

Zusammenfassung

Wie zirkulär ist PET?

Ein Bericht über die Zirkularität
von PET-Flaschen, anhand der
Fallstudie Europa

Februar 2022





1.0 Einleitung und Forschungsrahmen

Polyethylenterephthalat (PET) ist ein Polymer, das sowohl in Einwegverpackungen als auch in der Textilherstellung (Polyesterfasern) weit verbreitet ist. In einem vollständig kreislaufförmigem Wirtschaftsmodell würden alle PET-Produkte aus recyceltem PET (rPET) hergestellt werden und es wäre kein neues PET (vPET) erforderlich. In diesem Bericht schauen wir, welcher Anteil des auf den Markt gebrachten PET (POM) heute in einem kreislaufförmigen Herstellungsmodell enthalten ist – und wie viel Neu-PET (vPET) benötigt wird, als Prozentsatz aller insgesamt hergestellten PET-Produkte – um die Frage “Wie zirkulär ist PET?” zu beantworten.

Neben der **aktuellen** Zirkularität bewerten wir auch die potenzielle Zirkularität **in der Zukunft** und ihre Obergrenze, wenn nur mechanische Recyclingtechniken verwendet werden. Darauffolgend betrachten wir das **weitere Potenzial** für die Kreislaufwirtschaft, wenn in Zukunft auch chemische Recyclingtechniken eingesetzt werden und wenn das Angebot an PET-Produkten, die in einem geschlossenen Kreislauf recycelt werden, erhöht wird. Während unsere detaillierten Bewertungen der PET-Zirkularität Daten für Europa verwenden, gelten ähnliche Themen und Schlussfolgerungen weltweit. Dieser



PET-Flaschen



Alle PET-Verpackungen
(einschließlich anderer PET-Verpackung,
zum Beispiel Tablett und Umreifung)



Den allgemeinen PET-Stream
(+ Textilien /
Faserherstellung)

2.0 Aktuelle Zirkularität

Der Großteil PET wird derzeit nicht in einem Kreislaufmodell verwaltet, da der Materialverlust aus dem Kreislaufsystem hoch ist und dabei Material in allen Phasen des PET-Lebenszyklus verloren geht. Es gibt mehrere mögliche Einschränkungen, die die derzeitige Zirkularität von PET beeinflussen:

Schlüsselthemen

- **Ineffektive Sammelsysteme, die zu hohen Verlusten von Post-Consumer-PET führen.**
- **Die mangelnde Verfügbarkeit von Recyclern bedeutet, dass ein Teil des gesammelten Materials nicht wiederaufbereitet werden kann.**
- **Verunreinigungen aus der Sammlung und Sortierung.**
- **Produktdesign und Materialqualität, einschließlich farbigem PET und Multi-Material Anwendungen sowie Lebensmittelstandards für rPET.**
- **rPET-Wirtschaftlichkeit, d.h. die Marktrate von rPET im Vergleich zu vPET, die von vielen Faktoren abhängig ist, mitunter von der Nachfrage in den Endmärkten.**



Das Modell der PET-Zirkularität ist viel komplexer als ein einzelnes zirkuläres PET-Anwendungsmodell. Tatsächlich gibt es viele verschiedene PET-Produkte mit unterschiedlichen Herstellungsanforderungen an recycelte PET (rPET) -Rohstoffe. Es ist technisch und wirtschaftlich schwieriger, die Anforderungen an die Fertigungsqualität mit rPET zu erfüllen, als mit Neu-PET. Da dies insbesondere bei Closed-Loop-Anwendungen der Fall ist, kann rPET von einem Produktstrom zum anderen hinunter "kaskadieren", in der Regel von höherer Qualität zu niedriger. Wenn das rPET einmal auf ein niedrigeres Qualitätsniveau kaskadiert ist, ist es unwahrscheinlich, dass es sich in der Kaskade wieder hinaufbewegt und in einigen Fällen verlässt rPET das zirkuläre Recyclingsystem vollkommen.

2.1 PET-Flaschen

Von der gesamten PET-Familie verfügt das Flaschenrecycling über die am weitesten entwickelte Technologie und Infrastruktur. In Europa variieren die Sammelsysteme für PET-Flaschen. Einige Länder erreichen hohe Recyclingquoten mit Getränkepfandsystemen (DRS), während andere Länder und Regionen niedrigere Recyclingquoten mit separaten Sammelsystemen erreichen. Wir schätzen, dass PET-Flaschen eine Recyclingquote von etwa 50% haben (berechnet unter Verwendung des Gewichts des PET-Materials in der Phase nach dem Waschen und Flocken im Vergleich zu dem Gewicht der PET-Flaschen auf dem Markt (einschließlich Deckel und Etiketten)). rPET, welches in der Flaschenherstellung verwendet wird, muss hohe insgesamt Qualitätskriterien erfüllen und aus Flaschen stammen. Es wird geschätzt, dass auf dem Markt erhältliche Flaschen (POM) durchschnittlich nur 17%⁽¹⁾ rPET beinhalten, wobei das verbleibende rPET in andere Fertigungsanwendungen niedrigeren Grades heruntergecyclt wird und einen Verlust aus dem zirkulären Flaschenstrom darstellt.

