



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN

DIPLOMARBEIT

Vergleichende Ökobilanzierung von Joghurtbehältnissen aus Polypropylen, Polystyrol und Einwegglas

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines

Diplom-Ingenieurs

unter der Leitung von

Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.mont. Vasiliki-Maria Archodoulaki

(Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften, E308 - Institut für Werkstoffwissenschaften
und Werkstofftechnologie)

Senior Scientist Dipl.-Ing. Dr.techn. Bettina Mihalyi-Schneider

(Fakultät für Technische Chemie, E166 - Institut für Verfahrenstechnik, Umwelttechnik und technische
Biowissenschaften)

Univ.Ass. Dipl.-Ing. Bianca-Maria Köck

(Fakultät für Technische Chemie, E166 - Institut für Verfahrenstechnik, Umwelttechnik und technische
Biowissenschaften)

eingereicht an der Technischen Universität Wien

von

Christopher Karglmayer



Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass die vorliegende Arbeit nach den anerkannten Grundsätzen für wissenschaftliche Abhandlungen von mir selbstständig erstellt wurde. Alle verwendeten Hilfsmittel, insbesondere die zugrunde gelegte Literatur, sind in dieser Arbeit genannt und aufgelistet. Die aus den Quellen wörtlich entnommenen Stellen, sind als solche kenntlich gemacht.

Das Thema dieser Arbeit wurde von mir bisher weder im In- noch Ausland einer Beurteilerin/einem Beurteiler zur Begutachtung in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt. Diese Arbeit stimmt mit der von den Begutachterinnen/Begutachtern beurteilten Arbeit überein.

Ich nehme zur Kenntnis, dass die vorgelegte Arbeit mit geeigneten und dem derzeitigen Stand der Technik entsprechenden Mitteln (Plagiat-Erkennungssoftware) elektronisch-technisch überprüft wird. Dies stellt einerseits sicher, dass bei der Erstellung der vorgelegten Arbeit die hohen Qualitätsvorgaben im Rahmen der geltenden Regeln zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis „Code of Conduct“ an der TU Wien eingehalten wurden. Zum anderen werden durch einen Abgleich mit anderen studentischen Abschlussarbeiten Verletzungen meines persönlichen Urheberrechts vermieden.

Perchtoldsdorf, den 9. August 2022

Unterschrift

Danksagung

Der Abschluss eines Studiums an der TU Wien erfordert viel Einsatz, Motivation und Energie. Die Erstellung der abschließenden Diplomarbeit benötigt zudem auch die Unterstützung vieler Wegbegleiter.

An dieser Stelle möchte ich mich herzlich bei meinen Betreuerinnen Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.mont. Vasiliki-Maria Archodoulaki, Senior Scientist Dipl.-Ing. Dr.techn. Bettina Mihalyi und Univ.Ass. Dipl.-Ing. Bianca-Maria Köck bedanken. Hilfreiche Anregungen, zahlreiche Zoomcalls in Zeiten von Corona und auch konstruktive Kritik waren sehr hilfreich bei der Erstellung der Arbeit.

Auch möchte ich mich bei meiner Familie und meinen Freunden bedanken, die mich in den letzten Jahren begleitet haben und stets ein offenes Ohr für mich hatten.

Zum Schluss gilt mein Dank auch meinen Studienkolleginnen und Kollegen für die gegenseitige Unterstützung in all den Zeiten des gemeinsamen Studierens.

Christopher Karglmayer

Kurzfassung

Forschungsziel der vorliegenden Arbeit ist es, herauszufinden, welche, im Lebensmittel Einzelhandel aktuell angebotenen Behälter für Joghurt, die umweltfreundlichste Alternative darstellen und welche Parameter einen wesentlichen Einfluss auf das Ergebnis der Ökobilanz haben.

Mittels Literaturrecherche wird der aktuelle Stand der nach 2015 veröffentlichten Studien, die sich mit der Ökobilanz von Lebensmittelverpackungen auseinandersetzen, erhoben, wobei der geografische Untersuchungsrahmen mit Europa begrenzt wurde. Unter Verwendung der GaBi-Software wird eine Ökobilanz von ausgewählten Verpackungslösungen für Joghurt - Einwegglas, Kunststoffbecher und gewichtsreduzierte Kunststoffbecher mit Kartonmantel - modelliert und die Ergebnisse der am häufigsten verwendeten Wirkungskategorien hinsichtlich der wichtigsten Einflussfaktoren analysiert.

Die Literaturrecherche zeigt, dass Einwegglas das am meisten untersuchte Verpackungsmaterial im Lebensmittelbereich darstellt. Trotz konstant steigender Recyclingquoten in Europa ist das Einschmelzen der Mischung aus Primärmaterial und Altglasscherben sehr energieintensiv. Mehrwegsysteme im Sinne einer Kreislaufwirtschaft sind daher die Alternative mit den geringsten Umweltauswirkungen. Kunststoffverpackungen aus Recyclingmaterial zeigen ebenfalls die geringsten Effekte, sind jedoch im Lebensmittelbereich aufgrund aufwendiger Aufbereitungsprozesse noch nicht zugelassen.

Die Ergebnisse der Ökobilanz zeigen, dass Behälterglas das System mit den größten Umweltauswirkungen in den untersuchten Wirkungskategorien Treibhauspotential, Versauerung, Eutrophierung, Sommersmog, Feinstaub und Wasserverbrauch darstellt. Die vier betrachteten Kunststofflösungen befinden sich in etwa auf demselben Niveau, wobei in dieser Gruppe der gewichtsreduzierte Kunststoffbecher (250 g) durch sein ungünstiges

Verhältnis zwischen Füllinhalt und Verpackungsgewicht die größten Umweltauswirkungen zeigt. Alle untersuchten Verpackungssysteme zeigen die größten relativen Auswirkungen in der Produktion des Behälters bzw. Verschlusses (Primärverpackung), nur der untersuchte Wasserverbrauch weist bei der Produktion der Transport- und Verkaufsverpackungen (z.B. Trays) den größten relativen Anteil auf.

Eine Sensitivitätsanalyse zeigt, dass die untersuchten Wirkungskategorien Treibhauspotential, Versauerung, Eutrophierung, Sommersmog und Feinstaub sensibel auf eine Erhöhung der Transportdistanzen reagieren. Bei einer Erhöhung der Recyclingquote und der damit einhergehenden Verringerung der Verbrennungsrate verringert sich das Treibhauspotential der Kunststoffverpackungen am meisten.

Abstract

The research objective of this study is to find out which yoghurt containers currently offered in the food retail sector represent the most environmentally friendly alternative and which parameters have a significant influence on the result of the life cycle assessment.

The current status of studies published after 2015 that deal with the life cycle assessment of food packaging is surveyed by means of literature research, whereby the geographical scope of the study was limited to Europe. Using GaBi software, a life cycle assessment of selected packaging solutions for yoghurt - single-use glass, plastic cups and weight-reduced plastic cups with a cardboard sleeve - is modelled and the results of the most frequently used impact categories are analysed with regard to the most important influencing factors.

The literature research shows that single-use glass is the most studied packaging material in the food sector. Despite constantly increasing recycling rates in Europe, melting down the mixture of primary material and cullet is very energy-intensive. Reusable systems in the sense of a circular economy are therefore the alternative with the lowest environmental impact. Plastic packaging made of recycled material also shows the lowest effects, but is not yet approved in the food sector due to complex reprocessing processes.

The results of the LCA show that container glass is the system with the greatest environmental impact in the examined impact categories of greenhouse potential, acidification, eutrophication, summer smog, particulate matter and water consumption. The four plastic solutions considered are at about the same level, whereby in this group the weight-reduced plastic cup (250 g) shows the greatest environmental impact due to its unfavourable ratio between filling content and packaging weight. All examined packaging systems show the greatest relative impact in the production of the container or closure

(primary packaging), only the examined water consumption shows the greatest relative share in the production of the transport and sales packaging (e.g. trays).

A sensitivity analysis shows that the examined impact categories of greenhouse potential, acidification, eutrophication, summer smog and particulate matter react sensitively to an increase in transport distances. An increase in the recycling rate and the associated reduction in the incineration rate reduces the greenhouse potential of plastic packaging the most.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	x
1 Einleitung	1
1.1 Verpackungstechnologie	2
1.2 Verwertung und Recycling	3
1.3 Kreislaufwirtschaft und der EU-Aktionsplan	5
1.4 Kunststoffkonsum in Österreich und Europa	6
1.5 Glaskonsum in Österreich und Europa	8
2 Aufgabenstellung	10
2.1 Problemstellung und Ziel der Arbeit	10
2.2 Aufbau und Methodik	11
3 Theoretische Grundlagen	13
3.1 Polypropylen und Polystyrol	13
3.1.1 Basischemie der Ausgangsstoffe	13
3.1.2 Produktion von Kunststoff	14
3.1.3 Kunststoffverarbeitung	15
3.1.4 Recycling und Verwertung	16
3.2 Einwegglas	17
3.2.1 Basischemie der Ausgangsstoffe	17
3.2.2 Produktion von Behälterglas	18
3.2.3 Recycling und Verwertung	19
3.3 Ökobilanzierung	20
3.3.1 Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens	21
3.3.2 Sachbilanz	24
3.3.3 Wirkungsabschätzung	25

3.3.4	Auswertung	27
4	Vergleichende Ökobilanzen im Lebensmittelverpackungsbereich	28
4.1	Methodisches Vorgehen	28
4.2	Identifizierte Studien	29
4.2.1	Datenherkunft Sachbilanz	29
4.2.2	Gewählte Wirkungsindikatoren	31
4.2.3	Zusammenfassung der identifizierten Studien	32
4.2.4	Verpackungsmaterialien	35
4.3	Diskussion	37
5	Erstellung der Ökobilanz	40
5.1	Methodisches Vorgehen	40
5.2	Festlegung des Ziels der Studie	40
5.3	Festlegung des Untersuchungsrahmens	41
5.3.1	Systemgrenzen	42
5.4	Sachbilanz	45
5.4.1	Sachbilanz zu Primärverpackungen	45
5.4.2	Sachbilanz zu Verkaufs- und Transportverpackungen	48
5.4.3	Sachbilanz zu Transporten	49
5.4.4	Sachbilanz zu Verwertung	50
5.5	Wirkungsabschätzung	51
5.5.1	Auswahl der Wirkungskategorien	51
5.6	Ergebnisse	55
5.6.1	Basisszenario	55
5.6.2	Sensitivitätsanalyse der EoL-Prozesse	63
5.6.3	Sensitivitätsanalyse der Transportdistanzen	64
5.6.4	Normierung	65
5.7	Diskussion	66
6	Zusammenfassung	68
7	Ausblick	71
	Quellenverzeichnis	74

Abbildungsverzeichnis	79
Tabellenverzeichnis	81
A Anhang	83
A.1 Diverses	83
A.2 Wirkungsabschätzung EWG450	86
A.3 Wirkungsabschätzung PP250	90
A.4 Wirkungsabschätzung PS250K	94
A.5 Wirkungsabschätzung PS500	101
A.6 Wirkungsabschätzung PS500K	105

Abkürzungsverzeichnis

ARA	Altstoff Recycling Austria
BMK	Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie
BMSGPK	Bundesministerium für Soziales, Gesundheit, Pflege und Konsumentenschutz
CH	Schweiz
DS	Distributionsstufe
EFSA	European Food Safety Authority
EFTA	European Free Trade Association, Europäische Freihandelsassoziation (Island, Liechtenstein, Norwegen, Schweiz)
EPS	Expanded Polystyrene, Polystyrolschaum
EU	Europäische Union
EU-28	Europäische Union, Mitgliedsstaaten bis einschließlich Januar 2020
FCM	Food Contact Material
f. E.	funktionelle Einheit
FEVE	Fédération Européenne du Verre d’Emballage, Europäischer Behälterglasverband
GB	Großbritannien
HDPE	High Density Polyethylen, Hart-Polyethylen
IPCC	International Panel on Climate Change
LCA	Life Cycle Assessment
LMSVG	Lebensmittelsicherheits- und Verbraucherschutzgesetz
NO	Norwegen
PA	Polyamid
PEFCR	Product Environmental Footprint Category Rules

Inhaltsverzeichnis

PET	Polyethylenterephthalat
PP	Polypropylen
PS	Polystyrol
TU	Technische Universität
UN	United Nations
UNEP	United Nations Environment Programme
WMO	World Meteorological Organization

1 Einleitung

Mitte 2018 führte die größte österreichische Molkerei *Berglandmilch* den Verkauf von Milchprodukten in Einwegglas ein, um dem Wunsch ihrer Kund*innen nachzukommen, dem österreich- und vor allem weltweiten Problem des Plastikmülls entgegenzuwirken. Schnell wurden Stimmen in den Medien laut, dass diese Wiedereinführung das Problem nicht löse, sondern - im Gegenteil - ein weiteres Müllproblem erzeuge (Cobbina, 2018). Dieser Kritik folgte die heimische Milchindustrie und führte schon ein Jahr später ein Mehrwegsystem für Milchflaschen ein (Berglandmilch eGen, 2019). Das Feedback war laut Pressemitteilung des Unternehmens sehr gut und so folgte Ende 2021 auch das Joghurt im Mehrwegglas (Berglandmilch eGen, 2021).

Diese Diskussion im österreichischen Lebensmittelhandel um die Vermeidung von Verpackungsmüll und dessen Auswirkungen auf die Umwelt kann als Spiegelbild eines europä- bzw. weltweiten Problems gesehen werden. Das wachsende öffentliche Bewusstsein gegenüber der Vermeidung von Verpackungsabfällen und deren Auswirkungen auf die Umwelt ist ein zunehmend wichtiger Faktor für die Entscheidungsfindung in Unternehmen. Während in Österreich der Anteil an Glas und Kunststoffen in dieser Müllfraktion 2018 jeweils etwas über 20 % lag (BMK, 2021), war der weltweite Anteil von Verpackungen im Kunststoffabfall bei knapp der Hälfte¹ (UNEP, 2018). Eine Studie des UN-Umweltprogramms kam 2018 zum Schluss, dass in Zentraleuropa 7 % und in Westeuropa sogar 17 % der produzierten Kunststoffe durch Littering aus dem Stoffstrom verschwinden (Ryberg et al., 2021). Konsequenz dieses ungeordneten Wegwerfens von Müll ist neben der Freisetzung von Makro- und Mikroplastik in die Umwelt auch der Umstand, dass diese Abfälle für fachgerechte Verwertungsmethoden nicht mehr zur Verfügung stehen.

