
	Anteil PKW-Fahrten [%]	75.0	75.0	75.0

Die verwendeten Distanzen entsprechen den Distanzen, welche der Entsorgung der Wertstoffe angerechnet werden können. Sie entsprechen nicht den tatsächlich zurückgelegten Distanzen der Privatpersonen. Daten dazu stammen aus dem Bericht [18] und setzen sich in der vorliegenden Studie wie folgt zusammen:

- Wertstoffsammel- und Quartierentsorgungssammelstellen:
  - Distanz: Hin- und Rückweg beträgt gemäss ERB rund 1 km, da das Netz von Wertstoffsammelstellen sehr dicht ist. Hier gingen wir gemäss [19] davon aus, dass rund 50% ihrer Wertstoffe auf dem Weg zur Arbeit, auf dem Weg zum Einkauf etc. erledigen, weshalb wir  $50\% \times 1 \text{ km} = 0.5 \text{ km}$  Distanz kamen.
  - Besuche pro Woche und Haushalt: Berechnungen haben ergeben, dass pro Haushalt und pro Woche rund einmal eine Wertstoffsammelstelle aufgesucht wird. Wir nehmen an, dass durch die Umsetzung des FSTS im Szenario "WS80" 80% der Personen ihre Wertstoffe via FSTS entsorgen. Analog dazu entsorgen im Szenario "WS20" 20% der Personen ihre Wertstoffe via FSTS und die restlichen 80% nach wie vor bei Wertstoffsammelstellen
  - Anteil PKW-Fahrten: Gemäss [19] besitzen 43% der Stadt Berner Haushalte ein Auto, weshalb wir davon ausgegangen sind, dass die Personen die ein Auto besitzen es auch zur Entsorgung ihrer Wertstoffe verwenden werden. Dieser Wert wurde allerdings in einer Sensitivitätsanalyse runter gesetzt, siehe dazu Kap. 3.2.

- Entsorgungshöfe:
  - Distanz: Hin- und Rückweg ist gemäss ERB 10 km. Da 50% der Befragten in der Studie [18] angaben, den Besuch des Sammelhofes mit weiteren Aktivitäten zu verbinden, werden ihnen nur 2 km des Weges angerechnet. Die 2 km stammen ebenfalls aus der Studie [18]. Zusammen macht das dann  $50\% \times 10 \text{ km} + 2 \text{ km} = 7 \text{ km}$ . Gemäss Erhebungen von ERB aus dem Jahr 2018 sind rund 87% der Besuche mit dem Auto oder Kleinbus erfolgt.
  - Besucherzahl: Bei der Besucherzahl haben wir proportional zur prognostizierten Abfallmenge, die noch via Entsorgungshöfe entsorgt würde je Szenario eine Besucherzahlreduktion vorgenommen. Beim Alternativszenario WS80 wie auch WS20 führt das zu einer Reduktion von 11%. Auch hier haben wir in Kap. 3.2 eine Sensitivitätsbetrachtung vorgenommen für den Fall, dass sich die Besucherzahl nicht verändern würde durch die Einführung des FSTS.
- Detailhändlersammelstellen:
  - Distanz: Hin- und Rückweg wurde mit durchschnittlich 5 km abgeschätzt. Der Anteil, der der Entsorgung von Wertstoffen angerechnet werden kann, beträgt jedoch im Referenzszenario 2018 nur 1 km, also 20% der gesamten Strecke [18]. Im Alternativszenario "WS80" gingen wir davon aus, dass die 80%, die das FSTS nutzen, nur noch die Hälfte der Wertstoffe jeweils beim Einkaufen mitnehmen und beim Detailhändler entsorgen. Die restlichen 20%, die das FSTS nicht nutzen, bringen die unveränderte Menge, wie vor der Einführung des FSTS, beim Einkaufen zur Detailhändlersammelstelle. Die 80% FSTS-Nutzer, die nur noch die Hälfte der Wertstoffmenge im Vergleich zum Referenzszenario 2018 beim Detailhändler entsorgen, bekommen folglich auch nur noch die Hälfte der ökologisch angelasteten Wegstrecke pönalisiert. Die 20% nicht FSTS-Nutzer hingegen, bekommen nach wie vor die Strecke von 1 km ökologisch angelastet. Das bedeutet beim Referenzszenario werden die 1 km Strecke der Entsorgung der Wertstoffe ökologisch angelastet. Beim "WS80" hingegen wären es dann:  $80\% \times 0.5 \text{ km} + 20\% \times 1 \text{ km} = 0.6 \text{ km}$ . Analog zu diesen Überlegungen verhält sich die ökologisch negativ angerechnete Wegstrecke im Szenario "WS20":  $80\% \times 1 \text{ km} + 20\% \times 0.5 \text{ km} = 0.9 \text{ km}$ .
  - Besuch pro Woche und Haushalt: Wir gingen davon aus, dass jeder Haushalt einmal in der Woche zu einem Detailhändler einkaufen geht. Dabei werden

*Tabelle 2-8: Übersicht der von ERB angegebenen (Kehrichtsammelfahrzeuge und Hakenfahrzeuge) und von uns ermittelten (Transport Dritte, Transporte QES und Transport Private) Fahrleistung sowie der von uns ermittelten.*

Referenzszenario 2018	Kehrichtfahrzeuge / LKW	Hakenfahrzeuge	LKW mit Mulde 4 Achser	PW
Transporte Dritte	18'425 km			
Transporte Holsammlung ERB	140'500 km			
Transporte QES und Entsorgungshöfe		53'000 km	28'219 km	
Transporte Private				5'413'062 km

Alternativszenario WS80	Kehrichtfahrzeuge / LKW	Hakenfahrzeuge	LKW mit Mulde 4 Achser	PW
Transporte Dritte	12'839 km			
Transporte Holsammlung ERB	123'300 km			
Transporte QES und Entsorgungshöfe		37'200 km	24'820 km	
Transporte Private				3'360'406 km

Alternativszenario WS20	Kehrichtfahrzeuge / LKW	Hakenfahrzeuge	LKW mit Mulde 4 Achser	PW
Transporte Dritte	14'258 km			
Transporte Holsammlung ERB	123'100 km			
Transporte QES und Entsorgungshöfe		45'100 km	26'166 km	
Transporte Private				4'773'256 km

## 2.9 Sortieranlagen

Die unterschiedlich gefärbten Säcke der Fraktion *Farbsack-Trennsystem (FSTS)* werden mit Hilfe einer optischen Sortieranlage aussortiert. Aufgrund von fehlenden Daten zur Simulation einer optischen Sortieranlage wurde auf einen Datensatz vom UMTEC zurückgegriffen, der die optische Sortierung gut abbildet. Dabei wurde angenommen, dass die farbigen Säcke mittels mechanisch angetriebenen Klappen auf einem Förderband aussortiert werden. Dieser Datensatz repräsentiert demnach eine Sortieranlage mit hohem Automatisierungsgrad ohne händische Sortierung. Zudem wird angenommen, dass 100% der angelieferten Farbsäcke korrekt aussortiert werden und somit keine Mengenverluste bei der Sortierung auftreten.

## 3 Resultate und Diskussion

### 3.1 Ökobilanz FSTS

Abb. 3-1 zeigt die Umweltwirkung der Abfallverwertung aus Haushalten der Stadt Bern in Millionen Umweltbelastungspunkte "UBP" pro Jahr für die drei analysierten Szenarien. Das Referenzszenario schneidet ökologisch schlechter ab als die beiden Alternativszenarien. Das Alternativszenario WS80 spart 19% und das Alternativszenario WS20 1% gegenüber dem Referenzszenario 2018 ein. Neben der absoluten Höhe der ökologischen Auswirkung wurden die einzelnen Beiträge farblich dargestellt. Den Löwenanteil der Umweltbelastung trägt in allen drei Szenarien der Transport durch Privatpersonen. Der Transport durch Privatpersonen teilt sich in drei Beiträge auf: 1. Der Privattransport zu Detailhändlersammelstellen, 2. Privattransport zu Quartierentsorgungs- und Wertstoffsammelstellen und 3. Privattransport zu den Entsorgungshöfen. Der Anteil der drei Beiträge zum Privattransport verteilt sich im Verhältnis Detailhändlersammelstelle zu Quartierentsorgungs- und Wertstoffsammelstelle zu Entsorgungshöfen mit 50% : 20% : 30% auf. Den Beitrag des Privattransports zu Quartierentsorgungs- und Wertstoffsammelstellen ist der niedrigste, da die Distanzen zu den Sammelstellen sehr kurz ist im Gegensatz zu den Distanzen zu den Sammelstellen von Detailhändler und den Entsorgungshöfen. Der Beitrag für den Privattransport zu einer Detailhändlersammelstelle ist, obwohl wir nur einen sehr kleinen Teil der gefahrenen Strecke der Wertstoffentsorgung zugeordnet haben, sehr hoch.

Aufgrund des grossen ökologischen Beitrags des Privattransports an der Gesamtbilanz haben wir weiter unten in diesem Kapitel einige Sensitivitätsbetrachtungen für den Parameter "Privattransport" vorgenommen. Neben dem Privattransport schenkt auch die Infrastruktur ökologisch ein. Die Produktion und Bereitstellung der Container für das FSTS und die Unterflur-Container sowie auch die Bereitstellung und den Betrieb einer Sortieranlage. Ökologisch vernachlässigbar klein erscheint hingegen die Bereitstellung der Container Dritter sowie auch deren Transport der gesammelten Wertstoffe zum Rezyklist.

Kurzum gesagt: Der ökologische Nutzen des Alternativszenarios WS80 kommt hauptsächlich davon, dass ein Teil des privaten PW-Transports der Bürgerinnen und Bürger der Stadt Bern vermieden wird.

Zusätzlich haben wir auch den ökologischen Aufwand der Herstellung der Farbsäcke und Kehrichtsäcke je Szenario mitberücksichtigt, wobei je Farbsack / Kehrichtsack individuell der Anteil an Rezyklat sowie die Entsorgung/Verwertung in die Berechnung einfließen.

In dieser Studie wird die Monte Carlo-Simulation zur Unsicherheitsanalyse eingesetzt, welche direkt in der LCA Software SimaPro implementiert ist. Bei der Monte Carlo Simulation werden Eingabeparameter einer Ökobilanz anhand einer statistischen Verteilung variiert und die Ökobilanz wird neu berechnet. Der pro Iteration dadurch erhaltene Resultatwert wird zwischengespeichert. Danach wird die Ökobilanz erneut mit variierten Eingabeparameter gerechnet. Dies wird typischerweise einige 1'000mal durchgeführt. Je häufiger ein Resultat einen gewissen Zahlenwert ergibt, umso wahrscheinlicher ist dieser Wert. Mit andern Worten, die Monte Carlo-Simulation generiert Verteilungen von möglichen Ergebniswerten. In der vorliegenden Studie





wurde eine Monte Carlo-Simulation mit jeweils 10'000 Iterationen und einem Konfidenzintervall von 95% erstellt. Die Monte Carlo-Plots können im Anhang in Kap. 8.3 betrachtet werden. Das Ergebnis wird dann als Fehlerbereich in den Ökobilanz-Grafiken geplottet um eine vergleichende Aussage von den unterschiedlichen Szenarien besser abstützen zu können.

Mit Einbezug der Fehlerindikatoren, welche das 95%-Konfidenzintervall darstellen, lässt sich sagen, dass das Alternativszenario WS20 gegenüber dem Referenzszenario nicht ökologisch vorteilhaft abschneidet. Auch das Alternativszenario WS80 schneidet mit Einbezug der Unsicherheitsanalyse mit der UBP-Methode statistisch nicht signifikant besser ab als das Referenzszenario 2018, da die Fehlerindikatoren einen Überlappungsbereich aufweisen. Dennoch zeichnet sich ab, dass die Einführung des FSTS gegenüber dem aktuellen Stand respektive dem Referenzszenario 2018 einen Umweltnutzen erbringt und die Einführung des FSTS rund 15-20% der Umweltbelastung einspart.

