



Evaluierung von Maßnahmen zur Förderung des Kunststoffrecyclings mittels eines wirtschaftsmathematischen Modells

Stefani Rivić · Michael Freiberger · Oliver Cencic · Christoph Scharff · Alexia Prskawetz · Helmut Rechberger

Eingegangen: 29. Oktober 2025 / Angenommen: 3. November 2025
 © The Author(s) 2025

Zusammenfassung Die COVID-19-Pandemie hat zu erheblichen Spannungen im Recyclingsektor geführt. Besonders betroffen war das Recycling von Kunststoffverpackungen, da der Preisverfall von Rohöl zu erheblich günstigeren Primärkunststoffen führte. Infolgedessen konnten Rezyklate nur schwer abgesetzt werden, und es kam teilweise zu problematischen Lagerbeständen bei den Recyclern. Daher wurde von vielen Branchenvertretern eine verpflichtende Mindesteinsatzquote von Rezyklaten in der Kunststoffverpackungsproduktion gefordert. Diese soll helfen, die Nachfrage nach Rezyklaten langfristig zu stabilisieren.

Um die Einführung einer solchen Quote zu untersuchen, wurde das Kunststoffverpackungssystem basierend auf einer Materialflussanalyse als vereinfachtes Stoffstrommodell abgebildet und mit einem ökonomischen Gleichgewichtsmodell verknüpft. In verschiedenen Szenarien wurde analysiert, wie das System auf stark sinkende Primärkunststoffpreise reagiert. Die Ergebnisse zeigen, dass das Modell die

beobachtbaren realen Effekte qualitativ gut abbildet. Gleichzeitig wird deutlich, dass eine Mindestrezyklateinsatzquote als alleinige Maßnahme nicht ausreicht, um die gewünschten ökologischen und ökonomischen Ziele zu erreichen.

Das entwickelte Modell erweist sich somit als geeignetes Instrument, um politische Maßnahmen zur Stabilisierung und Förderung des Kunststoffrecyclings zu entwerfen und zu bewerten. Es ermöglicht ein besseres Verständnis für die Wechselwirkungen zwischen Marktmechanismen und politischen Maßnahmen und kann damit zur Entwicklung wirksamer Strategien für eine nachhaltigere Kreislaufwirtschaft beitragen.

Schlüsselwörter Materialflussanalyse · Allgemeines Gleichgewichtsmodell · Makroökonomische Modellierung · Kunststoffverpackungen · Governance

Evaluation of measures to promote plastics recycling using an economic mathematical model

Abstract The COVID-19 pandemic has led to significant distortions in the recycling sector. The recycling of plastic packaging was particularly affected, as the sharp decline in crude oil prices resulted in much cheaper virgin plastics. Consequently, recyclers had difficulties getting their recyclates into the market and the storages filled up. To stabilize the long-term demand for recyclates, the introduction of a mandatory minimum recyclate utilization rate in plastic packaging production was proposed.

To examine the implications of such a measure, the plastic packaging system was modeled as a simplified material flow system and linked to an economic equilibrium model. Various scenarios were used to analyze how the system responds to sharply declining virgin plastic prices and the implementation of a minimum utilization rate. The

results indicate that the model accurately reproduces the qualitative effects observed. At the same time, it becomes clear that a minimum utilization rate alone is insufficient to achieve the desired environmental and economic objectives.

Nevertheless, the developed model proves to be a suitable tool for designing and evaluating policy measures aimed at stabilizing and promoting plastic recycling. It enhances the understanding of the interactions between market mechanisms and policy interventions and thus contributes to the development of effective strategies for a more sustainable circular economy.

Keywords Material Flow Analysis · General Equilibrium Model · Macroeconomic Modelling · Plastic Packaging · Governance

1 Einleitung

Die Steuerung von Kunststoffströmen im Sinne einer nachhaltigen Kreislaufwirtschaft hat in den vergangenen Jahren zunehmend an Bedeutung innerhalb der europäischen Umwelt- und Abfallpolitik gewonnen. Dies ist insbesondere darauf zurückzuführen, dass sowohl die Produktion als auch der Konsum von Kunststoffen weiterhin ansteigen (Statista 2021), während die Recyclingraten nach wie vor auf einem vergleichsweise niedrigen Niveau verharren (Graedel et al. 2021; Scheider et al. 2018; Van Eygen et al. 2017). Gleichzeitig werden die ökologischen und gesundheitlichen Folgen der unsachgemäßen Kunststoffnutzung sowie einer ineffizienten Abfallwirtschaft immer deutlicher sichtbar. Kunststoffe tragen maßgeblich zur Kontamination von Böden und Gewässern bei, und Mikroplastikpartikel wurden bereits in verschiedenen Umweltkompartimenten sowie in biotischen Organismen und im menschlichen Körper nachge-

Univ.-Ass. DI S. Rivić, BSc (✉) ·
 DI Dr. O. Cencic ·
 Hon.-Prof. Mag. Dr. C. Scharff ·
 Univ.-Prof. DI Dr. Dr. h.c. H. Rechberger
 Institut für Wassergüte und
 Ressourcenmanagement, TU Wien,
 Karlsplatz 13/226-2, 1040 Wien,
 Österreich
 stefani.rivic@tuwien.ac.at

DI Dr. M. Freiberger
 International Institute for Applied
 Systems Analysis (IIASA),
 Schlossplatz 1, 2361 Laxenburg,
 Österreich

Univ.-Prof. DI Dr. A. Prskawetz
 Institut für Stochastik und
 Wirtschaftsmathematik, TU Wien,
 Wiedner Hauptstraße 8, 1040 Wien,
 Österreich

wiesen (Bakir et al. 2020; Huang et al. 2021; Senathirajah et al. 2021).

Vor diesem Hintergrund hat die Europäische Union das Ziel formuliert, ab dem Jahr 2025 mindestens 50% und ab 2030 mindestens 55% der Kunststoffverpackungen zu recyceln (DIRECTIVE (EU) 2018). In Österreich, das im europäischen Vergleich über relativ hohe Recyclingraten verfügt, beträgt die aktuell bekannte Recyclingquote für Kunststoffverpackungen rund 25%. Um die EU-Vorgaben zu erreichen, sind daher erhebliche zusätzliche Anstrengungen erforderlich.

Externe Schocks sowie deren Auswirkungen verschärfen die Situation maßgeblich. So führte die COVID-19-Pandemie zu gravierenden Störungen im Kunststoffrecyclingsystem. Der pandemiebedingte Rückgang der wirtschaftlichen Aktivität bewirkte einen deutlichen Preisverfall bei Rohöl im Jahr 2020, was wiederum zu einer Abnahme der Preise für Primärkunststoffe führte. Infolgedessen verlor der Einsatz von Rezyklaten an wirtschaftlicher Attraktivität, wodurch die Absatzmöglichkeiten für Recycler erheblich eingeschränkt wurden. Trotz des anhaltenden Anfalls von Kunststoffabfällen und der Verpflichtung zur Einhaltung gesetzlicher Mindestrecyclingquoten mussten erhebliche Mengen an Rezyklat zwischengelagert werden – eine Maßnahme, die aufgrund begrenzter Lagerkapazitäten nur kurzfristig praktikabel war.

In den Jahren nach der COVID-19-Pandemie verschärfte sich die Situation erneut. Ein Überangebot an Kunststoffmaterial traf auf eine schwache Nachfrage infolge rückläufigen privaten Konsums und einer industriellen Stagnation, bedingt durch die anhaltend hohe Inflation (EUWID Recycling und Entsorgung 2023d). Das Abfallaufkommen sank infolgedessen um 10% (EUWID Recycling und Entsorgung 2023a), während gleichzeitig steigende Energiepreise die Rezyklatproduktion weiter verteuerten (EUWID Recycling und Entsorgung 2023e). Unter diesen Bedingungen gerieten viele Recyclingunternehmen in eine wirtschaftlich prekäre Lage.

Als mögliche politische Maßnahme zur Stabilisierung des Rezyklatmarkts wurde die Einführung einer verbindlichen Mindestrezyklateinsatzquote diskutiert (UMK-95 2021). So fordert etwa der Recyclerband EuRIC „verbindliche EU-Ziele für den Recyclinganteil

in Kunststoffprodukten“ (EUWID Recycling und Entsorgung 2023c). Ein Beispiel für eine solche Maßnahme liefert die EU-Einwegplastikrichtlinie, welche einen Rezyklatanteil von mindestens 25 % in PET-Flaschen ab 2025 vorsieht und dieser sukzessive bis 2030 auf 30 % steigen soll (EUWID Recycling und Entsorgung 2023b). Auch bvs-Präsident Henry Forster unterstützt diesen Vorschlag, immerhin seien „Rezyklateinsatzquoten von 20 bis 30 % grundsätzlich kein Problem“ (EUWID Recycling und Entsorgung 2024). Die Befürworter argumentieren, dass eine solche Quote eine Abnahmegarantie für Recyclingmaterial schaffen und somit die Investitionssicherheit erhöhen könne. Kritiker hingegen befürchten negative Effekte auf die Rezyklatqualität und potenziell steigende Preise (EUWID Recycling und Entsorgung 2023d).

Zur systematischen Analyse dieser Zusammenhänge wurde in dieser Arbeit ein Materialflussmodell mit einem ökonomischen Gleichgewichtsmodell verknüpft. Dieser integrierte Modellrahmen erlaubt die simultane Betrachtung physischer Stoffströme und ökonomischer Wechselwirkungen entlang der Kunststoffwertschöpfungskette – von der Haushaltsabfallsammlung über die Recyclingindustrie bis hin zur Kunststoffverpackungsproduktion.

Innerhalb dieses Rahmens können unterschiedliche politische Instrumente und Marktdynamiken untersucht werden, die letztlich die Recyclingeffizienz beeinflussen. So kann beispielsweise die Regierung Recycling- oder Verwendungsquoten festlegen, die jeweils vom Recycling- bzw. Verpackungssektor zu erfüllen sind.

Auf Grundlage des beschriebenen theoretischen Rahmens verfolgt unsere Arbeit die Beantwortung der folgenden zentralen Forschungsfrage: Welche Effekte hat die Einführung einer Mindesteinsatzquote für Rezyklate auf Preisbildung und Recyclingquote?