¹In der angegebenen Studie wird Kunststoffabfall in die Fraktionen Verpackung, Transportwesen, Bauwesen, Elektrik/Elektronik, Konsumgüter, Industriemaschinen, Textilien und Weitere aufgeschlüsselt.

1.1 Verpackungstechnologie

Was Glas- und Kunststoffbehälter vereint, sind ihre Aufgaben und Funktionen, die sie als Packstoffe erfüllen müssen. Primär muss die Verpackung das Packgut vor Einflüssen aus der Umwelt schützen. Zu dieser Schutzfunktion zählen die Qualitätssicherung, das Sicherstellen der Hygieneanforderungen und die Gewährleistung der Haltbarkeit. Eine weitere wichtige Aufgabe der Verpackung ist das Bereitstellen von Informationen und das Bewerben des Packstoffes (Kaßmann, 2014).

Verpackungen und Behältnisse, die mit Lebensmitteln in Berührung kommen, werden als Lebensmittelkontaktmaterialien (FCM, Food Contact Materials) bezeichnet. Da chemische Stoffe in Lebensmittel übergehen können, gibt die EU für diese Materialien mit der Verordnung Nr. 1935/2004 (EU-Kommission, 2004) einen Rechtsrahmen mit allgemeinen Anforderungen an FCM vor, um zu verhindern, dass:

- ein möglicher Übergang von chemischen Stoffen Sicherheitsbedenken aufwirft,
- die Zusammensetzung der Lebensmittel verändert wird,
- die Geschmacks- und Geruchsqualität der Lebensmittel beeinträchtigt werden.

Die EU-Verordnung Nr. 10/2011 enthält Vorschriften und Anforderungen an Kunststoffe, die mit Lebensmitteln in Berührung kommen (EU-Kommission, 2011). Eine wichtige Rolle dabei spielen die Migrationsgrenzwerte, also die höchstzulässigen Mengen an Stoffen, die vom Verpackungsmaterial an das Lebensmittel abgegeben werden. Da sich diese Verordnung jedoch nur auf Primärmaterialien bezieht, regelt die EU-Verordnung Nr. 282/2008 zusätzlich die Verwendung von recycelten Kunststoffen im Lebensmittelbereich (EU-Kommission, 2008). Nachdem die Zulassung eines Wiederverwertungsverfahrens von Kunststoffen unter den angegebenen Bedingungen beantragt wurde, werden Gutachten durch die *European Food Safety Authority* (EFSA) erstellt und die Kommission entscheidet über eine Zulassung des Recyclingverfahrens. Bis 2018 wurden mehr als 130 solche Zulassungsanträge für recycelte Kunststoffe begutachtet. Keiner davon behandelte Wiederverwertungsverfahren von Polystyrolverpackungen und nur 5 % der Anträge hatten Verfahren für Polyolefine (PP und/oder HDPE) zum Inhalt, von denen bis jetzt keines zugelassen wurde (Geueke et al., 2018). Somit ist davon auszugehen,

dass alle Lebensmittelverpackungen, die aus PP oder PS in Europa in Umlauf gebracht werden, aus Primärmaterialien bestehen.

Generell spielen beim Recycling von Kunststoffen als FCM mehrere Faktoren eine wichtige Rolle. Abbauprodukte der Polymere, Verunreinigungen und Missbrauch durch den Verbraucher und fremde Kunststoffe, die ohne ausreichende Lebensmittelqualität in den Verwertungsstrom gelangen, stellen hohe Anforderungen an die Recyclingverfahren. Für PET konnten sich in den letzten Jahren mehrere Prozesse etablieren, da es sich bei diesem Kunststoff um sehr inertes Material handelt. PP und PS stellen Polyolefine dar, bei denen die Diffusion kritischer Stoffe weit schneller erfolgt als bei PET. Hohe Migrations- und Sorptionsraten dieser Kunststoffe haben weitaus geringere Migrationsgrenzwerte von Schadstoffen zur Folge. Auch die geringe Hitzebeständigkeit im Vergleich zu PET macht recycelte Lebensmittelverpackungen aus PP und PS im Moment noch nicht möglich bzw. effizient (Geueke et al., 2018).

Die Verwendung von Glas als FCM ist auf europäischer Ebene nicht harmonisiert und wird somit durch nationale Rechtsvorschriften geregelt. Im österreichischen Lebensmittelsicherheits- und Verbraucherschutzgesetz (LMSVG) wird Glas (als FCM) allgemein als Gebrauchsgegenstand beschrieben, zu deren Migrationsgrenzwerten das österreichische Lebensmittelbuch eine Reihe an Normen vorgibt (BMSGPK, 2021). Österreichische Unternehmen im Lebensmittelbereich melden Recyclinganteile von 52 %² bis 70 %³ in ihren Behältergläsern.

1.2 Verwertung und Recycling

Produkte, die am Ende ihrer Gebrauchsphase angelangt sind, können grundsätzlich in vier verschiedenen Kreislaufebene wiederverwertet werden bzw. als weitere Möglichkeit energetisch genutzt werden (Abb. 1.1). Die Summe dieser Optionen der Verarbeitung von Abfällen wird unter dem Oberbegriff Verwertung zusammengefasst (Koltzenburg et al., 2014).

²<https://mautner.at/de/magazine/4323/oekobusinessplan-zertifizierung?language=de>, zuletzt aufgerufen am 21.02.2022

³<https://www.pago.at/de/nachhaltigkeit-werte/>, zuletzt aufgerufen am 21.02.2022

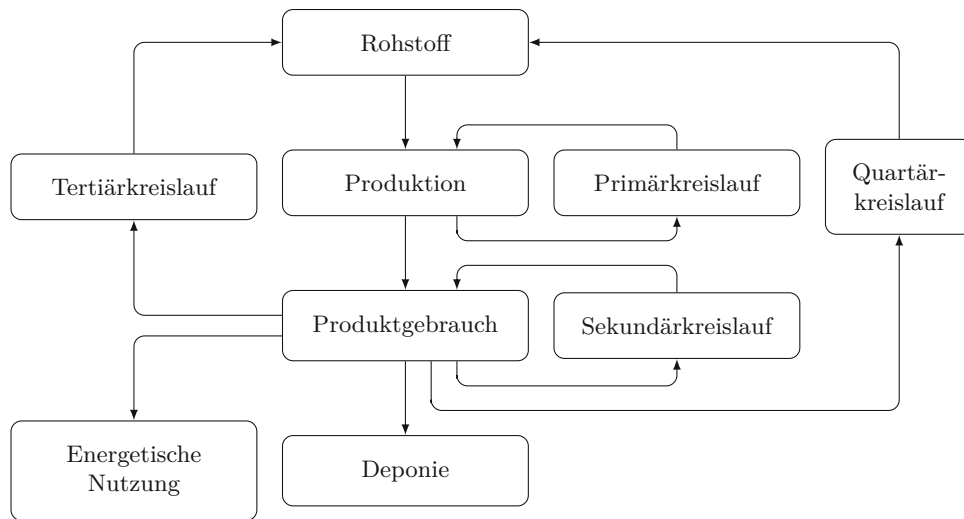


Abb. 1.1 Recyclingkreisläufe

Die vier verschiedenen Optionen des Recyclings ergeben sich auf verschiedenen Stufen der Herstellungs- bzw. Gebrauchskette von Kunststoffprodukten:

- Der *Primärkreislauf*, auch als innerbetriebliches Recycling bzw. In-Plant-Recycling bezeichnet, beschreibt die Verwertung von Abfällen, die während der Produktion anfallen. Neben Ausschussware werden auch Scherben bzw. Stanzreste meist direkt beim Verwerter als sortenreine Primärwerkstoffe erneut eingesetzt.
- Im *Sekundärkreislauf* erfolgt eine erneute Verwendung des beschädigungs- und verschleißfreien Produktes. Da eine weitere wichtige Voraussetzung für den Wiedergebrauch die Sauberkeit des Materials ist, stellt dieser Kreislauf bei den Kunststoffverpackungen im Bereich der verderblichen Lebensmittel sowohl ökonomisch als auch ökologisch keine Alternative dar. Für Behälterglas besteht dieser Kreislauf v. a. im Bereich von flüssigen Lebensmitteln wie Limonaden, Bier und Milch (vgl. Cobbina, 2018).
- Im *Tertiärkreislauf*, auch als werkstoffliches Recycling bezeichnet, werden Abfälle nach diversen Aufbereitungsprozessen (Sortieren, Zerkleinern etc.) dem Produktionsprozess erneut als Sekundärrohstoffe zugeführt.

- Der *Quartärkreislauf*, der auch als rohstoffliches Recycling bezeichnet wird, beschreibt die chemische Zerlegung des kunststofflichen Abfalls. Die so entstandenen Substanzen können entweder als chemische Grundprodukte oder als Brennstoffe eingesetzt werden. Die hohen Kosten und der hohe Energieaufwand der eingesetzten Prozesse in diesem Quartärkreislauf stellen jedoch einen problematischen Aspekt dieser Verwertungsmethode dar.

Führt das Recycling von Materialien in einem dieser Kreisläufe zu neuen Produkten, so spricht man von *open-loop* Recycling. Die Materialien (z.B. Altglas, Kunststoffabfälle und Altpapier) verlassen das System, in dem sie als Abfälle zur Verwertung anfielen und werden Teil anderer bzw. neuer Produktsysteme. Führen Recyclingprozesse wieder zum gleichen Produkt zurück, d.h. verbleiben die Materialien innerhalb der Systemgrenzen, handelt es sich um das sog. *closed-loop* Recycling. Ein Beispiel von closed-loop Recycling stellen Mehrwegsysteme von Glasflaschen dar (Sekundärkreislauf) (Klopffer et al., 2009).

1.3 Kreislaufwirtschaft und der EU-Aktionsplan

Generell folgen Einweg-Produkte, die nach ihrer einmaligen Nutzung in Abfallströme gelangen und thermisch verwertet oder deponiert werden, dem nach wie vor global vorherrschenden Modell der Linearwirtschaft. Das gegenteilige Konzept der Kreislaufwirtschaft beschreibt den Ansatz, eine dauerhafte Verfügbarkeit von Rohstoffen durch die Optimierung ihres Einsatzes in Richtung einer vollständigen Rückgewinnung der Rohstoffe zu erreichen. Je intensiver dieser Kreislauf, desto öfter können Materialien den Zyklus aus Produktion, Nutzung und Aufbereitung durchlaufen (Baron et al., 2017). Um die Europäische Union in dieses Wirtschaftsmodell überzuführen, veröffentlichte die EU-Kommission 2015 den Aktionsplan *Den Kreislauf schließen* (EU-Kommission, 2015). Dieser Plan soll einen Rechtsrahmen zur Realisierung der Kreislaufwirtschaft zur Verfügung stellen und den Mitgliedsstaaten dabei helfen, richtungsweisende Signale an alle Wirtschaftsteilnehmer zu senden.

Eine geeignete Methode, um verschiedene Produkte und deren Umweltauswirkungen über ihren gesamten Lebensweg zu bewerten, stellt die Ökobilanz dar. Dieses Werkzeug, das im englischen Sprachraum als *Life Cycle Assessment* (Abk. *LCA*) bezeichnet wird,

wurde in seiner anfänglichen Form bereits 1984 zur Analyse von Packstoffen verwendet (Klöpffer et al., 2009). Heute wird die korrekte Durchführung einer Ökobilanz in mehreren ISO-Normen geregelt.

1.4 Kunststoffkonsum in Österreich und Europa

Laut Plastics Europe, dem europäischen Verband der Kunststoffherzeuger, betrug 2018 die globale Kunststoffproduktion⁴ 359 Mio. t und ist 2019 um 2,5 % auf 368 Mio. t gestiegen. In Europa⁵ war dieser Wert zuletzt etwas rückläufig, im Jahr 2018 betrug er 61,8 Mio. und im 2019 57,9 Mio. t. Im selben Zeitraum betrug die Nachfrage europäischer Verarbeiter an Kunststoffen 50,7 Mio. t. Abb. 1.2 stellt die Verteilung nach Industrie-segment dar, knapp 20,3 Mio. t Kunststoff wurden demnach in der Verpackungsindustrie weiterverarbeitet. Teilt man den Bedarf nach Kunststoffen ein, so ist Polypropylen mit 19,4% bzw. knapp 10 Mio. t der gefragteste Kunststoff. Mit 6,2% liegen PS und EPS im mittleren Bereich. Im Verpackungssektor besteht der größte Bedarf an Polyethylen, Polypropylen und PET.

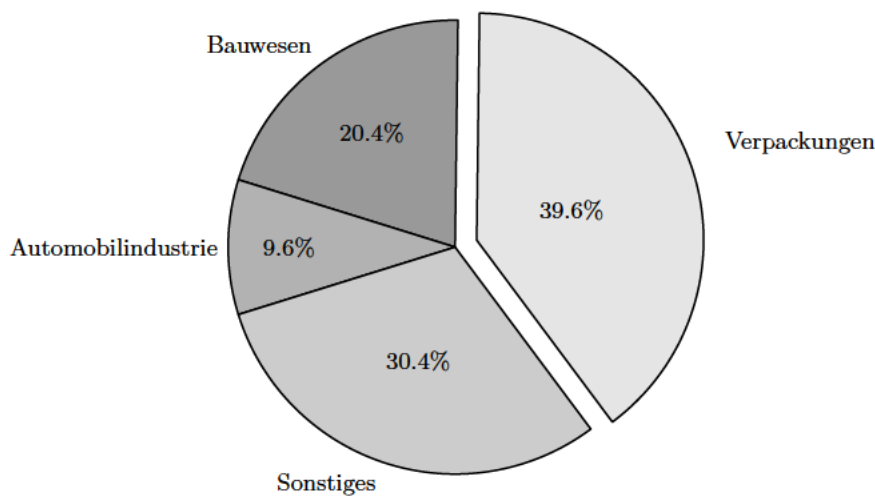


Abb. 1.2 Aufteilung des europäischen Kunststoffbedarfs 2019 nach Industriezweigen

⁴Als Kunststoffe definiert Plastics Europe Thermoplaste, Polyurethane, Duroplaste, Elastomere, Klebstoffe, Beschichtungen und Dichtstoffe. Nicht enthalten sind PET-, PA- und Polyacrylfasern

⁵In der angegebenen Studie werden als Europa die 27 Mitglieder der EU plus GB, NO und CH bezeichnet.