Wird die Unsicherheitsanalyse beim Treibhauspotenzial ausgewertet, sieht man, dass dort das Alternativszenario WS80 ökologisch besser abschneidet, und dies statistisch signifikant. Denn da überlappen sich die Enden der Fehlerindikatoren nicht. Betrachtet man nur das Treibhauspotenzial, deutet die Umweltbilanz auf eine noch grössere Reduktion der Umweltbelastung beim Alternativszenario WS80 gegenüber dem Referenzszenario hin. Mit der CO<sub>2</sub>-Methode werden gemäss Umweltbilanz 23% eingespart, siehe Abb. 3-2.

Die kleineren Fehlerindikatoren respektive das kleinere 95%-Konfidenzintervall bei der CO<sub>2</sub>-Methode gegenüber der UBP-Methode lässt sich wie folgt erklären: Die UBP-Methode umfasst eine grosse Palette an verschiedenen Umweltauswirkungen, verursacht von Abfällen, Ressourcen- und Landverbrauch über Wasser- und Luftschadstoffe bis hin zum Treibhauspotenzial (Klimaerwärmung). Am Schluss wird das Resultat zu einem eindimensionalen Wert gesamt aggregiert.

Die CO<sub>2</sub>-Methode bildet jedoch nur ein Zoom in eine spezifische Umweltwirkungskategorie dar, nämlich in diejenige des Klimawandels bedingt durch das Treibhauspotenzial von Klimagasen. Die verschiedenen Klimagase werden dann anhand ihres Treibhauspotenzials mit Faktoren relativ zum Treibhauspotenzial ausgedrückt in Kilogramm CO<sub>2</sub>-Äquivalente.

Wird nun bei der UBP-Methode eine Unsicherheitsanalyse durchgeführt, sind die gesamten Unsicherheiten deutlich grösser, da viele verschiedene Umweltwirkungskategorien hineinfließen. Das Treibhauspotenzial ist sogar selbst eine der betrachteten Umweltwirkungskategorien der UBP-Methode. Für genauere Details zu den hier verwendeten Ökobilanzmethoden verweisen wir den interessierten Leser auf Kap. 1.4.

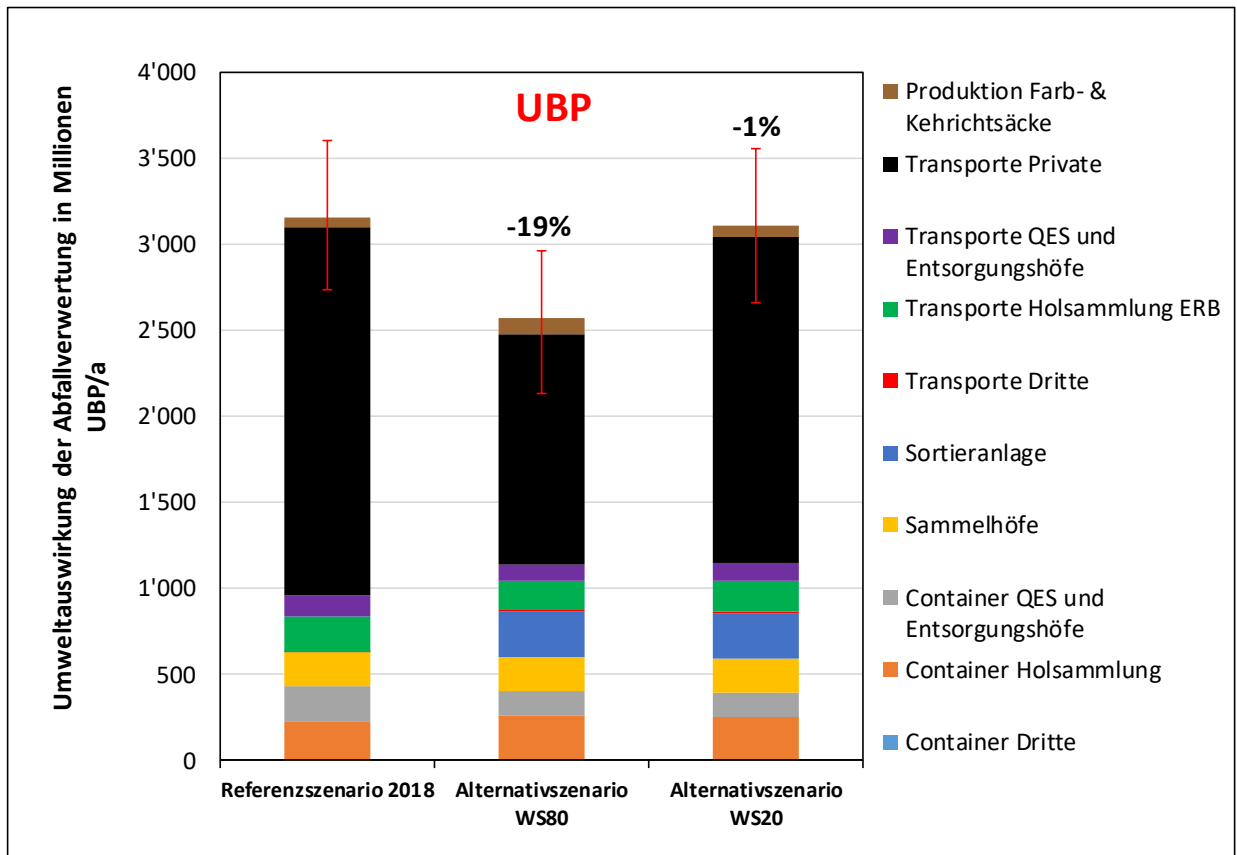


Abb. 3-1: Umweltwirkung der Abfallwertung aus Haushalten der Stadt Bern dargestellt in Millionen Umweltbelastungspunkte "UBP" pro Jahr und Szenario. Im Alternativszenario "WS80" können rund 19% eingespart werden. Im Alternativszenario "WS20" kann gegenüber dem Referenzszenario noch 1% eingespart werden. Die Roten Fehlerindikatoren geben das 95%-Konfidenzintervall der Unsicherheitsanalyse an.

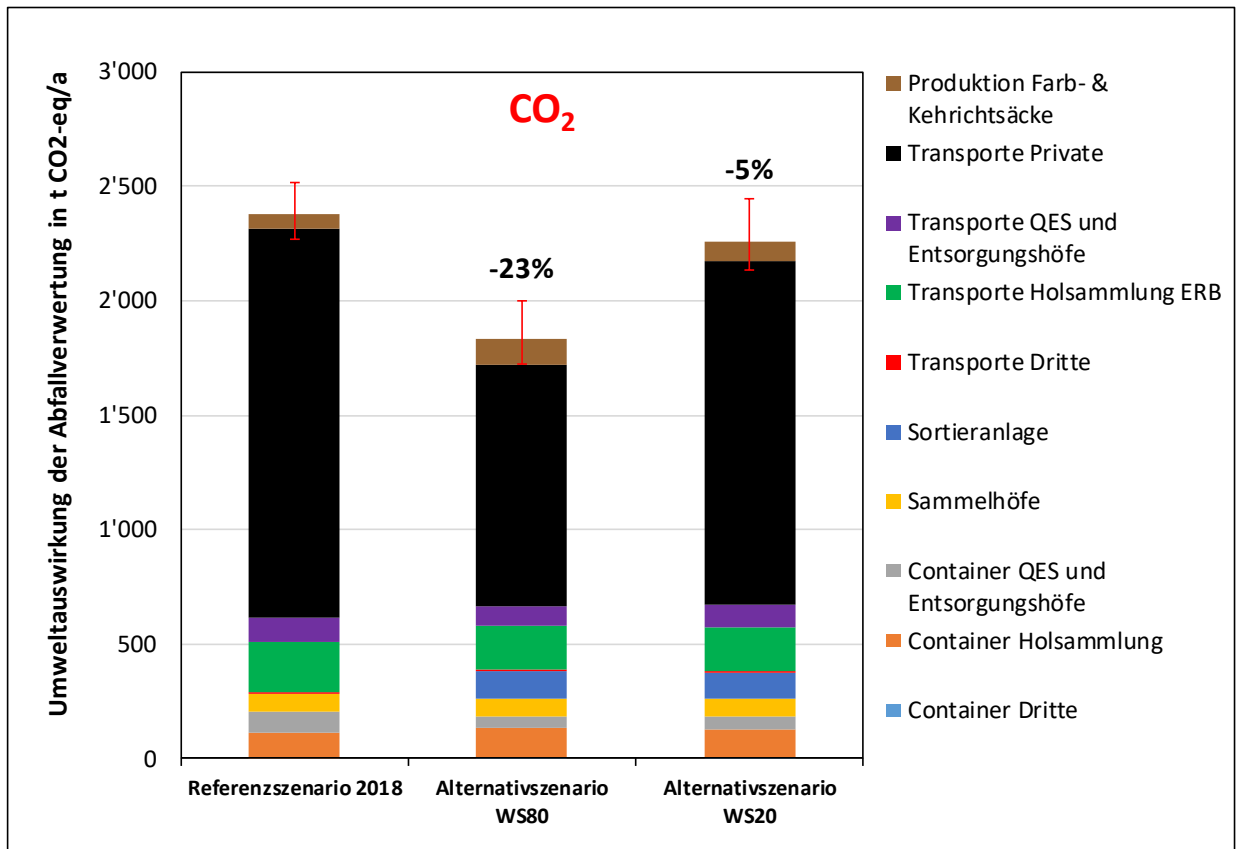


Abb. 3-2: Treibhauspotenzial der Abfallwertung aus Haushalten der Stadt Bern dargestellt in Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro Jahr und Szenario. Im Alternativszenario "WS80" können rund 23% eingespart werden. Im Alternativszenario "WS20" können gegenüber dem Referenzszenario nur noch 5% eingespart werden.

### 3.2 Sensitivitätsanalyse

Werden in einer Ökobilanz Annahmen für Eingabeparameter wie z.B. Transportdistanzen, Besucherzahlen pro Jahr etc. getroffen, ist es sinnvoll, die Aussage des Resultats mittels Variation dieser Eingabeparameter zu überprüfen und gegebenenfalls zu stützen. In den nachfolgenden Unterkapiteln wurden wichtige Eingabeparameter, die auf Annahmen oder auf einer "dünnen" Datenlage basieren, identifiziert. Danach wurde die komplette Ökobilanz mit variierten Werten nochmals neu gerechnet und als Grafik dargestellt.

#### 3.2.1 Einfluss Privattransport zu den Entsorgungshöfen

Abb. 3-3 und Abb. 3-4 zeigen das Resultat der Ökobilanz mit der Annahme, dass es durch die Einführung des FSTS zu keiner Abnahme der Besucherzahlen an den Entsorgungshöfen kommt. Dadurch würde es nicht zu einer Minderung des privaten Transports zu den Entsorgungshöfen bei der Einführung des FSTS kommen.

