

**Bericht**

# Vom Umweltnutzen des PET-Recyclings

**Unter Berücksichtigung des mehrfachen Recyclings**

**PRS: PET Recycling Schweiz**

Lukas Schumacher  
Jean-Claude Würmli

**Verfasser**

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

Anzahl Seiten: 16

Interne Referenz: 287.54

Basel, 7. Februar 2018

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Einleitung</b>	<b>3</b>
<b>2 Der Umweltnutzen vom PET-Recycling</b>	<b>5</b>
2.1 Aus Sicht des Abfallmanagements	5
2.2 Aus der Sicht des stofflichen Ressourcenmanagements	8
2.3 Aus Sicht des Bedarfs	11
<b>3 Diskussion</b>	<b>12</b>
3.1 Annahmen und Grenzen der Betrachtungsweisen	12
3.2 Bezug der Sichtweisen zueinander	13
3.3 Geeignete Betrachtungsweise	14
3.4 Das Recyclingdilemma brennbarer Materialien	14
<b>4 Fazit</b>	<b>15</b>
<b>5 Referenzen</b>	<b>16</b>

# 1 Einleitung

Die Schweiz ist Weltmeister im Rezyklieren. Diesen Satz hört man immer wieder, und er stimmt auch für gewisse Materialien, wobei lange nicht für alle. Wie dem auch sei, dass wir möglichst viel rezyklieren sollen scheint uns allen einzuleuchten. Recycling ist auch nichts Neues. Spätestens seit der Bronzezeit hat der Mensch erkannt, dass man gewisse Materialien wiederaufbereiten und wieder als Rohstoff verwenden kann. So ist es zu begrüßen, dass die Recyclinganstrengungen ständig ausgebaut werden. Beim PET-Recycling erreichen wir in der Schweiz mittlerweile eine Recyclingquote von 80 % und mehr, d.h. 80 % der im Umlauf gebrachten PET-Flaschen liegen nach dem Recycling wieder als PET-Granulat für die stoffliche Nutzung vor. Speziell am PET-Recycling ist, dass rund 30 % bis 35 % direkt wieder in die Flaschenherstellung geht (closed loop Recycling). Die restlichen 45 % bis 50 % werden als Regranulat in anderen Produkten verwendet, die nicht mehr dieselben inhärenten Materialeigenschaften benötigen (open loop Recycling). Im Rahmen der Ökobilanzierung werden die beiden Begriffe open loop (OL) und closed loop (CL) Recycling folgendermassen verwendet.

## **Geschlossener Kreislauf (closed loop - CL)**

Bei diesem Kreislauf können aus Rezyklat wieder Produkte in gleicher Qualität hergestellt werden. Das Rezyklat ersetzt neues Material praktisch zu 100 %. Im Rahmen der Ökobilanzierung ist bei diesem Ansatz nicht wesentlich, dass dasselbe Produkt hergestellt wird, sondern ob das rezyklierte Material dieselben inhärenten Materialeigenschaften wie das ursprüngliche Material besitzt und damit Produkte von gleicher Qualität hergestellt werden können, siehe dazu auch ISO 14'040 ff<sup>1</sup>.

## **Offener Kreislauf (open loop – OL)**

Bei diesem Kreislauf wird das Rezyklat einer anderen stofflichen Verwertung zugeführt. Der Grund dafür ist meistens, dass das Material veränderte Eigenschaften hat. Falls die Qualität des Rezyklats nicht die gleichen Anforderungen wie das Neumaterial erfüllt, kann es wegen der eingeschränkten Verwendung nicht 100 % des Neumaterials ersetzen. Es ist daher notwendig, eine sogenannte Allokation zur Abbildung des Minderwertes vorzunehmen. Gemäss ISO 14040 ff<sup>2</sup> können als Basis für die Allokation physikalische Eigenschaften oder ökonomische Werte verwendet werden. Für die ökonomische Allokation spricht, dass die Ökonomie in den meisten Fällen der Treiber ist, warum etwas gemacht wird. Auf der anderen Seite kann die Volatilität der Preise, z.B. auf Grund von Überkapazität am Markt, zu Verzerrungen führen. Wir verwenden daher falls möglich das technische Ersatzpotential. Darunter wird diejenige Menge an Primärmaterial verstanden, welches durch R-Material ersetzt werden kann, um für die jeweilige Anwendung dieselben gewünschten, technischen Eigenschaften, wie z.B. mechanische Festigkeit, zu erreichen. In der Praxis zeigt sich, dass PET-Rezyklate je nach Produkt durchaus bis zu 100 % Primärmaterial ersetzen kann. Dies ist zum Beispiel bei PET-Tragtaschen der Fall. Als Erfahrungswert verwenden wir für den Allokationsfaktor ein konservatives Ersatzpotential von 0.8 bis 0.9<sup>3</sup>. Dies kommt dem eigentlichen Ersatz von Primärmaterial näher als der ökonomische Faktor.

---

<sup>1</sup> ISO 14040, ISO-14044.

<sup>2</sup> (ISO 14040, 2006)

<sup>3</sup> (Dinkel, Kägi, Bunge, u. a., 2017)

### **Fragestellung und Vorgehen**

Damit im PRS-System das Rezyklat wieder in einer Flasche verwendet werden kann, muss dieses Lebensmittelqualität aufweisen. Dies ist mit höheren Aufwänden verbunden als die Herstellung eines nicht lebensmitteltauglichen Granulates für eine OL-Anwendung. Entsprechend stellt sich die Frage, ob sich dieser Mehraufwand aus ökologischer Sicht lohnt. Der Mehrnutzen ergibt sich einerseits aus dem höheren Ersatzpotential und andererseits, weil der Einsatz in Flaschen dazu führt, dass diese wiederum durch die PRS gesammelt und der stofflichen Verwertung zugeführt werden. D.h. das Material wird zumindest teilweise mehrfach rezykliert.

Im Rahmen dieser Studie soll untersucht werden wie hoch der ökologische Mehrnutzen des CL-Recyclings gegenüber einem OL-Recycling ist. In diesem Zusammenhang wird im Folgenden unter CL-Recycling die Wiederverwendung als lebensmitteltaugliches PET für Getränkeflaschen verstanden. Als OL-Recycling wird die Wiederverwendung in einer Anwendung ausserhalb des Lebensmittelbereichs verstanden. Dies entspricht einer etwas engeren Definition als diejenige in der ISO Norm.

Zudem wurden die folgenden Annahmen getroffen:

- CL-Rezyklat wird in Flaschen verwendet, welche in der Schweiz gebraucht und anschliessend von PRS-System erfasst werden.
- OL-Rezyklat gelangt in Anwendungen, welche nach dem Gebrauch in einer KVA der Schweiz mit Energienutzung entsorgt werden.

Sowohl das CL- wie auch das OL-Rezyklat könnte auch in Anwendungen ausserhalb der Schweiz eingesetzt und entsprechend einer anderen Verwertung oder Entsorgung zugeführt werden. Auf solche Anwendungen wird in dieser Analyse nicht eingegangen.