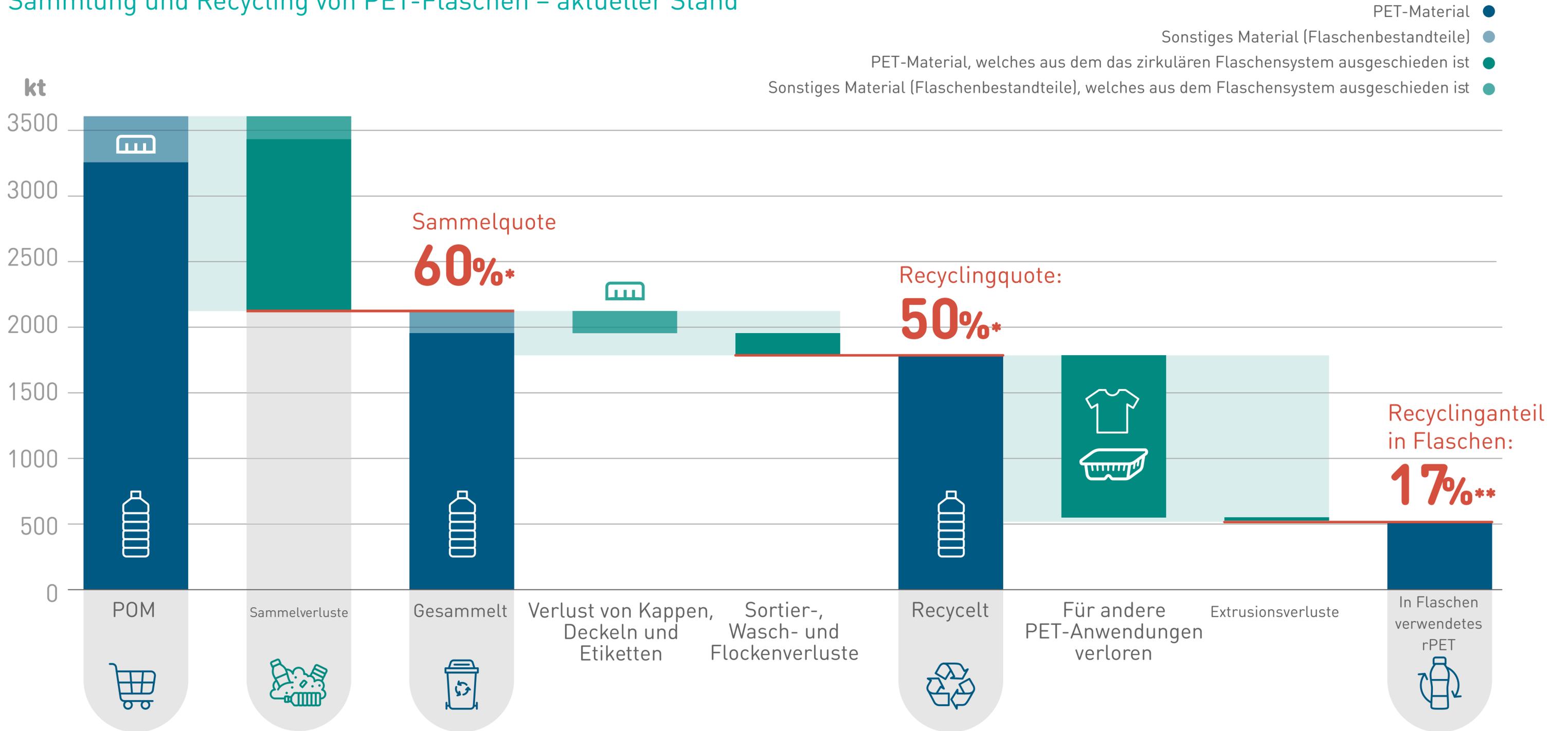


Abbildung E-1

Sammlung und Recycling von PET-Flaschen – aktueller Stand

* Basierend auf der Gesamtflaschentonnage POM

** Basierend auf PET-Tonnage POM



2.2 Der allgemeine PET-Strom

Während Flaschen den größten Anteil an PET-Verpackungen ausmachen, wird PET auch in anderen PET-Anwendungen, wie z. B. in Fasern und in der Herstellung von Einwegschalen, Folien und Umreifungsbändern verwendet.

In Europa gibt es keine standardisierte Sammlung und Sortierung von PET-Anwendungen außerhalb von PET-Flaschen. Das Fehlen geeigneter Sortier- und Recyclingtechnologien, sowie das Design dieser Anwendungen machen es derzeit schwierig, sie zu recyceln. Obwohl ein Teil des Tablett- und Folienrecyclings in kleinem Maßstab stattfindet, ist die Menge im größeren Schema der PET-Verpackungsherstellung derzeit unbedeutend. Daher wurde im aktuellen Szenario nur das Flaschenrecycling berücksichtigt.

Tabletts verbrauchen etwa ein Drittel (31%) des gesamten rPET, das durch das Flaschenrecycling erzeugt wird. Insgesamt wird 74% des rPET aus Flaschen in PET-Verpackungen verwendet. Während dies bedeutet, dass das von Flaschen erzeugte rPET in neuen Verpackungsprodukten Verwendung findet, bedeutet das Fehlen von großflächigem Recycling, für alles außer PET-Flaschen, dass es schließlich als Leckage aus der Zirkularität von PET-Verpackungen verloren geht. Etwa 14% des globalen Polyestermarktes besteht aus recyceltem Polyester, die Mehrheit davon wird aus PET-Flaschen hergestellt.^[2]

Klares/hellblaues Flaschenmaterial ist in der Regel am wünschenswertesten für die Textilproduktion, da dadurch Fasern mit reduzierter Verfärbung entstehen. Obwohl Fasern einen recycelten Inhalt haben können (rPET aus Flaschen), gibt es aktuell keine bekannten Recyclingprozesse im Marktmaßstab für Post-Consumer-Fasern. Daher scheidet, ähnlich wie bei anderen PET-Verpackungen (außer Flaschen), die Masse des in Fasern verwendeten PET am Ende als Verlust aus dem Kreislaufsystem.