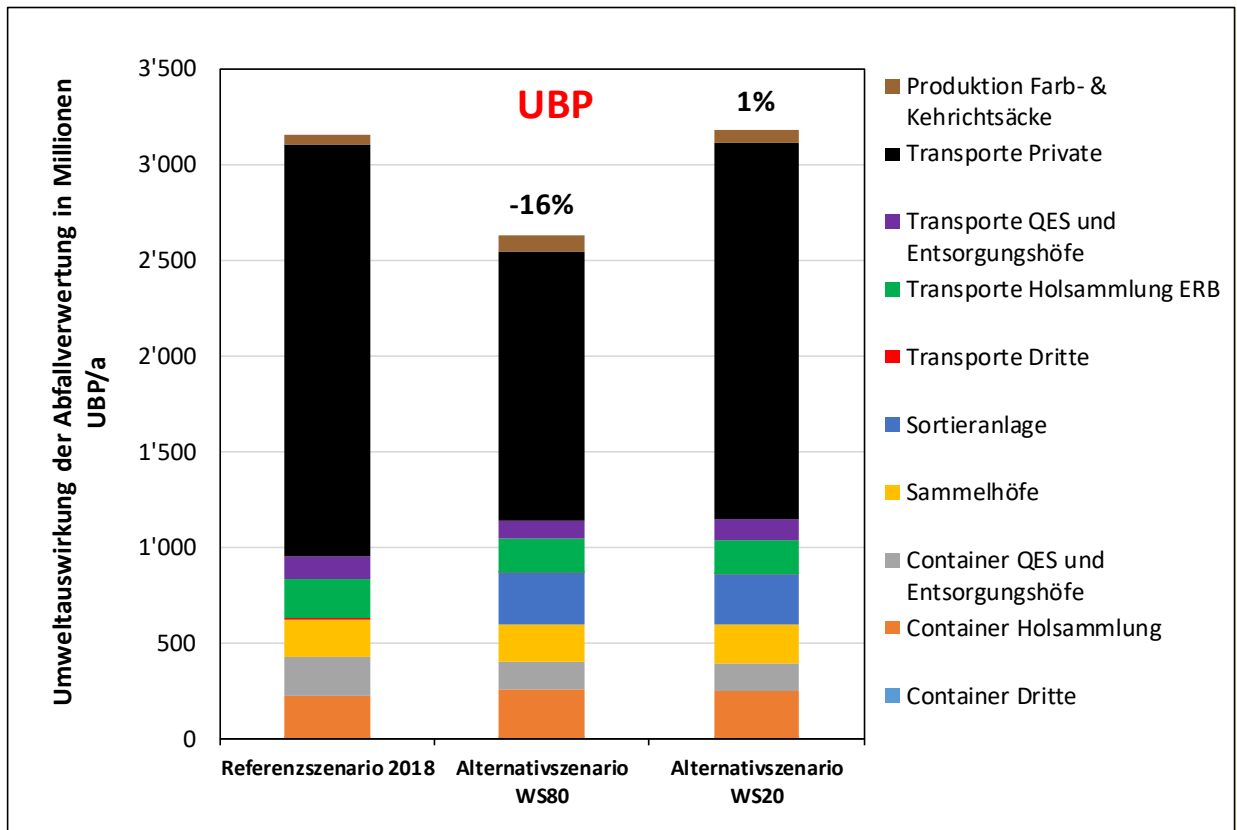


Abb. 3-3: "Keine Änderung der Besucherzahl an den Entsorgungshöfen" - Umweltwirkung der Abfallwertung aus Haushalten der Stadt Bern dargestellt in Millionen Umweltbelastungspunkte "UBP" pro Jahr und Szenario. Im Alternativszenario "WS80" können rund 18% eingespart werden. Im Alternativszenario "WS20" können gegenüber dem Referenzszenario keine UBPs eingespart werden. Das Alternativszenario "WS20" weist sogar die höhere ökologische Belastung (+1%) auf als das Referenzszenario.

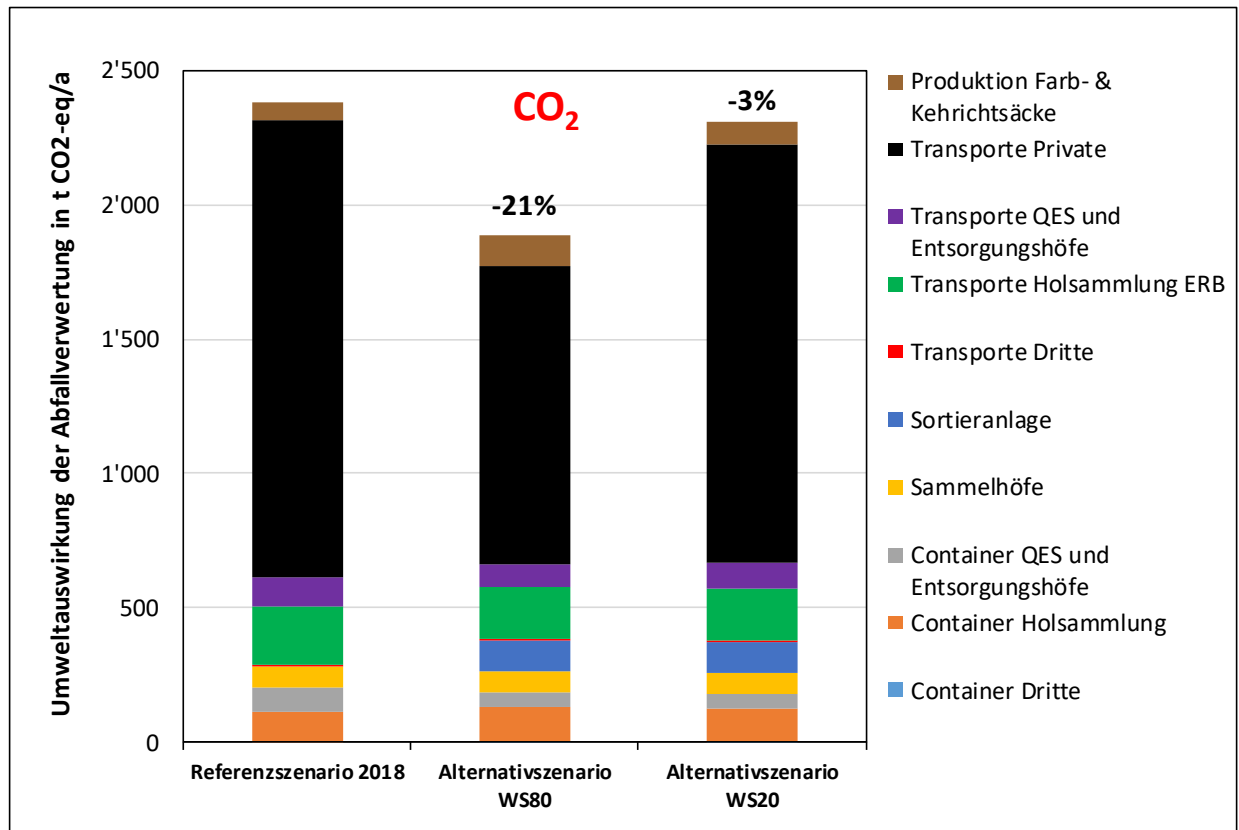


Abb. 3-4: "Keine Änderung der Besucherzahl an den Entsorgungshöfen" - Treibhauspotenzial der Abfallwertung aus Haushalten der Stadt Bern dargestellt in Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro Jahr und Szenario. Im Alternativszenario "WS80" können rund 21% eingespart werden. Im Alternativszenario "WS20" können gegenüber dem Referenzszenario nur noch 3% eingespart werden.

### 3.2.2 Einfluss Privattransport zu Detailhändlersammelstellen

In Abb. 3-5 und Abb. 3-6 ist das Ergebnis der Ökobilanz zu sehen, wenn man davon ausgeht, dass es ebenfalls nicht zu einer Änderung des privaten Transports zu Wertstoffsammelstellen bei Detailhändler bei der Einführung des FSTS kommt. Bei dieser Sensitivitätsanalyse gehen wir davon aus, dass in allen betrachteten Szenarios im Durchschnitt jeder Haushalt einmal pro Woche einkaufen geht und dabei, unabhängig vom Farbsack-Trennsystem, den gleichen Teil ihrer Wertstoffe an einer Sammelstelle eines Detailhändlers entsorgen. Daher bleibt auch der Anteil der gefahrenen Strecke, der der Wertstoffentsorgung angelastet wird, konstant in allen drei Szenarien. Im Gegensatz dazu schätzten wir, dass im Alternativszenario "WS80" die 80%, die das FSTS nutzen, nur noch die Hälfte der Menge pro Woche bei deiner Detailhändlersammelstelle entsorgen. Wodurch auch die ökologisch negativ an der Wertstoffentsorgung angerechnete Wegstrecke, entsprechend kleiner wird. Die 20%, die nicht das FSTS nutzen, bleiben bei der gleichen Menge an entsorgten Wertstoffen via Detailhändlersammelstelle. Analog dazu, respektive genau umgekehrt, verhält sich die Aufteilung im Szenario "WS20". Hier schätzen wir, dass 20% der Personen nur noch die Hälfte der Wertstoffe bei Detailhändler entsorgen und 80% der Ber-

ner Stadtbürger und –bürgerinnen unverändert die gleiche Menge an Wertstoffe bei Detailhändlern abgeben.

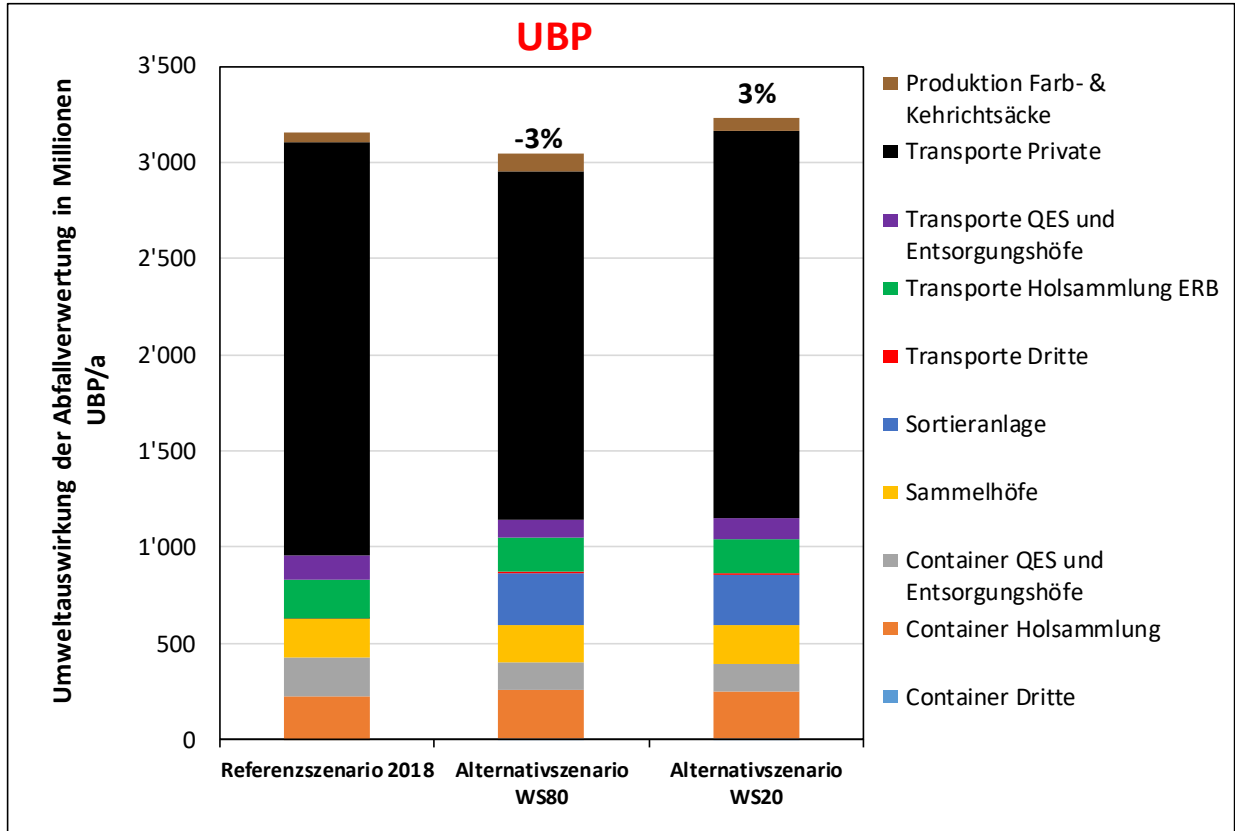


Abb. 3-5: "Keine Änderung der bei Detailhändlersammelstellen entsorgten Wertstoffe" - Umweltwirkung der Abfallwertung aus Haushalten der Stadt Bern dargestellt in Millionen Umweltbelastungspunkte "UBP" pro Jahr und Szenario. Im Alternativszenario "WS80" können nur noch 3% eingespart werden. Im Alternativszenario "WS20" können gegenüber dem Referenzszenario keine UBPs eingespart werden. Das Alternativszenario "WS20" weist sogar die höhere ökologische Belastung (+3%) auf als das Referenzszenario.