Berechnet wird der ökologische Nutzen für das heutige PRS-System sowie mögliche Variationen davon. Diese werden verglichen mit der Situation, in der das gesammelt Material vollständig dem OL-Recycling zugeführt würde. Der ökologische Nutzen wird mit der Methode der ökologischen Knappheit<sup>4</sup> in Umweltbelastungspunkten (UBP) gemessen. Zudem wird das Klimapotential<sup>5</sup> in CO<sub>2</sub>-Äquivalenten (CO<sub>2</sub>eq) bestimmt.

---

<sup>4</sup> (Frischknecht & Büsser Knöpfel, 2013)

<sup>5</sup> (IPCC, 2014)

## 2 Der Umweltnutzen vom PET-Recycling

Der grundsätzliche Vorteil des Recyclings besteht darin, dass ein Abfallstoff in einen Rohstoff umgewandelt wird und damit Primärmaterial ersetzen kann. Durch das Recycling von PET werden die fossilen Rohstoffe, die es für die Herstellung von primärem PET benötigt sowie die damit verbundenen Umweltauswirkungen, eingespart. Dies ist der Ressourcen-Nutzen, den das Recycling eines Materials erbringt. Zudem muss das PET nicht bzw. erst nach einem oder mehrerer weiteren Einsätzen als Werkstoff entsorgt werden. Solange der Aufwand fürs Recycling nicht grösser ist als die Herstellung des Primärmaterials sowie dessen Entsorgung, zahlt sich ein Recycling aus ökologischer und/oder ökonomischer Sicht aus<sup>6</sup>.

Für brennbare Materialien, insbesondere für Kunststoffe und Papier, kann jedoch auch durch die energetische Verwertung ein zusätzlicher Nutzen erbracht werden. Manchmal wird dabei unsinnigerweise von einem „thermischen Recycling“ gesprochen, obwohl es sich natürlich nicht um ein Recycling, sondern um eine einmalige Verwertung handelt. Mit dem Betrieb von immer effizienteren Kehrriechverbrennungsanlagen, die heutzutage im Durchschnitt etwa 28% Fernwärme und 17% Strom bezogen auf den Heizwert des Abfalls generieren<sup>7</sup>, wird dieser thermische Nutzen immer bedeutender. Der Nutzen ergibt sich daraus, dass die KVAs mit der Fernwärme direkt fossile Energieträger ersetzen, und mit dem KVA-Strom wird anderweitig produzierter Strom ersetzt, z. B: Schweizer oder Europäischer Strommix. Welcher Wärme- und Strommix nun wirklich ersetzt wird, ist ein anderes Thema und soll hier nicht weiter diskutiert werden. Für die Berechnungen wurde derselbe Ersatz angenommen, wie in der KuRve-Studie<sup>8</sup>, d.h. KVA Strom ersetzt den Europäischen Strom-Mix und die Wärme ersetzt 45% Gas und 55% Öl<sup>9</sup>.

Die Beurteilung des Nutzens von CL- und OL-Recycling wird im Folgenden aus verschiedenen Betrachtungswinkeln untersucht:

- Abfallmanagement:  
Dabei stellt sich die Frage: *Welches ist die optimalste Nutzung einer gesammelten Menge PET-Abfall?*
- Ressourcenmanagement - Kunststoff als Ressource:  
Dabei steht die Frage im Zentrum: *Wie kann eine gegebene Menge PET am besten genutzt werden?*
- Bedarfsmanagement:  
Die Gesellschaft benötigt PET und Energie. Daraus ergibt sich die Frage: *Wie können diese beiden Bedürfnisse am optimalsten gedeckt werden?*

Im Folgenden wird der ökologische Nutzen für die verschiedenen Betrachtungsweisen berechnet und diskutiert.

### 2.1 Aus Sicht des Abfallmanagements

Es gibt verschiedene Ökobilanzstudien welche den Recyclingnutzen aus der Abfallperspektive betrachten. D.h. es geht um die Frage, wie eine bestimmte Menge PET nach dem Gebrauch (post-consumer) am besten verwertet oder entsorgt wird. Im Rahmen dieser Studie wird diese Perspektive „Abfallmanagement“ genannt. Dabei wird der ökologische Nutzen der unterschiedlichen Verwertungswege, thermisch oder

---

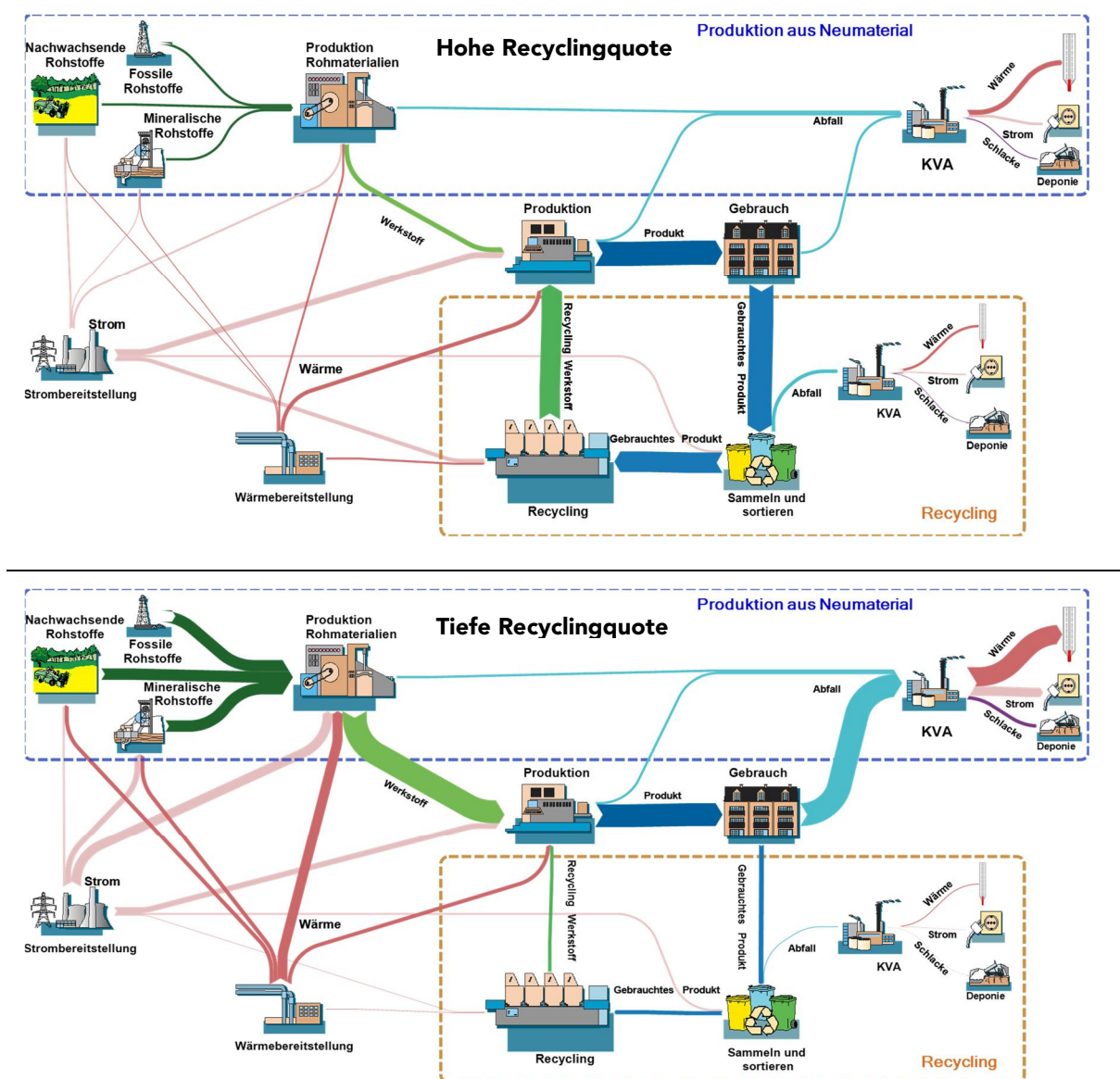
<sup>6</sup> (Carbotech AG, 2008; Dinkel, Kägi, Bunge, u. a., 2017; Dinkel, Kägi, & Weber, 2017; Dinkel & Hauser, 2008; Franov & Kägi, 2011)