Ein zentrales Anliegen dieser Arbeit besteht zudem darin, zu demonstrieren, dass abfallwirtschaftliche Systeme unter Anwendung etablierter wissenschaftlicher Modellierungsansätze aussagekräftig abgebildet werden können. Auf diese Weise können bislang vorwiegend intuitive Entscheidungsprozesse einer analytischen Überprüfung unterzogen und, sofern erforderlich, durch evidenzbasierte Handlungsoptionen ersetzt werden.

2 Modellbeschreibung

In unserer Arbeit integrieren wir eine Materialflussanalyse (MFA) österreichischer Kunststoffverpackungen in ein ökonomisches Gleichgewichtsmodell¹, das die Prozesse des Konsums, der Produktion und des Recyclings abbildet. Der entwickelte Modellrahmen ermöglicht es zunächst, die Abhängigkeit des Recyclings von Kunststoffverpackungen sowohl vom Aufkommen an Kunststoffabfällen aus Haushalten als auch von der Nachfrage nach Rezyklaten durch die kunststoffverarbeitende Industrie zu analysieren. In einem weiteren Schritt untersuchen wir, wie verschiedene politische Instrumente – etwa Verwertungsziele im Kunststoffsektor – die Recyclingaktivitäten und Investitionsentscheidungen der Unternehmen beeinflussen.

Wir beginnen bei der Beschreibung des Modells mit dem Sektor der privaten Haushalte. Hier wird von einer exogenen² Zeitreihe des Konsums ausgegangen, die eine entsprechende exogene Nachfrage der Haushalte nach Kunststoffverpackungen impliziert. Die Effizienz, mit der die nach dem Gebrauch anfallenden Kunststoffverpackungen gesammelt werden, hängt von den Sammelaktivitäten des Recyclingsektors ab und bestimmt die maximal verfügbare Menge an Kunststoffabfällen, die dem Recyclingprozess zugeführt werden kann.

Im Recyclingsektor wird angenommen, dass mehrere Unternehmen in einem oligopolistischen Markt miteinander konkurrieren. Jedes Unternehmen verarbeitet eine bestimmte Menge an Kunststoffabfällen aus dem Haushaltssektor, die wiederum von den Kunststoffverpackungsunternehmen als Rezyklat nachgefragt wird. Durch

¹ Ein allgemeines Gleichgewichtsmodell betrachtet eine ganze Volkswirtschaft und erklärt, wie sich Angebots- und Nachfragegleichgewichte in miteinander verbundenen Märkten gleichzeitig einstellen. Ein Gleichgewicht beschreibt hierbei jene Mengen und Preise, bei denen Angebot und Nachfrage übereinstimmt.

² In einem Modell sind exogene Variablen externe Größen, deren Wert außerhalb des Modells vorgegeben wird. Exogene Variablen beeinflussen das Modell, aber das Modell beeinflusst sie nicht. Endogene Variablen hingegen sind interne Größen, die durch das Modell selbst bestimmt oder erklärt werden.

Tab. 1 Zusammenfassung aller Notationen, Abkürzungen und Bezeichnungen

Abkürzung	Sektor
HH-Sektor	Haushaltssektor (household)
CGP-Sektor	Konsumgütersektor (consumer goods production)
PP-Sektor	Kunststoffverpackungssektor (plastic packaging)
R-Sektor	Recyclingsektor
Symbol	Gut
W	Kunststoffverpackungsabfall
Q	Kunststoffverpackung
X	Primärkunststoff
R	Rezyklat
T	Energiegewinnung aus Abfall
χ	Sammelquote/Sammlungseffizienz
σ	Sortiereffizienz
β	Recyclingeffizienz
Sub-/Superskript	Bedeutung
.	Nachfrage
.	Angebot
$\ddot{\cdot}$	Aggregierter Wert
$\hat{\cdot}$	Exogener (fixierter) Wert
\cdot^*	Optimaler Wert
\cdot	Extern (aus dem Ausland)
\cdot^{PP}	(Inländische) Kunststoffverpackung

Investitionen in Sortier- und Sammelfrakturen – etwa in verbesserte Sortiersysteme oder eine dichtere Containerverteilung – können die Unternehmen ihre Sammel- und Sortiereffizienz gezielt beeinflussen. Entsprechend hängen die Recyclingkosten jedes Unternehmens sowohl von seiner betrieblichen Effizienz als auch von der Menge der verarbeiteten Kunststoffabfälle ab. Darüber hinaus übernehmen die Recyclingunternehmen die Verantwortung für die Einhaltung eines von der Regierung vorgegebenen Recyclingziels in Bezug auf die von ihnen behandelten Abfallmengen. Dies ermöglicht die direkte Untersuchung der Auswirkungen und Wirksamkeit solcher Recyclingquoten, die gemäß den Vorgaben der Europäischen Union seit 2025 für Kunststoffe bei 50 % liegt. Im Rahmen der erweiterten Herstellerverantwortung (Extended Producer Responsibility, EPR) wird diese Verpflichtung faktisch von den Konsumgüterherstellern übernommen, die ihrerseits Lizenzgebühren an die Recyclingunternehmen entrichten.

Die inländischen Kunststoffverpackungsunternehmen schließen den Kreislauf. Diese verwenden eine Kombination aus Primärkunststoffen und Rezyklaten für die Herstellung von Kunststoffverpackungsmaterial, jedoch berücksichtigen wir mögliche Grenzen für den Anteil der in der Produktion

verwendeten Rezyklate. Während die Obergrenze der Rezyklateinsatzquote in der Regel eine Konsequenz technologischer Einschränkungen ist, kann die Untergrenze in Form einer Mindestrezyklateinsatzquote von der Regierung als politische Maßnahme eingeführt werden, um die Nachfrage nach Rezyklaten zu stimulieren.

Auf dem Markt für Kunststoffverpackungen konkurriert eine Vielzahl inländischer Anbieter um die Belieferung der Konsumgüterproduzenten mit den benötigten Verpackungen, sodass von einem vollkommenen Wettbewerbsmarkt ausgegangen werden kann. Trotz eines konstanten Bedarfs an Kunststoffverpackungen, der dem Konsumverhalten der privaten Haushalte entspricht, ist der Konsumgütersektor nicht bereit, jeden beliebigen Preis für inländisch produzierte Verpackungen zu akzeptieren. Dies liegt darin begründet, dass Konsumgüterhersteller alternativ auf im Ausland produzierte Kunststoffverpackungen zurückgreifen können. Der Marktanteil inländischer Produzenten wird somit endogen durch den Marktpreis bestimmt.

Entsprechend legen die inländischen Kunststoffverpackungsunternehmen ihr optimales Produktionsniveau an jenem Punkt fest, an dem die Grenzkosten der Produktion einer zusätzlichen Einheit dem Marktpreis für Kunststoff-

verpackungen entsprechen. Die Produktionskosten werden dabei nicht nur durch die Preise der eingesetzten Inputfaktoren – Primärkunststoffe und Rezyklat – bestimmt, sondern auch durch zusätzliche Aufwendungen, die mit der jeweiligen Verwendungsraten von Rezyklat verbunden sind. Mit zunehmendem Anteil von Rezyklat steigen insbesondere die Anforderungen an Qualitätskontrollen und Prozesssicherheit, was wiederum zu höheren Kosten führt. Darüber hinaus beeinflusst das Preisverhältnis zwischen Primärkunststoff und Rezyklat maßgeblich die ökonomisch optimale Rezyklatquote im Produktionsprozess.

Bevor die einzelnen Sektoren und ihre Wechselwirkungen im Detail beschrieben werden, bietet Tab. 1 eine Übersicht über die im weiteren Verlauf verwendeten Notationen, Abkürzungen und mathematischen Symbole. Abb. 1 stellt eine integrierte Darstellung dar, die sowohl die logischen Strukturen des ökonomischen Modells, also die Beziehungen zwischen den relevanten Akteuren auf den jeweiligen Märkten, als auch die physischen Materialflüsse innerhalb des Systems abbildet. Zusätzlich veranschaulicht Abb. 2 die dazugehörige Materialflussanalyse. Die Darstellung bezieht sich ausschließlich auf Kunststoffverpackungen; der Fluss der Konsumgüter selbst wird nicht abgebildet. Dadurch wird gewährleistet, dass die Materialeingänge den Materialausgängen entsprechen – eine grundlegende Voraussetzung für die Durchführung der Materialflussanalyse.

2.1 Konsumgüterproduktionssektor (CGP-Sektor)

Die Unternehmen des Konsumgütersektors decken die Nachfrage der privaten Haushalte nach Konsumgütern und benötigen hierfür eine Menge \hat{Q} an Kunststoffverpackungen (PP) für Transport- und Lagerzwecke. Es wird angenommen, dass diese Unternehmen die Wahl zwischen inländisch produzierten und importierten Kunststoffverpackungen haben. Dabei unterscheiden sich die Unternehmen hinsichtlich ihres Zugangs zu ausländischen Lieferanten sowie der damit verbundenen zusätzlichen Organisationskosten.