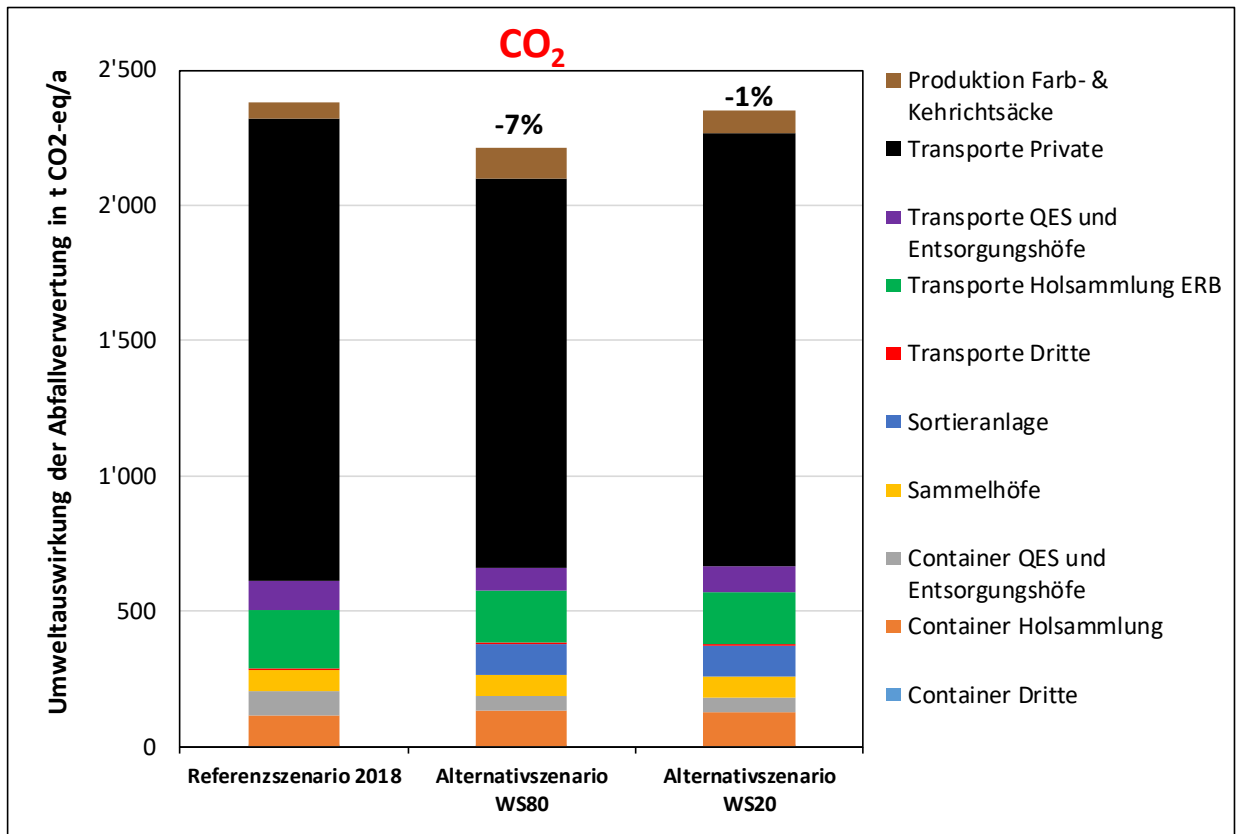


Abb. 3-6: "Keine Änderung der bei Detailhändlersammelstellen entsorgten Wertstoffe" - Treibhauspotenzial der Abfallwertung aus Haushalten der Stadt Bern dargestellt in Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro Jahr und Szenario. Im Alternativszenario "WS80" können 7% eingespart werden. Im Alternativszenario "WS20" können gegenüber dem Referenzszenario nur noch 1% eingespart werden.

### 3.2.3 Einfluss Privattransport zu den Entsorgungshöfen und zu Detailhändlersammelstellen

Nachfolgend wird die ökologische Auswirkung der Kombination beider oben genannter Änderungen dargestellt: Keine Abnahme der Besucherzahlen bei den Entsorgungshöfen sowie keine Abnahme der entsorgten Menge an Wertstoffen bei Detailhändlersammelstellen für alle drei betrachteten Szenarien. Das Resultat ist den Abb. 3-7 und Abb. 3-8 zu entnehmen.

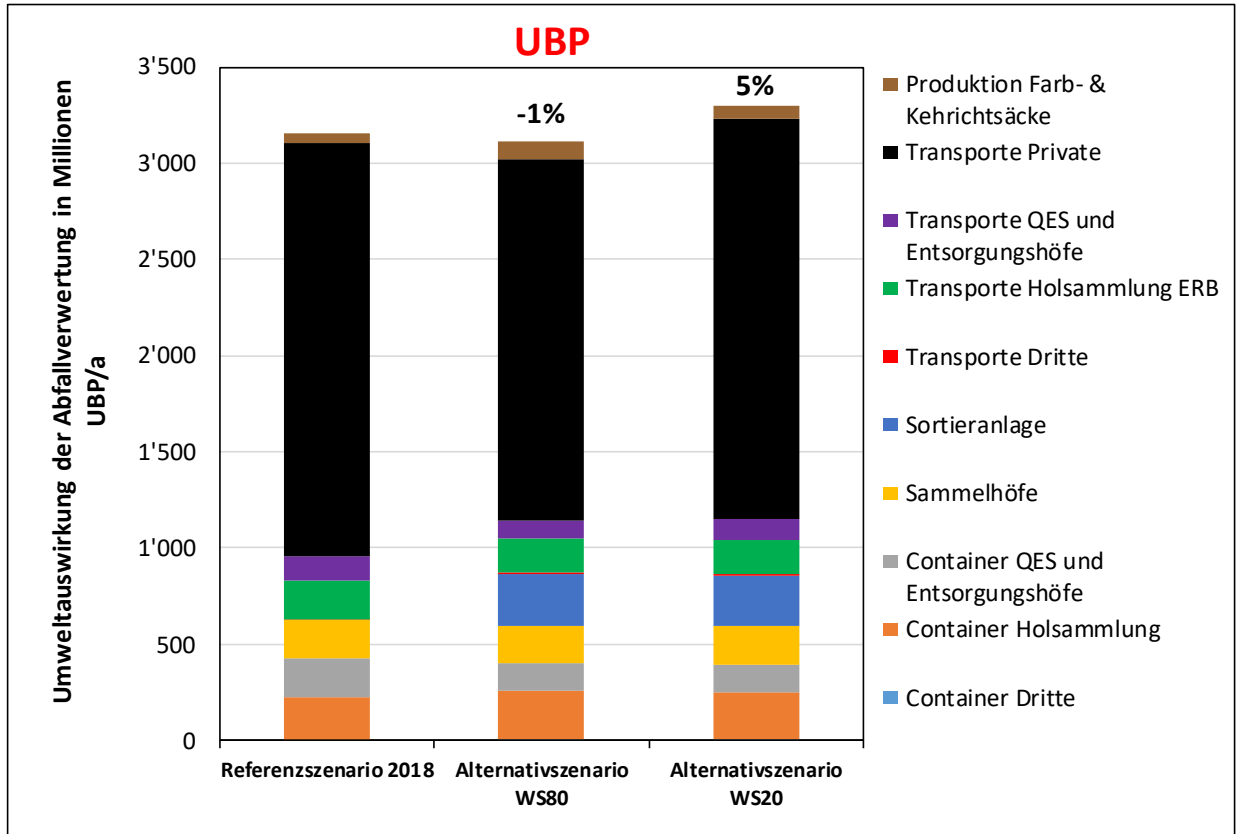


Abb. 3-7: "Keine Änderung der Besucherzahlen bei den Entsorgungshöfen und keine Änderung der bei Detailhändlersammelstellen entsorgten Wertstoffmenge" - Umweltwirkung der Abfallverwertung aus Haushalten der Stadt Bern dargestellt in Millionen Umweltbelastungspunkte "UBP" pro Jahr und Szenario. Im Alternativszenario "WS80" können nur 1% eingespart werden. Im Alternativszenario "WS20" können gegenüber dem Referenzszenario keine UBPs eingespart werden. Das Alternativszenario "WS20" weist sogar die höhere ökologische Belastung (+5%) auf als das Referenzszenario.



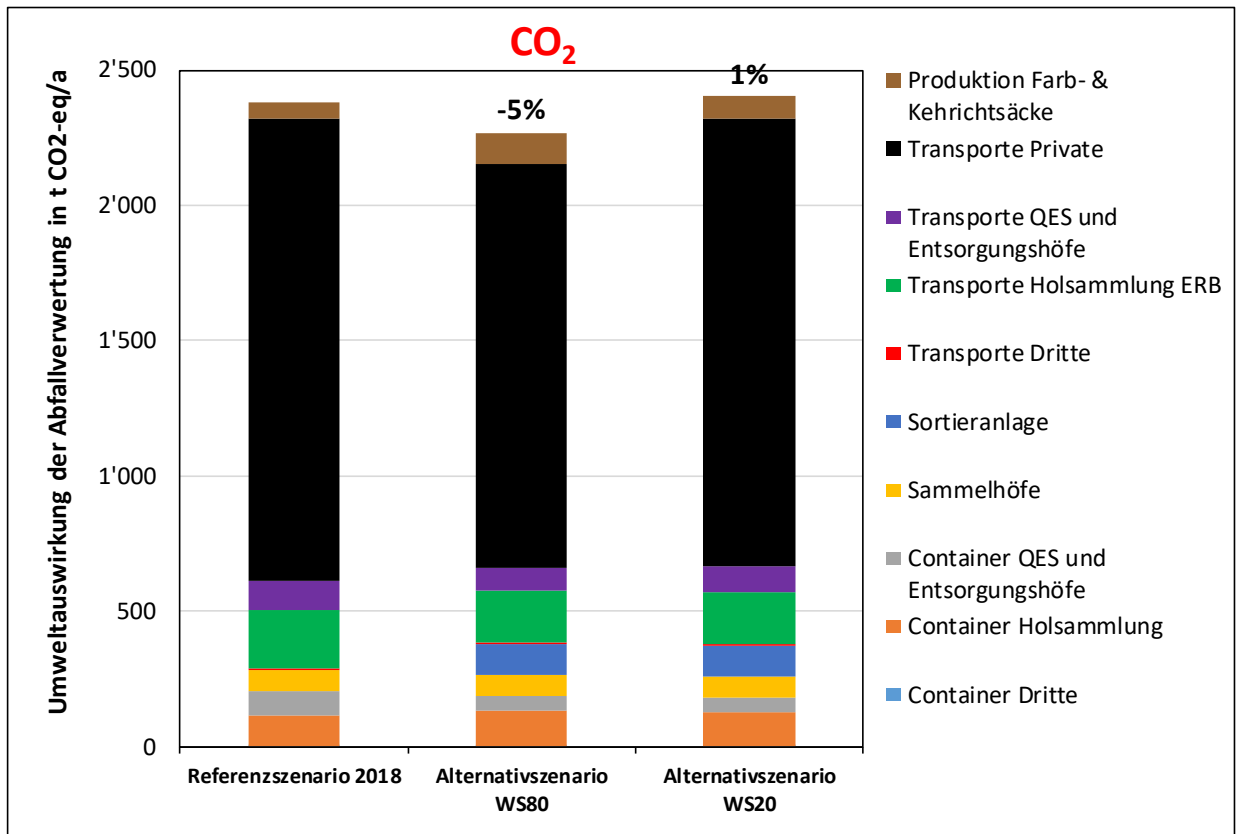


Abb. 3-8: "Keine Änderung der Besucherzahlen bei den Entsorgungshöfen und keine Änderung der bei Detailhändlersammelstellen entsorgten Wertstoffmenge" - Treibhauspotenzial der Abfallwertung aus Haushalten der Stadt Bern dargestellt in Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro Jahr und Szenario. Im Alternativszenario "WS80" können 5% eingespart werden. Im Alternativszenario "WS20" können gegenüber dem Referenzszenario keine CO<sub>2</sub>-Äquivalente eingespart werden. Das Alternativszenario "WS20" weist sogar die höhere ökologische Belastung (+1%) auf als das Referenzszenario.