1 Einleitung

Im selben Betrachtungszeitraum wurden 29,1 Mio. t Plastikabfälle gesammelt, wovon 42,6 % energetisch verwertet wurden. 32,5 % wurden recycelt und 24,9 % deponiert. Die Menge an gesammelten Verpackungsmaterialien betrug 17,8 Mio. t, wovon 39,5% recycelt und 18,5% deponiert wurden.

Für die Abfallwirtschaft in Österreich hat das Bundesministerium für Klimaschutz und Umwelt 2021 einen Statusbericht veröffentlicht (BMK, 2021). Folgende Zahlen in Verbindung mit Kunststoffverpackungen sind darin enthalten:

- Am Beispiel der Steiermark wird angeführt, dass es sich bei 6,2 % der 163.305 t Siedlungsabfall (Restmüll) um Kunststoffverpackungen handelte⁶.
- 1,55 Mio. t Altstoffe aus der Haushaltssammlung wurden getrennt gesammelt, von denen rund 165.000 t der Leichtfraktion - Verpackungen zugeordnet wurden.
- Ganzheitlich betrachtet betrug das Aufkommen an Kunststoffen in österreichischen Primärabfällen rund 0,98 Mio. t, wovon 17 Masse-% sortenreine Kunststoffe waren. Polyolefine waren in dieser Menge zu 14 % (23.848 t), PS und PS-Schaum zu 2 % (4.337 t) enthalten.
- In Österreich behandelt wurden knapp 0,93 Mio. t an Kunststoffabfällen (Differenz durch Importe und Exporte). Im Durchschnitt wurde dieser Stoffstrom zu 26 % recycelt, die darin enthaltenen sortenreinen Kunststoffe wurden zu 86 % stofflich verwertet.
- Verpackungsabfälle fielen in Summe (getrennt und in gemischten Fraktionen wie Restmüll) zu 1,41 Mio. t an. 2018 waren davon 302.000 t Kunststoffe. Die gesamte Menge wurde entweder recycelt oder verwertet.

Wissenschaftler der TU Wien untersuchten 2017 die Stoffströme von Kunststoffverpackungen in Österreich, um genauere Informationen über die Recyclingquoten und Verwertungsraten der einzelnen Kunststofftypen zu erhalten (Van Eygen et al., 2018). Tabelle 1.1 fasst die Ergebnisse der Studie für Behälter aus PP und PS zusammen. Demnach wurde rund die Hälfte der gesammelten Menge kleiner Hohlbehältnisse aus PP und PS im Restmüll entsorgt und anschließend thermisch verwertet. Die geringfügige Differenz der

⁶Österreichweite Daten zu dieser Müllfraktion werden in der angegebenen Studie nicht veröffentlicht.

beiden Summen kommt durch Reste im Werkstoffrecycling zustande, die anschließend auch der energetischen Verwertung zugeführt werden.

Tabelle 1.1 Abfallströme und Verwertungswege von PP und PS (vgl. Van Eygen et al., 2018)

	PP-Menge [t]	Anteil [%]	PS-Menge [t]	Anteil [%]
Abfallstrom				
Siedlungsabfall (Restmüll)	13.302	49	4.116	51
getrennte Altstoffsammlung	12.280	46	3.513	43
Sperrmüll, Gewerbeabfall	1.366	5	466	6
	26.948	100	8.095	100
Verwertung				
energetische Verwertung	22.615	82	6.865	83
werkstoffliches Recycling	3.901	14	1.070	13
Sonstige	1.209	4	365	4
	27.725	100	8.300	100

1.5 Glaskonsum in Österreich und Europa

Der europäische Verband der Glasindustrie *Glass Alliance Europe* meldete für 2020 ein Produktionsvolumen von knapp 36 Mio. t, was einer Steigerung von 9,2 % seit 2010 entspricht. Von dieser Menge fielen 62,3 % auf Behälterglas, der vor Flachglas mit einem Anteil von 30,1 % den größten Sektor der europäischen Glasindustrie bildet⁷. Die Interessen der europäischen Behälterglas-Industrie werden durch den Verband *FEVE* vertreten, der für das Jahr 2019 eine europaweite Recyclingrate von 78 % meldet. Das entspricht einer Steigerung von 2 % innerhalb eines Jahres. Die höchsten Quoten weisen neben Belgien auch die skandinavischen Länder mit 98 % auf. Während Österreich mit 86 % eine ebenfalls überdurchschnittliche Quote zeigt, ist Ungarn mit 29 % das Land mit der niedrigsten Rückführquote in Europa⁸.

In Österreich steht dem Endverbraucher ein duales System zur Verfügung, das Weiß- und Buntglas getrennt sammelt. Jährlich werden so insgesamt rund 270.000 t Altglas gesam-

⁷<https://www.glassallianceeurope.eu/en/statistical-data>, zuletzt aufgerufen am 01.02.2022

⁸https://feve.org/glass_recycling_stats_2019/, zuletzt aufgerufen am 21.02.2022

1 Einleitung

melt. Der Anteil von Weißglasscherben bei der Produktion von neuen Glasverpackungen beträgt 60 %, bei Grünglas beträgt diese Quote 90 %⁹.

⁹<https://www.agr.at/glasrecycling/glasrecyclingdaten>, zuletzt aufgerufen am 21.02.2022

2 Aufgabenstellung

2.1 Problemstellung und Ziel der Arbeit

Die wichtige Rolle, die Glas- und Kunststoffverpackungen bei der Verpackung von Lebensmitteln spielen, machen sie nach wie vor unverzichtbar. Zum jetzigen Zeitpunkt befinden sich aber weder Glas- noch Kunststoffverpackungen in einer geschlossenen Kreislaufwirtschaft. Gründe hierfür liegen auf der einen Seite im Trennverhalten des Konsumenten, das noch immer Verbesserungs- und Aufklärungspotential aufweist. Auf der anderen Seite wurden für viele Kunststoffe noch keine Recycling-Verfahren im Lebensmittelbereich zugelassen, bei diesen Verpackungen handelt es sich also stets um Primärmaterial. Umso wichtiger ist es also, deren Auswirkungen auf die Umwelt über ihren gesamten Lebensweg zu bewerten. Verbrauchte Ressourcen und emittierte Schadstoffe bei der Produktion, während dem Gebrauch und bei der Verwertung des Produktes müssen detailliert betrachtet werden, um kritische Lebenswegphasen zu identifizieren und mögliche Alternativen zu evaluieren. Die Diskussion über das Einführen von Mehrwegsystemen von Milchprodukten spiegelt die Sensibilisierung der Gesellschaft für die Vermeidung von Einwegverpackungen wieder. Demgegenüber sehen sich die Lebensmittelproduzenten aber auch veranlasst, auf das veränderte Konsumverhalten zu reagieren. Neue Entwicklungen im Bereich der Kunststoffverpackungen, eine größere Vielzahl an unterschiedlichen Kunststoffen und deren Kombinationen und Variationen an Verpackungsgrößen machen es dem Kunden jedoch schwierig, die Umweltauswirkungen des eigenen Konsumverhaltens richtig einzuschätzen.

Es gibt bereits zahlreiche Ökobilanzen im Bereich der Lebensmittelverpackungen, diese sind jedoch schwierig zu vergleichen. Gründe dafür sind beispielsweise verschiedene Untersuchungsrahmen, unterschiedliche Informationshintergründe und divergierende Datenqualität der einzelnen Studien.

Diese Umstände werfen die Forschungsfrage auf, welche Lebensmittelbehältnisse aktuell die Alternative mit den geringsten Umweltauswirkungen darstellen. In der vorliegenden Arbeit soll dieser Forschungsfrage am Beispiel Joghurtbehälter nachgegangen werden. Dazu werden im Vorfeld durch eine Marktanalyse und eine Literaturrecherche folgende Punkte geklärt:

- Welche Alternativen werden dem Kunden im Lebensmittelhandel angeboten?
- Wurden diese Alternativen bereits auf ihre Umweltauswirkungen untersucht?
- Wie wird das Instrument *Ökobilanz* bei Verpackungen im Lebensmittelbereich eingesetzt?

2.2 Aufbau und Methodik

Die vorliegende Arbeit gliedert sich in eine Literaturstudie und in die praktische Durchführung einer Ökobilanz. In Kapitel 3 werden die theoretischen Grundlagen zur Herstellung von Behälterglas und Kunststoffbechern erarbeitet. Um ein besseres Verständnis für die erwünschten Eigenschaften der Behältnisse zu gewinnen, wird auf der einen Seite der chemische Aufbau der verschiedenen Rohstoffe betrachtet und auf der anderen Seite die Weiterverarbeitung zum fertigen Produkt erörtert. Um den kompletten Lebenszyklus der untersuchten Behältnisse betrachten zu können, werden im Theorieteil auch verschiedene Verwertungsmöglichkeiten behandelt.

Im ersten Teil der Arbeit (vgl. Kap. 4: Vergleichende Ökobilanzen im Lebensmittelverpackungsbereich) wird mit Hilfe einer strukturierten Literaturrecherche nach Ökobilanzen gesucht, die die Umweltauswirkungen von verschiedenen Lebensmittelverpackungen untersuchen. Um einen Einblick in die Praxis der Ökobilanzierung in diesem Bereich zu gewinnen, werden die Studien auf verschiedene Aspekte wie die untersuchten Umweltkategorien und die erhobenen Daten untersucht. Damit der aktuelle Stand der Forschung bzw. Methodik (*State of the Art*) erhoben werden kann, wird die Suche auf Studien begrenzt, die nach 2015 veröffentlicht wurden.

2 Aufgabenstellung

Der zweite Teil der Arbeit umfasst die Erstellung einer vergleichenden Ökobilanz nach DIN EN ISO 14040/14044 für die ausgewählten Verpackungsmodelle (vgl. Kap. 5: Erstellung der Ökobilanz). Die Studie wird nach den Vorgaben der dafür geltenden Normen mit Hilfe der Software *GaBi* durchgeführt und gliedert sich in mehrere Teile. Nachdem der Untersuchungsrahmen festgelegt wird, werden die verwendeten Daten in der sog. Sachbilanz dargelegt und die Umweltwirkungskategorien ausgewählt. Anschließend werden die gewonnenen Ergebnisse ausgewertet und analysiert.

Im Schlussteil der Arbeit werden die gewonnenen Erkenntnisse aus den beiden Forschungsteilen zusammengeführt und kritisch betrachtet.

3 Theoretische Grundlagen

3.1 Polypropylen und Polystyrol

3.1.1 Basischemie der Ausgangsstoffe

Polypropylen (PP) und Polystyrol (PS) gehören zur Gruppe der synthetisch hergestellten Polymere. Polymere entstehen durch die Verknüpfung von Monomeren zu Makromolekülen. Lineare und verzweigte Kettenmoleküle können bei Wärmezufuhr aneinander gleiten und werden plastisch, demnach zählen PP und PS zur Untergruppe der Thermoplaste (Menges et al., 2011)

Die Polymerisation stellt die chemische Reaktion (Kettenwachstumsreaktion) dar, bei der Monomere, meist ungesättigte organische Verbindungen, mit einer Kohlenstoff - Doppelbindung zu Polymeren verknüpft werden. Bei der Polymerisationsreaktion unterscheidet man zwischen radikalischen, ionisierenden und katalytisch-koordinativen Initiatoren. Bei der radikalischen Polymerisation liefert der sog. Initiator Radikale, also Moleküle mit ungepaartem Elektron, die diese Doppelbindung angreifen und so eine Bindung mit dem Monomer eingehen. Das Monomer wird so selbst zu einem Radikal und eine Kettenreaktion, das sog. Kettenwachstum, wird in Gang gesetzt. Aus mehreren Monomeren wird so ein Polymer mit mehreren Wiederholungseinheiten (Bonten, 2020).

Im Fall einer katalytisch-koordinativen Polymerisation dienen katalytisch wirkende Verbindungen als Initiatoren. Bei den sog. Ziegler-Natta-Katalysatoren, die nach ihren Entdeckern benannt wurden, handelt es sich meist um metallorganische Verbindungen (z.B. Titanchlorid TiCl_4). Sie spielen bei der Polymerisation von Propylen zu Polypropylen eine große Rolle. Bei der ionischen Polymerisation, wie sie beim Kettenwachstum von

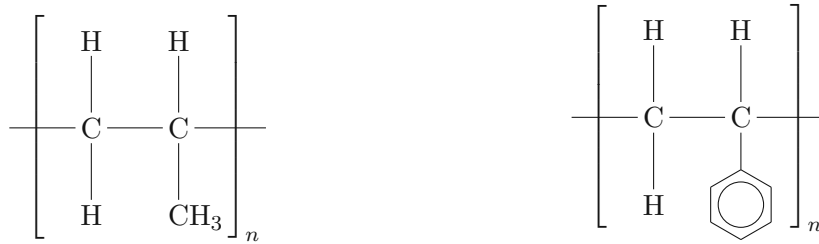


Abb. 3.1 Strukturformeln von Polypropylen (links) und Polystyrol (rechts)

Phenylethen bzw. Styrol zu Polystyrol stattfindet, wird dieser Prozess durch Ionen gestartet (Bergmann und Leyens, 2021).

Propen stellt den monomeren Baustein von PP dar. Dieses ungesättigte Molekül ist ein Kohlenwasserstoff mit einer Kohlenstoff-Doppelbindung und einer CH₃-Gruppe. Polystyrol stellt polymerisiertes Phenylethen bzw. Styrol dar, das ebenfalls eine C-Doppelbindung und einen Benzolring enthält. Diese beiden Substituenten des Kohlenwasserstoffes sind räumlich unterschiedlich angeordnet und spielen eine bedeutende Rolle für die Eigenschaften des jeweiligen Polymers. Die Methylgruppe ist isotaktisch angeordnet und lässt PP teilkristallin erstarren, wodurch hohe Festigkeit, Steifigkeit und ein hoher Schmelzpunkt entsteht. Die ataktisch angeordneten Benzolringe lassen PS-Schmelzen amorph erstarren und führen dadurch ebenfalls zu hoher Steifigkeit, aber auch Sprödigkeit (Bergmann, Leyens und Fleck, 2013).

3.1.2 Produktion von Kunststoff

Grundlage vieler Polymere ist Rohöl. Durch Rohöldestillation entsteht Rohbenzin bzw. Naphta, dass in einem weiteren Verfahrensschritt, dem sog. Cracking, u.a. in die gasförmigen Kohlenwasserstoffe Ethen und Propen kleingespalten wird (Bonten, 2020).