Daraus ergibt sich, dass die aggregierte Nachfrage \hat{Q}_{PP}^D nach inländischen Kunststoffverpackungen aus dem PP-Sektor eine fallende Funktion des Prei-

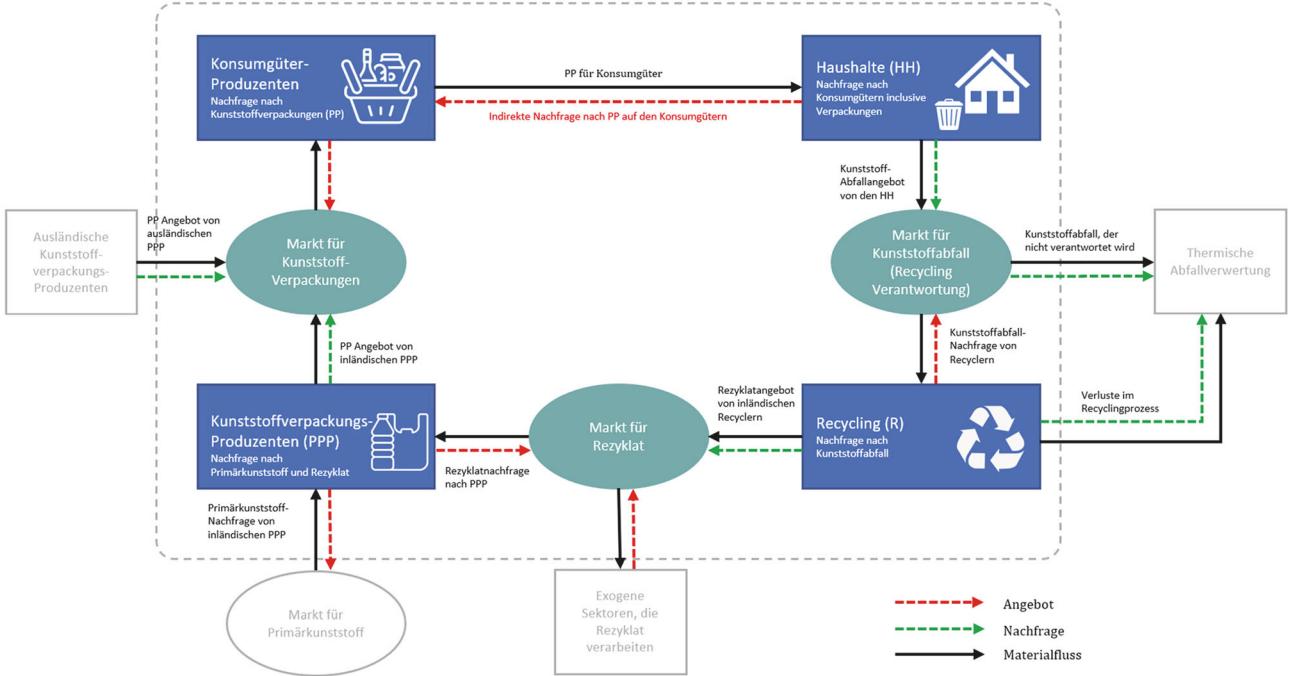


Abb. 1 Illustration des Kunststoffverpackungskreislaufs

ses p_Q für inländisches PP darstellt. Bei sehr niedrigen Preisen p_Q beziehen alle Konsumgüterproduzenten ihre Verpackungen ausschließlich von inländischen Anbietern, sodass die Gesamtnachfrage \hat{Q} vollständig auf den heimischen Markt entfällt. Mit steigenden Preisen fällt die Nachfrage nach inländischem PP und es existiert ein (möglicherweise hoher) Reservationspreis³, oberhalb dessen kein Unternehmen mehr bereit ist, inländische Kunststoffverpackungen zu erwerben und stattdessen vollständig auf Importe ausweicht. Zwischen diesen beiden Extremwerten nimmt die Nachfrage nach inländischem PP kontinuierlich ab, da zunehmend mehr Unternehmen auf ausländische Lieferanten umsteigen.

2.2 Kunststoffverpackungssektor (PP-Sektor)

Es wird angenommen, dass der Kunststoffverpackungssektor (PP-Sektor) aus einer großen Anzahl kleiner Unternehmen besteht, die in einem vollkommenen Wettbewerbsmarkt agieren. Die Unternehmen nutzen eine Kombinati-

on aus Primärkunststoff (X) und Rezyklat (R) als Inputfaktoren zur Produktion von Kunststoffverpackungsmaterial (Q), das zum Preis p_Q an Unternehmen des Konsumgüterproduktionssektors (CGP-Sektor) verkauft wird.

Die Produktionsfunktion kann im Allgemeinen durch eine Output-Funktion $F_{PP}(X, R)$ beschrieben werden. Für die vorliegende Modellierung wird eine lineare Produktionsfunktion unterstellt:

$$Q = F_{PP}(X, R) := X + R.$$

Damit wird angenommen, dass keine Produktionsverluste auftreten und die Massenbilanz exakt erfüllt bleibt.

Zur Beschreibung des Anteils von Rezyklat am Gesamtinput wird die Rezyklateinsatzquote u definiert als:

$$u = \frac{R}{X + R}$$

Die Inputfaktoren X und R sind zu den Preisen p_x bzw. p_R erhältlich und bestimmen den Materialkostenanteil der Gesamtproduktionskosten. Die zusätzlichen Produktionskosten des PP-Sektors, die über die reinen Materialkosten hinausgehen, werden durch die Kostenfunktion $C_{PP}(u, Q)$ beschrieben. Diese Kosten steigen mit der Produktionsmenge Q sowie mit der Rezyklatquote u , da ein höherer Rezyklatanteil erhöhte Qualitätskontrollen und tech-

nische Anpassungen erfordert. Es wird ferner angenommen, dass $C_{PP}(u, Q)$ in u konvex ist, da jede weitere Erhöhung des Rezyklatanteils überproportional schwierig und kostenintensiv wird.

Schließlich werden für die Rezyklateinsatzquote technologische und regulatorische Grenzen eingeführt. Die untere Schranke $\underline{u} \geq 0$ ist durch politische Vorgaben bestimmt, während sich die obere Schranke $\bar{u} < 1$ durch technologische oder qualitätsbezogene Restriktionen ergibt, die sicherstellen, dass das Endprodukt den erforderlichen Qualitätsstandards entspricht.

2.2.1 Optimierungsproblem

Die PP-Produzierenden maximieren ihren Gewinn, der sich aus der Differenz ihrer Einnahmen und den Produktionskosten ergibt. Die Einnahmen sind das Produkt der angebotenen Menge Q an Kunststoffverpackungen PP und dem Verkaufspreis p_Q :

$$\text{Einnahmen} = p_Q \cdot Q$$

Die Kosten resultieren aus dem Bedarf und Kauf der Produktionsinputfaktoren X und R sowie der gewählten Rezyklateinsatzquote u :

$$\text{Kosten} = p_x \cdot X + p_R \cdot R + C_{PP}(u, Q)$$

³ Ein Reservationspreis ist der minimale Preis, für den man ein Produkt verkaufen will oder der maximale Preis, den man gewillt ist, für ein Produkt zu zahlen.

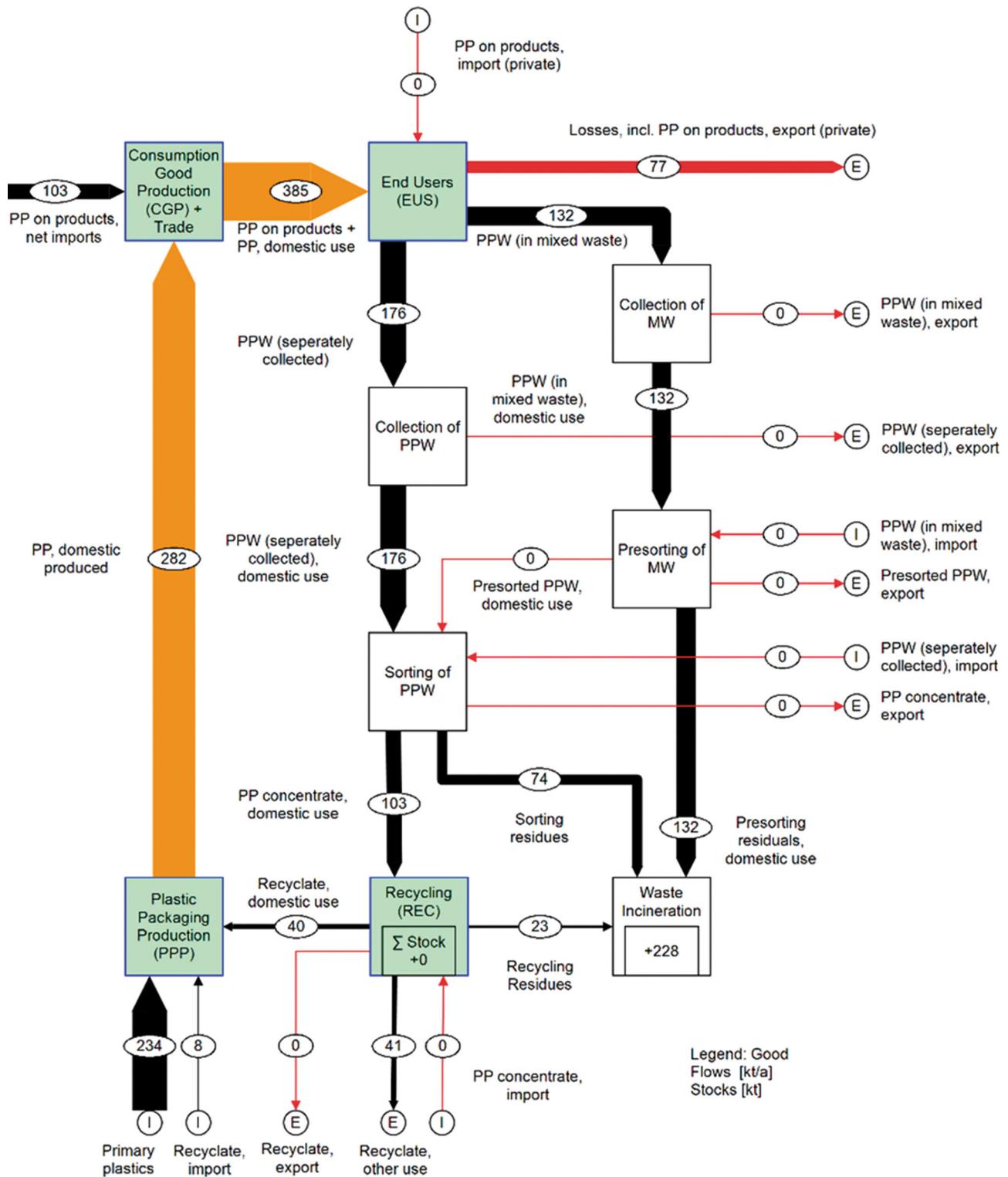


Abb. 2 Materialflussanalyse österreichischer Kunststoffverpackungen 2021 (Quelle: eigene Darstellung). Prozesse, die mit den Werten 0 aufscheinen, sollen illustrieren, dass sie theoretisch und praktisch möglich sind, jedoch im Modell nicht berücksichtigt werden