### 3.2.4 Einfluss Privattransport zu Quartierentsorgungs- und Wertstoffsammelstellen

Die letzte Sensitivitätsanalyse zeigt das Ergebnis der Ökobilanz für die drei betrachteten Szenarien, wenn die Anzahl Personen, die mit dem Auto einen Teil ihrer Wertstoffe an einer Quartierentsorgungs- oder sonstigen Wertstoffsammelstelle entsorgt. Wir sind ursprünglich davon ausgegangen, dass die Haushalte, die ein Auto besitzen, es auch zur Entsorgung der Wertstoffe nutzen. Gemäss [19] besitzen 43% der Stadt Berner Haushalte ein Auto. In der Sensitivitätsanalyse haben wir nun etwas konservativ angenommen, dass nur 2/3 der Haushalte, die über ein Auto verfügen, es tatsächlich nutzen um einen Teil ihrer Wertstoffe an Quartierentsorgungs- und Wertstoffsammelstellen zu bringen. Das Resultat ist in den Abb. 3-9 und Abb. 3-10 zu sehen.

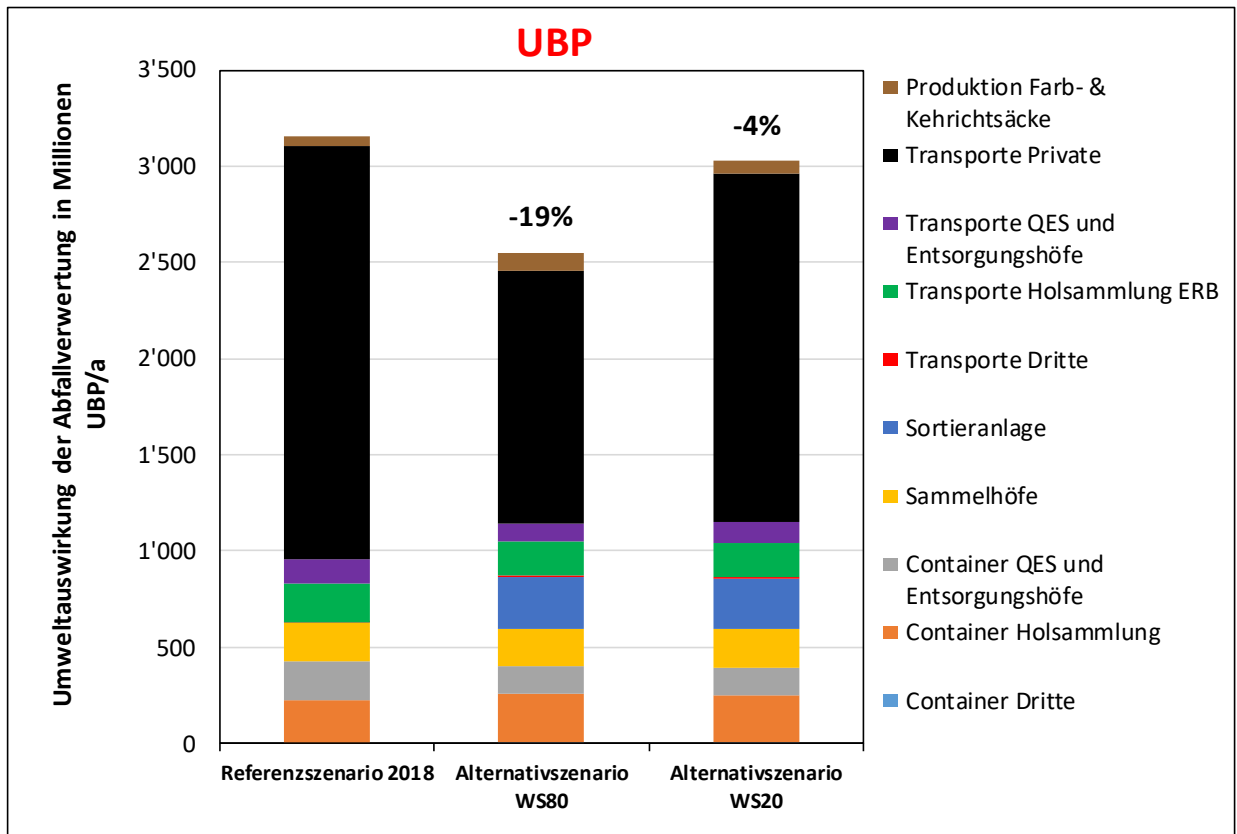


Abb. 3-9: "Abnahme des PW-Anteils bei Wertstoffsammelstellen" - Umweltwirkung der Abfallwertung aus Haushalten der Stadt Bern dargestellt in Millionen Umweltbelastungspunkte "UBP" pro Jahr und Szenario. Im Alternativszenario "WS80" können rund 19% eingespart werden. Im Alternativszenario "WS20" können gegenüber dem Referenzszenario nur noch 4% eingespart werden.

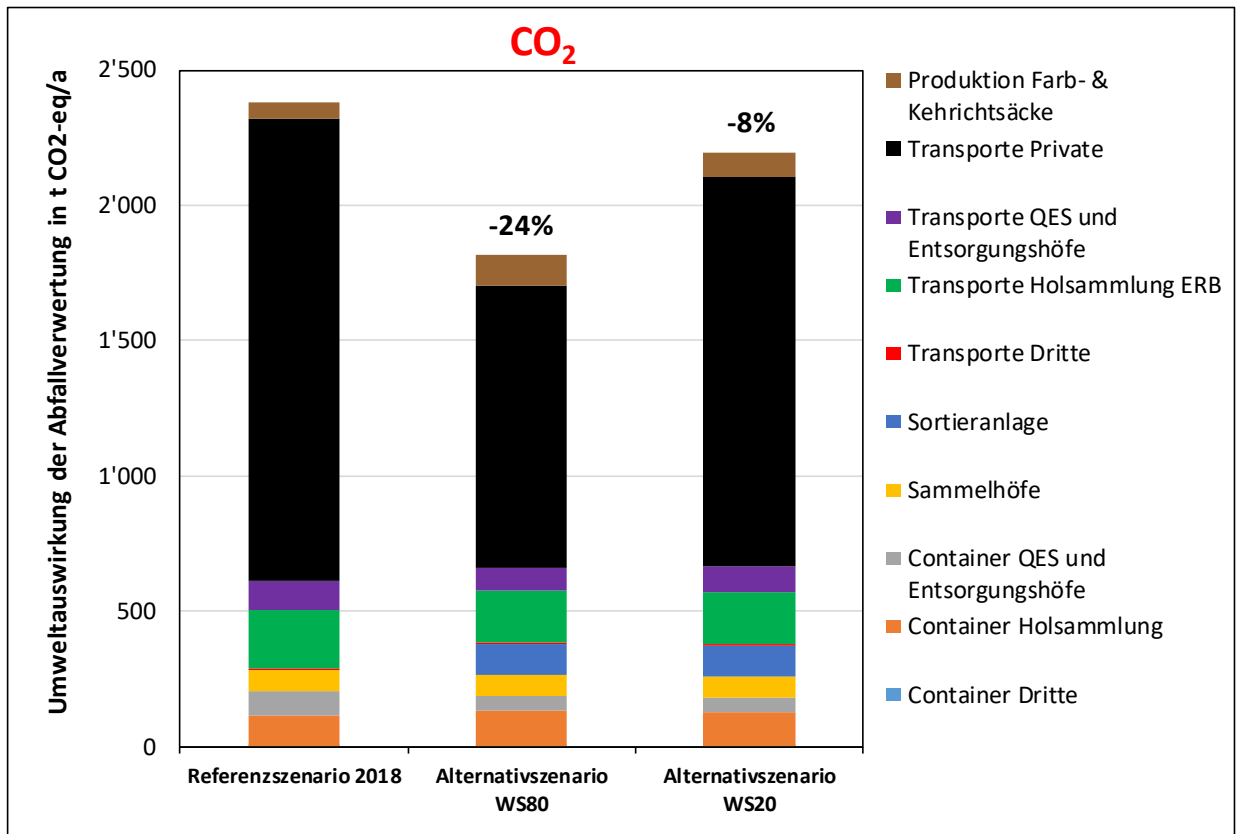


Abb. 3-10: "Abnahme des PW-Anteils bei Wertstoffsammelstellen" - Treibhauspotenzial der Abfallwertung aus Haushalten der Stadt Bern dargestellt in Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro Jahr und Szenario. Im Alternativszenario "WS80" können 24% eingespart werden. Im Alternativszenario "WS20" können gegenüber dem Referenzszenario nur noch 8% eingespart werden.

### 3.3 Ökobilanz Altglasverwertung

Neben der ökologischen Bewertung der Einführung des Farbsack-Trennsystems steht die Fragestellung der Altglasverwertung im Vordergrund. Dabei soll der ökologische Nutzen zweier Altglasverwertungsmöglichkeiten miteinander verglichen werden. Einerseits soll die separate Sammlung und Aufbereitung von Altglas mit anschliessender Glasproduktion und andererseits soll die Sammlung und Aufbereitung von Altglas mit anschliessender Verwertung zu Schaumglas ökologisch miteinander verglichen werden. Zur besseren Einordnung wurde als Basisszenario eine Glasproduktion aus 100% Rohstoffen mit einer anschliessenden Entsorgung von Altglas über den Siedlungsabfall im Kehrrietsack herangezogen. Das Ergebnis ist in Abb. 3-11 zu sehen. Gegenüber der Entsorgung in KVA via Kehrrietsack schneiden beide Verwertungsmöglichkeiten ökologisch besser ab. Bei der Verwertung des Altglases zu Schaumglas wird eine ökologische Gutschrift vergeben, da dadurch konventionelle Baustoffe ersetzt werden. Schaumglas respektive Schaumglasschotter dient als Isolationsmaterial/Baumaterial und ersetzt standardmässig eingesetzte Baumaterialien wie folgt: 70% Perimeterdämmung, 20% Leichtschüttungen und

10% Spezialanwendungen/Leichtbeton [20]. Die Altglasverwertung zu neuen Flaschen schneidet ökologisch besser ab und spart gegenüber Altglasverwertung zu Schaumglas rund 13% der Umweltbelastung ein. Pro Tonne Altglas, die wieder zu neuen Flaschen werden, anstelle zu Schaumglas, werden rund 120'000 UBP eingespart. Für die Stadt Bern macht das bei einer im 2018 separat gesammelten Menge Altglas von 4'364 Tonnen x 120'000 UBP/t = 524 Mio. vermiedene UBP. Das entspricht an 1'600'000km Autofahrt (=11km pro Einwohner und Jahr) mit einem durchschnittlichen PW oder an 6'500 kg Rindfleisch (= 26'000 Steaks oder 1/5 Steak pro Einwohner und Jahr) [21].