Für die Weiterverarbeitung dieser Rohstoffe zu synthetischen Polymeren stehen mehrere Verfahren zur Verfügung. Neben der Polymerisation in Substanz und in Lösung stellt die Perlpolymerisation, die Polymerisation in Suspension, ein wichtiges Verfahren in der Produktion von PP und PS dar. Dabei wird das wasserunlösliche, verflüssigte Monomer zunächst in einem Rührkessel intensiv mit Wasser verrührt, bis sich feine Öltropfen bilden. In einem zweiten Schritt startet die Polymerisation durch Zugabe der Initiatoren.

Endprodukt ist ein feiner Schlamm, die sog. Suspension, aus der durch Filtern und Trocknen das Polymerisat in Form von millimetergroßen Perlen gewonnen werden kann (Kaiser, 2021). Die Prozesstemperaturen, bei denen die Polymerisation von Styrol abläuft (80 °C bis 110 °C), sind etwas höher als jene der Propylen-Polymerisation (50 °C bis 75 °C).

3.1.3 Kunststoffverarbeitung

Nach der Polymerisation befindet sich das Material meist in pulvrigem oder körnigem Zustand und wird vom Kunststoffhersteller in eine für die Verarbeitung günstigere Form gebracht. Im Aufbereitungsschritt werden die Kunststoffe sortenrein oder gemischt zusammen mit den verschiedenen Additiven zur Verbesserung der Eigenschaften in Knet- und Rührwerken intensiv gemischt und zur weiteren Verarbeitung anschließend z.B. in Granulatform gebracht (Bergmann und Leyens, 2021). Ziel der weiteren Kunststoffverarbeitung ist dann die Fertigung von Formteilen, Fasern oder Folien.

Das wichtigste Verfahren zur Massenproduktion von Formteilen aus Thermoplasten wie Joghurtbechern stellt das sog. Spritzgießen dar¹. Der große Vorteil dieses Verfahrens besteht in der Möglichkeit, das granuliertes Rohmaterial in einem Arbeitsschritt ohne größere Nacharbeiten zum fertigen Produkt zu verarbeiten. Das der Spritzgussmaschine (Abbildung 3.2) zugeführte Granulat wird durch Heizbänder und Reibungswärme plastifiziert und durch eine rotierende Schnecke in den vorderen Zylinderteil transportiert. Die Schnecke wird wie ein Kolben nach vorne geschoben und presst die Schmelze in das Formwerkzeug. Abschließend ist eine kontrollierte Abkühlung des Formteils notwendig, damit Qualität und Eigenschaften des Materials nicht verloren gehen (Bergmann und Leyens, 2021).

Große Bedeutung in der Verarbeitung von Thermoplasten hat auch das Warm- bzw. Thermoformen. Bei diesem Verfahren wird das Halbzeug in einem ersten Bearbeitungsschritt durch Infrarotstrahlung aufgeheizt. In diesem thermoelastischen Zustand wird die Folie dann durch einen Formstempel und/oder Druckluft bzw. Vakuum geformt, wobei man zwischen Positiv- und Negativformen (Abbildung 3.3) unterscheidet. Beim

¹Neben dem Spritzgießen und dem später erläuterten Verfahren des Warm bzw. Thermoformens gibt es noch eine Vielzahl weiterer Verarbeitungsmöglichkeiten (z.B. Kalandrieren oder Schäumen), die aber aufgrund ihrer Relevanz in der Herstellung von Joghurtbechern nicht näher erläutert werden.

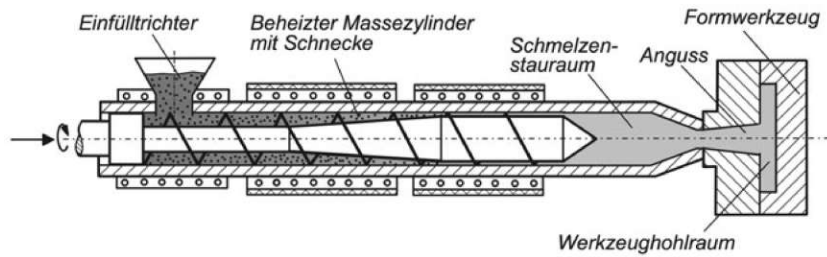


Abb. 3.2 Schneckenspritzgussmaschine (Bergmann und Leyens, 2021)

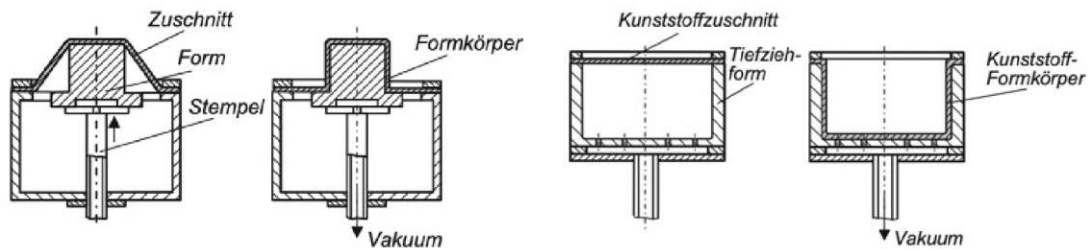


Abb. 3.3 Thermoformprozess: Positivformen mit Formstempel (links) und Negativformen durch Vakuumsaugen (rechts), Abbildung aus Bergmann und Leyens, 2021

Positivformen wird die Folie an einen nach außen gewölbten Formkern gelegt, beim Negativformen nimmt die Folie die Form eines nach innen gewölbten Formhohlraums an. Nachdem die geformte Folie durch einen Luftstrom oder Wassernebel abgekühlt wurde, müssen die Werkstücke noch ausgestanzt werden (Kaiser, 2021).

3.1.4 Recycling und Verwertung

Aufgrund der bereits in Kapitel 1.2 erläuterten negativen Aspekte des Sekundär- und Quartärkreislaufs in der Kunststoffverwertung und deren Relevanz im Lebensmittelbereich wird im Folgenden nur auf den Tertiärkreislauf eingegangen.

Wenn Kunststoffe nach ihrem Gebrauch dem Werkstoff-Recycling bzw. dem *Tertiärkreislauf* zugeführt werden, müssen sie eine Reihe an Prozessen durchlaufen, um als Polymer wiederverarbeitet werden zu können. In einem ersten Schritt müssen die Kunststoffabfälle gesammelt werden. Hierfür steht Privathaushalten der sog. *gelbe Sack* zur Verfügung.

Anschließend folgt der aufwendige Schritt des Sortierens. Da viele Polymere nicht miteinander mischbar sind, ist dieser Schritt notwendig, um chemisch sortenreine Teilmengen für die Weiterverarbeitung zu gewinnen. Für Stückgutgrößen bis 100 mm kommt oft eine sensorgestützte Sortierung zum Einsatz, bei der die verschiedenen Kunststoffarten auf einem Förderband oder im freien Fall vollautomatisch identifiziert und in stoffspezifische Aufnahmebehälter geblasen werden (Martens et al., 2016). Nach dem Sortierschritt werden die verschiedenen Fraktionen gewaschen, getrocknet, extrudiert und granuliert (Koltzenburg et al., 2014).

3.2 Einwegglas

3.2.1 Basischemie der Ausgangsstoffe

Glas gehört zur Gruppe der nichtmetallisch-anorganischen Werkstoffe, bei denen Silicium (Si) eine große Rolle spielt. Dieses Element ist sehr reaktionsfreudig und kommt in der Natur häufig in Verbindung mit Sauerstoff (Siliciumdioxid SiO_2) oder mit anderen Oxiden (Silikate) vor. Strukturbestimmende Grundbausteine von SiO_2 sind SiO_4 -Tetraeder, die im Falle von Gläsern vierfach miteinander vernetzt sind und somit ein räumliches Gitter aufbauen. Das Verhältnis zwischen Si und O beträgt 1:2. Der Einbau anderer Oxide in dieses Gitter ändert durch den Abbau der Sauerstoffbrücken und der damit verbundenen Erhöhung des Si-O-Verhältnisses die chemischen Eigenschaften von Si=O_2 (Bergmann, Leyens und Fleck, 2013).

Beim Einbau von Alkalioxiden wie Natriumoxid Na_2O wird das Netzwerk instabiler, eine Verringerung der Viskosität und der Schmelztemperatur ist die Folge. Um dieser Instabilität entgegen zu wirken, werden der Struktur Erdalkalioxide wie Calciumoxid (CaO) zugefügt. Diese Oxide beeinflussen den Viskositätsbereich des Glases wesentlich und verbessern die chemische Beständigkeit. Kalknatron-Silicatglas ($\text{CaO-Na}_2\text{O-SiO}_2$) besteht neben SiO_2 (73%) aus 13% Na_2O und 11% CaO (Schaeffer et al., 2020). In Summe zeichnet sich die Werkstoffgruppe der Gläser v. a. durch ihre hohe Härte und ihre hohe Verschleiß- bzw. Druckfestigkeit aus (Bergmann, Leyens und Fleck, 2013).

Färbungen in Gläsern werden durch die minimale Zugabe von Metalloxiden hervorgerufen. Beifügen von Chromoxid erzeugt eine Grünfärbung, Brauntöne entstehen bei eisen-

und schwefelhaltigen Glasschmelzen. Diese Farbtöne, wie sie z.B. bei Bier- und Weinflaschen zu finden sind, bewirken einen UV-Schutz für das Füllgut. Eine Entfärbung von Glas erreicht man durch die Zugabe von Manganoxid (Schaeffer et al., 2020).

3.2.2 Produktion von Behälterglas

Die allgemeine Herstellung von Gläsern erfolgt in 4 Prozessschritten (Bergmann und Leyens, 2021):

1. Im ersten Schritt werden die verschiedenen Rohstoffe zum Glasgemenge angesetzt. Die Hauptkomponente aller silicatischen Gläser ist Quarzsand (SiO_2), der vor der Weiterverarbeitung gewaschen und je nach Einsatzgebiet des Glases nach Korngröße sortiert wird. Die Zusatzstoffe Na_2O und CaO werden in Form von Soda und Kalk zugesetzt.
2. Das Schmelzen der festen Phasen erfolgt bei ca. 1400°C bis 1600°C . Zur Verkürzung des Schmelzprozesses werden dem Rohstoffgemenge Glasscherben bzw. Glasbruch bis zu einem Anteil von 50% zugesetzt.
3. Bei einer Temperatur von etwa 1500°C werden die Komponenten in der Schmelze gleichmäßig verteilt bzw. homogenisiert. Die Läuterung in diesem Prozessschritt hat das Ziel, unerwünschte Gasblasen in der Schmelze zu beseitigen.
4. In der Absteckphase kühlt die Schmelze auf 900°C bis 1000°C ab. In diesem Temperaturbereich kann das Glas weiterverarbeitet werden.

Gläser zeichnen sich bei steigender Temperatur durch ihre Fähigkeit zur viskosen Verformung aus. Das Verhalten in höheren Temperaturbereichen ähnelt dabei stark dem von thermoplastischen Kunststoffen wie PP und PS. Dünnwandiges Behälterglas wird in großer Stückzahl mit Hilfe automatischer Blasmaschinen gefertigt (Abb. 3.4). In diesen Maschinen werden viskose Glastropfen durch einen Stempel in eine Vorform gedrückt und dann mit Druckluft in die Endform geblasen (Bergmann und Leyens, 2021).

Der Energieverbrauch bei der Glasherstellung ist abhängig von der Glasart und dem Scherbenanteil. Die effizientesten Anlagen findet man im Bereich Behälterglas, sie haben

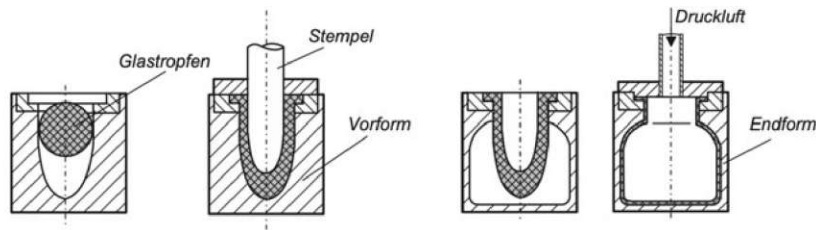


Abb. 3.4 Blasen von Behälterglas: Vorformen (Links) und Endformen (Rechts), Abbildung aus Bergmann und Leyens, 2021

bei einem Scherbenanteil von 50 % einen Energieverbrauch von ca. 4 MJ/kg (Blesl et al., 2017).

3.2.3 Recycling und Verwertung

Für das Recycling und die Verwertung von Altglas spielt die in Kapitel 3.2.1 beschriebene Stabilität der Silikate und Oxide eine entscheidende Rolle. Grundlegend ergeben sich für die Verwertung von Glas drei Aussagen:

- Aufgrund seiner Molekularstruktur ist Glas ein inertes Material mit hohen Barriereigenschaften, sodass selbst kleine Moleküle es nicht durchdringen können. Glas absorbiert auch keine Moleküle aus den Lebensmitteln, mit denen es in Berührung kommt. Aus diesen Gründen ist eine effiziente Reinigung im Sinne eines Sekundärkreislaufes möglich, der weltweit in Form von Mehrweg-Pfandsystemen existiert. (Geueke et al., 2018)
- Durch die Beimengung von Glasbruch und Altglasscherben erfolgt das Werkstoffrecycling (Tertiärkreislauf) hauptsächlich durch Zumischung der Altstoffe zu den frischen Rohstoffen. Die Stabilität der Glassilikate erlaubt ein wiederholtes Einschmelzen.
- Eine Auftrennung des Werkstoffes in seine Ausgangsrohstoffe ist nicht mehr möglich. Daher ist ein rohstoffliches Recycling (Quartärkreislauf) wie bei Kunststoffen nicht möglich.

3.3 Ökobilanzierung

Die Ökobilanz bezieht sich auf die Umweltaspekte und potenziellen Umweltwirkungen (z. B. Nutzung von Ressourcen und die Umweltauswirkungen von Emissionen) im Verlauf des Lebensweges eines Produktes von der Rohstoffgewinnung über Produktion, Anwendung, Abfallbehandlung, Recycling bis zur endgültigen Beseitigung (d. h. „von der Wiege bis zur Bahre“). (DIN EN ISO 14040, 2006)

Die internationale Organisation für Normung (ISO) stellt für ein standardisiertes Vorgehen für die Erstellung einer Ökobilanz zwei Dokumente bereit. Zum einen werden in der Norm ISO 14040 Grundsätze und Rahmenbedingungen für Ökobilanzen vorgegeben (DIN EN ISO 14040, 2006). Zum anderen werden in ISO 14044 weitere Anforderungen und Anleitungen bereitgestellt (DIN EN ISO 14044, 2006). Gemäß dieser Normen gliedert sich eine Ökobilanz grundlegend in vier Phasen:

1. Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens
2. Sachbilanz
3. Wirkungsabschätzung
4. Auswertung

Wie in Abbildung 3.5 zu sehen ist, handelt es sich bei der Ökobilanz um eine iterative Methode, bei der die Ergebnisse der einzelnen Phasen in den anderen Phasen verwendet werden. Um das ursprüngliche Ziel zu erreichen, kann der Fall eintreten, dass gewisse Aspekte des Untersuchungsrahmens abgeändert werden müssen, um das ursprüngliche Ziel zu erreichen. Dies trägt zur Ganzheitlichkeit der Studie und zur Konsistenz der Ergebnisse bei (DIN EN ISO 14040, 2006).