Unter Verwendung der Definitionen der Produktionsfunktion und der Rezyklateinsatzquote können wir die Gewinne eines Unternehmens in Bezug auf das Produktionsniveau Q und die Nutzungsrate u formulieren:

$$\text{Gewinn} = \text{Einnahmen} - \text{Kosten} = p_Q Q - Q \cdot [p_X \cdot (1-u) + p_R \cdot u] - C_{PP}(u, Q)$$

Um schließlich den Gewinn $\Pi_{PP}(u, Q)$ zu maximieren, muss das Unternehmen ein restringiertes Optimierungsproblem unter Berücksichtigung der beiden Variablen u und Q lösen, wobei die Rezyklateinsatzquote durch eine Ober- und Untergrenze eingeschränkt ist

$$\begin{aligned} \max_{u, Q} \Pi_{PP}(u, Q) &= \\ Q \cdot [p_Q - p_X \cdot (1-u) - p_R \cdot u] - C_{PP}(u, Q) \\ \text{s.t. } u &\leq \underline{u} \leq \bar{u} \end{aligned}$$

Die optimale Lösung dieses Optimierungsproblems legt für jedes Unternehmen die folgenden Größen fest: Q^S (das Angebot an PP), u^* (die optimale Rezyklatquote), R^D (die Nachfrage nach Rezyklat) und X^D (die Nachfrage nach Primärkunststoffen), jeweils in Abhängigkeit von den Preisen für Rezyklat und Primärkunststoffe, wobei letztere exogen angenommen werden. Durch die Aggregation über alle Unternehmen lassen sich die gesamtwirtschaftlichen Größen ableiten: Q_{PP}^S (das aggregierte Angebot an Kunststoffverpackungen im PP-Sektor), R_D^{PP} und X_D^{PP} (die aggregierte Nachfrage nach Rezyklat bzw. Primärkunststoffen im PP-Sektor).

$$\begin{aligned} (Q^S, u^*) &:= \arg \max_{u, Q} \Pi_{PP}(u, Q) \\ R^D &:= u^* \cdot Q^S \\ X^D &:= (1 - u^*) \cdot Q^S \end{aligned}$$

2.3 Recyclingsektor (R-Sektor)

Es wird angenommen, dass der Recyclingsektor ein Oligopol darstellt, d.h., es wird von einer geringen Anzahl von Unternehmen ausgegangen, die auf dem Rezyklatmarkt interagieren und die Wechselwirkungen zwischen konkurrierenden Unternehmen bei ihrer Planung berücksichtigen. Zur Produktion von Rezyklat R verwendet das Recyclingunternehmen den von den Haushalten entsorgten Kunststoffabfall W . Die Produktionskosten hängen dabei von der Menge an Rezyklat ab, die das Unternehmen produziert.

Zur Herstellung einer gewissen Menge R an Rezyklat, wendet das Recyclingunternehmen die Produktionsfunktion an:

$$R = \chi \cdot \sigma \cdot \beta \cdot W$$

Diese obliegt folgenden Parametern und Entscheidungsvariablen:

- Die Sammelquote χ bezeichnet den Anteil des von den Haushalten gesammelten Kunststoffabfalls. Das Recyclingunternehmen kann diesen Wert erhöhen, indem es den Haushalten bequemere Entsorgungsmöglichkeiten bietet (z.B. mehr und/oder größere Sammelstellen oder Abholung durch Entsorgungsfahrzeuge).
- Die Sortierquote σ beschreibt, wie gut der von den Haushalten gesammelte Abfall sortiert ist. Der Anteil $(1-\sigma)$ erfasst die Verluste in der Rezyklatproduktion, die durch mögliche Vermischungen unterschiedlicher Kunststoffarten entstehen. Eine sorgfältige Sortierung und damit homogenerer Abfall führen zu geringeren Produktionsverlusten. σ kann durch Anreize für Haushalte, ihren Kunststoffabfall sorgfältiger zu sortieren, oder durch Investitionen in bessere Sortiertechnologien in den Recyclinganlagen erhöht werden.
- β ist die von der eingesetzten Technologie abhängige Recyclingeffizienz und wird als exogener Parameter betrachtet. Wir ziehen hierfür den in Österreich ermittelten Wert von $\beta = 0,78$ heran.
- W bezeichnet die Abfallmenge, für die das Recyclingunternehmen im Rahmen der erweiterten Produzentenverantwortung seitens des CGP-Sektors verantwortlich ist.

Jedes Recyclingunternehmen kann somit durch die Entscheidungsvariablen χ, σ und W die eigene Produktionsmenge regulieren. Dabei wird angenommen, dass diese konvexe Kosten und somit steigende Grenzkosten aufweisen. Für χ und σ ist es plausibel, dass die Anreize zur Änderung menschlichen Verhaltens (Sammeln und Sortieren) mit zunehmendem Niveau der Raten zunehmend schwieriger und kostenintensiver werden. Auch die Verarbeitung wachsender Mengen an Kunststoffabfall führen unter rationalen Annahmen zu wachsenden Grenzkosten.

Darüber hinaus besteht eine Abhängigkeit zwischen den Sammelkosten und der anfallenden Abfallmenge:

Mit zunehmender Abfallmenge steigen auch die Sammelkosten, beispielsweise aufgrund eines höheren Bedarfs an Arbeitskräften und Transportkapazitäten. Dieser Zusammenhang wird durch eine lineare Beziehung zwischen dem Kostenparameter des Sammelprozesses und der Abfallmenge W beschrieben, wobei der Parameter k die Stärke dieser Abhängigkeit bestimmt.

Zur Vereinfachung wird ferner angenommen, dass die Kosten in Bezug auf alle anderen Steuerungsgrößen additiv separabel sind. Somit ergibt sich für die Gesamtkosten der Rezyklatproduktion die folgende Kostenfunktion⁴ $K(\chi, \sigma, W)$:

$$\begin{aligned} K(\chi, \sigma, W) &= (C_\chi + kW) \cdot \chi^{\alpha_\chi} + C_\sigma \cdot \sigma^{\alpha_\sigma} \\ &\quad + C_W \cdot W^{\alpha_W} \end{aligned}$$

Aufgrund der erweiterten Produzentenverantwortung können die Recyclingfirmen auch ein Entgelt für die Entsorgung des Abfalls von den CGP-Unternehmen einfordern. Für jede behandelte Einheit Abfall entfällt somit eine sogenannte Lizenzgebühr LF an die Recyclingunternehmen und führt zu einer Reduktion der Kosten. Man kann die Lizenzgebühr als Preis des Abfalls betrachten. Daraus folgt, dass die Höhe der Lizenzgebühr eine Konsequenz des am Markt für Kunststoffverpackungen eingestellten Gleichgewichts ist. Schließlich streben alle Recyclingunternehmen nach einer Minimierung ihrer Recyclingkosten $K(\chi, \sigma, W)$, die neben den Inputfaktoren auch von der produzierten und am Rezyklatmarkt angebotenen Menge an Rezyklat R abhängt:

$$\begin{aligned} C_R(R) &= \min_{\chi, \sigma, W} K(\chi, \sigma, W) - LF \cdot W = \\ &\min_{\chi, \sigma, W} (C_\chi + kW) \cdot \chi^{\alpha_\chi} + C_\sigma \cdot \sigma^{\alpha_\sigma} + \\ &C_W \cdot W^{\alpha_W} - LF \cdot W \end{aligned}$$

⁴ Die Exponenten α_χ , α_σ und α_W bestimmen dabei die Krümmung der jeweiligen Kostenkomponente und spiegeln somit das Ausmaß der Kostenkonvexität wider. Werte von $\alpha > 1$ implizieren steigende Grenzkosten, d.h. eine zunehmende Schwierigkeit bzw. höhere Kosten, die je-weilige Effizienz weiter zu verbessern (z.B. Sammel- oder Sortierquote zu erhöhen). Werte von $\alpha = 1$ entsprechen linearen Kosten, während $\alpha < 1$ auf abnehmende Grenzkosten hindeuten würde. In der Modellierung wird $\alpha > 1$ angenommen, um realistische, konvexe Kostenverläufe abzubilden.

$$\chi \cdot \sigma \cdot \beta \cdot W = R$$

$$\chi \cdot \sigma \cdot \beta \geq \rho$$

Wie bereits erläutert, beschreibt die erste Nebenbedingung die Produktionsfunktion des Rezyklatherstellungsprozesses. Die zweite Nebenbedingung stellt sicher, dass das Recyclingunternehmen nun für die Erfüllung des Recyclingziels ϱ in Bezug auf die Abfallmenge, für die es Verantwortung übernimmt, verantwortlich ist.

Die Lösung dieses Optimierungsproblems liefert nicht nur eine Kostenfunktion $C_R(R)$, die von der produzierten Rezyklatmenge R abhängt, sondern auch die optimalen Werte für χ und σ sowie insbesondere eine Abfallnachfragefunktion $W^D(R)$. Durch die Aggregation der Abfallnachfragefunktionen aller Unternehmen ergibt sich die gesamtvolkswirtschaftliche Abfallmenge auf dem Markt, welche wir heranziehen, um den Gleichgewichts- bzw. Lizenzgebührenwert LF zu bestimmen. Es wird angenommen, dass die Kostenfunktion $C_R(R)$ wachsend und stückweise konvex in R ist, was durch ausreichende Konvexität der einzelnen Kostenfunktionen in den Entscheidungsgrößen sichergestellt werden kann.

Um den Ertrag jedes Unternehmens zu bestimmen und dessen Entscheidungsprozess zu modellieren, muss zunächst die Oligopolstruktur des Marktes festgelegt werden. Für den Recyclingsektor wird dabei eine Cournot-Struktur vorgeschlagen: Die n Unternehmen entscheiden simultan über die Menge an Rezyklat, die sie auf dem Markt anbieten wollen. Jedes Unternehmen kennt die Preis-Nachfrage-Funktion für Rezyklat (abgeleitet aus der Rezyklatnachfrage des PP-Sektors) und berücksichtigt die Angebotsmengen der Konkurrenten sowie deren Einfluss auf diese Preis-Nachfrage-Funktion.