<sup>7</sup> (Rytec, 2016)

<sup>8</sup> (Dinkel, Kägi, Bunge, u. a., 2017)

<sup>9</sup> (BFE, 2017)

stofflich, einander gegenübergestellt. Dabei wird berücksichtigt, dass mit dem werkstofflichen Recycling ein Beitrag zum PET-Bedarf geleistet wird und damit die entsprechenden fossilen Ressourcen eingespart werden. Zudem fällt die Entsorgung des PET nicht oder erst nach einer weiteren Nutzung an. Jedoch werden andere Energieträger und somit andere Ressourcen benötigt, um den Energiebedarf zu decken. Würde nach einmaligem Gebrauch das PET thermisch verwerten, könnte damit ein Beitrag zur Deckung des Energiebedarfs geleistet werden, der auch heute noch oft auf fossilen Energieträgern beruht. Aber es würden fossile Energieträger benötigt, um den PET-Bedarf zu decken<sup>10</sup>. Dieser Ansatz wird typischerweise und berechtigterweise in Ökobilanzen von Recyclingsystemen verwendet, die der Frage nachgehen, welches die optimale Verwertung einer bestimmten Menge gebrauchtem PET ist. Abbildung 1 zeigt die verschiedenen Einflussfaktoren der untersuchten Systeme.



**Abbildung 1: Untersuchtes System mit hoher resp. tiefer Recyclingquote**

<sup>10</sup> Auf Grund des geringen Marktanteils an PET aus biogenen Rohstoffen wird im Rahmen dieser Studie nicht auf die Problematik eingegangen, dass diese zwar weniger fossile Rohstoffe benötigen, jedoch oft höhere Umweltbelastungen aufweisen als PET aus fossilen Rohstoffen, falls das biogene PET aus landwirtschaftlich angebauten Rohstoffen hergestellt wird.

Die Berechnung des Umweltnutzens aus der Sicht des Abfallmanagements erfolgt typischerweise pro definierte Menge an gesammelten PET-Flaschen (z.B. 1 t PET-Flaschen) und ergibt sich wie folgt aus der Differenz der Umweltbelastung des Recyclingsystems und der Umweltbelastung des Referenzsystems «Entsorgung in der KVA»:

$$N_R = U_R - U_E \quad (1)$$

Mit:

$N_R$ : Umweltnutzen des Recyclingsystems

$U_R$ : Umweltbelastung des Recyclingsystems

$U_E$ : Umweltbelastung der Entsorgung

Die Umweltbelastung des Recyclingsystems ergibt sich aus den Aufwänden der Primärmaterialherstellung und des Recyclingsystems abzüglich der Gutschrift für den Ersatz von neuem, primärem Material:

$$U_R = A_P + P_c * (A_c - e_c * A_P) + P_o * (A_o - e_o * A_P) + (1 - P_c - P_o) * U_E \quad (2)$$

Mit:

$A_c$ : Aufwand des CL-Recyclingsystems mit der entsprechenden Umweltbelastung

$A_o$ : Aufwand des OL-Recyclingsystems mit der entsprechenden Umweltbelastung

$A_P$ : Aufwand der primären Herstellung mit der entsprechenden Umweltbelastung

$e_c$ : Ersatzfaktor: Drückt aus, wieviel Primärmaterial durch das CL-Recyclingmaterial ersetzt werden kann

$e_o$ : Ersatzfaktor: Drückt aus, wieviel Primärmaterial durch das OL-Recyclingmaterial ersetzt werden kann

$P_c$ : Anteil, welcher ins CL-Recycling geht

$P_o$ : Anteil, welcher ins OL-Recycling geht

$U_E$ : Umweltbelastung der Entsorgung

Die Umweltauswirkungen der Entsorgung  $U_E$  wird als Belastung durch die Verbrennung abzüglich des Nutzens der Energiebereitstellung berechnet.

$$U_E = U_V - (A_w + A_e) \quad (3)$$

Mit:

$U_V$ : Umweltbelastung durch die Verbrennung in einer KVA

$A_w$ : Umweltbelastung des Aufwandes zur Bereitstellung der Wärme aus fossilen Brennstoffen

$A_e$ : Umweltbelastung des Aufwandes zur Bereitstellung der Elektrizität ab Netz

Tabelle 1 zeigt den Umweltnutzen des PET-Recyclings pro kg PET. Um das Nutzenverhältnis zwischen CL- und OL-Recycling zu ermitteln, wurde nebst dem System mit CL dasselbe System nur mit OL berechnet, d.h.  $P_c = 0$  und  $P_o = \text{Recyclingrate}$ . Daraus wurde der Nutzen CL zu OL berechnet. Neben realistischen Parameterwerten, wurde auch eine Berechnung mit theoretischen Maximalwerten durchgeführt. Bei dieser wurde die Recyclingrate CL auf 99% gesetzt und der Ersatzfaktor auf 100%. Klar sind diese Werte weder aus Gründen der Materialeigenschaften noch der Logistik je machbar. Diese Berechnung soll einfach aufzeigen, wo die theoretische Grenze des Umweltnutzens bei diesem Betrachtungswinkel liegen würde.

**Tabelle 1 Umweltnutzen des OL- und CL-Recyclings von PET aus Abfallmanagementsicht. Angaben pro kg PET.**

Für die bessere Lesbarkeit wurden die gegenüber der vorigen Zeile geänderten Werte jeweils fett gedruckt.