Abbildung E-2: PET-Massenströme - aktueller Zustand

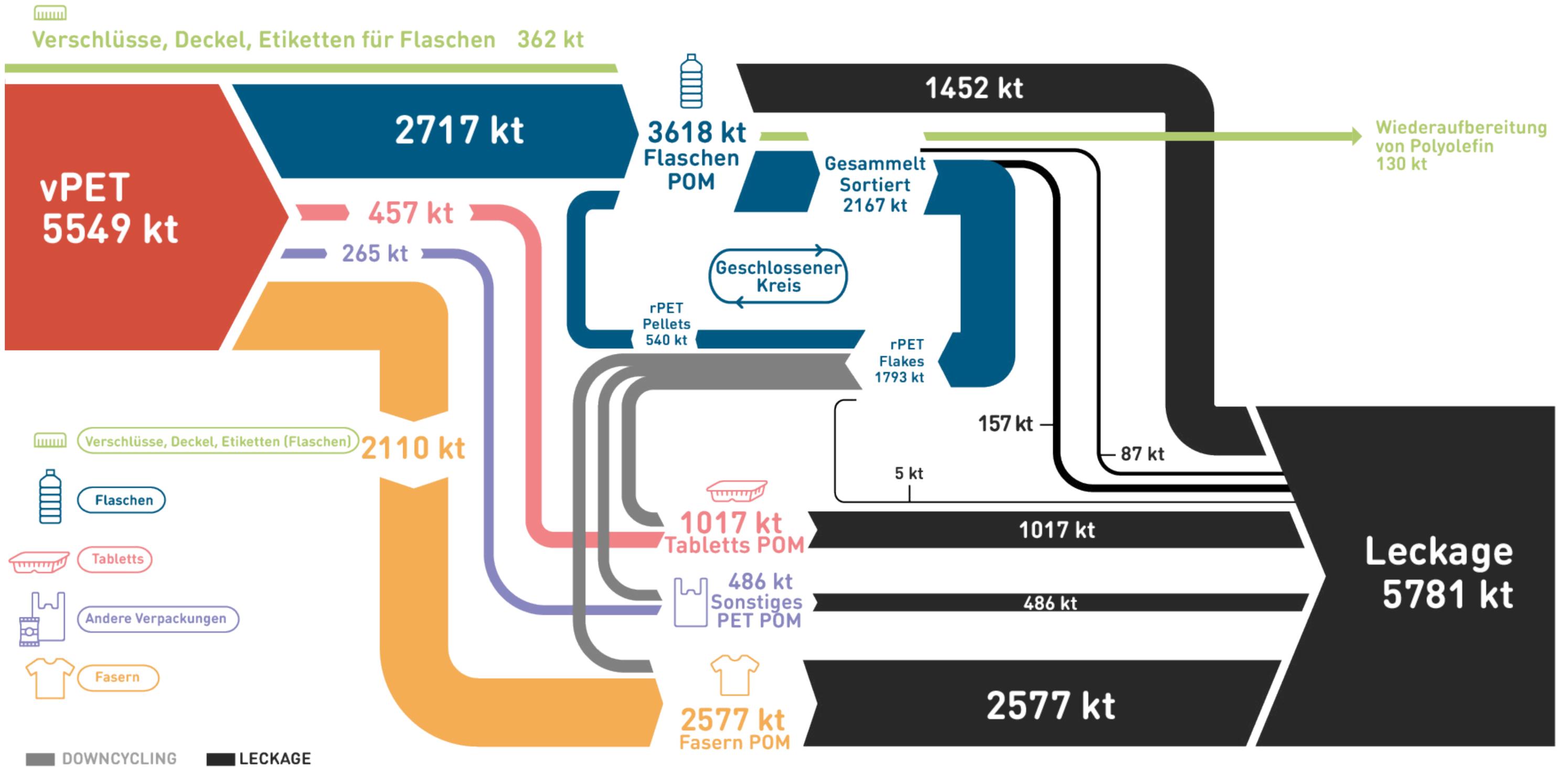
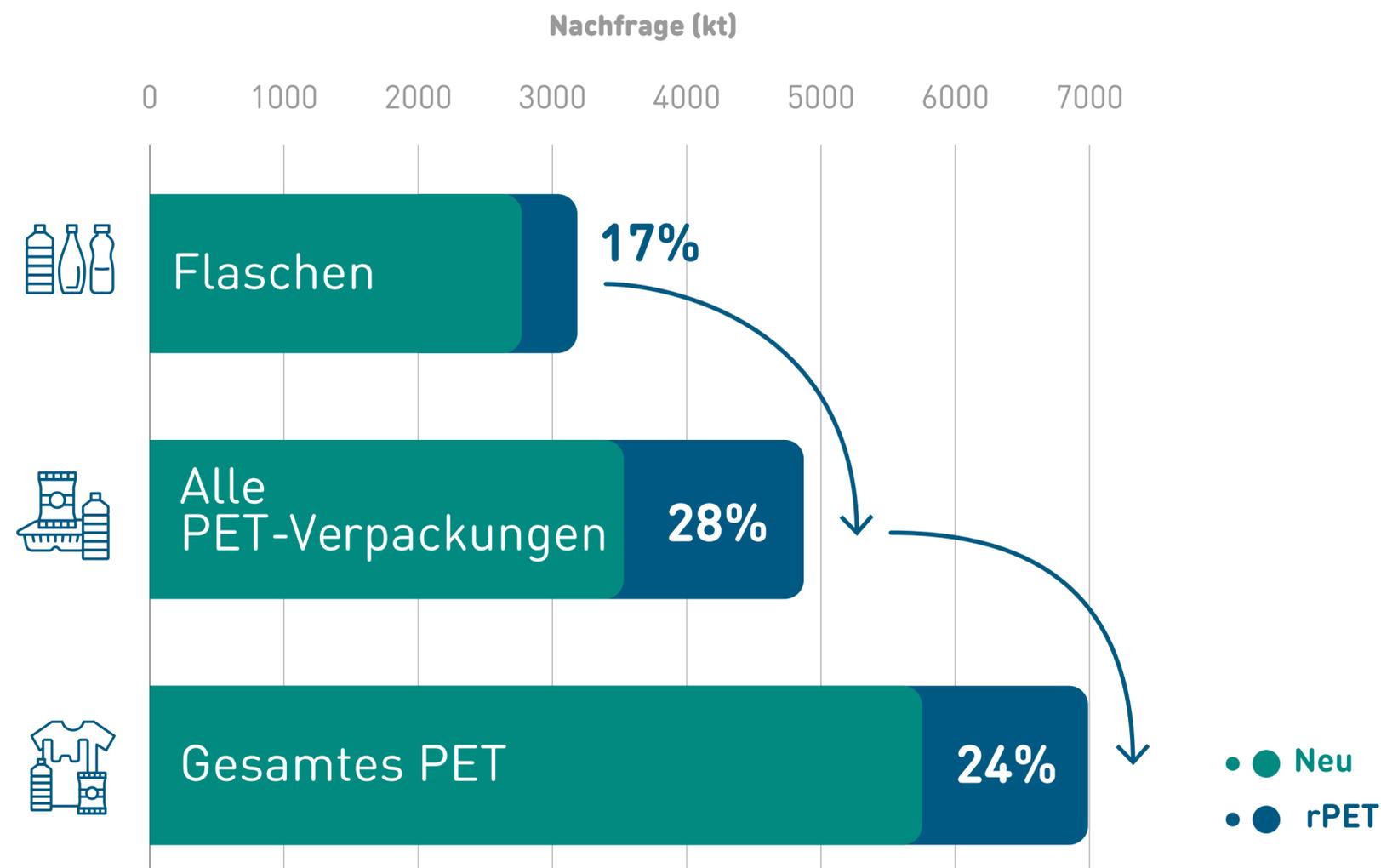