Obwohl die Recyclingunternehmen die Preis-Nachfrage-Beziehung der PP-Unternehmen kennen, wird angenommen, dass ihr Wissen nicht die daraus resultierenden Dynamiken auf dem PP-Markt umfasst. Daher behandeln die Recyclingunternehmen die Nachfrage nach inländischen Kunststoffverpackungen als exogenen Faktor und internalisieren nicht ihren möglichen Einfluss auf das Marktgleichgewicht im PP-Sektor.

Die Preis-Nachfrage-Funktion $p_R(\cdot)$ kann direkt aus der Formel für die

aggregierte Rezyklatnachfrage $\overline{R^D}$ abgeleitet werden.

$$\overline{R^D} = \underbrace{\overline{Q_{PP}^S} \cdot u^*(p_R) \cdot Z(p_R)} + \overline{R_{notPP}^D}(p_R) \\ = \overline{R_{PP}^D}(p_R)$$

Dabei bezeichnet $u^*(p_R)$ die optimale Rezyklateinsatzquote im Kunststoffverpackungssektor, abhängig vom Rezyklatpreis p_R . Weiterhin ist $Z: [0, \infty) \rightarrow [0, 1]$ ein multiplikativer Faktor, der angibt, welcher Anteil der PP-Unternehmen bei einem gegebenen Preis p_R inländisches Rezyklat verwendet, während der verbleibende Anteil $1-Z(p_R)$ auf importiertes Rezyklat ausweicht.

Die Funktion $\overline{R_{notPP}^D}(p_R)$ beschreibt die Nachfrage nach Rezyklat aus anderen Sektoren als dem PP-Sektor in Abhängigkeit vom Preis p_R . Durch Bildung der inversen Funktion in Bezug auf p_R lässt sich daraus die Preis-Nachfrage-Funktion $p_R(R^S)$ ableiten, die vom aggregierten Rezyklatangebot R^S des Rezyklatsektors abhängt.

Unter der Annahme, dass die Angebotsmenge $\overline{Q_{PP}^S}$ für inländische Kunststoffverpackungen durch den PP-Sektor gegeben ist, ergibt sich die Gesamtnachfrage nach Rezyklat aus

$$\overline{R^D} = \overline{Q_{PP}^S} \cdot u^* \cdot Z(p_R) + \overline{R_{notPP}^D}(p_R),$$

die durch das maximal mögliche Nachfragevolumen $\overline{Q_{PP}^S} \cdot \overline{u} + \overline{R_{notPP}^D}$ begrenzt ist. Hierbei bezeichnet $\overline{R_{notPP}^D}$ die exogen gegebene, maximale externe Rezyklatnachfrage, die entstehen würde, wenn der Rezyklatpreis p_R null wäre.

In Szenarien, in denen Recyclingunternehmen Mengen produzieren, die das aggregierte Nachfragevolumen überschreiten, wird angenommen, dass jedes Unternehmen nur jene Menge verkaufen kann, die seinem Anteil an der Gesamtproduktion entspricht. Die

Erlösfunktion eines Recyclingunternehmens i lautet daher:

$$Erlös \left(\sum_{j=1}^n R_j, R_i \right) = \begin{cases} p_R \left(\sum_{j=1}^n R_j \right) \cdot R_i & \text{falls } \sum_{j=1}^n R_j \leq \overline{Q_{PP}^D} \overline{u} + \overline{R_{notPP}^D} \\ p_R \left(\overline{Q_{PP}^D} \overline{u} + \overline{R_{notPP}^D} \right) \cdot \left(\frac{R_i}{\sum_{j=1}^n R_j} \right) & \text{falls } \sum_{j=1}^n R_j \geq \overline{Q_{PP}^D} \overline{u} + \overline{R_{notPP}^D} \end{cases}$$

Das vollständige Profitmaximierungsproblem für das i -te Recyclingunternehmen ist damit gegeben durch

$$\max_{R_i} \Pi_R(R_i) = Erlös \left(\sum_{j=1}^n R_j, R_i \right) - C_R(R_i)$$

wobei die Gewinne stark davon abhängen, ob das Gesamtangebot die maximale Rezyklatnachfrage $\overline{Q_{PP}^S} \cdot \overline{u} + \overline{R_{notPP}^D}$ überschreitet. Die Lösung liefert eine Reaktionsfunktion

$$R_i^* = R_i^*(R_{j \neq i}),$$

die die optimale Angebotsmenge des i -ten Recyclingunternehmens für jede mögliche Kombination der Angebotsmengen aller anderen Recyclingunternehmen beschreibt. Gleichzeitig werden die Produktionskosten $C_R(R_i^*)$, die optimalen Steuerungsgrößen χ^* und σ^* sowie die Abfallnachfrage des Unternehmens $W^D(R_i^*)$ bestimmt.

Durch die simultane Lösung der Reaktionsfunktionen aller n Unternehmen lässt sich das Marktgleichgewicht bestimmen, einschließlich der Angebotsmengen R_i^S jedes Unternehmens und des aggregierten Angebots des gesamten Sektors

$$\overline{R^S} = \sum_{i=1}^n R_i^S.$$

Das Marktgleichgewicht impliziert zudem die aggregierte Abfallnachfrage aller Recyclingunternehmen

$$\overline{W^D} = \sum_{i=1}^n W^D(R_i^S),$$

Tab. 2 Parameter zur Kalibrierung des Status quo (Basiskalibrierung)

Parameter	p_x	β	ρ	\hat{W}	\hat{Q}	u	\bar{u}	C_{util}
Value	1,0	0,78	0,26	308,0	385,0	0,0	0,5	2,33
Unit	[€/kg]	[–]	[–]	[kt]	[kt]	[–]	[–]	[€/t]
Parameter	C_x	C_σ	C_W	α_χ	α_σ	α_W	n	–
Value	185,0	200,0	0,3	2,7	2,5	1,2	5,0	
Unit	[€/t]	[€/t]	[€/t]	[–]	[–]	[–]	[–]	

die typischerweise ober- oder unterhalb des gesamten Haushaltsabfallangebots liegen kann.

2.4 Haushaltssektor

Der Haushaltssektor schließt den Kreislauf der Kunststoffverpackungen. Es wird angenommen, dass die Nachfrage nach Konsumgütern und folglich die insgesamt für Verpackungen benötigte Menge an Kunststoffverpackungen \hat{Q} exogen durch eine Zeitreihe des Haushaltkonsums vorgegeben ist. Die Haushalte entsorgen die Kunststoffverpackungen nach Nutzung der ursprünglich gekauften Güter, wodurch diese zu Kunststoffabfall \hat{W} werden. Alle Abfälle, für die der Rezyklatsektor keine Verantwortung übernimmt, also $\hat{W} - \overline{W_D}$, werden thermisch verwertet.

Um die insgesamt in Abfallverbrennungsanlagen endende Menge an Kunststoffverpackungen zu bestimmen, müssen zusätzlich die Verluste im Recyclingprozess berücksichtigt werden. Da im Recyclingprozess keine 100%ige Effizienz beim Sammeln χ , Sortieren σ und Recycling β erreicht wird, muss jedes Recyclingunternehmen i den Anteil $(1 - \chi_i \sigma_i \beta) \cdot W_i^D$ seines Abfalls an eine thermische Verwertungsanlage weiterleiten, wobei χ_i , σ_i und W_i^D die optimalen Recyclingentscheidungen des Unternehmens i darstellen.

Summiert über alle Unternehmen ergibt sich die insgesamt in der thermischen Verwertung anfallende Menge an Kunststoffabfällen

$$T = \hat{W} - \overline{W^D} + \sum_{i=1}^n (1 - \chi_i \sigma_i \beta) \cdot W_i^D$$

Unter der Annahme symmetrischer Unternehmen kann dies vereinfacht werden zu

$$T = \hat{W} - \chi \cdot \sigma \cdot \beta \cdot \overline{W^D}$$

3 Resultate

Die im vorangegangenen Kapitel eingeführten Gleichungen werden, basierend auf dem verfügbaren mathematischen Hintergrund, so weit wie möglich analytisch gelöst. Ziel ist es einerseits, die betriebswirtschaftlichen Optimierungsprobleme zu analysieren, um daraus die optimalen sektorspezifischen Preise und Gleichgewichtsmarktmengen abzuleiten. Andererseits sollen jene Mengen identifiziert werden, bei denen Angebot und Nachfrage in allen betrachteten Märkten simultan im Gleichgewicht stehen.

Das zugrunde liegende Modell umfasst drei eng miteinander verknüpfte Märkte: Rezyklate, Kunststoffverpackungen und Abfall. Diese sind entlang des Kunststoffverpackungskreislaufs strukturell miteinander verbunden. Entsprechend ergibt sich ein dreidimensionales Marktgleichgewichtsproblem, das es ermöglicht, sektorale Veränderungen nicht nur isoliert, sondern auch in ihren wechselseitigen Auswirkungen auf die übrigen Märkte zu analysieren. Diese Interdependenzen erhöhen jedoch die Modellkomplexität erheblich.

Die Vielzahl der Rückkopplungen zwischen den Märkten erfordert einen sorgfältig konzipierten Lösungsansatz. Während für einzelne Komponenten analytische Lösungen möglich sind, ist für das simultane Auffinden des allgemeinen Gleichgewichts eine numerische Lösungsmethode notwendig.

Ein zentrales Anliegen dieser Arbeit ist es darüber hinaus, konkrete Aussagen zur gegenwärtigen Recyclingproblematik zu ermöglichen. Zu diesem Zweck wurden spezifische funktionale Zusammenhänge und Marktstrukturen gewählt, die den tatsächlichen institutionellen und regulatorischen Gegebenheiten des österreichischen Marktes möglichst realitätsnah entsprechen. Diese weichen bewusst von in der ökonomischen Literatur üblichen Standardannahmen ab und erfordern

daher eine besonders sorgfältige mathematische Behandlung.