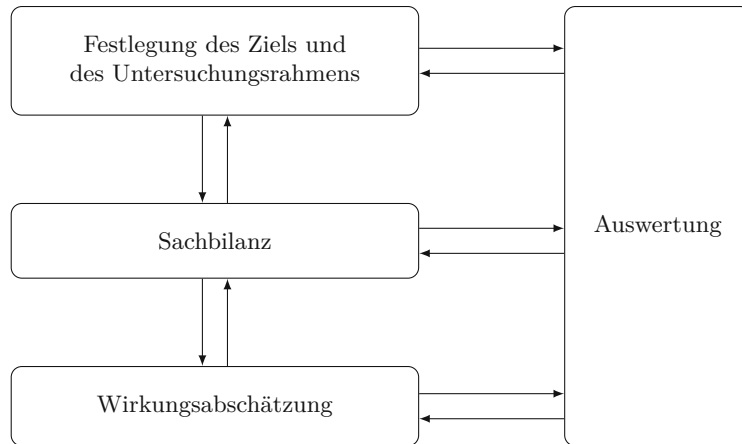


Abb. 3.5 Phasen einer Ökobilanz (in Anlehnung an DIN EN ISO 14040, 2006)

3.3.1 Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens

Festlegung des Ziels

In der 1. Phase einer Ökobilanz muss das Ziel der Studie festgelegt werden. Es beinhaltet neben den Gründen für die Durchführung und der beabsichtigten Anwendung auch die angesprochene Zielgruppe (DIN EN ISO 14040, 2006).

Festlegung des Untersuchungsrahmens

Der Untersuchungsrahmen legt fest, wie das Produktsystem und seine Funktionen modelliert und wo seine Systemgrenzen gesetzt werden. Zentraler Bestandteil des Rahmens ist auch die eindeutige Beschreibung bzw. Definition der funktionellen Einheit, der ausgewählten Wirkungskategorien und deren Methode sowie der Systemgrenze (DIN EN ISO 14044, 2006).

Die *funktionelle Einheit* gibt die Bezugsgröße an, auf die die aufgenommenen und abgegebenen Produkt-, Stoff- und Energieflüsse mathematisch normiert werden. Vergleiche zwischen verschiedenen Produktsystemen müssen auf Basis derselben funktionellen Einheit vorgenommen werden, wobei deren Funktion dann mithilfe von Referenzflüssen

quantifiziert wird (DIN EN ISO 14044, 2006). Werden z. B. Kunststoffbecher unterschiedlicher Größe miteinander verglichen, so kann als funktionelle Einheit eine gewisse Menge an Füllgut definiert werden. Die Sachbilanzen der zu vergleichenden Systeme beziehen sich dann jeweils auf die Menge an Bechern bzw. Verpackungsmaterial, um dieses Füllgut bereitzustellen.

Die *Wirkungskategorien* stellen die verschiedenen Umweltaspekte wie das Treibhauspotential oder die Vergrößerung des Ozonlochs dar. Weiters müssen auch die Wirkungsindikatoren und die Charakterisierungsmodelle definiert werden, die im Rahmen der Wirkungsabschätzung verwendet werden (DIN EN ISO 14040, 2006).²

Welche Prozessmodule in der Ökobilanz enthalten sind, wird von der *Systemgrenze* festgelegt. Berücksichtigt werden (sollten) u.a. die Gewinnung der Rohstoffe, diverse Transportprozesse und die Verwertung gebrauchter Produkte. Prozessmodule und ihre gegenseitigen Wechselwirkungen sollten hinsichtlich ihrer Inputs, Zwischen- und Endprodukte so genau wie möglich definiert werden. Werden einzelne Lebenswegabschnitte weggelassen, so darf dies keine Auswirkungen auf die grundlegenden Aussagen der Ökobilanz haben (DIN EN ISO 14044, 2006). Nach ISO 14044 ist es hilfreich, mittels einem Systemfließbild das System und seine Prozesse mit ihren Wechselwirkungen zu beschreiben. Abb. 3.6 stellt ein Beispiel für ein Produktsystem und seine Systemgrenze dar.

Für die Entscheidung, welche Ströme in die Ökobilanz einbezogen werden, müssen Abschneidekriterien festgelegt werden. Diese Kriterien bestimmen, ab welchem prozentualen Anteil Inputs und Outputs zur Modellierung des Produktsystems beitragen müssen. Die Identifizierung relevanter Ströme kann anhand des Massenbeitrags, des Energieinputs oder aber auch anhand der Umweltrelevanz erfolgen (DIN EN ISO 14044, 2006). Die Norm legt keine bestimmten Werte für diese Entscheidungskriterien fest. In der ökobilanziellen Praxis wird für einzelne Prozessinputs ein Schwellenwert von 1% und für die Summe aller nicht berücksichtigten Systemteile 5% verwendet (Frischknecht, 2020; Klöpffer et al., 2009).

Damit das Ziel der Ökobilanz erreicht und der Untersuchungsrahmen erfüllt werden können, müssen Voraussetzungen für die Daten festgelegt werden. Diese Anforderungen

²Auf die Begriffe *Wirkungskategorie*, *Wirkungsindikator* und *Charakterisierungsmodell* wird in Kapitel 3.3.3 näher eingegangen

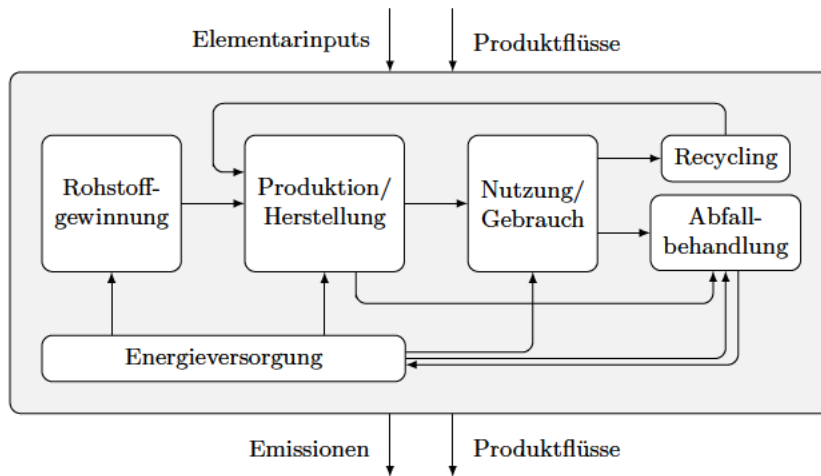


Abb. 3.6 Systemflussbild eines Produktsystems

beziehen sich auf den zeitlichen, den geographischen und den technologischen Erfassungsbereich, über die die Daten gesammelt werden sollten (DIN EN ISO 14044, 2006). Diese Erfassungsbereiche legen somit auch folgende Geltungsbereiche der Ökobilanz fest (Frischknecht, 2020):

- Der *geographische* Geltungsbereich legt fest, für welches Gebiet das Produktsystem und die Ergebnisse der Ökobilanz gültig sind. Die geographische Systemgrenze umfasst jedoch in der Regel mehrere Kontinente, da die einzelnen Prozesse heutiger Produktsysteme - insbesondere die Rohstoffgewinnung -, weltweit stattfinden.
- Der *zeitliche* Geltungsbereich hält fest, in welchem Zeitrahmen die betrachteten Systeme analysiert werden. Auch hier wird wieder von der zeitlichen Systemgrenze unterschieden, die in den meisten Fällen (z.B. Bau von Produktionsanlagen) viel weiter bzw. länger gesetzt werden muss.
- Der *technologische* Geltungsbereich definiert die zu berücksichtigende sog. alte, durchschnittliche oder moderne Technologie.

In den seltensten Fällen entsteht bei Produktionsprozessen nur ein einziges Produkt, vielmehr entstehen mehrere Produkte bzw. auch Abfallprodukte, die wiederum neue bzw. andere Rohstoffe ersetzen können. *Allokationsverfahren* dienen der Zuweisung von In- und Outputs verschiedener Produktsysteme. Endet z.B. der Lebensweg eines Produktes

in der Müllverbrennungsanlage, so wird dadurch Energie substituiert. ISO14044 schreibt die Allokation bei Produktsystemen mit mehreren quantifizierbaren Nutzungsmöglichkeiten vor (DIN EN ISO 14044, 2006).

Die Allokationsgrundsätze gelten auch für Recyclingsysteme, wobei zwischen zwei Ansätzen unterschieden wird (Frischknecht, 2020):

- Beim *Cut-Off-Ansatz*³ werden Emissionen, die bei der Gewinnung einer Ressource entstehen, dem Produkt angerechnet, welches das erzeugte Primärmaterial benötigt. Dementsprechend werden Aufwendungen von Recyclingprozessen den Sekundärrohstoffen und somit dem Produkt zugerechnet, das aus den recycelten Rohstoffen entstanden ist.
- Der *Avoided Burden-Ansatz* rechnet Produktsystemen, die recyceltes Material verwenden, Gutschriften an. Die Höhe der Gutschriften ergibt sich aus der Höhe des vermiedenen Primärrohstoffes und den somit vermiedenen Aufwendungen und Emissionen.

3.3.2 Sachbilanz

Die 2. Phase (Sachbilanz) umfasst die Teilabschnitte Datenerhebung, Datenberechnung und Allokation. Während das anzuwendende Allokationsverfahren schon in der 1. Phase der Ökobilanz festgelegt wird, erfolgt die Durchführung erst in der Sachbilanz. Die erhobenen Daten müssen u.a. Energieinputs, Rohstoffinputs, Abfallprodukte und Emissionen in Luft, Wasser und Erde beinhalten. Datenberechnung und Allokation müssen unter Berücksichtigung der funktionellen Einheit und der Systemgrenze stattfinden (DIN EN ISO 14044, 2006).

Grundlegend besteht eine Ökobilanz aus zwei Arten von Daten. *Primärdaten* bzw. spezifische Daten sind in guter Qualität verfügbar, wenn der Hersteller des untersuchten Produktsystems in die Erstellung der Ökobilanz eingebunden ist. Leicht ermittelbare Daten betreffen dann den Materialeinsatz, die bezogene Energie und Transporte, von

³Dieser Begriff findet sich in neuerer Literatur, da man das Produktsystem an einer bestimmten Systemgrenze abschneidet. Er ist jedoch nicht zu verwechseln mit den Abschneidekriterien - engl. Cut Off-Criteria.

denen der Betrieb abhängig ist. Schwierig zu beschaffende Daten sind Emissionen und Verunreinigungen in Luft und Wasser. Ein großer Nachteil bei der Verwendung von Primärdaten in einer Ökobilanz ergibt sich aus der Abhängigkeit vom Datenlieferant (Klöpffer et al., 2009).

Generische Daten beziehen sich meist auf Studien, in denen Mittelwerte für verschiedene Prozesse wie z. B. in der Kunststoffindustrie ermittelt werden. Ihr Einsatz empfiehlt sich v. a. dann, wenn kein näheres Wissen über gewisse Prozesse vorhanden, bzw. die Erhebung zu aufwändig ist. Wichtige Einsatzbereiche für generische Daten sind daher die Energie- und Transportbereitstellung und gebräuchliche Materialien wie Kunststoffe, Metalle und Packstoffe (Klöpffer et al., 2009).

Zur Verwendung von Datenbanken, auf denen generische Datensätze gesammelt werden, existieren mehrere Ökobilanz-Software-Systeme. Zu den bekanntesten europäischen Programmen zählt *GaBi*, das an der Universität Stuttgart entwickelt wurde und im ingenieurtechnischen Bereich weit verbreitet ist.⁴

3.3.3 Wirkungsabschätzung

Das Ziel der Wirkungsabschätzung (3. Phase) einer Ökobilanz ist es, potenzielle Umweltauswirkungen anhand der Ergebnisse der Sachbilanz zu beurteilen. Sie besteht aus drei verbindlichen und drei optionalen Bestandteilen. Verbindlich ist die Auswahl der Wirkungskategorien, Indikatoren und Charakterisierungsmodelle inklusive der Begründung der Auswahl. Anschließend erfolgt die Zuordnung der Sachbilanzergebnisse (Klassifizierung) und die Berechnung der Wirkungsindikatorwerte (Charakterisierung) (DIN EN ISO 14044, 2006). Tab. 3.1 gibt eine Erklärung dieser Begriffe anhand des Beispiels *Treibhauspotential*.