Abbildung E-2 zeigt die aktuellen PET-Massenströme für alle in diesem Bericht bewerteten PET-Anwendungen. Sie zeigt deutlich, dass nur Flaschen recycelt werden und somit der Recyclinganteil für alle Produktströme aus Flaschen gewonnen wird. Von dem 1,8 mt-Flockenoutput aus Flaschen wird nur 31% zu Pellets für Flaschen verarbeitet, der Rest (69%) kaskadiert in andere Produkte wie Schalen, sonstige Verpackungen oder Fasern. Das fehlende Recycling in einigen Produktströmen führt zu weiteren Verlusten aus dem gesamten PET-System.

Abbildung E-3 zeigt auch die mangelnde Zirkularität von PET, indem der Recyclinggehalt der einzelnen Produktionsbereiche in Europa betrachtet wird.

Abbildung E-3:
Recyclinganteil nach Herstellungsumfang (Ausgangswert)

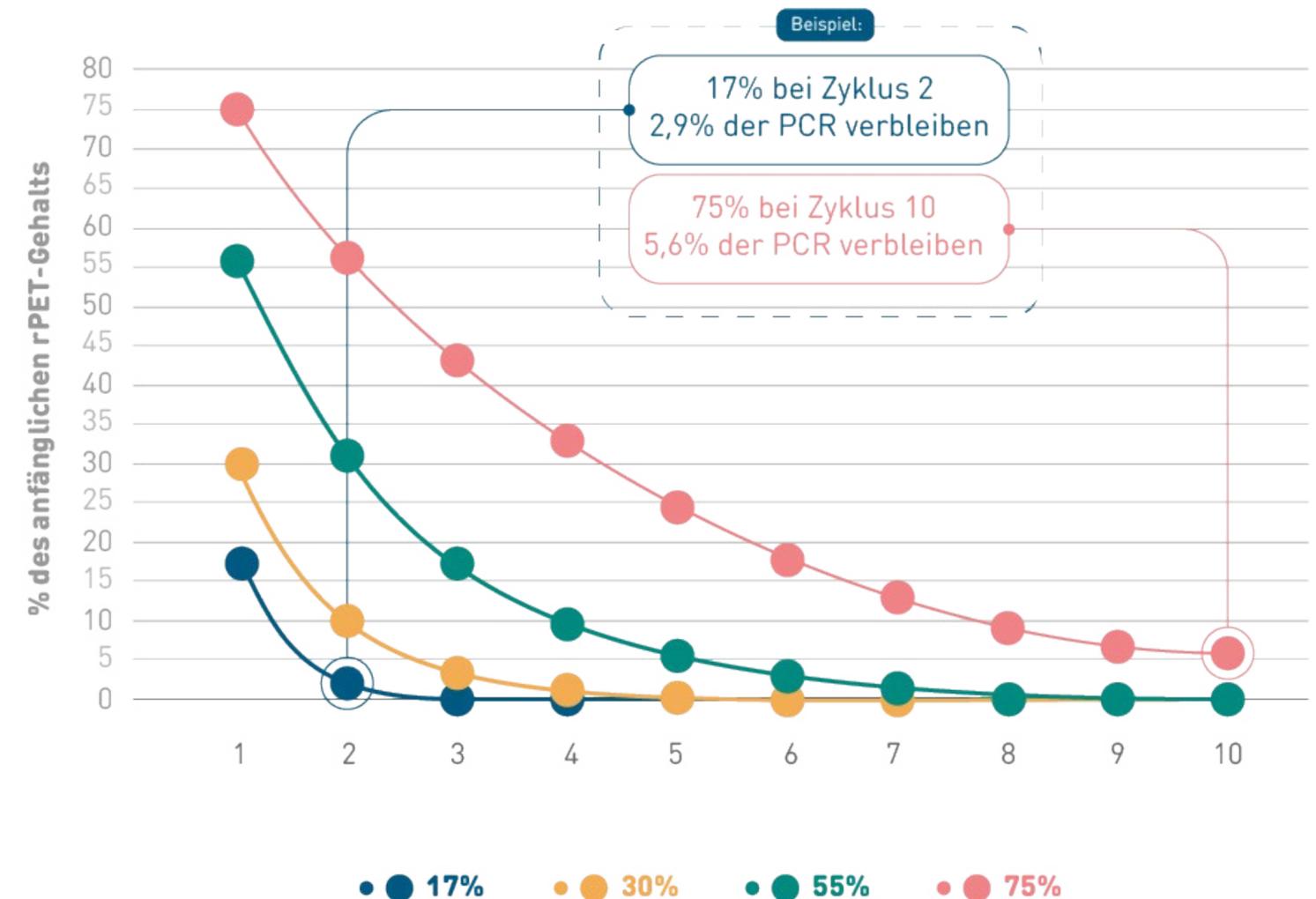


3.0 Obergrenzen der PET-Zirkularität in der Zukunft

Bevorstehende Politik treibt eine erhöhte Flaschensammlung voran, die wahrscheinlich nur durch die Einführung von Pfandrücknahmesystemen (DRS) für PET-Getränkeflaschen erreichbar ist. Die breite Einführung von DRS in Verbindung mit Verbesserungen im Flaschenproduktdesign wird wahrscheinlich auch Vorteile in der Qualität von aus Flaschen gewonnenem rPET bieten.

Petcycle, ein deutsches DRS-Kreislaufsystem mit geschlossenem Kreislauf, zeigt, dass eine kontinuierliche Zirkularität mit einem rPET-Gehalt von 55 % in Flaschen erreicht werden kann (Recycling-Gehaltsziel für Mitglieder in den letzten acht Jahren). Jüngste Labortestergebnisse^[3] zeigen, dass Flaschen aus 75 % recyceltem Inhalt in einem Kreislaufmodell mit geschlossenem Kreislauf hergestellt werden können, indem 25 % vPET in jeder Herstellungsstufe hinzugefügt werden, ohne dass es zu einem signifikanten Verlust der Flaschenqualitätseigenschaften kommt, abgesehen von einer grauen Verfärbung des Erscheinungsbild der Flasche.

Abbildung E-4:
Langlebigkeit des rPET-Inhalts in PET-Flaschen



Innerhalb des gesamten europäischen PET-Flaschenmarktes bedeutet das, dass Flaschen POM durchschnittlich 17% rPET enthalten, also nur 17% aus der vorherigen Schleife übernommen wird und der PCR-Gehalt innerhalb des Systems sich schnell reduziert, wie in Abbildung E - 4 zu sehen ist. Unter Berücksichtigung der anstehenden Richtlinienänderungen, der Petcycle-Fallstudie sowie die Versuchsergebnisse von Pinter et al., können wir sehen, dass die Auswirkungen auf die Langlebigkeit des PCR-Inhalts in jedem Fall von Bedeutung sind.