Die Relevanz der Modelllösung ergibt sich somit nicht nur aus ihrer praktischen Anwendbarkeit, sondern auch aus ihrer theoretischen Eigenständigkeit. Die Publikation der detaillierten Darstellung des Lösungswegs sowie der resultierenden Gleichgewichte in einem Fachbeitrag ist in Vorbereitung.

3.1 Status quo

Zunächst möchten wir zeigen, dass das Modell in der Lage ist, beobachtete Werte zu replizieren. Ziel ist es also zu zeigen, dass die numerische Lösung des allgemeinen Gleichgewichts in unserem Modell für eine Basiskombination von Parametern exakt jene Ergebnisse für die Zielvariablen liefert, die auch in der Realität beobachtet werden können.

Für die Basiskalibrierung wählen wir Werte der österreichischen Wirtschaft aus dem Jahr 2021. Eine Auswahl der 22 Parameter wird in Tab. 2 vorgestellt. Die Größen \hat{W} und \hat{Q} repräsentieren die gesamte Menge an Kunststoffverpackungsabfällen bzw. den gesamten Verbrauch von Kunststoffverpackungen in Österreich 2021. Mit fünf inländischen Sammelsystemen⁵ wird $n = 5$ gesetzt. Die Mindestrezyklateinsatzquote u wird auf null gesetzt, da derzeit keine bindende Untergrenze besteht. Die Obergrenze \bar{u} hängt jedoch vom verwendeten Kunststoffmaterial und der eingesetzten Technologie ab. Trotz vereinzelter Hersteller mit 100% Rezyklat in der Produktion liegt der typische Anteil zwischen 30% und 70%, weshalb für das Basiszenario ein Mittelwert von 50% angenommen wird. Alle Parameterwerte und Quellen sind in Tab. 4 im Anhang aufgeführt. Eine Materialflussanalyse der österreichischen

⁵ In unserem Modell werden Sammler, Sortierer und Recycler betrieblich zusammengefasst. Die Zahl 5 bezieht sich daher auf jene fünf österreichischen Systeme, die selbst Sammelverträge abgeschlossen haben oder ein Sammelsystem mitbenutzen.

Tab. 3 Ergebnisse der Basiskalibrierung. Die Zahlen entsprechen den Materialflüssen aus Abb. 2 und replizieren somit den Status quo

Variable	W_i^D	χ	σ	$\chi \cdot \sigma \cdot \beta$	W^D	LF	ΔW
Wert	61,6	0,57	0,58	0,26	308,0	0,788	0,0
Einheit	kt	//	//	//	kt	€/kg	kt
Variable	R_i	p_R	$\overline{R_{PP}^D}$	$\overline{R_{notPP}^D}$	$\overline{R^D}$	τ	ΔR
Wert	16,016	0,215	39,578	40,502	80,08	0,494	0,0
Einheit	kt	€/kg	kt	kt	kt	//	Kt
Variable	-	u	$\overline{Q^D}$	$\overline{Q_{ext}^D}$	$\overline{Q_{PP}^D}$	p_Q	ΔQ
Wert		0,169	234,22	103,297	281,703	0,934	0,0
Einheit		//	kt	kt	kt	€	kt

Kunststoffverpackungen aus dem Jahr 2021, welche dieselben Quellen nutzt, ist in Abb. 2 dargestellt.

Die übrigen Kostenparameter $C_\sigma, C_{util}, \alpha_\chi, \alpha_\sigma, \alpha_W$ sowie die restlichen Funktionsparameter werden anhand beobachteter Daten so kalibriert, dass sie bekannte Daten einschließlich Lizenzgebühren, Preise sowie Sortier- und Sammeleffizienzen replizieren. Zusätzlich wird die Variable $\tau := R_{PP}^D / \overline{R^D}$ eingeführt, die den Anteil des für Kunststoffverpackungen verwendeten Rezyklat angibt. τ ist in der Literatur etabliert und unterstützt die Modellkalibrierung. Zielwerte und deren Quellen sind in Tab. 5 im Anhang dokumentiert.

Die Ergebnisse der Basiskalibrierung aus Tab. 2 sind in Tab. 3 dokumentiert.

Wir stellen fest, dass das Modell konsistent arbeitet, da sich alle drei Märkte – Kunststoffverpackungen, Rezyklat und Abfall – im Gleichgewicht befinden. Dies erkennt man daran, dass Angebot und Nachfrage in die-

sen Bereichen übereinstimmen, wie die Differenzen Δ in der letzten Spalte der Tab. 3 zeigen. Alle anderen Variablen entsprechen nahezu exakt den Zielwerten, wie man auch im Vergleich mit den Materialflüssen aus Abb. 2 bzw. mit den Werten aus Tab. 5 erkennen kann. Eine Ausnahme stellt die Treffsicherheit der Lizenzgebühr LF dar. Diese weicht um etwa 10 % von den realen Werten ab, was nach Einschätzung von Expert:innen plausibel erscheint, da die Lizenzgebühren halbjährlich angepasst werden und von den Abfallwirtschaftsunternehmen häufig auf Basis einer Erfahrungssentscheidung („Bauchgefühl“) festgelegt werden.

3.2 Einführung einer Mindestrezyklateinsatzquote

In diesem Abschnitt wird die Anwendbarkeit des Modells anhand eines praxisrelevanten Beispiels demonstriert. Untersucht werden die Auswirkungen

einer politischen Maßnahme – konkret einer Mindestrezyklateinsatzquote – auf den Kunststoffverpackungssektor. Eine solche Quote verpflichtet Unternehmen, einen bestimmten Mindestanteil an Rezyklat in ihren Produkten zu verwenden. Ziel dieser Maßnahme ist es, durch die Schaffung einer Abnahmegarantie für den Rezyklatsektor die Nachfrage nach Rezyklat zu stabilisieren und damit Anreize für Investitionen in Recyclingkapazitäten zu setzen. Die Europäische Union plant, bis zum Jahr 2030 einen Mindestrezyklateinsatz von mindestens 30 % verbindlich vorzuschreiben (UMK-95 2021).

Zur Analyse der Auswirkungen dieser Regulierung wird im Modell die Untergrenze u für den Rezyklateinsatz in der Produktionsfunktion der Kunststoffverpackungshersteller angehoben. Dadurch wird die Mindestrezyklateinsatzquote als bindende Nebenbedingung in die Profitmaximierung der Unternehmen integriert. Diese Anpassung zwingt die Kunststoffverpackungsproduzenten, den vorgeschriebenen Mindestrezyklatgehalt bei ihrer Produktions- und Inputentscheidung explizit zu berücksichtigen.

Im Folgenden werden die modellbasierten Reaktionen der Marktakteure auf die Einführung einer Mindestrezyklateinsatzquote analysiert. Untersucht wird insbesondere, wie sich eine Erhöhung der Mindestrezyklateinsatzquote auf die Produktionsentscheidungen der Unternehmen, die Preisbildung auf dem Rezyklatmarkt sowie auf die gesamtwirtschaftliche Abfallverwertung auswirkt. Die Simulationsergebnisse dieser Politikszenarien sind in den

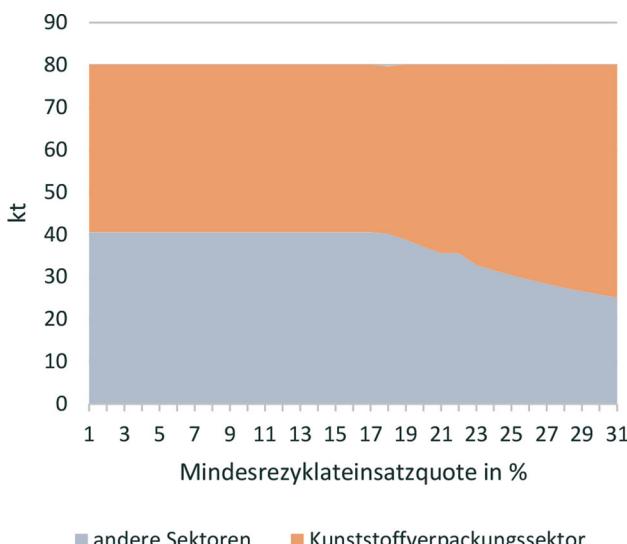


Abb. 3 Konsum von inländischem Rezyklat. Blau repräsentiert die Menge an inländischem Rezyklat, die nicht für Kunststoffverpackungen genutzt wird (Quelle: eigene Darstellung)

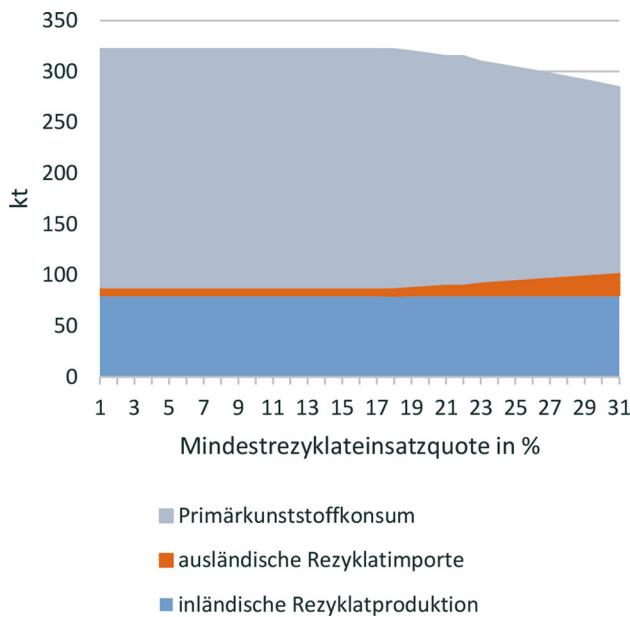


Abb. 4 Produktion und Import von Rezyklat sowie Konsum von Primärkunststoffen im Verpackungssektor (in kt) in Abhängigkeit von einer Mindestrezyklateinsatzquote (in %) (Quelle: eigene Darstellung)