Recyclingrate	Closed Loop		Open Loop		Umweltnutzen		Nutzen CL zu OL	
	Anteil	Ersatzfaktor	Anteil	Ersatzfaktor	kUBP	kg CO <sub>2</sub> eq.	UBP	CO <sub>2</sub> eq
80%	30%	95%	50%	90%	1'800	2.7	1.08	1.04
80%	30%	95%	50%	<b>80%</b>	1'700	2.5	1.14	1.08
80%	30%	95%	50%	<b>70%</b>	1'550	2.4	1.23	1.13
80%	<b>50%</b>	95%	<b>30%</b>	<b>80%</b>	1'800	2.7	1.24	1.13
80%	<b>70%</b>	95%	<b>10%</b>	80%	2'300	3.2	1.57	1.35
<b>99%</b>	<b>99%</b>	<b>100%</b>	<b>0%</b>	<b>100%</b>	2'700	3.7	1.06	1.13

Im Vergleich zu einem PET-Recycling System, welches nur aus 80 % OL-Recycling besteht, liegt der Umweltnutzen, gemessen in UBP, des heutigen PRS Systems rund 1.08 Mal höher, d.h., der Mehrnutzen generiert durch das CL-Recycling liegt bei 8 %. Das tönt nach wenig. Wie die vorherige Tabelle zeigt, hängt der Mehrnutzen stark vom Ersatzpotential des R-PET ab und vom Anteil, welcher in den OL gelangen. Bei einem OL-Ersatzfaktor von 70% liegt der Mehrnutzen des CL-Recyclings bei einem Faktor 1.23. Falls 70% in den CL, ergäbe sich ein Mehrnutzen der knapp einen Faktor 1.6 höher liegt als ein reines OL--System.

Weiter ist zu beachten, dass bei dieser Betrachtungsweise nur der nächste Zyklus der gesammelten Ware berücksichtigt wird. D.h. es ist offen, was mit dem Rezyklat nach der nächsten Anwendung geschieht. Es ist jedoch anzunehmen, dass bei einem CL-Recycling dank dem PRS-System das gebrauchte PET erneut rezykliert wird, während gebrauchtes PET, welches ins OL-Recycling gelangt mit grosser Wahrscheinlichkeit bereits nach einem weiteren Zyklus (oder zwei) entsorgt wird. Wie sich der Nutzen dadurch verändert, wird in Kapitel 2.2 und 2.3 betrachtet.

## 2.2 Aus der Sicht des stofflichen Ressourcenmanagements

Gegenüber der Betrachtungsweise in Kapitel 2.1 werden teilweise die folgenden Einwände erhoben:

- Es ist sinnvoller eingesetztes, neues PET als Ausgangspunkt zu nehmen und nicht das gebrauchte PET.
- Anstatt nur den Nutzen des nächsten Verwertungsschrittes zu berücksichtigen, sollen alle weiteren Recyclingschritte und den sich daraus ergebende Nutzen ebenfalls einbezogen werden.
- Mit jedem zusätzlichen Recyclingschritt erhöht sich der Nutzen und am Ende des Lebensweges kann das PET immer noch verbrannt und energetisch genutzt werden. Das ist sicher sinnvoller als es gleich zu verbrennen.

Diese Einwände können berücksichtigt werden, wenn wir die Optik wechseln, und nun nicht mehr aus Sicht des Abfallmanagements, sondern aus der Sicht des Ressourcenmanagements, d.h. das System aus Sicht einer ausgewählten (in Gedanken markierten) Tonne PET betrachten. Dies bedeutet Folgendes: Wenn es darum geht, die Ressource PET möglichst sinnvoll zu nutzen (nehmen wir an, dass wir nur diese eine Tonne zur Verfügung haben), dann macht es Sinn, das PET so oft wie möglich zu rezyklieren und erst zum Schluss die nicht mehr verwendbaren Anteile zu verbrennen. Somit wird stofflich das Optimum herausgeholt und auch noch die thermische Verwertung berücksichtigt. Aus Sicht dieser einen Tonne PET haben wir so deutlich mehr Nutzen generiert, als wenn wir nach einmaliger PET-Nutzung das PET thermisch verwerten.

Es wird offensichtlich, dass je höher der CL-Anteil ist, desto höher wird der so generierte Umweltnutzen, denn mit jedem Zyklus wird abermals neues Material eingespart. Bei einer theoretischen CL-Rate von 100



% wäre der Umweltnutzen unendlich hoch. Die Frage stellt sich nun, was mit dem Material geschieht, welches in das OL-Recycling gelangt. Grundsätzlich kann auch dieses immer wieder rezykliert werden. Zum heutigen Zeitpunkt ist die Wahrscheinlichkeit sehr hoch, dass das PET-Material nach dem einmaligen OL-Recycling in die thermische Verwertung gelangt. Dies bedeutet, dass der Nutzen nur einmal generiert wird. Da dies heute weitgehend der Realität entspricht und wir ausloten wollen, wie hoch der maximale Zusatznutzen des CL-Recyclings ist, wird für die folgende Berechnung angenommen, dass das Material, welches ins OL-Recycling gelangt, anschliessend thermisch verwertet wird.

Die Berechnung des Umweltnutzens aus Sicht der einen Ressource ergibt sich aus der Differenz der Umweltbelastung des Recyclingsystems und der Umweltbelastung des Referenzsystems «Primärmaterialherstellung und Entsorgung in der KVA» wie folgt:

$$N_R = U_P + U_R + U_E - X * (U_P + U_E) = U_R - (X - 1) * (U_P + U_E) \quad (4)$$

Mit:

$N_R$ : Umweltnutzen des Recyclingsystems

$U_R$ : Umweltbelastung des Recyclingsystems

$U_E$ : Umweltbelastung der Entsorgung

$U_P$ : Umweltbelastung der Primärmaterialproduktion

$X$ : Anzahl stofflicher Nutzungen durch das Recycling als Vielfaches des ersten Primärmaterialeinsatzes

Die Umweltbelastung des Recyclingsystems ergibt sich aus der Summe der Aufwände der Recyclingzyklen abzüglich der Gutschrift für den Ersatz von neuem, primärem Material plus die Umweltbelastung der Entsorgung, wenn das Material zum Schluss nicht mehr weiter rezykliert wird. Um das wiederholte Recycling anzunähern, wurde die folgende Formel verwendet.

$$X = \sum_{n=0}^{\infty} p^n = \frac{1}{1-p} - 1 \quad (5)$$

Wobei:

$P$ : Anteil, der ins CL-Recycling gelangt.

Diese Formel überschätzt tendenziell die Anzahl Recyclingzyklen. Denn für Polymere ist eine hohe Anzahl von Zyklen aus materialspezifischen Gründen nicht möglich, da sich die intrinsischen Materialeigenschaften im Laufe der Nutzung und des Recyclings verändern. Der Grund liegt in der molekularen Struktur der Polymere, welche unter Belastungen aufbrechen können<sup>11</sup>. Bei der heutigen CL-Recyclingrate von 30% ist der Fehler durch die Anwendung dieser Formel schon nach drei Zyklen kleiner als 5%. Bei einer Recyclingrate von 50% beträgt der Fehler nach fünf Zyklen rund 3%. Bei einem Polykondensat wie PET ist dies vertretbar, da die Kettenbrüche bis zu einem gewissen Grad beim Recycling wieder «repariert» werden können. Bei einer Recyclingrate von 80% müssten 15 Zyklen realisiert werden bis der Fehler kleiner als 5% ist. Dies ist keine realistische Anzahl. Bei der Interpretation der Resultate muss die Grenze dieser Annäherung berücksichtigt werden.