Ein Zukunftsszenario wird wahrscheinlich sein, dass Flaschen viel zirkulärer gehandhabt werden, als dies derzeit der Fall ist. Bei einem hohen PCR-Gehalt (maximal 75% in unserem Beispiel) wird eine große Menge rPET-Flakes in gleichfarbige Flaschen zurückgeführt, wobei die Kaskadierung von Flaschen zu geringeren Wertströmen reduziert wird. Bemerkenswert ist auch eine deutliche Verringerung der Verluste

aus dem Flaschensystem, sowohl in Bezug auf Abfall als auch auf die Kaskadierung von rPET in andere, minderwertigere PET-Anwendungen, wie in Abbildung E - 5 zu sehen ist. Aufgrund der mangelnden Verfügbarkeit von rPET aus klarem und hellblauen Flaschen sind in diesem Best-Case-Szenario nur 61% statt 75% Recyclinganteil in Flaschen möglich.

Betrachtet man nur den traditionellen mechanischen Recyclingmarkt gibt es in diesem Bericht zwei mögliche Szenarien, die den Recyclinganteil in Flaschen erhöhen könnten:

1. Eine weitere Verbesserung in den Sammelraten (z. B. Erfüllung höherer Sammelraten in DRS-Schemen); und/oder
2. Eine Bewegung von farbigen und undurchsichtigen zu transparenten Flaschen (dies würde eine Reduzierung der farbigen und undurchsichtigen Flaschen um ca. 91% erfordern).

Einen Recyclinganteil von 75% allein mit einer weiteren Erhöhung der DRS-Sammelquote zu generieren ist unmöglich, selbst wenn man davon ausgeht, dass alle aktuellen und zukünftigen DRS-Systeme die aktuelle Sammelquote des leistungsstärksten DRS-Systems (d. h. 97% gemeldet in Deutschland) erreichen würden. Daher müssten Hersteller Änderungen im Design ihrer Flaschen in Betracht ziehen, insbesondere bei der Farbe ihrer Produkte. Eine Reduzierung der aktuellen undurchsichtigen und farbigen Getränkeflaschen POM um 91% und eine damit einhergehende Erhöhung der klaren und hellblauen Flaschen POM um dieselbe absolute Zahl würde bedeuten, dass insgesamt ein Recyclinganteil von 75% in Flaschen erreicht werden kann.