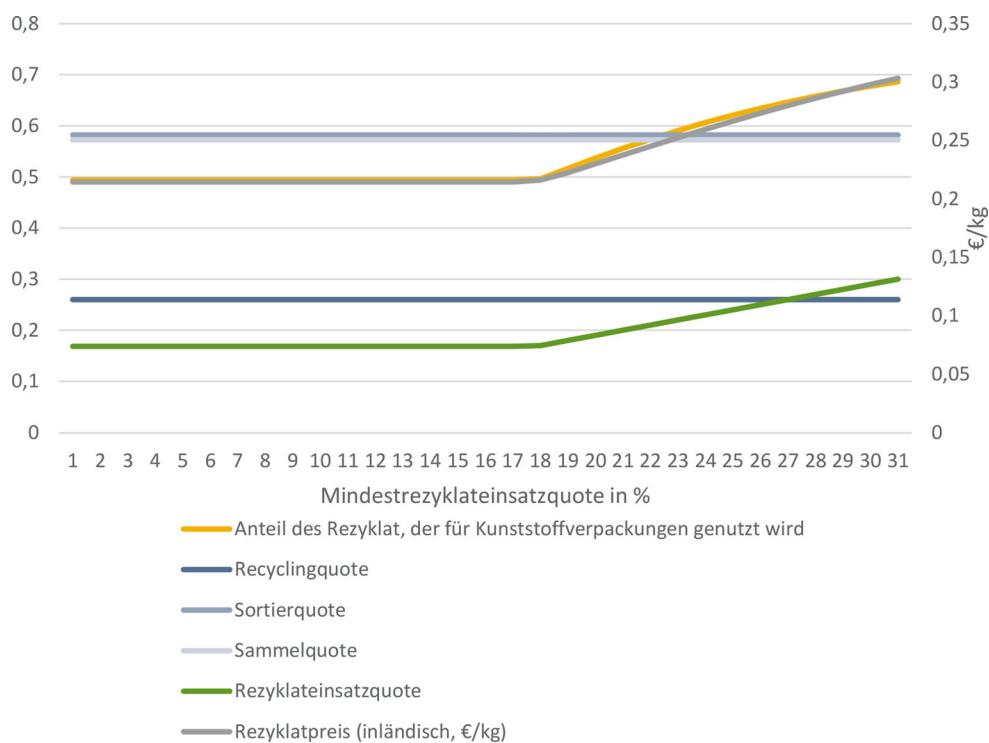


Abb. 5 Quoten des Recyclingprozesses (linke Achse) und der Rezyklatpreis (rechte Achse, in €/kg) in Abhängigkeit von der Mindestrezyklateinsatzquote (Quelle: eigene Darstellung)

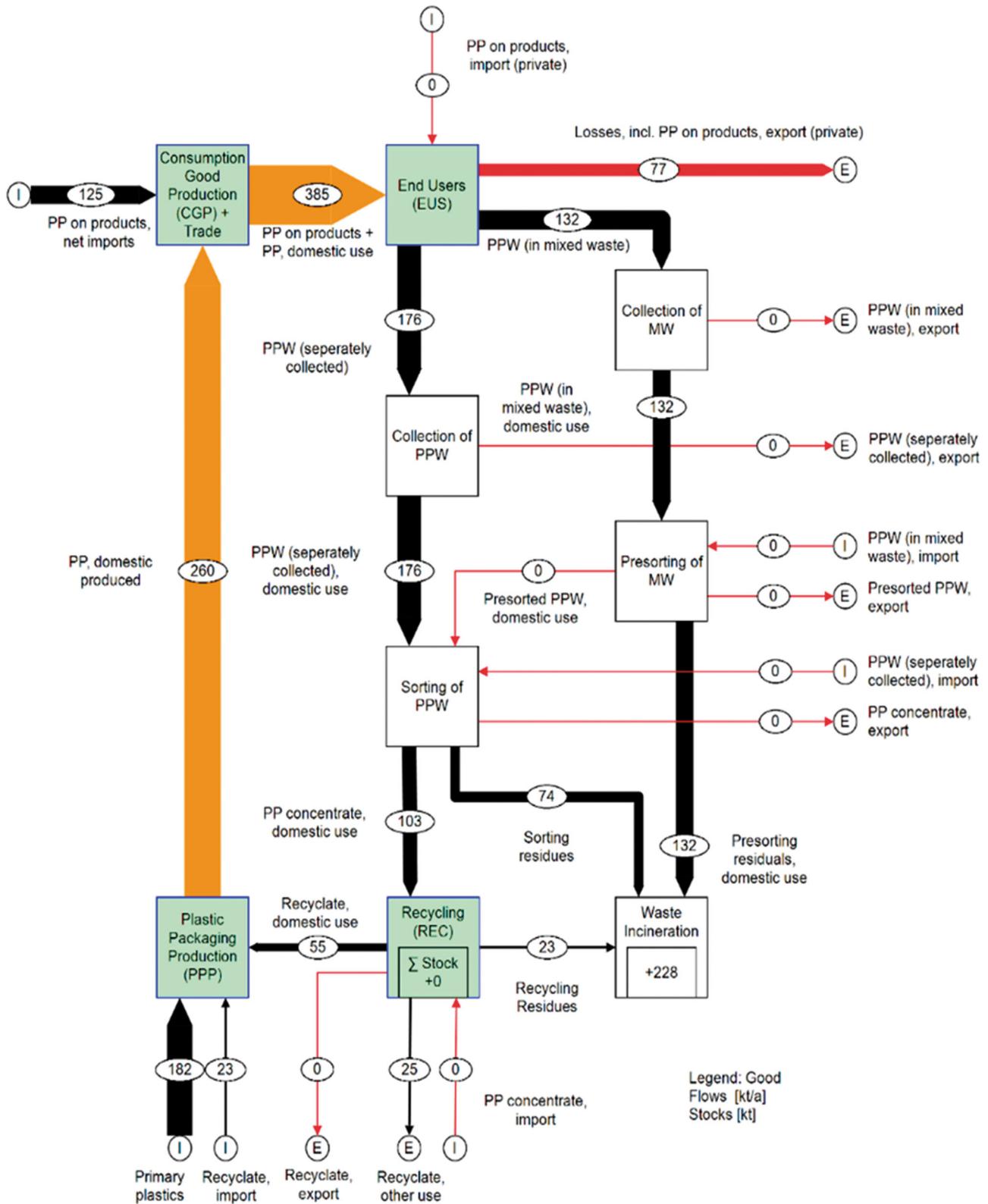


Abb. 6 Materialflussanalyse des österreichischen Kunststoffverpackungssystems nach Einführung einer Mindestrezyklateinsatzquote von 30 %. Achtung: Die Materialströme basieren nun auf eigenen Rechnungen (Quelle: eigene Darstellung)

Abb. 3⁶, 4 und 5 sowie in Abb. 6 dargestellt.

Zunächst soll die Frage beantwortet werden, ob eine Mindestrezyklateinsatzquote tatsächlich zu einer Steigerung des Rezyklatkonsums führt. Wie in Abb. 4 ersichtlich wird, steigt der gesamte österreichische Rezyklatkonsum – dargestellt durch die dunkelgraue Fläche – trotz einer zunehmenden Mindestrezyklateinsatzquote (x-Achse, in Prozent) nicht an. Gleichzeitig zeigt sich, dass der Verbrauch von Primärkunststoffen (hellblaue Fläche) zurückgeht, während die Importe von ausländischem Rezyklat (orange Fläche) zunehmen.

Zur Erklärung dieser Ergebnisse kann auf Abb. 3 verwiesen werden, die den Einsatz von inländischem Rezyklat in der Kunststoffverpackungsproduktion im Vergleich zur Nutzung in anderen kunststoffverarbeitenden Sektoren darstellt.

Hier zeigt sich im Einklang mit den Ergebnissen aus Abb. 4, dass die Gesamtmenge an inländisch produziertem Rezyklat mit rund 80 kt konstant bleibt. Innerhalb dieser Gesamtmenge verschiebt sich jedoch die sektorale Verwendung: Der Bedarf an Rezyklat im Kunststoffverpackungssektor steigt von 39,5 auf 55 kt, während der Konsum in den übrigen Sektoren von 40 auf 25 kt sinkt. Der beobachtete Rückgang des Primärkunststoffeinsatzes im Verpackungssektor ist somit eine direkte Folge der vorgeschriebenen Substitution durch Rezyklat, liefert jedoch keine Aussage über den gesamtwirtschaftlichen Verbrauch an Primärkunststoffen, da nur der Verpackungssektor betrachtet wird.

Die zugrunde liegende Dynamik lässt sich durch die Preisentwicklung am Rezyklatmarkt erklären, wie in Abb. 5 dargestellt ist. Die dort gezeigte graue Kurve verdeutlicht, dass der Preis für inländisches Rezyklat mit Einführung der Mindestrezyklateinsatzquote ansteigt. Ursache hierfür ist die Marktstruktur im Recyclingsektor: Durch die politische Maßnahme erhalten die Recyclingunternehmen eine Absatzgarantie, agieren jedoch in einem oligopolistischen Marktumfeld mit begrenztem Wettbewerb. Diese Marktmacht ermög-

licht es den Unternehmen, die Preise zu erhöhen, ohne ihre Produktionsmengen signifikant auszuweiten. Infolgedessen bleiben die Sammel-, Sortier- und Recyclingquoten trotz der politischen Intervention nahezu unverändert, was sich auch an den konstanten Verläufen der blauen Kurven in Abb. 5 ablesen lässt.

Darüber hinaus zeigt die gelbe Kurve, dass der Anteil des inländischen Rezyklates, der im Verpackungssektor eingesetzt wird, stetig zunimmt. Gleichzeitig reduzieren alle übrigen, von der Quote nicht betroffenen Sektoren ihren Rezyklatkonsum infolge der gestiegenen Preise.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Einführung einer Mindestrezyklateinsatzquote im Verpackungssektor nicht zu einer Erhöhung der Rezyklatproduktion führt. Stattdessen führen die durch die oligopolistische Marktstruktur verursachten Preissteigerungen zu einem Verdrängungseffekt („crowding-out“) in anderen Sektoren, sodass der gesamtwirtschaftliche Rezyklatkonsum konstant bleibt. Infolgedessen steigen auch die gesamtwirtschaftlichen Recyclingquoten nicht an.