Für die Umweltauswirkungen des Recyclings  $U_R$  gilt unter der Annahme, dass das OL-Rezyklat nach einmaligem Einsatz einer thermischen Verwertung zugeführt wird, die folgende Formel:

---

<sup>11</sup> (Dinkel, Conte, & Heim, 2017)

$$U_R = X * (A_c - e_c * A_{Pc}) + X * p_o * (A_o - e_o * A_{Po}) \quad (6)$$

Mit:

$A_c$ : Aufwand des CL-Recyclingsystems mit der entsprechenden Umweltbelastung

$A_o$ : Aufwand des OL-Recyclingsystems mit der entsprechenden Umweltbelastung

$A_P$ : Aufwand der primären Herstellung mit der entsprechenden Umweltbelastung

$A_{Pc}$ : für CL, d.h. food grade PET

$A_{Po}$ : für OL, d.h. non food grade PET

$e_c$ : Ersatzfaktor: Drückt aus, wieviel Primärmaterial durch das CL-Recyclingmaterial ersetzt werden kann

$e_o$ : Ersatzfaktor: Drückt aus, wieviel Primärmaterial durch das OL-Recyclingmaterial ersetzt werden kann

Somit ergibt sich

$$N_R = X * (A_c - e_c * A_P) + X * p_o * (A_o - e_o * A_P) - (X - 1) * (U_P + U_E) \quad (7)$$

Tabelle 2 zeigt den Umweltnutzen des PET-Recyclings pro kg PET aus der Ressourcensicht. Um das Nutzenverhältnis zwischen CL- und OL-Recycling zu ermitteln, wurde nebst dem System mit CL dasselbe System nur mit OL berechnet, d.h. der OL-Anteil entspricht der Recyclingrate und  $p_c = 0$ . Das Material wird nach dem einmaligen OL-Recycling thermisch verwertet.

**Tabelle 2** **Tabelle 1: Umweltnutzen des OL- und CL-Recyclings von PET aus Ressourcensicht. Angaben pro kg PET.**

Für die bessere Lesbarkeit wurden die gegenüber der vorigen Zeile geänderten Werte jeweils fett gedruckt.

Recyclingrate	Closed Loop		Open Loop		Umweltnutzen		Nutzen CL zu OL	
	Anteil	Ersatzfaktor	Anteil	Ersatzfaktor	kUBP	kg CO <sub>2 eq</sub>	UBP	CO <sub>2 eq</sub>
80%	30%	95%	50%	90%	3'400	4.9	2.1	2.8
80%	30%	95%	50%	<b>80%</b>	3'200	4.7	2.3	3.1
80%	30%	95%	50%	<b>70%</b>	3'000	4.5	2.5	3.5
80%	<b>50%</b>	95%	<b>30%</b>	<b>80%</b>	4'600	6.7	3.3	4.3
80%	<b>70%</b>	95%	<b>10%</b>	80%	7'700	10.6	5.5	6.9
<b>99%</b>	<b>99%</b>	<b>100%</b>	<b>0%</b>	<b>100%</b>	355'000	471	157	192

Im Vergleich zu einem PET-Recycling System, welches nur aus 80 % OL-Recycling besteht, liegt der Umweltnutzen, gemessen in UBPs, des heutigen PRS Systems rund 2 Mal höher, d. h., der Mehrnutzen generiert durch das CL-Recycling liegt bei 100 %. Wie die vorherige Tabelle zeigt, hängt der Mehrnutzen stark vom Ersatzpotential des R-PET ab und vom Anteil, welcher in den OL gelangen. Bei einem OL-Ersatzfaktor von 70% liegt der Mehrnutzen des CL-Recyclings bei einem Faktor 2.5. Falls 70% in den CL gelangen ergibt sich ein Mehrnutzen der einen Faktor 5.5 höher liegt als ein reines OL-System.

Der Mehrnutzen des CL-Systems ist mit diesem Ansatz wesentlich höher aus der Sicht des Abfallmanagements.

Es gilt jedoch zu beachten, dass dieser Ansatz aus einer gesamtheitlichen Sicht einen entscheidenden blinden Fleck aufweist: Dies kann mit dem folgenden theoretischen Beispiel verdeutlicht werden: Angenommen es gingen 99 % ins CL-Recycling, dann würden aus 1 Tonne PET dank dem CL-Recycling rund 100 Tonnen PET-Material generiert. Um denselben stofflichen Nutzen ohne Recycling (Referenzsystem) zu erhalten, müssten also 100 Tonnen primäres PET erzeugt und entsorgt werden. Was dieser Ansatz nun eben nicht berücksichtigt, ist, dass die Entsorgung der 100 Tonnen PET im Referenzsystem Energie generiert. Damit die Vergleichbarkeit gegeben ist, muss der Gesamtnutzen derselbe sein, d.h. im Falle des Recyclingsystems müssen noch entsprechende energetische Ressourcen hinzugefügt werden. Dieser Aspekt wird bei der Bedarfssicht in Kapitel 2.3 berücksichtigt.

## 2.3 Aus Sicht des Bedarfs

Die Bedarfsicht basiert auf der Betrachtung des Ressourcenmanagements, berücksichtigt jedoch zusätzlich die Tatsache, dass, um denselben Gesamtnutzen zu erhalten, im Falle des Recyclingsystems noch entsprechende energetische Ressourcen bereitgestellt werden müssen.

Damit muss Formel (6) ergänzt werden mit dem Nutzen der Energiebereitstellung in der KVA, fett dargestellt in der folgenden Formel:

$$N_R = X * (A_c - e_c * A_P) + X * p_o * (A_o - e_o * A_P) - (X - 1) * (U_P + U_E - U_{En}) \quad (7)$$

Mit:

$U_{En}$ : Umweltauswirkungen der Energiebereitstellung, falls diese nicht von der KVA bereitgestellt würde.

Formel (7) geht in Formel (6) über, falls die Umweltauswirkungen der Energiebereitstellung  $U_{En}$  gegen 0 geht. D.h. je besser die Energieversorgung eines Landes aus Umweltsicht ist, desto höher ist der Mehrfachnutzen durch das CL-Recycling verglichen mit dem einmaligen OL-Recycling und nähert sich demjenigen des Ressourcennutzens.

Tabelle 3 zeigt den Umweltnutzen des PET-Recyclings pro kg PET aus der Bedarfsicht.

**Tabelle 3 Umweltnutzen des OL- und CL-Recyclings von PET aus Bedarfsicht. Angaben pro kg PET.**

Für die bessere Lesbarkeit wurden die gegenüber der vorigen Zeile geänderten Werte jeweils fett gedruckt.