⁴<https://gabi.sphera.com/austria/index/>, zuletzt besucht am 21.02.2022

Tabelle 3.1 Erklärung wichtiger Begriffe in der ökobilanziellen Praxis anhand der Wirkungskategorie *Treibhauspotential* (vgl. Klöpffer et al., 2009)

Begriff	Erklärung	Beispiel
Wirkungskategorie	Adressierung verschiedener Umweltthemen	Treibhauspotential
Wirkungsindikator	Quantifizierbare Darstellung einer Wirkungskategorie	Abgabe von Wärme der Treibhausgasmoleküle in Form von Infrarotstrahlung (W/m^2).
Sachbilanzergebnis	Stoffflüsse eines Produktsystems	Menge an Treibhausgasen (CO_2 , CH_4 , N_2O ,...) je funktioneller Einheit
Charakterisierungsmodell	Beschreibung des Zusammenhangs zwischen Sachbilanzergebnissen und Wirkungsindikatoren	Klimawirksamkeit der verschiedenen Treibhausgase
Charakterisierungsfaktor	Umrechnung verschiedener Sachbilanzergebnisse auf eine Grundeinheit	1 kg Lachgas (N_2O) \equiv 265 kg CO_2
Wirkungsindikatorwert	Zusammenfassung aller klassifizierten Substanzen	kg CO_2 -Äquivalente
Wirkungsabschätzung	Ergebnis	Klimawirksamkeit des Sachbilanzergebnisses

Für die Durchführung der Wirkungsabschätzung stehen eine Reihe von Bewertungsmethoden zur Verfügung. Sie unterscheiden sich in den meisten Fällen in der Zuordnung der Sachbilanzergebnisse mit dem sog. *Midpoint-Level*, also dem Bilanzierungsschritt, in dem die verschiedenen Emissionen verschiedenen Kategorien wie dem Treibhauspotential zugeordnet werden. Umweltwirkungen auf der Midpoint-Ebene können weiters auf dem sog. Endpoint-Level, der Schadensebene zusammengefasst werden. Auf dieser Ebene finden sich in den verschiedenen Methoden zusammengefasste Themenbereiche wie die Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit, die Ökosystemqualität oder aber auch Schäden an kulturellem Erbe (Gebäude, Kunstwerke, etc.).(Frischknecht, 2020)

Während vollaggregierende Methoden wie *ReCiPe 2016* und *PEF-Europäischer Umweltfussabdruck 2018* eine Vielzahl an unterschiedlichen Umweltauswirkungen bis zur Schadensebene adressieren, existieren auch Methoden wie der CO_2 -Fußabdruck, die nur eine Wirkungskategorie thematisieren (Jungbluth, 2021). ISO 14044 selber gibt keine Aus-

wahl an Wirkungskategorien, -indikatoren und Charakterisierungsmodellen vor, sondern nur Anforderungen und Empfehlungen an diese (internationale Akzeptanz, wissenschaftliche Begründung, technische Gültigkeit, etc).

Die optionalen Bestandteile umfassen die Normierung, Ordnung und Gewichtung. Bei der Normierung handelt es sich um das Berechnen der Größenordnung der Ergebnisse in Bezug auf einen Referenzwert wie die gesamten Umweltauswirkungen oder die Pro-Kopf-Umweltauswirkungen eines bestimmten Gebietes. Wandelt man diese normierten Ergebnisse durch ausgewählte Gewichtungsfaktoren um, macht man die Ergebnisse vergleich- und addierbar. Die Ordnung kann eine Einordnung und (subjektive) Rangbildung der Wirkungskategorien vorgeben. (Frischknecht, 2020)

3.3.4 Auswertung

Die Auswertung stellt die vierte und letzte Phase einer Ökobilanz dar, in der die Ergebnisse der Sachbilanz und der Wirkungsabschätzung gemeinsam betrachtet werden. In Übereinstimmung mit der Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens (1. Phase) sollen die Effekte und Auswirkungen leicht verständlich und in sich schlüssig dargestellt werden (DIN EN ISO 14040, 2006).

4 Vergleichende Ökobilanzen im Lebensmittelverpackungsbereich

Das folgende Kapitel vergleicht wissenschaftliche Literatur, die sich mit Hilfe der Methode der Ökobilanz mit den Umweltauswirkungen der Lebenszyklen von Lebensmittelverpackungen aus Polypropylen, Polystyrol oder Einwegglas auseinandersetzt. Insgesamt wurden 19 relevante Arbeiten gefunden, wobei sich 5 davon selber mit dem Vergleich bereits veröffentlichter Ökobilanzen befassen.

4.1 Methodisches Vorgehen

Die Literaturrecherche wird unter Verwendung der wissenschaftlichen Suchmaschine *Google Scholar* durchgeführt, deren Suchraum u.a. Datenbanken wie *Science Direct* und *Springer Link* und deren veröffentlichte Magazine bzw. Artikel umfasst. Um eine möglichst große Anzahl an einschlägigen Werken zu finden, werden Stichwörter in drei Kategorien eingeteilt und dann in verschiedenen Anordnungen kombiniert (vgl. Abb. 4.1). Die erste Gruppe grenzt die Recherche nach Ökobilanzen gegenüber anderen Methoden ab. Die zweite Kategorie soll sicherstellen, dass es sich um Ökobilanzstudien im Lebensmittelbereich handelt. Die dritte Gruppe sucht nach Studien, die nicht (nur) den Lebenszyklus der Lebensmittel selber untersuchen, sondern auch deren Verpackung. Die Stichwörter werden mithilfe von sog. boolschen Operatoren verbunden, wobei die Kategorien mit ›AND‹ und die enthaltenen Stichwörter untereinander mit ›OR‹ kombiniert werden. Mit der zusätzlichen Funktion ›allintitle:‹ in der Suchleiste wird sichergestellt, dass die Wortkombinationen im Titel der zu suchenden Arbeiten erscheinen. Des Weiteren wird die Suche nur auf Artikel begrenzt, die ab 2015 verfasst wurden.

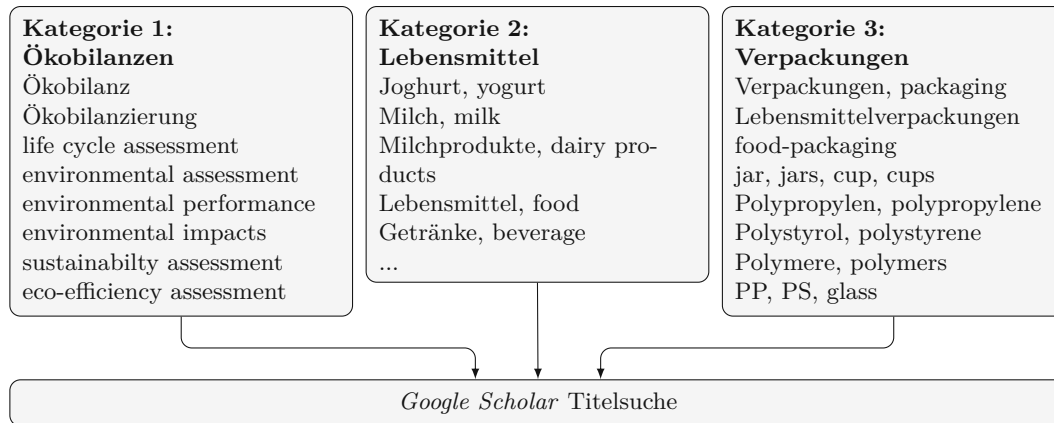


Abb. 4.1 Methodisches Vorgehen bei der Suche nach relevanten Studien im Bereich Lebensmittelverpackungen

In den Ergebnissen der Recherche befinden sich auch Artikel, die nicht mittels der durchgeführten Methodik gefunden, sondern durch Quellenverzeichnisse (van der Harst et al., 2016) oder bei der Suche nach anderer Primärliteratur (Fehringer, 2019) identifiziert wurden. Diese Studien fielen entweder durch das Suchraster oder wurden nicht auf wissenschaftlichen Datenbanken veröffentlicht.

4.2 Identifizierte Studien

Insgesamt wurden mittels der vorgestellten Methodik 19 Ökobilanzen identifiziert, die verschiedene Umweltauswirkungen von Lebensmittelverpackungen untersuchen (Tab. 4.1). Die Mehrheit der Studien befassen sich mit Flaschen, Dosen und Kartons für Getränke wie Limonade, Wein und Wasser. Acht Autoren setzten den geografischen Geltungsbereich ihrer Arbeiten im Raum Italien fest. In den Jahren 2017 und 2018 wurden keine für die vorliegende Recherche relevanten Studien veröffentlicht.

4.2.1 Datenherkunft Sachbilanz

Tabelle 4.1 Identifizierte Ökobilanzen

Nr.	Autoren	Publikationsjahr	Untersuchungsrahmen	Geografischer Geltungsbereich
1	Abejón et al.	2020	Kisten für Obst und Gemüse	Spanien
2	Accorsi et al.	2015	Flaschen für Olivenöl	Global
3	Amienyo et al.	2016	Bierflaschen und -dosen	Großbritannien
4	Bertolini et al.	2016	Milchflaschen und -kartons	Italien
5	Boesen et al.	2019	Flaschen und Dosen für Bier und Limonade	Dänemark
6	Conte et al.	2015	Verpackungsfolien für Schafkäse	Italien
7	Fehringer	2019	Diverse Flaschen für Wasser, Milch und Limonade	Österreich
8	Ferrara et al.	2020	Weinflaschen und -kartons	Italien
9	Gallego-Schmid et al.	2019	Behälter für Take-Away-Gerichte	Europa
10	Garfi et al.	2016	Wasserflaschen	Spanien
11	Ingarao et al.	2016	Behälter für Sugo	Italien
12	Ingrao et al.	2015	Schalen für Fleisch	Italien
13	Landi et al.	2019	Weinflaschen	Italien
14	Maga et al.	2019	Schalen für Fleisch	Europa
15	Simon et al.	2016	Flaschen und Dosen für Bier und Limonade	Europa
16	Stefanini et al.	2021	Milchflaschen	Italien
17	Tua et al.	2020	Mineralwasserflaschen	Italien
18	van der Harst et al.	2016	Dosen und PS-Becher in Getränkeautomaten	Europa
19	Wohner et al.	2020	Ketchupflaschen	Österreich

Um einen Überblick über die Daten zu bekommen, die in den identifizierten Ökobilanzen in der Sachbilanz-Phase verarbeitet wurden, wird eine entsprechende Analyse der Herkunft und der Qualität durchgeführt. Angelehnt an Kapitel 3.3.2 werden folgende sechs Bereiche auf deren Einsatz von generischen oder spezifischen Daten untersucht:

- Materialmasse bzw. -einsatz
- Emissionen in Luft und Wasser durch Bereitstellung von Rohmaterialien (Metalle, Kunststoffe, etc.)
- Energieverbrauch und dessen Form (Elektrizität, thermische Energie, etc.)

- Emissionen in Luft und Wasser durch Energiebereitstellung
- Transportdistanzen
- Emissionen in Luft und Wasser durch Bereitstellung von Transportmöglichkeiten

Eine detaillierte, tabellarische Zusammenfassung dieser Analyse befindet sich im Anhang (Tab. A.1). Sämtliche Studien greifen bei der Abbildung von Energie-, Transport- und Materialprozessen auf generische Daten zurück. Ausnahmslos spezifische Daten werden für die Materialmasse verwendet, wobei entweder Primärdaten von Herstellern verwendet oder die untersuchten Produkte selber abgewogen werden.

Ein differenzierteres Bild zeigt sich bei den Energie- und Transportformen. Im Bereich Energie wurden in einigen Studien zwar Primärdaten des Produktionsprozesses erhoben (Verbrauch), jedoch wurde der Energiemix anhand generischer Daten abgebildet. In 9 der 19 identifizierten Studien wurden Transportdistanzen als Primärdaten bei Herstellern bzw. Kunden erhoben. Die anderen Arbeiten schätzten diese Distributionswege anhand anderer Studien und Sekundärliteratur ab.

4.2.2 Gewählte Wirkungsindikatoren

Wie in Kapitel 3.3.3 näher erläutert, werden in DIN EN ISO 14040, 2006 weder eine verpflichtende Liste noch Empfehlungen von Wirkungskategorien angegeben. Um sich ein Bild davon zu machen, welche Wirkungskategorien (v. a. im Verpackungsbereich) ausgewählt bzw. angewendet werden, wird eine entsprechende Analyse der identifizierten Ökobilanzen durchgeführt. Wie in Tab. 4.2 dargestellt, untersuchen alle Studien die Auswirkungen ihrer Produktsysteme auf die Kategorie *Treibhauspotential*. Ebenfalls häufig untersuchte Wirkungsmechanismen sind das *Versauerungspotential*, das *Eutrophierungspotential* und der *Abbau der stratosphärischen Ozonschicht*. Die am weitesten verbreitete Bewertungsmethode (8 von 19) ist *CML 2001*, wobei nicht alle Studien sämtliche, in dieser Methode enthaltenen Kategorien bewerten.

Tabelle 4.2 Identifizierte Wirkungskategorien: GWP (Treibhauseffekt), AP (Versauerung), EP (Eutrophierung), ODP (Ozonabbau), POCP (Photochemische Oxidantienbildung), HTP (Humantoxizität), EC (Ökotoxizität), PMP (Feinstaub), IRP (Ionisierende Strahlung), ADP (Erschöpfung abiotischer Ressourcen), Nummerierung entsprechend Tab. 4.1

Nr.	Bewertungsmethode	GWP	AP	EP	ODP	POCP	HTP	EC	PMP	IRP	ADP
1	CML	✓	✓	✓	✓	✓					
2	EDIP	✓	✓	✓	✓	✓					
3	CML	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			✓
4	CML	✓	✓	✓	✓	✓	✓				
5	ILCD	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓	
6	CML	✓	✓	✓		✓	✓	✓			✓
7	k.A.	✓	✓	✓					✓		✓
8	ReCiPe	✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓	
9	CML	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
10	CML	✓	✓	✓	✓	✓					✓
11	k.A.	✓									
12	IMPACT2002	✓	✓		✓		✓	✓		✓	
13	k.A.	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
14	ILCD	✓	✓	✓	✓	✓			✓	✓	
15	CML	✓				✓	✓				
16	ReCiPe	✓	✓		✓		✓				
17	k.A.	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		
18	CML	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			✓
19	PEFCR	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
		19	17	15	15	14	13	9	7	6	5

4.2.3 Zusammenfassung der identifizierten Studien¹

Eine Arbeitsgruppe der Universität von Bologna vergleicht die Ökobilanzen verschiedener Verpackungen von Olivenöl. Neben der Produktion der Flasche und des Inhaltes, 11 extranatives Olivenöl, werden auch die Umweltauswirkungen der Abfüllung, des Transportes und verschiedener EoL-Szenarien untersucht. Die Studie kommt zu dem Ergebnis, dass die Abfüllung und die Transportwege den größten Umwelteinfluss haben. Geht man von einer Recyclingrate des Einwegglases von über 40 % aus, so ist das Olivenöl in der

¹Um den Lesefluss nicht zu beeinträchtigen, wird in diesem Kapitel vom Anführen der einzelnen untersuchten Wirkungskategorien bzw. Umweltauswirkungen pro Studie abgesehen. Eine übersichtliche Darstellung liefert Tab. 4.2.

Glasflasche weniger umweltschädlich als das in der PET-Flasche, wobei Recycling-PET in allen untersuchten Szenarien die umweltfreundlichste Verpackungsalternative ist, so die Studienautoren (Accorsi et al., 2015).

Eine spanische Studie untersucht die Umweltauswirkungen von Obst- und Gemüseverpackungen. Verglichen wurden Mehrweg-Kunststoffboxen und Einweg-Kartons. Die vergleichende Ökobilanz zeigt, dass die Auswirkungen von Kunststoff in allen untersuchten Szenarien signifikant kleiner als jene von Karton sind. Jedoch betonen die Autoren, dass Kunststoffe auch korrekt entsorgt werden müssen, da sie ansonsten weit höhere Umweltauswirkungen zeigen (Abejón et al., 2020).