Diese Ergebnisse werden abschließend in Abb. 6 in Form einer Materialflussanalyse dargestellt, basierend auf einem Szenario mit einer Mindestrezyklateinsatzquote von 30 %.

4 Conclusio

Das vorliegende Modell bietet einen integrativen Rahmen zur Analyse der Interaktionen zwischen Konsum, Abfallaufkommen, Recyclingaktivitäten und industrieller Nachfrage im Kunststoffsektor. Es zeigt, dass politische Eingriffe – wie etwa Mindestrezyklateinsatzquoten – nicht isoliert betrachtet werden dürfen. Unser Modell verdeutlicht, dass zwischen den zentralen Parametern, wie Sammel-, Sortier- und Recyclingeffizienzen sowie den Preisbildungsmechanismen auf den Märkten für Primär- und Sekundärkunststoffe, signifikante Interdependenzen bestehen, die zu nicht-intuitiven und teils gegenläufigen Ergebnissen führen können.

Die Simulationsergebnisse zeigen, dass Maßnahmen zur Steigerung des Rezyklateinsatzes unter bestimmten Marktbedingungen nicht notwendigerweise eine höhere Recyclingquote bewirken. Oligopolistische Marktstruk-

turen im Recyclingsektor können die Preisbildung dominieren und dadurch Effekte erzeugen, die politisch intendierte Wirkungen teilweise kompensieren. Steigende Rezyklatpreise infolge regulatorischer Eingriffe führen zu Substitutionseffekten, bei denen nicht betroffene Sektoren ihren Rezyklatkonsum reduzieren, wodurch der gesamtwirtschaftliche Rezyklateinsatz nahezu konstant bleibt.

Das Modell ermöglicht eine detaillierte Analyse der Wechselwirkungen innerhalb des Kunststoffkreislaufs und zeigt, dass sich die komplexen Zusammenhänge zwischen Konsum, Abfallentstehung, Recyclingaktivität und industrieller Nachfrage nur durch eine integrierte, sektorübergreifende Betrachtung adäquat erfassen und politisch bewerten lassen. Darüber hinaus verdeutlicht unsere Arbeit, dass abfallwirtschaftliche Prozesse ökonomisch abbildbar und systematisch simulierbar sind. Dadurch können Entscheidungsprozesse in Politik und Wirtschaft künftig auf modellgestützte und empirisch fundierte Analysen zurückgreifen, anstatt sich auf intuitive Einschätzungen zu stützen. Dies schafft die Grundlage, politische Maßnahmen im Bereich der Kreislaufwirtschaft zielgerichteter zu gestalten und ihre potenziellen Wirkungen bereits im Vorfeld zu evaluieren.

Das entwickelte Basismodell bildet den ökonomischen Kern eines vereinfachten, aber realitätsnahen Materialflusssystems ab: Kunststoffverpackungen werden produziert, konsumiert und nach kurzer Nutzungsdauer zu Abfall, der gesammelt, sortiert und recycelt wird. Das daraus entstehende Rezyklat ersetzt Primärkunststoffe und schließt so den Materialkreislauf. Trotz vereinfachender Annahmen weist das Modell ein stabiles und realitätsnahe Verhalten auf und bietet eine valide Grundlage für weiterführende Analysen.

Zukünftige Arbeiten werden sich auf eine präzisere Parametrisierung und Kalibrierung des Modells konzentrieren, um dessen quantitative Aussagekraft weiter zu erhöhen. Darüber hinaus sollen alternative Szenarien, wie der Preisverfall bei Primärkunststoffen im Jahr 2020, analysiert werden, um die strukturellen Wechselwirkungen zwischen Recycling-, Kunststoffverpackungs- und Konsumsektor vertieft zu untersuchen.

Insgesamt zeigen die Ergebnisse, dass sich das reale Kunststoffverpackungssystem mithilfe des Modells

⁶ Die Abbildungen illustrieren immer die Ergebnisse im Gleichgewicht. Somit sind hier Konsum und Angebot ident, weshalb die Größen auch auf beide Arten verstanden und interpretiert werden dürfen.

realitätsgerecht abbilden lässt und die zugrunde liegenden Systemmechanismen besser verstanden werden können. Dadurch wird deutlich, dass modellgestützte Analysen ein wirksames Instrument zur Unterstützung abfallwirtschaftlicher Entscheidungsprozesse darstellen. Künftig können auf dieser Basis politische und ökonomische Entscheidungen faktenbasiert getroffen werden, sodass intuitive oder erfahrungsgebasierte Vorgehensweisen zunehmend durch systematische, modellgestützte Ansätze ersetzt werden können.

Funding Open access funding provided by TU Wien (TUW).

Interessenkonflikt

S. Rivić, M. Freiberger, O. Cencic, C. Scharff, A. Prskawetz und H. Rechberger geben an, dass kein Interessenkonflikt besteht.

Open Access Dieser Artikel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jedem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden. Die in diesem Arti-

kel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen. Weitere Details zur Lizenz entnehmen Sie bitte der Lizenzinformation auf <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>.

5 Anhang

Tab. 4 Werte einiger verwendeter Parameter und ihre Quellen

Parameter	Wert	Einheit	Quelle
\hat{W}	308	kt	Facts matters – Conversio Studie (2022, S. 50)
\hat{Q}	392 ¹	kt	Facts matters – Conversio Studie (2022, S. 27)
ρ	22,5 bzw. 50	%	DIRECTIVE (EU) (2018)
β	78	%	Vorlesung aus Abfallwirtschaft (2024)

¹Es scheint auch der Wert 385 kt regelmäßig auf. Dieser wurde auch von unseren Experten bestätigt, weshalb wir den Wert in unseren Berechnungen verwendet haben

Tab. 5 Werte einiger Zielvariablen und ihre Quellen

Variable	Wert	Einheit	Quelle
LF (2021)	0,695	€/kg	ARA-Tarifblatt (2021)
χ	58	%	ARA value chain
σ	58	%	ARA value chain (2021)
p_R	0,23	€/kg	Plasticker
u	16,8	%	Facts matters – Conversio Studie (2022, S. 35)
τ	0,49	//	Facts matters – Conversio Studie (2022, S. 35)

Literatur

- Altstoff Recycling Austria.** (2021a): Shaping the circular future.
- Altstoff Recycling Austria.** (2021b): TARIF-BLAIT 2021
- Bakir, A., Desender, M., Wilkinson, T., Van Hoytema, N., Amos, R., Airahui, S., Graham, J., Maes, T.** (2020): Occurrence and abundance of meso and microplastics in sediment, surface waters, and marine biota from the South Pacific region. *Marine Pollution Bulletin*, 160, 111572.
- DIRECTIVE (EU) (2018):** DIRECTIVE (EU) 2018/852 of the European Parliament and of the Council of 30 May 2018 amending Directive 94/62/EC on packaging and packaging waste. Official Journal of the European Union, 852.
- EUWID Recycling und Entsorgung (2023a):** Alternative Finanzierung der EU-Kunststoffabgabe gesucht. Ausgabe 37.
- EUWID Recycling und Entsorgung (2023b):** Berechnungsverfahren für Rezyklatgehalt in Einweg-PET-Flaschen veröffentlicht. Ausgabe 49.
- EUWID Recycling und Entsorgung (2023c):** Kunststoffrecyclerverband: Zukunft der Recyclingunternehmen in Europa gefährdet. Ausgabe 42, 5–6.
- EUWID Recycling und Entsorgung (2023d):** Markt für PET: Aufkommen an Neuware und Rezyklaten übersteigt weiterhin Bedarfe. Ausgabe 43.
- EUWID Recycling und Entsorgung (2023e):** Weiterhin schlechte Stimmung unter Kunststoffverarbeitern in Deutschland. Ausgabe 34.
- EUWID Recycling und Entsorgung (2024):** BDE, bvse und VBS präsentieren Forderungskatalog zur Bundestagswahl. Ausgabe 50, 1–2.
- Grabuschnig, L., Rechberger, H., Lindner, C., Schmitt, J.** (2022): Ergebnisse in den Bereichen Kunststoffstrom 2019 in Österreich.
- Graedel, T. E., Miatto, A., Di, J., Reck, B. K.** (2021): United States plastics: Large flows, short lifetimes, and negligible recycling. *Resources, Conservation and Recycling*, 117.
- Huang, W., Song, B., Liang, J., Niu, Q., Zeng, G., Shen, M., Deng, J., Luo, Y., Wen, X., Zhang, Y.** (2021): Microplastics and associated contaminants in the aquatic environment: A review on their ecotoxicological effects, trophic transfer, and potential impacts to human health. *Journal of Hazardous Materials*, 405, 124187.
- Rechberger, H., Scharff, C., Fellner, J., Ableidinger, M.** (2024): Abfallwirtschaft Entsorgungstechnik. TU Wien.
- Scheeder, P. R. W., Kawecki, D., Nowak, B.** (2018): Probabilistic Material Flow Analysis of Seven Commodity Plastics in Europe. *Environmental Science Technology*, 9874–9888.
- Senathirajah, K., Attwood, S., Bhagwat, G., Carrbery, M., Wilson, S., Palanisami, T.** (2021): Estimation of the mass of microplastics ingested—A pivotal first step towards human health risk assessment. *Journal of Hazardous Materials*, 404, 124004.
- Statista** (2021): Weltweite und europäische Kunststoffproduktion in den Jahren von 1950 bis 2019. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/167099/umfrage/weltproduktion-von-kunststoff-seit-1950/#statisticContainer>
- UMK-95 (2021):** Umweltministerkonferenz der BRD am 13. November 2020, Top 29. www.umweltministerkonferenz.de/documents/end_gueltiges-ergebnisprotokoll_95_umk_2_1608714572.pdf
- Van Eygen, E., Feketitsch, J., Laner, D., Rechberger, H., Fellner, J.** (2017): Comprehensive analysis and quantification of national plastic flows: The case of Austria. *Resources, Conservation and Recycling*, 117, 183–194.

Hinweis des Verlags Der Verlag bleibt in Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutsadressen neutral.