Recyclingrate	Closed Loop		Open Loop		Umweltnutzen		Nutzen CL zu OL	
	Anteil	Ersatzfaktor	Anteil	Ersatzfaktor	kUBP	kg CO <sub>2</sub> eq.	UBP	CO <sub>2</sub>
80%	30%	95%	50%	90%	2'600	3.7	1.5	1.5
80%	30%	95%	50%	<b>80%</b>	2'400	3.4	1.6	1.6
80%	30%	95%	50%	<b>70%</b>	2'200	3.2	1.8	1.7
80%	<b>50%</b>	95%	<b>30%</b>	<b>80%</b>	3'500	5.0	2.4	2.3
80%	<b>70%</b>	95%	<b>10%</b>	80%	5'800	8.2	4.0	3.7
<b>99%</b>	<b>99%</b>	<b>100%</b>	<b>0%</b>	<b>100%</b>	270'000	370	113	106

Im Vergleich zu einem PET-Recycling System, welches nur aus 80 % OL-Recycling besteht, liegt der Umweltnutzen, gemessen in UBP, des heutigen PRS Systems rund 1.5 Mal höher, d.h., der Mehrnutzen generiert durch das CL-Recycling liegt bei 50 %. Wie vorherige Tabelle zeigt, hängt der Mehrnutzen stark vom Ersatzpotential des R-PET ab und vom Anteil, welcher in den OL gelangt. Bei einem OL-Ersatzfaktor von 70% liegt der Mehrnutzen des CL-Recyclings bei einem Faktor 1.8. Falls 70% in den CL gelangen ergibt sich ein Mehrnutzen der einen Faktor 4 höher liegt als ein reines OL-System.

Der Mehrnutzen des CL-Systems liegt bei diesem Ansatz zwischen der Sicht des Abfallmanagements und der Ressourcensicht.

Im Folgenden werden die verschiedenen Sichtweisen, deren Anwendbarkeit und Grenzen diskutiert.

## 3 Diskussion

Wie die Ergebnisse in den Kapiteln 2.1 bis 2.3 zeigen, ergeben sich je nach Betrachtungswinkel sehr unterschiedliche Resultate. Entsprechend muss im Folgenden diskutiert werden, unter welchen Bedingungen welcher Betrachtungswinkel sinnvollerweise zu wählen ist. Dazu werden die folgenden Punkte diskutiert:

- Welche Annahmen bei den verschiedenen Betrachtungsweisen getroffen werden und welche Grenzen sich daraus ergeben.
- Wie die verschiedenen Betrachtungsweisen zueinanderstehen.
- Wann welche Betrachtungsweise gewählt werden soll.

Diese Diskussion wird in den folgenden Unterkapiteln geführt und das Fazit daraus in Kapitel 4 dargestellt.

### 3.1 Annahmen und Grenzen der Betrachtungsweisen

#### **Sicht Abfallmanagement**

Wie der Name schon sagt, geht diese Betrachtungsweise von einer bestimmten Menge gebrauchten PET aus und beantwortet die Frage, welches aus Umweltsicht die optimale Verwertung dieses post-consumer Abfalls ist. Wesentliche Faktoren, welche das Resultat bestimmen sind:

- Die Qualität des Rezyklates, d.h., wieviel Primärmaterial technisch ersetzt werden kann. Dabei kann der OL oder CL eine wichtige Rolle spielen.
- Die Energienutzung bei der Entsorgung, d.h., wie hoch die Energienutzung z.B. in der KVA ist und welche Energieträger ersetzt werden.

Entsprechend hängen die Resultate von den regionalen Gegebenheiten und den technischen Möglichkeiten beim Recycling ab. Typischerweise werden Durchschnittswerte, wie Energienutzung der KVAs und Bereitstellung der Nutzwärme und des Stroms der ersetzt wird, verwendet.

Da keine Annahmen bezüglich der weiteren Verwertung des Rezyklates notwendig sind, sind die Resultate für eine bestimmte regionale Situation relativ genau und aussagekräftig. Jedoch wird bei dieser Betrachtung der Nutzen des CL-Recyclings tendenziell unterschätzt, da nicht berücksichtigt wird, dass zumindest bei PET-Flaschen in der Schweiz das CL-Recycling dazu führt, dass bei Verwendung des R-PET in Flaschen diese wieder gesammelt und rezykliert werden und andererseits das OL-Rezyklat nach einer weiteren Anwendung mit grosser Wahrscheinlichkeit nicht mehr stofflich weiterverwertet wird.

#### **Sicht stoffliches Ressourcenmanagement**

Bei dieser Sichtweise wird von der Herstellung von PET ausgegangen und die bestimmte Menge PET als Ressource betrachtet. Bei dieser Betrachtungsweise müssen keine Annahmen bezüglich der energetischen Nutzung bei der thermischen Verwertung getroffen werden. Dafür sind die Resultate sehr stark von der Recyclingquote und den Annahmen bezüglich des zukünftigen Recyclings abhängig. Dabei muss auch berücksichtigt werden, dass Polymere nicht beliebig oft rezykliert werden können, da sich die molekularen Strukturen im Gebrauch und bei der Verarbeitung ändern, siehe auch die Diskussion zu Formel (5).

Teilweise wird diese Sichtweise mit dem Argument begründet, dass ein brennbares Material nach diversen Recyclingzyklen immer noch verbrannt werden kann und dies sinnvoller ist, als es nach der ersten Nutzung zu verbrennen. Dies ist aus Sicht der stofflichen Ressource korrekt, jedoch wird dabei ein Teil des Gesamtsystems, in dem auch PET involviert ist, gänzlich ausgeblendet. Die Abfallmanagements- und die Bedarfs-sicht haben dagegen einen ganzheitlicheren Betrachtungswinkel indem sie berücksichtigen, dass

- Recycling zwar zur Deckung des PET-Bedarfs beiträgt (und somit die Ressource Öl eingespart wird) wie oben beschrieben, gleichzeitig jedoch entsprechend mehr andere Energieträger und somit andere Ressourcen zur Deckung unseres Energiebedarfs benötigt werden.
- die direkte thermische Verwertung des PETs mehr zur Deckung unseres Energiebedarfs beiträgt, dafür aber zusätzliches Öl benötigt wird, um den PET-Bedarf zu decken.

Weil bei der Ressourcensichtweise der energetische Aspekt vernachlässigt wird, ergibt diese den scheinbar höchsten Nutzen.

### **Sicht des Bedarfs**

Die Bedarfssicht berücksichtigt nicht nur die Nutzung der stofflichen Ressource PET, sondern betrachtet das Recyclingdilemma brennbarer Materialien. Das bedeutet, dass sich aus Bedarfssicht für brennbare Materialien wie Kunststoffe oder Papier die Frage stellt, ob es sinnvoller ist, das Material stofflich zu rezyklieren oder thermisch zu verwerten. In beiden Fällen wird ja ein Nutzen generiert, bzw. es kann ein Bedarf gedeckt werden. Wesentliche Faktoren, welche das Resultat bestimmen sind:

- Die Qualität des Rezyklates, d.h., wieviel Primärmaterial technisch ersetzt werden kann. Dabei kann der OL oder CL eine wichtige Rolle spielen.
- Die Energienutzung bei der Entsorgung, d.h., wie hoch die Energienutzung z.B. in der KVA oder einem Zementwerk ist und welche Energieträger ersetzt werden.
- Wie das Rezyklat nach der Nutzung verwertet wird. Bzw. wie viele Recyclingzyklen angenommen werden.