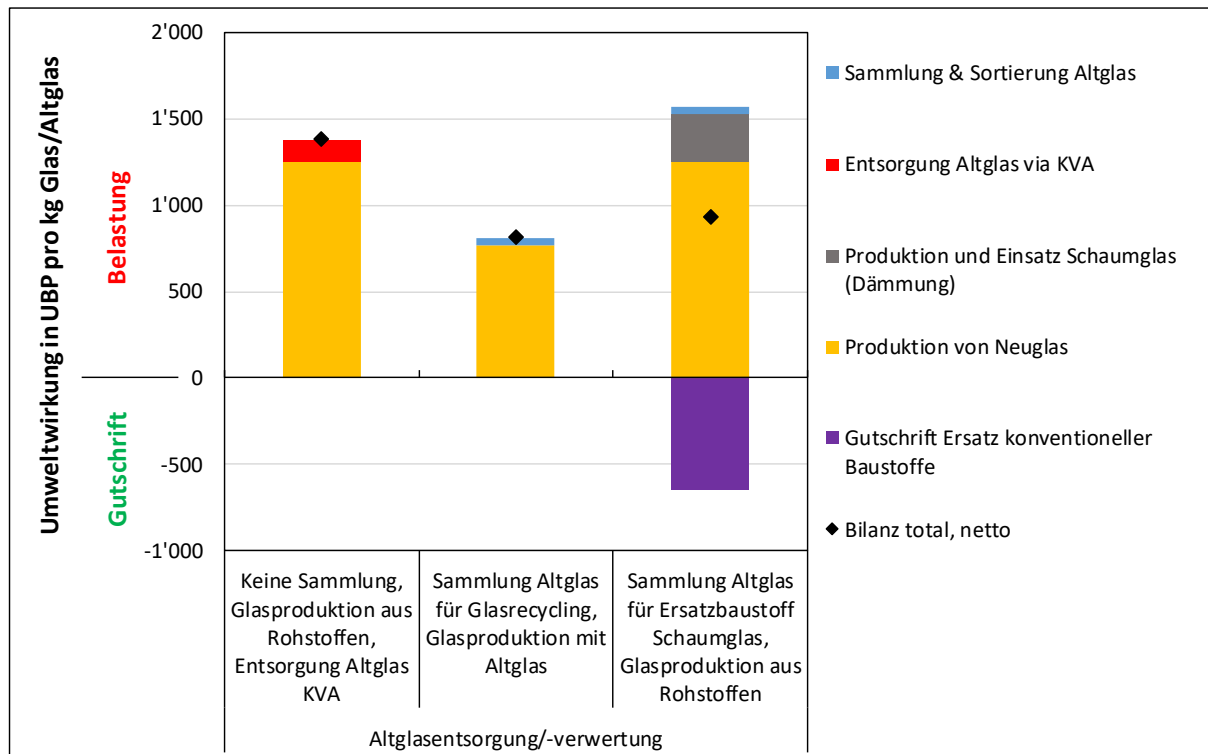


Abb. 3-11: Ökobilanz von zwei verschiedenen Altglasverwertungen im Vergleich zur Entsorgung in der KVA via Kehrichtsack. Die Umweltbelastung wurde mit den Umweltbelastungspunkten UBP berechnet. Die Daten stammen aus der Studie des Umweltberatungsbüros Carbotech [20]. Die Altglasverwertung zu neuen Flaschen schneidet ökologisch besser ab und spart gegenüber Altglasverwertung zu Schaumglas rund 13% der Umweltbelastung ein.



## 4 Schlussfolgerung

Aufgrund der Umweltbilanz des Farbsack-Trennsystems und der ökologischen Bewertung der aktuellen Situation 2018 als Referenzszenario, bietet sich aus ökologischen Gesichtspunkten die Einführung des FSTS an. Bei einer Beteiligung von 80% der Haushalte schafft die Stadt Bern einen Umweltnutzen gegenüber der aktuellen Situation. Diese Aussage wird einerseits durch die Auswertung einer weiteren Ökobilanzmethode (CO<sub>2</sub>) deutlich bestärkt und andererseits durch eine ausgiebige Sensitivitätsanalyse erhärtet. Das Alternativszenario WS80 schloss in allen UBP-Betrachtungen ökologisch besser ab als das Referenzszenario. Betrachtet man nur das Treibhauspotenzial (CO<sub>2</sub>), so ist das Alternativszenario WS80 statistisch signifikant ökologisch besser als das Referenzszenario.

Der Umweltnutzen ergibt sich aus der Reduktion des privaten Transports zu Sammelstellen bzw. zu den Entsorgungshöfen. Wir gehen davon aus, dass durch die Einführung des Farbsack-Trennsystems mit einer Beteiligung von 80% der Haushalte der Stadt Bern rund 20% der Umweltbelastung eingespart werden kann.



## 5 Literaturverzeichnis

- [1] Holinger AG, Textor Engineering, «Strategie Abflsammlung 2030,» Luzern/Münsingen, 2015.
- [2] I. 14040, «Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines,» ISO, Geneva, 2006.
- [3] I. 14044, «Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines,» ISO, Geneva, 2006.
- [4] G. Doka, «Life Cycle Inventories of Waste Treatment Services - Ecoinvent report No. 13 Part II,» Swiss Center of Life Cycle Inventories, Dübendorf, 2009.
- [5] G. Doka, «Life Cycle Inventories of Waste Treatment Services - Ecoinvent report No. 13 Part V,» Swiss Center of Life Cycle Inventories, Dübendorf, 2009.
- [6] P. Consultants, «SimaPro (version 8.5.0),» Pré Consultants, Netherlands, 2018.
- [7] ecoinvent, «ecoinvent 2018: Version 3.4 Swiss Life Cycle Inventories,» ecoinvent, 2018.
- [8] M. Keller, S. Hausberger, C. Matzer, P. Wüthrich und B. Notter, «HBEFA Version 3.3,» infras, Bern, 2017.
- [9] IPCC 2013, «Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group + to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change,» Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom an New York USA, 2013.
- [10] R. Bunge, A. Stäubli und T. Pohl, «EconEcol - Kosten-Nutzen-Analyse von umweltbezogenen Massnahmen im Recyclingbereich (Kurzbericht),» Hochschule für Technik Rapperswil HSR, Rapperswil, 2016.
- [11] A. Gautschi, «Green Economy - The Method of Ecological Scarcity in Policy Making, in Economics and Environmental Monitoring Division,» *Bundesamt für Umwelt (BAFU)*, 2013.
- [12] T. Kägi, F. Dinkel, R. Frischknecht, S. Humbert, J. Lindberg, S. De Mester, T. Ponsioen, S. Sala und U. W. Schenker, «Session "Midpoint, endpoint or single score for decision-making?" - SETAC Europe 25th Annual Meeting,» *International Journal of Life Cycle Assessment*, 5 Mai 2015.
- [13] R. Frischknecht und S. Büsser Knöpfel, «Ökofaktoren Schweiz 2013 gmäss der Methode der ökologischen Knappheit - Methodische Grundlagen und Anwendung auf die Schweiz,» Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern, 2013.
- [14] Intergovernmental Panel on Climate Change, «Climate Change 2007: Synthesis Report,» Valencia, 2007.



- [15] M. G. (. S. Solutions), «Ökologische Lebenszyklusanalyse des Variantenstudiums Sack im Behälter (SaB),» Sustainable Systems Solution GmbH, Dübendorf, 2016.
- [16] Bundesamt für Umwelt BAFU, «Erhebung der Kehrrechtzusammensetzung 2012,» Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern, 2014.
- [17] Entsorgung und Recycling Stadt Bern ERB, «Leistungsdaten mobil 2018,» ERB, Bern, 2018.
- [18] S. Scherer, «Vom Haushalt zum Recyclinghof: Ökobilanz des Transports von separat gesammelten Siedlungsabfällen - Bachelorarbeit im Rahmen des Umweltingenieurstudiums an der ETH Zürich,» ETH Zürich, Zürich, 2016.
- [19] M. Gretler, F. Müller und U. Tinguely, «Mobilität in der Region Bern-Mittelland - Mikrozensus 2015 zum Verkehrsverhalten,» Statistik Stadt Bern, Bern, 2018.
- [20] C. Stettler, S. Rüttimann und T. Kägi, «Ökobilanz Verwertungen von Altglas - ökologischer Nutzen der Sammlung von Verpackungsglas, im Auftrag fürs BAFU und VetroSuisse,» Carbotech AG, Basel, 2016.
- [21] C. AG, «Bedeutung von 1000 UBP (Umweltbelastungspunkte),» Carbotech AG, Basel, 2018.
- [22] Statistisches Landesamt Baden-Württemberg, «Statistik Baden-Württemberg,» [Online]. Available: [http://www.statistik.baden-wuerttemberg.de/Datenerhebung/33\\_A\\_Umrechnungsfaktoren.pdf](http://www.statistik.baden-wuerttemberg.de/Datenerhebung/33_A_Umrechnungsfaktoren.pdf). [Zugriff am 23 09 2015].



## 6 Abbildungen

Abb. 0-1: Umweltwirkung der Abfallwertung aus Haushalten der Stadt Bern .....	ii
Abb. 1-1: Prozessschema der Aufbereitung der FSTS-Säcke .....	1
Abb. 1-2: Schritte einer Ökobilanz nach ISO 14.040ff. ....	5
Abb. 1-3: Ablauf der Bewertung bei der Ökobilanzierung. Quelle: BAFU.....	9
Abb. 2-1: Betrachtetes System und dessen Systemgrenze .....	15
Abb. 3-1: Umweltwirkung der Abfallwertung aus Haushalten in UBP.....	27
Abb. 3-2: Treibhauspotenzial der Abfallwertung aus Haushalten der Stadt Bern in CO2.....	28
Abb. 3-3: "Keine Änderung der Besucherzahl an den Entsorgungshöfen" UBP .....	29
Abb. 3-4: "Keine Änderung der Besucherzahl an den Entsorgungshöfen" CO2 .....	30
Abb. 3-5: "Keine Änderung bei Detailhändlersammelstellen entsorgten Wertstoffe" UBP ...	31
Abb. 3-6: "Keine Änderung bei Detailhändlersammelstellen entsorgten Wertstoffe" CO2 ...	32
Abb. 3-7: "Keine Änderung Entsorgungshöfe und Detailhändlersammelstellen" UBP.....	33
Abb. 3-8: "Keine Änderung Entsorgungshöfe und Detailhändlersammelstellen" CO2.....	34
Abb. 3-9: "Abnahme des PW-Anteils bei Wertstoffsammelstellen" UBP.....	35
Abb. 3-10: "Abnahme des PW-Anteils bei Wertstoffsammelstellen" CO2.....	36
Abb. 3-13: Ökobilanz von zwei verschiedenen Altglasverwertungen .....	37
Abb. 8-1: Monte Carlo-Simulation Referenzszenario 2018.....	47
Abb. 8-2: Monte Carlo-Simulation Alternativszenario WS80.....	48
Abb. 8-3: Monte Carlo-Simulation Alternativszenario WS20.....	49







## **7 Tabellen**

Tabelle 2-1: Übersicht der Szenarien-Definitionen .....	14
Tabelle 2-2: Einwohnerzahlen der Stadt Bern gemäss ERB .....	16
Tabelle 2-3: Übersicht Abfallsammelmengen für die verschiedenen Szenarien .....	17
Tabelle 2-4: Sammelquoten der verschiedenen Wertstoffe .....	18
Tabelle 2-5: Übersicht der Anzahl verwendeten Container .....	20
Tabelle 2-6: Fahrleistung der Kehrrechtsammelfahrzeuge .....	21
Tabelle 2-7: Übersicht der Annahmen für Transporte von Privatpersonen .....	22
Tabelle 2-8: Übersicht der von ERB angegebenen Daten zur Fahrleistung .....	24
Tabelle 8-1: Dichten der Einzelfraktionen .....	43
Tabelle 8-2: Detaillierte Annahmen für die Simulation der Transportdistanzen.....	43
Tabelle 8-3: Zusammenstellung der verwendeten Eingabemengen .....	44
Tabelle 8-4: Resultat der Ökobilanz je betrachtetes Szenario .....	46
Tabelle 8-5: Resultate der Monte Carlo-Simulationen mit der UBP-Methode. ....	47

## 8 Anhang

### 8.1 Grundlagen zur Berechnung der Transportdistanzen

Die in Tabelle 8-1 gelisteten Dichten werden für die Berechnung der Ladungen der einzelnen Transportmittel verwendet.