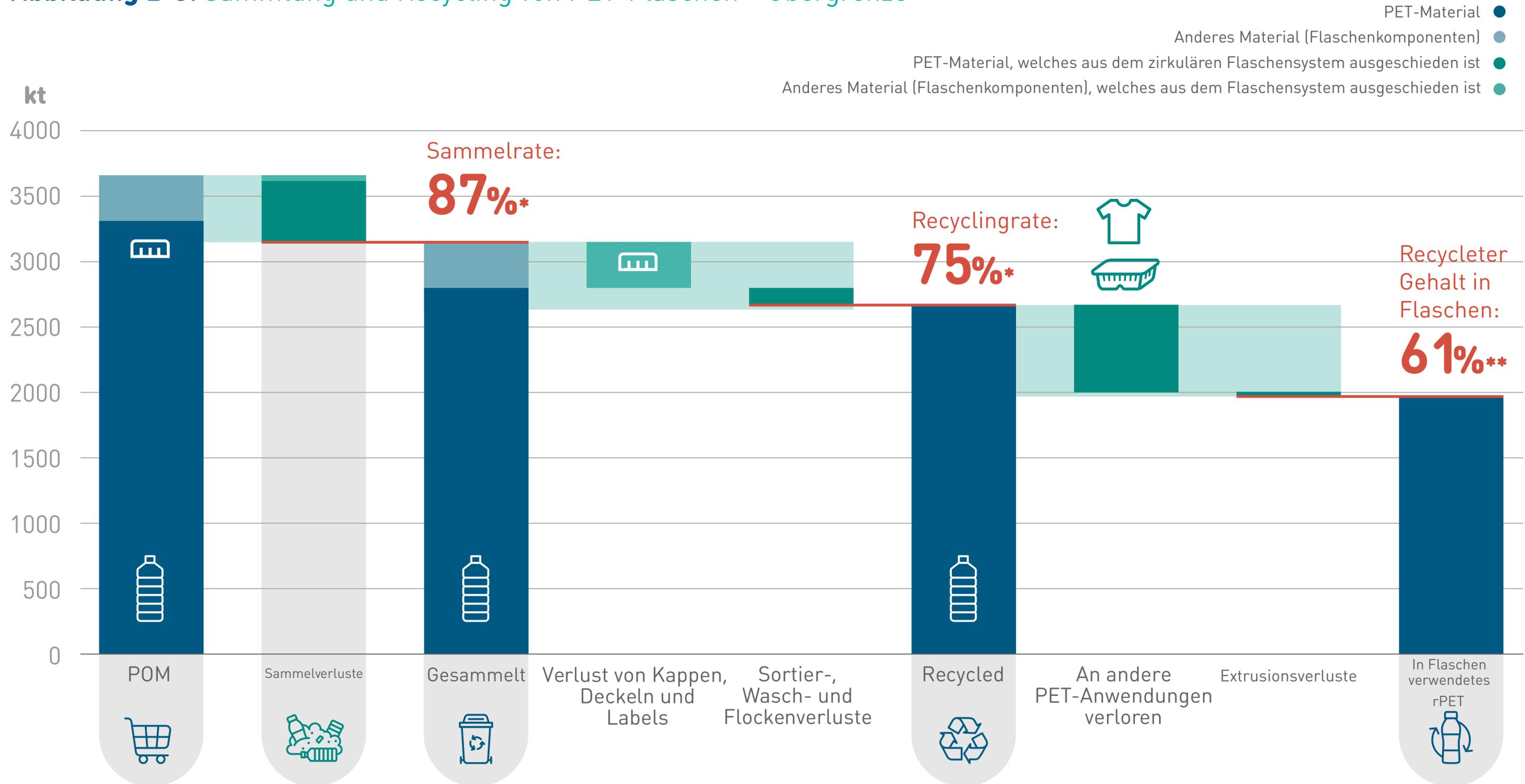
Zusätzlich zu den beiden betrachteten Szenarien für das mechanische Recycling gibt es Potenzial für chemische Recyclingtechnologien wie die chemische Depolymerisation, um zur PET-

Kreislaufwirtschaft beizutragen und einen Recyclinganteil von 75% in allen Flaschen zu erreichen. Diese Industrie ist noch nicht ausgereift und ihr gesamtes Potenzial ist derzeit nicht vollständig bekannt, es scheint jedoch, dass bis 2025 eine geplante Input-Kapazität (sortierte und saubere PET-Flakes) von etwa 350 kt pro Jahr besteht⁽⁴⁾, welches ausreichen könnte, um 75% Inhalt in Flaschen zu erreichen, wenn die Vorschriften zum Kontakt mit Lebensmitteln dies zulassen.