Entsprechend hängen die Resultate von den regionalen Gegebenheiten und den technischen Möglichkeiten beim Recycling ab. Typischerweise werden dafür Durchschnittswerte verwendet. Zudem ergeben sich Unsicherheiten, auf Grund der Annahmen zu den Recyclingzyklen und der zeitlichen Veränderungen, welche sich aus dem mehrfachen Recycling ergeben. Diese Unsicherheit ist der Preis, der bezahlt wird, um eine umfassende Sicht zu erhalten und ist typisch für komplexe Systeme.

## **3.2 Bezug der Sichtweisen zueinander**

Wie im vorherigen Kapitel dargestellt wurde, ist die Bedarfssicht die umfassendste und die Ressourcensicht die einseitigste Betrachtungsweise, da letztere die Tatsache ausklammert, dass unsere Gesellschaft Energie benötigt und die Bereitstellung dieser Energie ebenfalls mit Umweltauswirkungen verbunden ist. In einer idealen Welt, in der die Umweltauswirkungen der Energiebereitstellung praktisch null wären, würden die Ergebnisse der Bedarfssicht in diejenige der Ressourcensicht übergehen. Da dies auch mit den besten alternativen Möglichkeiten der Energiebereitstellung nicht der Fall ist, kann die Ressourcensicht bestenfalls zur Bestimmung des theoretischen Grenznutzens des Mehrfachrecyclings verwendet werden.

Demgegenüber stellt die Abfallmanagementsicht für eine bestimmte Situation die untere Grenze des Recyclingnutzens dar, da der Nutzen eines möglichen zusätzlichen Recyclings nicht betrachtet wird. Dies kann für PET wesentlich sein, da PET aufgrund des Aufwandes bei der Herstellung, der Art der Polymerisation und der chemischen Struktur je nach Anwendung ein mehrfaches Recycling mit hohem Umweltnutzen erlaubt. Bei anderen Polymeren kann dies anders sein. Bezüglich dem Verhältnis des Nutzens des CL-Recyclings zum OL-Recycling gehen die Resultate der Bedarfssicht in diejenigen des Abfallmanagements über, falls die gleiche Anzahl Recyclingzyklen für CL wie für OL realisiert würden und das OL-Rezyklat dabei immer denselben Ersatzfaktor aufweisen würde. Typischerweise sind diese Bedingungen nur bedingt oder gar nicht erfüllt. In der Schweiz führt das PRS-System dazu, dass bei einem CL-Recycling das Rezyklat wieder gesammelt und verwertet wird. Jedoch muss angenommen werden, dass PET, welches ins OL-Recycling gelangt, am Ende der nächsten Nutzungsphase fast immer thermisch verwertet wird. Entsprechend kann die Abfallmanagementsicht als untere Grenze des Umweltnutzens betrachtet werden.

### 3.3 Geeignete Betrachtungsweise

Die geeignete Betrachtungsweise hängt wesentlich von der Fragestellung ab!

Bei vielen Ökobilanzen ist die Fragestellung folgender Natur: „welche Umweltauswirkungen ergeben sich durch die Bereitstellung einer gewissen Funktion? Z.B. Aufbewahrung und Schutz einer gewissen Produktmenge oder Verwertung einer bestimmten Menge an Abfall“. Für Letzteres ist die Abfallmanagementsicht die geeignete Betrachtungsweise. Das ist auch der Grund, weshalb dieser Ansatz typischerweise und berechtigterweise in Ökobilanzen von Recyclingsystemen verwendet wird, wenn es um den Umweltnutzen von Recyclingsystemen geht. Zudem hat diese Sichtweise den Vorteil, dass keine Annahmen zu nachfolgenden Schritten gemacht werden müssen. Andererseits kann dies dazu führen, dass das CL-Recycling tendenziell zu schlecht dargestellt wird, wie die Resultate in Kapitel 2 zeigen.

Für eine Fragestellung wie in dieser Studie, welche sich mit den Auswirkungen von zwei Systemen CL und OL beschäftigt, ist die Bedarfssicht die geeignete Betrachtungsweise. Sie trägt einerseits der Tatsache Rechnung, dass ein CL-Recycling eine Mehrfachnutzung des Materials ermöglicht und berücksichtigt in ihrem holistischen Ansatz das Recyclingdilemma brennbarer Materialien. Auf dieses wird im folgenden Kapitel 3.4 eingegangen.

Die Sicht des stofflichen Ressourcenmanagements berücksichtigt genau dieses Dilemma nicht und stellt sich auf den Standpunkt, dass ein stoffliches Recycling immer sinnvoll ist, wenn der Aufwand für das Rezyklieren kleiner ist als derjenige der Neuherstellung. Dabei wird der Energiebedarf unserer Gesellschaft ausgeblendet. Entsprechend kann diese Betrachtungsweise aus einer gesamtheitlichen Sicht wie dies die Ökobilanzierung einnimmt, für die Entscheidungsfindung nicht oder nur mit Einschränkung empfohlen werden.

### 3.4 Das Recyclingdilemma brennbarer Materialien

Beim Fokus auf den Werkstoff und dessen stoffliche Ressource ist klar, dass sich Recycling lohnt, solange die Aufwände dafür geringer sind als für die Herstellung des Primärmaterials. Aus Abfallmanagement- und Bedarfssicht stellt sich jedoch für brennbare Materialien wie Kunststoffe oder Papier die Frage, ob es sinnvoller ist, das Material stofflich zu rezyklieren oder thermisch zu verwerten. In beiden Fällen wird ja ein Nutzen generiert. Dabei zeigt sich, dass je fossiler der Energiemix ist, der durch die thermische Verwertung ersetzt wird, desto höher ist der Nutzen der Verbrennung. Und dieser Nutzen kann so hoch sein, dass unter dem Strich das einmalige Verwenden eines Materials mit anschliessender thermischer Verwertung sinnvoller erscheint als ein mehrmaliges stoffliches Recycling des Materials. Mit anderen Worten: je schlechter die Energiestrategie eines Landes oder einer Region ist, desto weniger scheint sich das stoffliche Recycling von brennbaren Materialien zu lohnen. Andererseits würde sich das stoffliche Recycling umso mehr lohnen, wenn ein Land oder Region ausschliesslich mit erneuerbaren und ökologisch verträglichen Energien versorgt wird. Im idealen Fall, d.h. wenn die Energie praktisch keine Umweltbelastung aufwiese, hätten wir dieselben Resultate aus Sicht des Ressourcenmanagements und aus Bedarfssicht. Das heisst, die Ressourcenmanagementsicht widerspiegelt den Umweltnutzen, wenn die bei der Entsorgung ersetzte Energie frei von Umweltbelastungen wäre. Das energiepolitische Versagen behindert zumindest aus ökologischer Sicht den Recyclingausbau von brennbaren Materialien. Wir können uns die berechtigte Frage stellen, inwiefern diese ökologische Bestrafung der Recyclingsysteme für das energiepolitische Versagen gerechtfertigt ist<sup>12</sup>. Dieses Dilemma zeigt auch die Schwierigkeit bei der Interpretation von Ökobilanzen auf.