Tabelle 8-1: Dichten der Einzelfraktionen [1] und [22]

Fraktion	Dichte gepresst [kg/m <sup>3</sup> ]	Dichte lose [kg/m <sup>3</sup> ]
Hauskehricht	450	126
Papier / Karton	600	240
Büchsen / Alu	250	56
Übrige Kunststoffe	350	38
PET	350	30
Glas	600	285

Die Transportdistanzen für den Transport der verschiedenen Wertstoffe von den Entsorgungshöfen respektive der optischen Sortieranlage zu den Verwertungsunternehmen ist in Tabelle 8-2 abgebildet.

Tabelle 8-2: Detaillierte Annahmen für die Simulation der Transportdistanzen ab Entsorgungshöfe und Sortieranlage

		Referenzszenario 2018	Alternativszenario WS80	Alternativszenario WS20
Papier / Karton	LKW Art	4-Achser	4-Achser	4-Achser
	Ladevolumen [m <sup>3</sup> ]	36	36	36
	Distanz (Leerung) [km/Fahrt]	6.4	6.4	6.4
Büchsen / Alu	LKW Art	4-Achser	4-Achser	4-Achser
	Ladevolumen [m <sup>3</sup> ]	36	36	36
	Distanz (Leerung) [km/Fahrt]	8..8	8.8	8.8
Glas	LKW Art	4-Achser	4-Achser	4-Achser
	Ladevolumen [m <sup>3</sup> ]	36	36	36
	Distanz (Leerung) [km/Fahrt]	8..8	8.8	8.8
PET	LKW Art	4-Achser	4-Achser	4-Achser
	Ladevolumen [m <sup>3</sup> ]	36	36	36
	Distanz (Leerung) [km/Fahrt]	8.8	8.8	8.8
Kunststoff-hohlkörper	LKW Art	4-Achser	4-Achser	4-Achser
	Ladevolumen [m <sup>3</sup> ]	36	36	36
	Distanz (Leerung) [km/Fahrt]	6.4	6.4	6.4

## 8.2 Daten Ökobilanz

Nachfolgend sind in Tabelle 8-3 die berechneten oder von ERB erhaltenen Eingabeparameter je betrachtetes Szenario aufgeführt. Tabelle 8-4 stellt zudem das Resultat der Ökobilanz einmal als Umweltbelastungspunkte UBP und einmal als Treibhauspotenzial in kg CO<sub>2</sub>-Äquivalente dar.

*Tabelle 8-3: Zusammenstellung der verwendeten Eingabemengen für die Ökobilanz je betrachtetes Szenario. Auf der nächsten Seite wird die Tabelle fortgesetzt.*

		Referenzszenario 2018			
<b>Infrastruktur</b>	<b>Container Dritte</b>	8.3 t Stahl			
		<b>770l, 360l und 240l</b>	<b>UFC-Beton</b>	<b>UFC-Stahlbehälter</b>	<b>OFC</b>
	<b>Container Holsammlung</b>	238 t HDPE		347 t Beton	69 t Stahl
	<b>Container QES und Entsorgungshöfe</b>			683 t Beton	135 t Stahl
		<b>Stahlmulden</b>	<b>Stahlkonstruktion mit Dach</b>	<b>Betonierte Fläche</b>	
	<b>Sammelhöfe</b>	62.4 t Stahl	1 Stück mit Lebensdauer 30 Jahre	6'500 m <sup>2</sup>	
	<b>Sortieranlage</b>	Ecoinvent Prozess "Glass sorting facility"			
		<b>Kehrlichfahrzeuge / LKW</b>	<b>Hakenfahrzeuge</b>	<b>LKW mit Mulde 4 Achser</b>	<b>PW</b>
<b>Transporte</b>	<b>Transporte Dritte</b>	18'425 km			
	<b>Transporte Holsammlung ERB</b>	140'500 km			
	<b>Transporte QES und Entsorgungshöfe</b>			53'000 km	28'219 km
	<b>Transporte Private</b>				5'413'062 km
		<b>Kehrlichsäcke</b>	<b>PET- &amp; Kunststoff-Säcke</b>	<b>Alu/Büchsen-Säcke</b>	<b>Glas-Säcke</b>
<b>Farbsäcke</b>	<b>Produktion Farb- &amp; Kehrlichsäcke</b>	98.5 t Kunststoffsäcke			
	<b>Recyclinganteil Farbsäcke</b>	80%			

		Alternativszenario WS80			
Infrastruktur		7.7 t Stahl			
Container Dritte		770l, 360l und 240l	UFC-Beton	UFC-Stahlbehälter	OFC
	Container Holsammlung	198 t HDPE	630 t Beton	125 t Stahl	
	Container QES und Entsorgungshöfe		305 t Beton	60 t Stahl	75 t Stahl
	Sammelhöfe	Stahlmulden 62.4 t Stahl	Stahlkonstruktion mit Dach 1 Stück mit Lebensdauer 30 Jahre	Betonierte Fläche 6'500 m <sup>2</sup>	
	Sortieranlage	Ecoinvent Prozess "Glass sorting facility"			
	Transporte	Kehrlichfahrzeuge / LKW	Hakenfahrzeuge	LKW mit Mulde 4 Achser	PW
	Transporte Dritte	12'839 km			
	Transporte Holsammlung ERB	123'300 km			
	Transporte QES und Entsorgungshöfe		37'200 km	24'820 km	
	Transporte Private				3'360'406 km
	Farbsäcke	Kehrlichsäcke	PET- & Kunststoff-Säcke	Alu/Büchsen-Säcke	Glas-Säcke
	Produktion Farb- & Kehrlichsäcke	91.8 t Kunststoffsäcke	26.5 t Kunststoffsäcke	6.2 t Kunststoffsäcke	22.0 t Kunststoffsäcke
	Recyclinganteil Farbsäcke	80%	70%	80%	40%

		Alternativszenario WS20			
Infrastruktur		8.3 t Stahl			
Container Dritte		770l, 360l und 240l	UFC-Beton	UFC-Stahlbehälter	OFC
	Container Holsammlung	179 t HDPE	630 t Beton	125 t Stahl	
	Container QES und Entsorgungshöfe		305 t Beton	60 t Stahl	75 t Stahl
	Sammelhöfe	Stahlmulden 62.4 t Stahl	Stahlkonstruktion mit Dach 1 Stück mit Lebensdauer 30 Jahre	Betonierte Fläche 6'500 m <sup>2</sup>	
	Sortieranlage	Ecoinvent Prozess "Glass sorting facility"			
	Transporte	Kehrlichfahrzeuge / LKW	Hakenfahrzeuge	LKW mit Mulde 4 Achser	PW
	Transporte Dritte	14'258 km			
	Transporte Holsammlung ERB	123'100 km			
	Transporte QES und Entsorgungshöfe		45'100 km	26'166 km	
	Transporte Private				4'773'256 km
	Farbsäcke	Kehrlichsäcke	PET- & Kunststoff-Säcke	Alu/Büchsen-Säcke	Glas-Säcke
	Produktion Farb- & Kehrlichsäcke	91.8 t Kunststoffsäcke	25.0 t Kunststoffsäcke	1.6 t Kunststoffsäcke	5.5 t Kunststoffsäcke
	Recyclinganteil Farbsäcke	80%	70%	80%	40%

*Tabelle 8-4: Resultat der Ökobilanz je betrachtetes Szenario einmal angegeben mit der Methode der Umweltbelastungspunkte UBP und einmal ausgewertet als Treibhauspotenzial ausgedrückt in kg CO<sub>2</sub>-Äquivalente.*

		UBP	CO2	UBP	CO2	UBP	CO2
		Referenzszenario 2018		Alternativszenario WS80		Alternativszenario WS20	
		Referenzszenario 2018	RS CO2	Alternativszenario WS80	AS A CO2	Alternativszenario WS20	AS B CO2
<b>Infrastruktur</b>	Container Dritte	317'766 UBP	133 kg CO2-eq	2'947'949 UBP	1'233 kg CO2-eq	2'947'949 UBP	1'233 kg CO2-eq
	Container Holsammlung	220'935'657 UBP	113'422 kg CO2-eq	254'235'413 UBP	129'592 kg CO2-eq	248'906'118 UBP	123'843 kg CO2-eq
	Container QES und Entsorgungshöfe	204'974'917 UBP	87'980 kg CO2-eq	141'289'820 UBP	53'776 kg CO2-eq	141'289'820 UBP	53'776 kg CO2-eq
	Sammelhöfe	199'193'580 UBP	78'122 kg CO2-eq	199'193'579 UBP	78'122 kg CO2-eq	199'193'579 UBP	78'122 kg CO2-eq
	Sortieranlage	0 UBP	0 kg CO2-eq	268'104'205 UBP	117'619 kg CO2-eq	264'844'012 UBP	116'344 kg CO2-eq
<b>Transporte</b>	Transporte Dritte	6'238'778 UBP	5'713 kg CO2-eq	4'347'336 UBP	3'981 kg CO2-eq	4'827'815 UBP	4'421 kg CO2-eq
	Transporte Holsammlung ERB	202'492'645 UBP	218'786 kg CO2-eq	177'703'509 UBP	192'003 kg CO2-eq	177'415'264 UBP	191'691 kg CO2-eq
	Transporte QES und Entsorgungshöfe	120'661'030 UBP	107'213 kg CO2-eq	93'903'287 UBP	84'116 kg CO2-eq	109'602'439 UBP	97'897 kg CO2-eq
	Transporte Private	2'149'941'785 UBP	1'706'770 kg CO2-eq	1'334'674'763 UBP	1'059'556 kg CO2-eq	1'895'825'778 UBP	1'505'036 kg CO2-eq
	<b>Total</b>	<b>3'104'756'157 UBP</b>	<b>2'318'139 kg CO2-eq</b>	<b>2'476'399'862 UBP</b>	<b>1'719'997 kg CO2-eq</b>	<b>3'044'852'774 UBP</b>	<b>2'172'363 kg CO2-eq</b>
	100%	100%	80%	74%	98%	94%	
	Herstellung LDPE Sack 100% Primär			-20%	-26%	-1.9%	-6.3%
	1'802'241 UBP/t						
	2'267.8 kg CO2-eq/t						
	Sortierung LDPE						
	70'000 UBP/t						
	Recyclingaufwand LDPE Sack						
	100'000 UBP/t						
	Herstellung LDPE Sack 100% Sekundär						
	170'000 UBP/t						
	213.9 kg CO2-eq/t						
<b>Farbsäcke</b>	Produktion Farb- & Kehrichtsäcke	48'914'370 UBP	61'549 kg CO2-eq	91'390'515 UBP	114'996 kg CO2-eq	69'144'485 UBP	87'004 kg CO2-eq
	<b>Total + Farbsäcke</b>	<b>3'153'670'527 UBP</b>	<b>2'379'688 kg CO2-eq</b>	<b>2'567'790'377 UBP</b>	<b>1'834'994 kg CO2-eq</b>	<b>3'113'997'259 UBP</b>	<b>2'259'367 kg CO2-eq</b>
	100%	100%	81%	77%	99%	95%	
			-19%	-23%	-1.3%	-5.1%	

### 8.3 Unsicherheitsanalysen

Nachfolgend sind die Histogramme der Monte Carlo-Simulationen in Abb. 8-1 bis Abb. 8-3 für die drei betrachteten Szenarien dargestellt.