* Basierend auf der gesamten Flaschentonnage POM
 ** Basierend auf PET-Tonnage POM

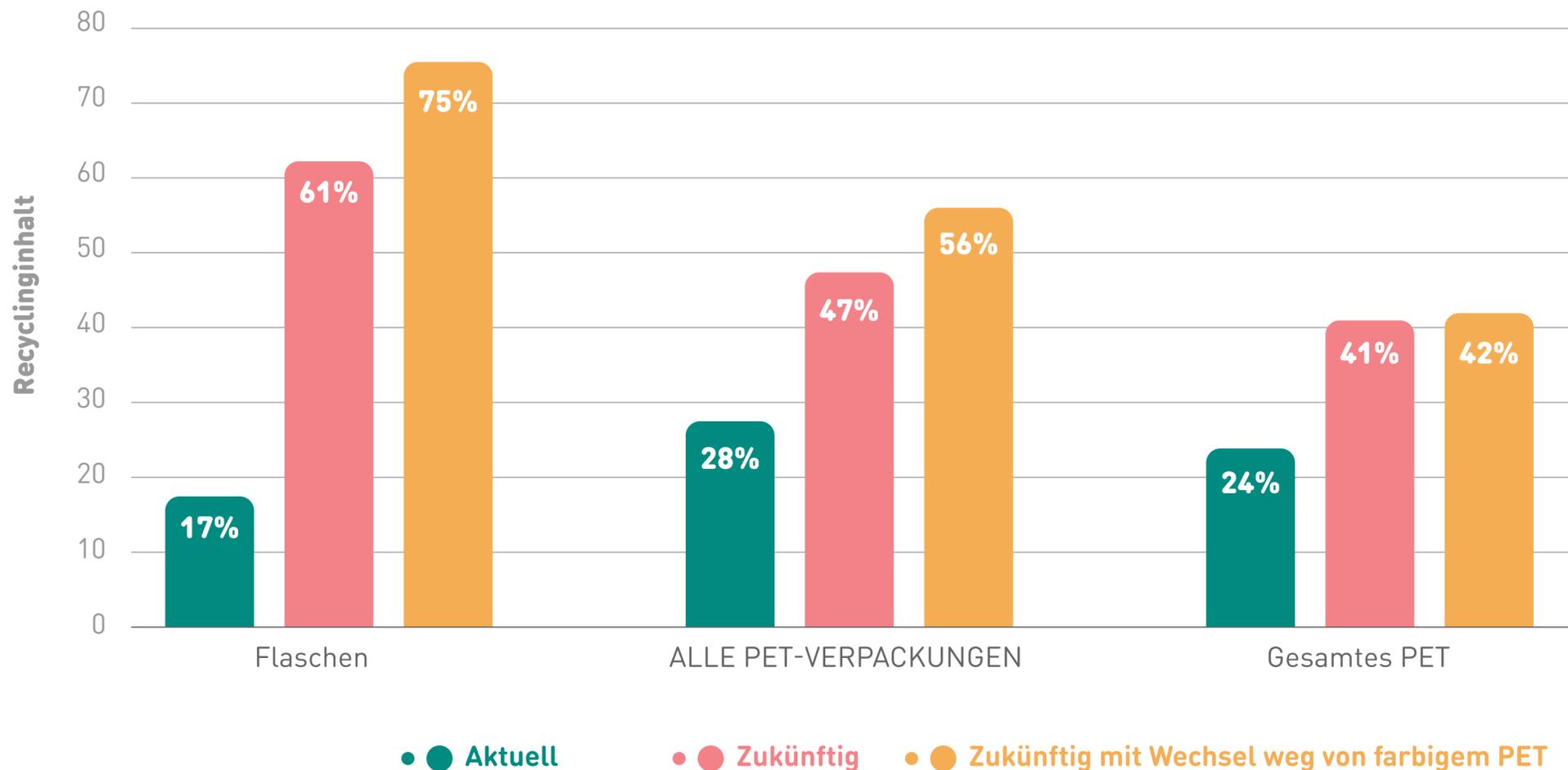
Abbildung E-5: Sammlung und Recycling von PET-Flaschen – Obergrenze



Wir gehen davon aus, dass wir in Zukunft eine Erhöhung der Obergrenze für Flasche-zu-Flasche-Recycling mit einem Recyclinganteil zwischen 61% und 75%, gegenüber derzeit 17% sehen werden. Dies geschieht jedoch unter der Annahme, dass das Recycling im geschlossenen Kreislauf (d.h. die Verwendung von rPET aus Flaschen in Flaschen im Gegensatz zu anderen PET-Anwendungen) priorisiert wird, um maximale Kreislaufwirtschaft zu gewährleisten. Realistischer geschätzt, wird die Verwendung

von recyceltem Material in Zukunft irgendwo zwischen einem politischen Mindestziel von 30% und der möglichen Obergrenze von 75% liegen. Bei der Betrachtung der Auswirkungen der Änderungen auf alle PET-Verpackungen können wir einen Anstieg des Recyclinganteils von 28% auf irgendwo in der Größenordnung von 47% auf 56% sehen. Für alle PET-Anwendungen verschiebt sich der Recyclinganteil von derzeit 24% auf eine Obergrenze von 41% auf 42% in der Zukunft.

Abbildung E-6
Recyclinganteil nach Herstellungsumfang



Dies wird nur geschehen, wenn...

- Flasche-zu-Flasche Recycling im geschlossenen Kreislauf stattfindet, statt das rPET von Flaschen in anderen PET-Anwendungen verwendet wird;
- Die Verwendung von Mherwehssystemen vermehrt wird, was zu einer verbesserten Qualität und Quantität der gesammelt Materialien führen wird; und/oder
- Ein Wechsel von farbigem und undurchsichtigen PET zu transparentem PET stattfindet.

4.0

Erhöhung der Zirkularität von PET-Anwendungen, die keine Flaschen sind



Die erhöhte Nachfrage nach rPET in Flaschenanwendungen wird die Verfügbarkeit von rPET für andere PET-Verpackungsanwendungen verringern. Angesichts des derzeitigen Mangels an praktikablen, groß angelegten Methoden zum Recycling von PET-Thermoform, wie beispielsweise Tablett, werden die Hersteller größere Mengen an neuem Material benötigen, um die Nachfrage zu decken. Derzeit wird an der Entwicklung von Tablett-End-of-Life-Optionen mit angemessenem Ertrag gearbeitet. PETCORE Europe gründete 2015 die Working Group on Recycling PET Thermoforms.