---

<sup>12</sup> (Kägi & Dinkel, 2015)

## 4 Fazit

Das PET CL-Recycling der PRS ermöglicht die direkte Wiederverwendung des rezyklierten PET-Granulats in Flaschen. Da diese wiederum mit dem PRS-System gesammelt und dem Recycling zugeführt werden, generiert dies aus Umweltsicht einen signifikanten Mehrnutzen, gegenüber einem OL-Recycling, welches oft mit einem Downcycling verbunden ist und anschliessend thermisch verwertet wird. Diese Tatsache gilt unabhängig von den drei in dieser Studie untersuchten Betrachtungsweisen. Jedoch unterscheidet sich die Höhe des Nutzens je nach Sichtweise. Am höchsten ist er aus Sicht von PET als stoffliche Ressource gefolgt von der Bedarfssicht. Am kleinsten ist der Unterschied aus Sicht des Abfallmanagements. Für das aktuelle PRS-System, Stand 2016, beträgt das Verhältnis zwischen CL- und OL-Recycling 1.5 für die Bedarfssicht, welche als die adäquate Betrachtungsweise angesehen wird. Aus Sicht Abfallmanagement ist der Mehrnutzen mit einem Faktor 1.08 wesentlich geringer und mit dem Faktor 2.1 aus Sicht des stofflichen Ressourcenmanagements entsprechend höher.

Der Grund liegt darin, dass beim Abfallmanagement nur der folgende Zyklus betrachtet wird. Damit wird der Nutzen des Mehrfachrecyclings beim CL nicht berücksichtigt, dafür muss keine Annahme getroffen werden, was mit dem OL-Rezyklat nach dem nächsten Einsatz geschieht. Es gibt durchaus auch Anwendungen, bei denen mehrfache Recyclingzyklen beim OL-Recycling möglich sind. Heutzutage sind diese jedoch eher selten. Zudem kann auch das OL-Recycling einen hohen Ersatzfaktor haben. Im theoretischen Grenzfall bei dem auch das OL-Recycling immer wieder zu einer Wiederverwertung des Materials führt und der Ersatzfaktor sich nicht verringert, würde sich das Verhältnis von CL zu OL der Bedarfssicht demjenigen des Abfallmanagements annähern.

Auf der Basis der heutigen Zahlen des PRS-Systems und der gemachten Annahmen, wobei die wesentlichste darin besteht, dass das OL-Rezyklat nach dem folgenden Gebrauchszyklus nicht stofflich rezykliert, sondern thermisch verwertet wird, lohnt sich das CL- gegenüber dem OL-Recycling, da es einen 50% höheren ökologischen Nutzen bringt. Je nach Umständen kann sich dieser Wert folgendermassen verändern:

- Eine Steigerung der CL-Recyclingrate würde das Verhältnis weiter erhöhen, z.B. 50% CL-Recycling führt zu einem Faktor grösser als 2. Bei noch höheren CL-Recyclingquoten ist zu beachten, dass die verwendete Formel das Verhältnis überschätzt, siehe dazu auch die Diskussion in Kapitel 2.2.
- Die angestrebte Energiestrategie des Bundes, welche u.a. dazu führt, dass die Umweltauswirkungen der Energiebereitstellung kleiner werden, führt ebenfalls zu einer Erhöhung des Faktors CL zu OL, siehe dazu Kapitel 3.4
- Eine Erhöhung des Faktors CL zu OL ergibt sich auch dann, wenn der Ersatzfaktor des OL-Rezyklates kleiner ist, d.h. die Qualität des OL-Rezyklates schlechter ist. Für die Standardvariante wurde ein hoher Ersatzfaktor von 90% für das OL-Rezyklat verwendet.
- Falls OL-Rezyklat ebenfalls mehrfach rezykliert würde, hätte dies eine Reduktion des Faktors CL zu OL zur Folge.

Da keiner dieser Einflussfaktoren zu einer Umkehrung der Resultate führt, kann die Aussage, dass das CL-Recycling der PRS zu einem ökologischen Mehrnutzen gegenüber dem OL-Recycling führt als gesichert angesehen werden.

## 5 Referenzen

BFE. (2017). Schweizerische Gesamtenergiestatistik 2016.

Carbotech AG. (2008). *Ökobilanz Nutzen der Glasverwertungen*.

Dinkel, F., Conte, F., & Heim, T. (2017). *Permanent Materials - An approach to classify materials in the context of sustainable development*.

Dinkel, F., & Hauser, A. (2008). *Ökologischer Nutzen des PET-Recycling Schweiz*. Im Auftrag von PET Recycling Schweiz. Abgerufen von [http://carbotech.ch/cms2/wp-content/uploads/Carbotech\\_LCA\\_PET-REcycling-Schweiz.pdf](http://carbotech.ch/cms2/wp-content/uploads/Carbotech_LCA_PET-REcycling-Schweiz.pdf)

Dinkel, F., Kägi, T., Bunge, R., Pohl, T., & Stäubli, A. (2017). KuRVE - Kunststoff Recycling und Verwertung - Ökonomisch-ökologische Analyse diverser Kunststoffsammlensysteme in der Schweiz. Im Auftrag von BAFU, diverse Kantonale Umweltämter, Cemsuisse, Swissrecycling, VBSA.

Dinkel, F., Kägi, T., & Weber, L. (2017, Februar). *Ökologischer Nutzen von Recyclingsystemen in der Schweiz - Update 2017*. Im Auftrag von Swissrecycling.

Franov, E., & Kägi, T. (2011). *Ökobilanz grafischer Papiere, Vergleich von Recycling und Frischfaser (FSC) Büropapier*. BAFU.

Frisknecht, R., & Büsser Knöpfel, S. (2013). *Ökofaktoren Schweiz 2013 gemäss der Methode der Ökologischen Knappheit - Methodische Grundlagen und Anwendung auf die Schweiz* (No. 1330) (S. 256). Bern: Bundesamt für Umwelt.

IPCC. (2014). *Climate change 2013: the physical science basis: Working Group I contribution to the Fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. (T. F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, u. a., Hrsg.). New York: Cambridge University Press.

ISO 14040. (2006). *Environmental management—Life cycle assessment—Requirements and guidelines*. Geneva.

Kägi, T., & Dinkel, F. (2015). Implementation of recycling systems: The delusive role of LCA. 25th SETAC Europe Annula Meeting in Barcelona. Abgerufen von [https://carbotech.ch/cms/wp-content/uploads/Kaegi\\_complex-recycling-v1.0.pdf](https://carbotech.ch/cms/wp-content/uploads/Kaegi_complex-recycling-v1.0.pdf)

Rytec. (2016). *Einheitliche Heizwert- und Energiekennzahlenberechnung der Schweizer KVA nach europäischem Standardverfahren – Resultate 2015*. Im Auftrag der Bundesämter für Umwelt und Energie. Abgerufen von [http://www.bfe.admin.ch/php/modules/publikationen/stream.php?extlang=de&name=de\\_425037652.pdf](http://www.bfe.admin.ch/php/modules/publikationen/stream.php?extlang=de&name=de_425037652.pdf)