Amienyo et al. (2016) vergleichen die Ökobilanzen verschiedener Behältnisse von Bier in Großbritannien. Untersucht werden neben Glasflaschen auch Aluminium- und Stahlblechdosen sowie die Produktion des Inhalts. Die Studie kommt zu dem Ergebnis, dass die Produktion der Stahlblechdose zu 19 % an den gesamten Umweltauswirkungen beteiligt ist, was den geringsten Prozentsatz aller untersuchten Verpackungsalternativen darstellt. Die Umweltauswirkungen der Rohstoffgewinnung aller drei untersuchten Verpackungen liegt weit höher als die der Bierproduktion selber.

Genauso wie Amienyo et al. (2016) kommt auch eine italienische Forschungsgruppe zu dem Ergebnis, dass ein geringeres Verpackungsgewicht (weniger verwendetes Material) zu einer signifikanten Reduzierung der Umweltauswirkungen führt. Die Studie vergleicht mehrlagige Kartonverpackungen und PET- und HDPE-Flaschen für den Verkauf von haltbarer Milch. Auch der Einsatz von biobasierten Kunststoffen - deren Barriereigenschaften jedoch ein Problem für lang haltbare Lebensmittel darstellen - würde die Umweltauswirkungen reduzieren, so die Autoren (Bertolini et al., 2016).

Ingrao et al. (2015) geben jedoch zu Bedenken, dass sowohl eine Rohstoffreduktion in der Produktion als auch eine Gewichtsreduktion der finalen Verpackung zu einem Verlust der Funktionalität und der Verwendbarkeit führen würde. Aus diesem Grund wurde der Einsatz einer Windkraftanlage als Elektrizitätsquelle getestet, mit der eine Reduktion der Umweltauswirkungen von 14% erreicht werden konnte. In ihrer Studie untersuchen sie die Umweltauswirkungen einer PS-Schale, die für die Verpackung von faschiertem Fleisch verwendet wird (Ingrao et al., 2015).

Forscher der TU Dänemark führen eine Ökobilanzstudie mit Behältnissen für Softdrinks und Bier durch und vergleichen diese mit Ergebnissen einer selbst durchgeführten Umfrage über die Umweltauswirkungen dieser Verpackungsmaterialien. Die Studie kommt zu dem Schluss, dass die meisten (dänischen) Umfrageteilnehmer entgegen der Ökobilanzergebnisse im Glauben sind, Verpackungen aus Einweg- und Mehrwegglas seien umweltfreundlicher als jene aus Kunststoffen. Positiv hervorgehoben wird, dass ein hoher Bildungsgrad mit verantwortungsvollem Umgehen mit recyclebaren Verpackungsmaterialien einhergeht (Boesen et al., 2019).

Eine weitere Studie aus Italien untersucht die Umweltauswirkungen von verschiedenen Kunststofffolien, die für die Verpackung von Schafkäse bestimmt sind. Des Weiteren wird deren Einfluss auf die Haltbarkeit und Lebensmittelabfall untersucht. Auf der einen Seite stellen die Autoren fest, dass dünnere und recyclebare Materialien weniger Auswirkungen auf die Umwelt haben. Auf der anderen Seite führen dünne Verpackungsfolien durch geringere Haltbarkeit zu mehr Lebensmittelabfall. Da die Käseproduktion weit höhere Umweltauswirkungen als die Produktion der Verpackungsmaterialien aufweist, liegt der Schlüssel zu mehr Nachhaltigkeit vielmehr im Vermeiden von Lebensmittelabfall als in der Untersuchung von Verpackungsmaterialien und Recyclingmöglichkeiten, so die Argumentation der Autoren (Conte et al., 2015).

Zu ähnlichen Forschungsergebnissen kommen auch Wohner et al. (2020) von der FH Campus Wien. Mittels Ökobilanz werden Ketchupflaschen aus Polypropylen und Glas sowie deren Inhalt untersucht, wobei die Kunststoffverpackungen 7% - 13% und die Glasverpackung 29% bis 31% der untersuchten Auswirkungen ausmachen. Es wird betont, dass die ökologischen Auswirkungen durch in der Flasche zurückgebliebene Ketchupreste weit größer seien, als jene der verschiedenen Verpackungsmaterialien.

Tua et al. (2020) haben die Umweltauswirkungen von Mehrwegsystemen vier verschiedener italienischer Mineralwasserhersteller analysiert. Da der Transport der vollen Flaschen von der Abfüllung zum Supermarkt in den meisten der untersuchten Kategorien die größten Effekte zeigt, wird die Sensitivität dieses Transportweges untersucht. Bis zu einer Distanz von 200 km sei das Mehrwegsystem selbst bei einer Wiederverwendungsrate der Flaschen von nur 2 umweltfreundlicher, bei 800 km zeige es selbst bei 30 Umläufen noch keine geringeren Effekte als das Einwegglas, so das Studienergebnis. Das Mehrwegsystem von Weinflaschen mehrerer italienischer Weinbauern haben Landi

et al. (2019) untersucht. Auch sie kommen zum Schluss, dass Einwegsysteme selbst bei hohen Recyclingraten energieintensiver sind als Mehrwegsysteme und dadurch in allen untersuchten Kategorien größere Auswirkungen auf die Umwelt haben.

Gallego-Schmid et al. (2019) von der Universität Manchester haben Ökobilanzen von Fastfood-Behältnissen aus Aluminium, PP und geschäumtem PS erstellt und miteinander verglichen. Schalen aus PP, selbst als Mehrwegsystem, schneiden in allen untersuchten Wirkungskategorien am schlechtesten ab. So wird beispielhaft angeführt, dass die PP-Schale 18 mal wiederverwendet werden müsste, um die gleichen Auswirkungen wie die Einweg-EPS-Schale zu haben. Die Autoren resümieren, dass Mehrwegsysteme also nicht zwangsläufig die umweltfreundlichere Option darstellen. Auch Maga et al. (2019) kommen in ihrer Studie über Rohfleischschalen zum Schluss, dass geschäumtes PS aufgrund des geringeren Materialbedarfs weniger Umweltauswirkungen zeigt als PP, PLA und PET. Einschichtige Verpackungslösungen seien gegenüber mehrschichtigen, die ebenfalls in dieser Studie untersucht werden, aufgrund der besseren Rezyklierbarkeit zu bevorzugen, so ein weiteres Ergebnis.

4.2.4 Verpackungsmaterialien

Sämtliche Studien, die Einwegglas untersuchten, kommen zum Ergebnis, dass dieses Verpackungsmaterial die größten Umweltauswirkungen hat. Gleichzeitig zeigen alle Mehrweg-Glassysteme mit Ausnahme von Fehringer und Stefanini et al. die geringsten Effekte. In diesen Studien zeigen HDPE- und rPET-Einwegflaschen, die aus 100% recyceltem Material hergestellt wurden, die günstigsten Ergebnisse in den betrachteten Wirkungskategorien.

PP-Produktsysteme werden in sechs Studien untersucht, wobei extrudiertes PS und rPET in drei Fällen weniger Auswirkungen zeigen. In den anderen Studien wurde PP mit Einweg-Systemen aus Karton und Glas verglichen und schnitt unter diesen Rahmenbedingungen besser ab.

Drei Studien analysierten Systeme aus PS, wobei Aluminium größere und PP geringere Effekte hat.

Tabelle 4.3 Identifizierte Verpackungsmaterialien und ihre Reihung in der Wirkungskategorie *Treibhauspotential*: Für jede Studie sperat betrachtet ist das Material mit dem niedrigsten GWP mit ▲ gekennzeichnet und hat einen relativen Prozentsatz von 100% (in Klammern hinter dem studienspezifischen Ranking, 100% wird in der Tabelle nicht erwähnt), Nummerierung entsprechend Tab. 4.1.

Nr.	EW-Glas	PP	PET	Alu	MW-Glas	rPET	PS	Sonstige
1		▲				▲		▼(EW-Karton, 833%)
2	▼(127%)	2 (115%)				1		
3	▼(165%)			2 (113%)				▲(Weißblech)
4			2 (159%)					▲(EW-Karton)
5	▼(681%)		2 (328%)	3 (364%)	▲			
6								
7	▼(409%)		3 (143%)		2 (139%)			▲(rHDPE)
8	▼(213%)		2 (148%)		▲			
9		3 (296%)		2 (149%)				▲(EPS)
10								
11	▼(184%)	▲						2 (Weißblech, 103%)
12							▲	
13								
14		2 (132%)					3 (189%)	▲(EPS)
15								
16	▼(283%)		2 (122%)		3 (134%)	▲		
17								
18				▼(1500%)			▲	
19	▼(106%)	1						
Anzahl an Untersuchungen des Verpackungsmaterials in den 19 identifizierten Studien:								
	8	6	5	4	4	3	3	

Generell zeigt die Recherche, das Produktsysteme aus Glas (Einweg und Mehrweg) am häufigsten analysiert wurden. Dies kann darauf zurückgeführt werden, dass auf der einen Seite Einwegglas durch den hohen Energieaufwand die größten Umweltauswirkungen - besonders im Bereich der CO_2 -Emissionen zeigt und auf der anderen Seite Mehrwegglas die im Moment einfachste Möglichkeit und das größte Potential für eine Kreislaufwirtschaft bietet.

4.3 Diskussion

Die vorgenommene, strukturierte Literaturrecherche mit Hilfe der wissenschaftlichen Suchmaschine *Google Scholar* zeigt, dass seit 2015 19 Studien mit der geografischen Systemgrenze Europa auf verschiedenen wissenschaftlichen Datenbanken veröffentlicht wurden. Darin wurden verschiedene Umweltauswirkungen von Lebensmittelverpackungen mittels Ökobilanz bewertet, wobei keine Studie zu Joghurt-Verpackungen veröffentlicht wurde. Die Herstellung der verschiedenen Inhalte (Olivenöl, Wein, etc.) wird nur teilweise berücksichtigt, da mehrere Autoren in ihren Studien die Annahme vertreten, dass Produktions- und Abfüllprozess des Füllinhalts in Bezug auf den Ressourcenverbrauch keine relevanten Unterschiede aufweisen. Aufgrund der Tatsache, dass die Gewinnung der Daten über diese Prozesse mit erheblichem Aufwand verbunden ist, kann angenommen werden, dass dies der Grund für die unterlassene Berücksichtigung dieses Abschnittes in den Lebenszyklusanalysen war. Auch wenn diese Vorgehensweise - gerade in vergleichenden Ökobilanzen - nachvollziehbar scheint, ergibt sich an diesem Punkt Potential, diese Annahmen durch fundierte Datensammlung, -aufbereitung und -analyse wissenschaftlich zu unterlegen.

Weiters legen alle Autoren hohen Wert auf die normgerechte Durchführung der Methode der Ökobilanzierung. Auch auf die genaue Abbildung der Produktions- und Distributionsprozesse entlang des Lebensweges der Verpackung, teilweise unter Verwendung von spezifischen Primärdaten, wird in den meisten Fällen geachtet. Die dazu vorhandenen Normen ISO14040 und ISO14044 lassen jedoch viel Spielraum für individuelle Interpretationen des/der Studienautor*innen zu, wodurch der Begriff der ›normgerechten Durchführung‹ der Studie zu relativieren ist. Auch wenn in den letzten Jahren einige Versuche unternommen wurden, das Erstellen von Ökobilanzen zu vereinheitlichen, zeigt sich hier trotz bereits vorhandener Dokumente wie dem PEFCR Guidance Document der EU-Kommission weiterer Handlungsbedarf.

Die Auswertung der untersuchten Materialien und deren modellierte Lebenswege zeigt, dass das Vergleichen verschiedener Studien vor allem aus folgenden Gründen schwierig bis unmöglich ist:

- Verschiedene Bewertungsmethoden kommen aufgrund ihrer gewählten Charakterisierungsmodelle bzw. -faktoren zu unterschiedlichen Ergebnissen in derselben Wir-

kungskategorie.

- Unterschiedlich gesetzte Systemgrenzen, vor allem Entscheidungen über das Hinzufügen oder Weglassen von Lebenszyklusabschnitten, führen zu nicht vergleichbaren Ergebnissen der Wirkungsabschätzung.
- Der Einsatz von verschiedenen generischen Datensätzen und die vorhandene Menge an primären Daten beim Erstellen der Sachbilanz führt zwangsläufig zu unterschiedlichen Wirkungsindikatorwerten.

Trotz der bereits angeführten Schwierigkeiten in der Vergleichbarkeit der unterschiedlichen Studien, in denen sowohl Ziel als auch Untersuchungsrahmen nicht ident sind, kommen sieben der identifizierten Berichte zum selben Ergebnis. Das Verpackungsmaterial Einwegglas hat die größten Umweltauswirkungen.

Die Ausarbeitung der theoretischen Grundlagen hat gezeigt, dass die Recyclingquoten von Glas in Europa stetig steigen und dieses Verpackungsmaterial bis auf den Quartärkreislauf auch auf allen Ebenen der Wiederverwendung Einsatz finden kann. Trotz dieser positiven Eigenschaften im Sinne der Kreislaufwirtschaft muss festgehalten werden, dass sich die Prozesstemperaturen beim Einschmelzen der recycelten Glasscherben nicht von jenen des Primärmaterials unterscheiden. Aus diesem Grund zeigen sich beim Verpackungsmaterial Einwegglas auch bei hohen Recyclingquoten (Tertiärkreislauf) große Umweltauswirkungen. Um diese zu verringern und das Verpackungsmaterial Glas mit seinen hohen Barriereigenschaften zur umweltfreundlichsten Verpackungsvariante weiterzuentwickeln, müsste ein flächendeckendes Mehrwegsystem inklusive effizienter Reinigung und kurzer Transportwege eingeführt werden, da auch diese einen großen Einfluss in der Bilanzierung zeigen. Mit Ausnahme von zwei Studien (vgl. Tab. 4.3, Nr. 7 & 16) kommen alle identifizierten Studien, in denen Glas untersucht wird, zu diesem Ergebnis. Diese zwei Studien zeigen, dass recycelte Kunststoffe im Sinne des Tertiärkreislaufes (100 % rPET) noch geringere Umweltauswirkungen in den untersuchten Wirkungskategorien aufweisen als Mehrwegglas. Diese Ergebnisse machen deutlich, welches Potential Kunststoffe hätten, wenn sie sortenrein gesammelt werden und in einem geschlossenen Kreislauf wieder als Lebensmittelverpackung verwendet werden können.