Tabelle 8-5: Resultate der Monte Carlo-Simulationen mit der UBP-Methode.

UBP	Mittelwert [UBP/a]	2.5%-Quantil [kUBP/t]	97.5%-Quantil [kUBP/t]
Referenzszenario 2018	3'104 MUBP/a	2'733 MUBP/a	3'600 MUBP/a
Alternativszenario WS80	2'478 MUBP/a	2'133 MUBP/a	2'962 MUBP/a
Alternativszenario WS20	3'044 MUBP/a	2'654 MUBP/a	3'561 MUBP/a

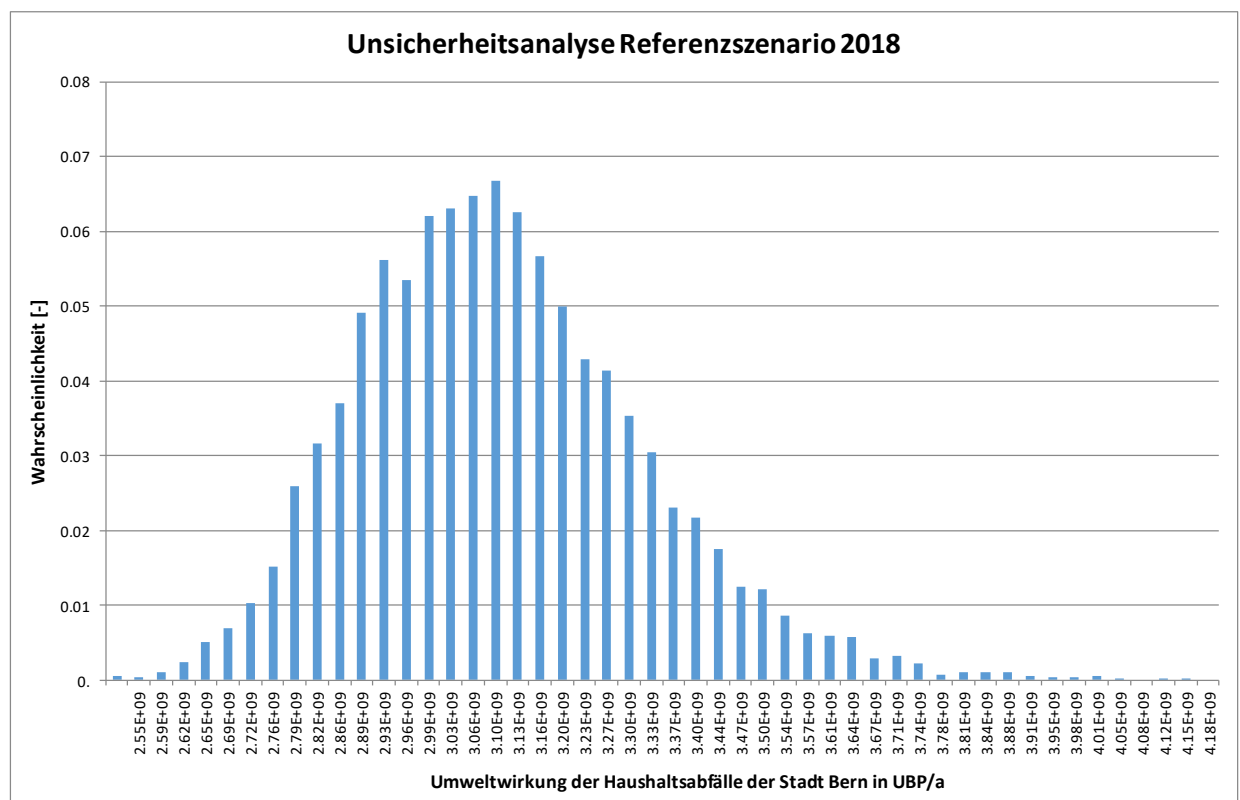


Abb. 8-1: Monte Carlo-Simulation mit 10'000 Iterationen und einem Konfidenzintervall von 95% für das Referenzszenario 2018.

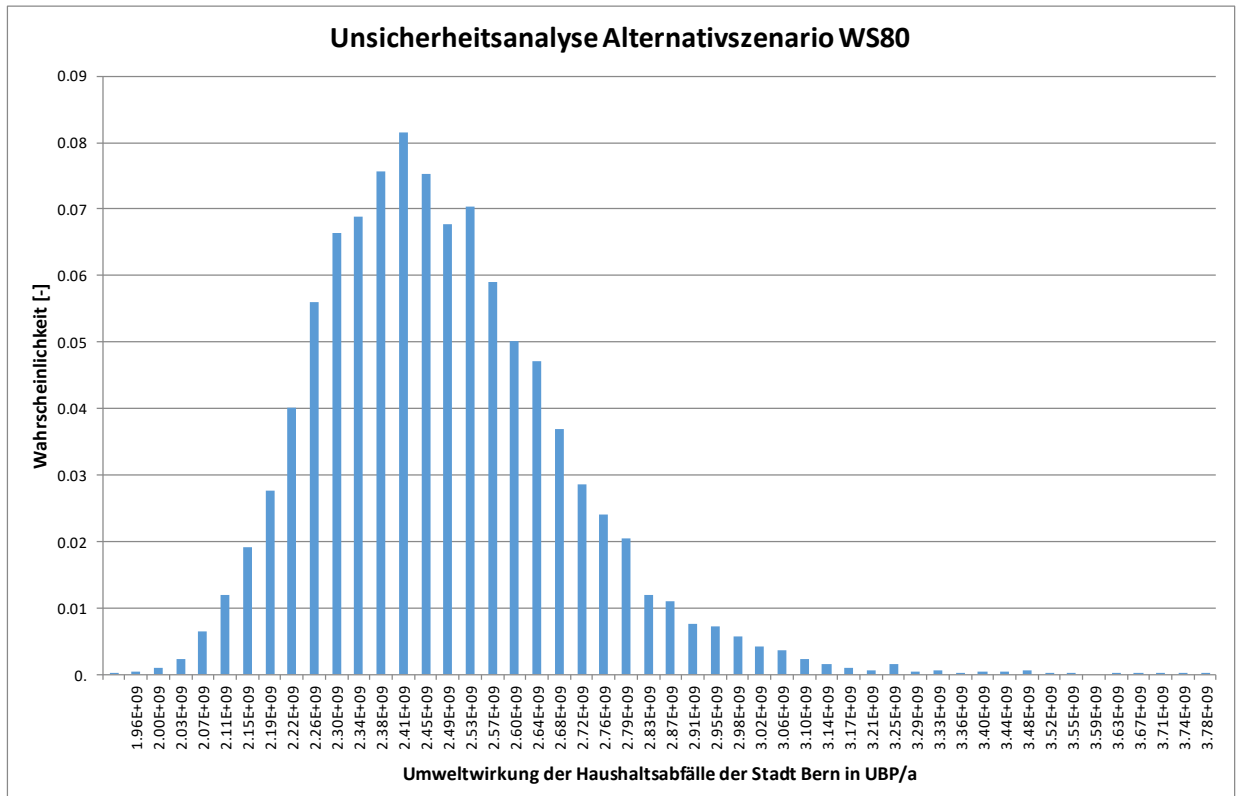


Abb. 8-2: Monte Carlo-Simulation mit 10'000 Iterationen und einem Konfidenzintervall von 95% für das 1. Alternativszenario WS80.

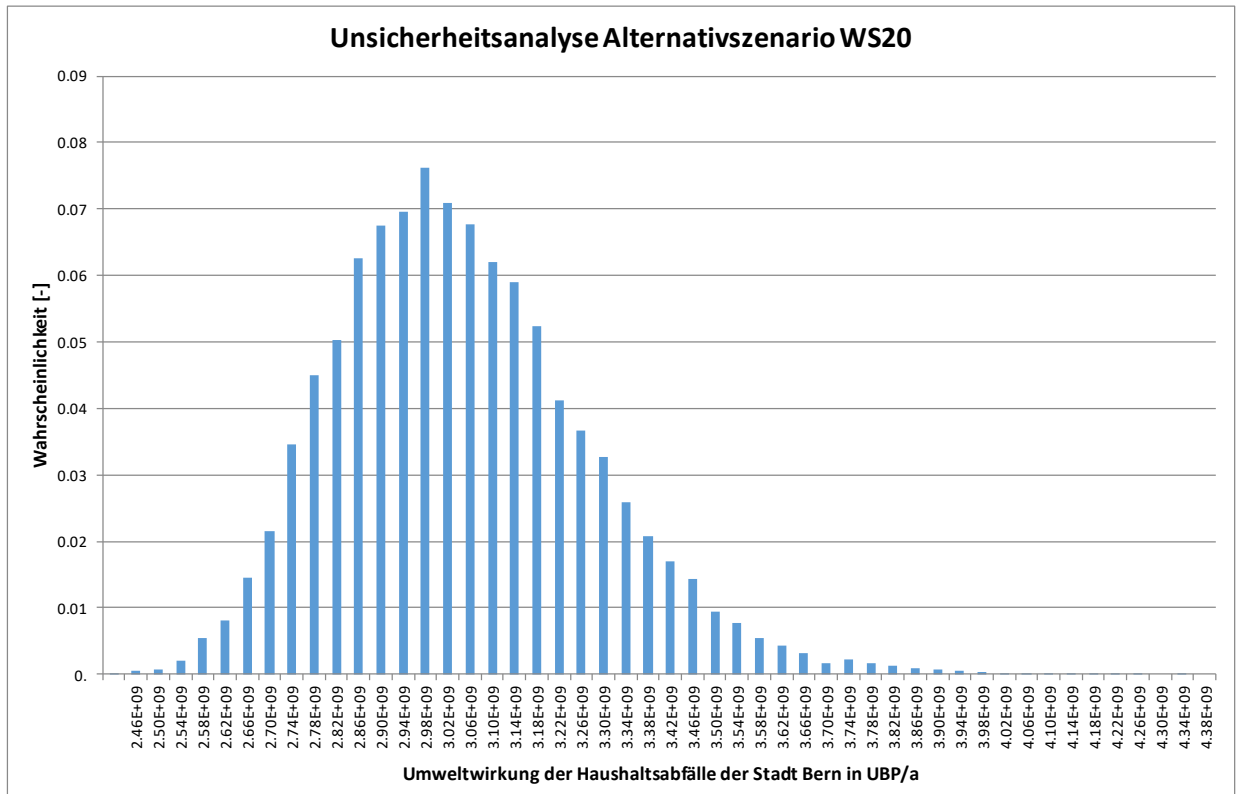


Abb. 8-3: Monte Carlo-Simulation mit 10'000 Iterationen und einem Konfidenzintervall von 95% für das 2. Alternativszenario WS20.