PET-Folie eignet sich für das mechanische Recycling, da sie ihre physikalischen und optischen Eigenschaften über Extrusionszyklen hinweg beibehalten kann. Über das derzeitige Ausmaß des Folienrecyclings ist jedoch wenig bekannt. Es wird davon ausgegangen, dass die Mengen gering sind und sich bestenfalls auf experimentellem Niveau befinden und das Ausgangsmaterial aus sauberen Monomaterialquellen stammen müsste.

Es gibt zwei Haupttrouten für das mechanische Recycling (direkte Faser-

zu-Faser- und Schmelzextrusion) und eine Form des physikalischen Recyclings (Lösemittelreinigung) von PET-Fasern, die auf experimenteller Ebene umgesetzt wurden.

In den letzten Jahren haben Hersteller, Recycler und politische Entscheidungsträger Interesse an der Entwicklung chemischer Recyclingtechnologien als ergänzende Mechanismen neben dem mechanischen Recycling von Kunststoffen gezeigt.⁽⁵⁾ Von besonderem Interesse für die PET-Industrie ist die chemische Depolymerisation (häufig als Monomerrecycling bezeichnet), eine Kategorie von Recyclingverfahren, die die Polymerketten mit Chemikalien aufbrechen. Sobald diese Depolymerisation erfolgt ist, werden die Monomere aus dem Reaktionsgemisch gewonnen und gereinigt, um ein Monomer in Neuqualität zurückzulassen, das direkt in der Polymerherstellung verwendet werden kann.

Depolymerisations- und Repolymerisationstechniken haben das Potenzial, einige der in diesem Bericht aufgeführten Zirkularitätsbeschränkungen zu beheben, da die Prozesse möglicherweise Monomere aus „niedrigeren“ PET-Zyklen

(z. B. farbigen Verpackungen und Materialien ohne Lebensmittelkontakt) zur Verwendung in „höheren“ PET-Zyklen (z. B. klaren Getränkeflaschen) herstellen können, wenn die Lebensmittelkontaktbestimmungen dies zulassen.

In Europa ist dies jedoch noch ein aufstrebender Markt. Es gibt Beispiele von Unternehmen mit Pilot-/Demonstrationsanlagen, und die Depolymerisationsindustrie berichtet, dass sie dabei ist, auf Anlagen im vollen kommerziellen Maßstab zu skalieren. Derzeit wird geschätzt, dass eine Input-Kapazität von 68 ktpa von Anbietern chemischer Depolymerisationstechnologie verfügbar ist, die sich als betriebsbereit erwiesen haben. Diese Kapazität wird voraussichtlich bis 2025 350 ktpa erreichen.⁽⁶⁾ Die Leistung und die Kosten dieser Prozesse sind jedoch noch unklar. Informationen über Erträge von Monomeren durch diese Prozesse, die auf den ersten Blick vielversprechend aussehen, finden sich normalerweise nur in Technologiepatenten oder Marketingmaterial. Es werden nur minimale unterstützende Informationen zur Berechnungsmethode bereitgestellt (z. B. die in der Ertragsberechnung berücksichtigten Materialien), im Gegensatz zu den Stoffmassenströmen auf Werksebene, die detailliert sind. Daher bleiben die resultierenden Auswirkungen auf den Ertrag bei einer Skalierung dieser Technologien, unter Berücksichtigung von Faktoren wie Sortierung, Verarbeitung und Reinigung unklar.

Derzeit besteht aus finanzieller und ökologischer Sicht noch erhebliche Unsicherheit über das langfristige Potenzial chemischer Depolymerisationstechnologien. Es ist auch wichtig zu beachten, dass es typischerweise wenig Informationen darüber gibt, inwieweit eine Kontamination toleriert werden kann. Viele dieser Technologien erfordern jedoch einen erheblichen Einsatz von Chemikalien und Energie⁽⁷⁾ und ähnlich saubere und homogene Abfallströme wie das mechanische Recycling, was zu weitgehend ähnlichen Kosten und Auswirkungen in den Phasen der Sammlung, Sortierung und Materialaufbereitung führt. Daher konzentriert sich diese Studie auf die Optimierung des mechanischen Recyclings unter Verwendung von Techniken, die sich im kommerziellen Maßstab bewährt und etabliert haben, erkennt jedoch, dass eine Zukunft mit chemischer Depolymerisation zu weiteren Verbesserungen der PET-Zirkularität führen könnte.

Notizen

1) Natural Mineral Waters Europe, Petcore Europe, Plastic Recyclers Europe, and Unesda (2022) PET Market in Europe: State of Play 2022, January 2022

2) Textile Exchange (2020) Preferred Fibre & Materials Market Report 2020

3) Pinter, E., Welle, F., Mayrhofer, E., et al. (2021) Circularity Study on PET Bottle-To-Bottle Recycling, Sustainability, Vol.13, No.7370

4) Natural Mineral Waters Europe, Petcore Europe, Plastic Recyclers Europe, and Unesda (2022) PET Market in Europe: State of Play 2022, January 2022

5) Crippa, M., De Wilde, B., Koopmans, R., et al. (2019) A circular economy for plastics – Insights from research and innovation to inform policy and funding decisions

6) Natural Mineral Waters Europe, Petcore Europe, Plastic Recyclers Europe, and Unesda (2022) PET Market in Europe: State of Play 2022, January 2022

7) Hann, S., and Connock, T. Chemical Recycling: State of Play (2020)

Wie zirkulär ist PET?

Andy Grant
Vera Lahme
Toby Connock
Leyla Lugal