Auch wenn diese übereinstimmenden Ergebnisse den hohen Energieverbrauch des Produktionsprozesses von Glas widerspiegeln, muss in Frage gestellt werden, ob ein Vergleich

4 Vergleichende Ökobilanzen im Lebensmittelverpackungsbereich

verschiedener Ökobilanzen aufgrund der unterschiedlichen Untersuchungsrahmen, wie in Tab. 3.2. durchgeführt, überhaupt zulässig ist.

5 Erstellung der Ökobilanz

5.1 Methodisches Vorgehen

Die vorliegende Ökobilanz, die die Umweltauswirkungen verschiedener Verpackungssysteme für Joghurt vergleicht, wurde unter Anwendung der Normen ISO 14040 und ISO 14044 erstellt. Zur Durchführung der Studie wurde die Software *GaBi* verwendet, die neben einer eigenen Datenbank für Sachbilanzdaten auch *ecoinvent* beinhaltet. Neben diesen Sekundärdaten wurden für die Studie auch Primärdaten aus Experteninterviews verwendet.

5.2 Festlegung des Ziels der Studie

Ziel der Studie ist es, die Umweltauswirkungen verschiedener ausgewählter Joghurtbehältnisse zu analysieren und zu vergleichen. Die Studie untersucht den gesamten Lebensweg von der Gewinnung der Rohstoffe für die Produktion der Gebinde bis zur Verwertung des Abfalls. In einem Basisszenario werden die Umwelteinflüsse mit Transportdistanzen und Verwertungsquoten (Recycling, energetische Verwertung und Deponie) berechnet, die die aktuelle österreichische Situation repräsentieren (IST-Zustand Österreich).

Die Variabilität der LCA-Ergebnisse wird durch die Durchführung einer Sensitivitätsanalyse von zwei Parametern, die in der Regel entweder auf Durchschnitts- oder Schätzwerten beruhen, überprüft. Dazu werden die Verwertungsquoten im Sinne des EU-Kreislaufwirtschaftspaketes für 2025 eingesetzt, um den österreichischen SOLL-Zustand abzubilden. Eine weitere Sensitivitätsanalyse mit konservativeren Transportdistanzen wird durchgeführt, um zu analysieren, wie sensitiv das Modell auf diesen Parameter reagiert.

Durchgeführt wird die Studie im Zuge der Diplomarbeit des Verfassers an der TU Wien in fakultätsübergreifender Kooperation der Institute für Verfahrenstechnik (Fakultät Technische Chemie) und Werkstoffwissenschaft und Werkstofftechnologie (Fakultät Maschinenwesen und Betriebswissenschaften).

Die Ergebnisse der Arbeit werden an den beteiligten Instituten primär für weiterführende, interne Forschungszwecke verwendet. Das Augenmerk des Instituts für Verfahrenstechnik liegt in der Prozess- und Qualitätsoptimierung bei der Durchführung zukünftiger Ökobilanzen. Das Institut für Werkstoffwissenschaft und Werkstofftechnologie hat das Anliegen, Kenntnisse über die ökologischen Auswirkungen der Herstellung bzw. des Recyclings der untersuchten Kunststoffe zu gewinnen. An diesem Punkt ist anzumerken, dass der Studie keinerlei wirtschaftliche Interessen zugrundeliegen und die wissenschaftlich korrekte Durchführung der Methode der Ökobilanz im Vordergrund steht.

Die Studie richtet sich neben den beteiligten Akteuren auch an fachkundige und interessierte Leser*innen. Die Ökobilanz wird durch das zur Geltung kommende österreichische Universitätsgesetz in der Bibliothek der TU Wien veröffentlicht. Eine weitere Zielgruppe stellen daher auch umweltbewusste Konsument*innen dar, die in einen sachorientierten Dialog über die ökologische Bewertung der untersuchten Produktsysteme treten wollen.

5.3 Festlegung des Untersuchungsrahmens

Die vergleichende Studie umfasst ausgewählte Arten von Behältern, die für den Verkauf von Joghurt bestimmt sind und im österreichischen Lebensmitteleinzelhandel in verschiedenen Größen angeboten werden. Eine Marktstudie der TU Wien analysierte im Vorfeld der Ökobilanz-Erstellung das Angebot an Joghurtbehältnissen in österreichischen Supermärkten. Die Produktsysteme bestehen grundlegend aus dem Gebinde, das mit Joghurt befüllt wird und dem Verschluss, der den Inhalt bis zur Öffnung durch den Endverbraucher schützt (vgl. Abb. 5.1). Als funktionelle Einheit wird die Verpackungsmenge definiert, die notwendig ist, um 4500 g Joghurt (3,6 % Fettgehalt, Naturgeschmack) zum Verkauf an den Endkunden bereitzustellen. Folgende Produktsysteme, die aufgrund ihrer Füllmenge rechnerisch einfach handhabbar sind (kgV bzgl. fE) werden untersucht:

- EWG450: Einwegglas mit Schraubverschluss aus Weißblech (Füllmenge 450g)

- PP250: Kunststoffbecher aus PP mit Siegeldeckel aus Aluminium (Füllmenge 250g)
- PS500: Kunststoffbecher aus PS mit Siegeldeckel aus Aluminium (Füllmenge 500g)
- PS250K: Kunststoffbecher aus PS mit Kartonsleeve und Siegeldeckel aus Aluminium (Füllmenge 250g)
- PS500K: Kunststoffbecher aus PS mit Kartonsleeve und Siegeldeckel aus Aluminium (Füllmenge 500g)



Abb. 5.1 Untersuchte Produktsysteme¹: 500g-Einwegglas (Links), 500g-Kunststoffbecher (Mitte) und 500g-Kunststoffbecher mit Kartonmantel (Rechts)

5.3.1 Systemgrenzen

Wie in Abbildung 5.2 dargestellt, werden die Systemgrenzen der betrachteten Produktsysteme so gelegt, dass die Ökobilanz den gesamten Lebensweg der Produkte von der Wiege bis zur Bahre ohne Nutzphase erfasst (*cradle to grave without use*).

Sämtliche erfassten Prozesse bilden durchschnittliche Technologien ab 2015 ab und finden in Europa statt. Als Abschneidekriterium wurde in den verwendeten Datensätzen ein Schwellenwert von 5% für Massenbeiträge, Energieinputs und Umweltrelevanz festgelegt. Alle Prozesse, für die Daten bzw. Datensätze verfügbar sind, werden abgebildet. Sind keine Daten für einzelne Subsysteme verfügbar, so werden diese auch nicht untersucht.

¹Symbolbilder angelehnt an <https://shop.billa.at>, zuletzt aufgerufen am 21.02.2022

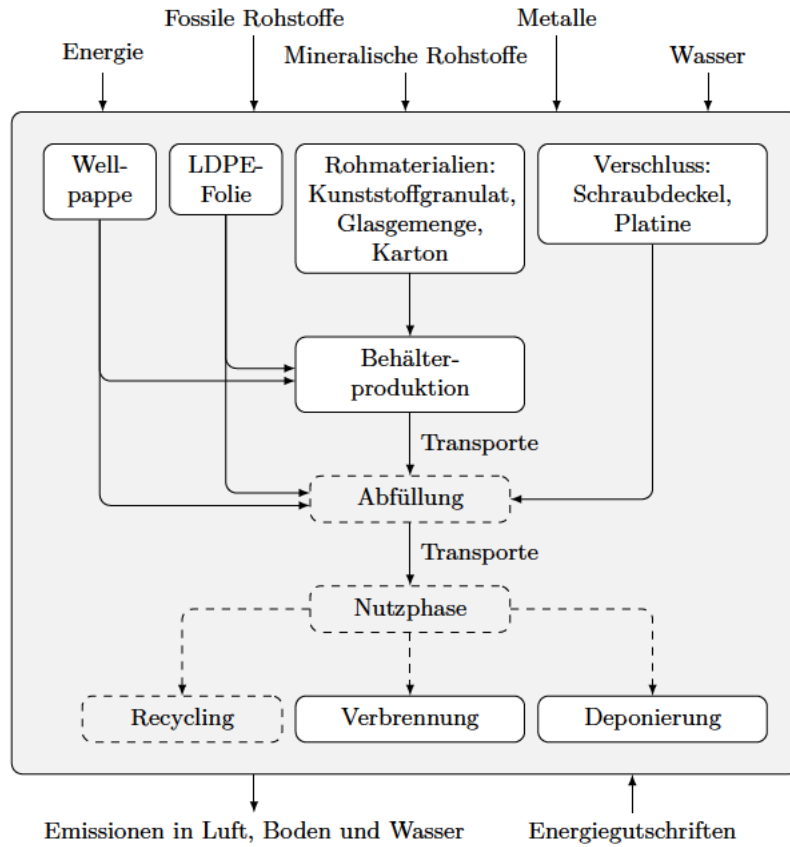


Abb. 5.2 Systemfließbild der fünf untersuchten Produktsysteme (- - - Teilsysteme und Transporte außerhalb der Systemgrenze)

Im Detail werden in vorliegender Studie folgende Lebenszyklusabschnitte untersucht:

- Herstellung
 - Kunststoffbecher, Einwegglas
 - Kartonsleeve für Kunststoffbecher
 - Platine für Becher und Schraubverschluss für Glas
 - Sekundärverpackung bzw. Verkaufsverpackung (Trays)
 - Tertiärverpackung bzw. Transportverpackung (PE-Stretchfolie und Karton)

- Transporte
 - Gebinde zur Molkerei
 - Abgefülltes Gebinde zum Zentrallager der Supermarktkette
- Verwertung
 - Kunststoffbecher, Einwegglas
 - Kartonsleeve für Kunststoffbecher
 - Platine für Becher und Schraubverschluss für Glas

Die Produktion des Joghurts und die Abfüllung der Becher und Gläser wird nicht berücksichtigt, da angenommen wird, dass dieser Prozess in Bezug auf seinen Energieverbrauch in allen verglichenen Produktsystemen gleich oder ähnlich abläuft. Auch der Transport des Joghurts vom Zentrallager bis zum Supermarkt fließt nicht in die Ökobilanz ein, da angenommen wird, dass die Auswirkungen der Art Joghurtbehältnisse vernachlässigbar klein sind im Vergleich zur kompletten Lieferung.

Ebenfalls außerhalb der Systemgrenze liegt die Verwertung der Verkaufs- und Transportverpackungen. Hier wird angenommen, dass sie sortenrein in den Betrieben gesammelt und somit zu 100% recycelt werden können. Ebenfalls nicht berücksichtigt wird die Gebrauchsphase durch den (End-)Kunden, die sich von der Auslieferung des Produkts in den Supermarkt bis zum Mülltransport zur Verbrennungsanlage bzw. zur Deponie erstreckt. Gründe dafür sind auf der einen Seite die Annahme, dass diese Prozesse für alle betrachteten Produktsysteme gleich ablaufen (Entfernung, Energie für Kühlung, etc.) und auf der anderen Seite fehlende Daten. Aus diesem Grund liegen weiters außerhalb der Systemgrenze:

- die Herstellung der Druckfarben auf den Kunststoffbechern und dem Kartonmantel,
- die Herstellung der Infrastruktur (Maschinen, Aggregate, Transportmittel,...),
- Verluste beim Transport, durch Lagerung und durch beschädigte Verpackungen
- und Umwelteinflüsse durch Unfälle.

5.4 Sachbilanz

Primärdaten für die Durchführung der vorliegenden Studie wurden an der TU Wien erhoben und beziehen sich einerseits auf die Masse der einzelnen Teilsysteme (Becher, Platine, etc.) und andererseits auf die Transportdistanzen zwischen Behälterproduzent, Molkerei und Zentrallager. Die verwendeten generischen Daten, mit denen die Produktsysteme modelliert werden, stammen aus der *GaBi*- und der *ecoinvent*-Datenbank (vgl. Tab. A.5). Der Einsatz von elektrischer und thermischer Energie wird in sämtlichen Datensätzen mit Hilfe generischer Daten modelliert, die das europäische Mittel aller verwendeten Energieträger darstellen (sog. Energiemix).

5.4.1 Sachbilanz zu Primärverpackungen

Die Primärverpackung des Einwegglases (EWG450) besteht aus dem Behälterglas selber und einem Schraubdeckel aus Weißblech. Der Datensatz für das Glas (*GaBi*) beinhaltet die Gewinnung der Rohstoffe, das Beimengen von Glasscherben und das Formen des Gebindes (vgl. Kapitel 3.2.2). Der Datensatz für den Schraubdeckel enthält ebenfalls alle relevanten Produktionsschritte von der Gewinnung der Rohstoffe (Eisenerz, Koks, Zinnsand) über die Produktion von Zinnmetall bis hin zum Stanzen und Falten des Bleches.

Die Produktion der vier Kunststoffbecher wurde in zwei Teilschritten modelliert. Die *GaBi*-Datensätze für PP und PS repräsentieren den gesamten Herstellungsprozess bis zu den Pellets (vgl. Kap. 3.1.2). Der zweite Datensatz stellt den Produktionsprozess des Bechers von der Plastifizierung der Pellets im Extruder bis zum Thermoformen dar (vgl. Kap. 3.1.3). Für die Bilanzierung der Platine wird ein Datensatz für herkömmliche Alufolie verwendet, der sämtliche Prozessschritte von der Herstellung der Primäraluminiumballen bis zum Warm- und Kaltwalzen der Folie umfasst.

Zur Abbildung des Kartonmantels (PS250K & PS500K) wurde ein Kraftpapier-Datensatz verwendet. Er repräsentiert den gesamten Herstellungsprozess von Papiersäcken, angefangen bei der Ernte des Holzes, der Vermischung der Hackschnitzel mit Zusatzstoffen für die weitere Verarbeitung bis hin zum Trocknen und Pressen des fertigen Zellstoffes.

Die Gewichte der verschiedenen PP- und PS-Produktsysteme bzw. derer Einzelteile wurden ebenfalls im Zuge der bereits erwähnten Marktstudie der TU Wien erhoben. Das Gewicht des Einwegglases und des dazugehörigen Weißblech-Deckels wurden ebenfalls ermittelt. Die Daten (Masse und Zusammensetzung) der fünf Produktsysteme, die die Analyse umfasst, sind in Tabelle 5.1 zusammengefasst. Die Referenzflüsse der einzelnen Gewichte fließen in die jeweiligen Datensätze, das Gesamtgewicht wird für die Berechnung der Transportaufwände benötigt (vgl. Kap. 5.4.3).

5 Erstellung der Ökobilanz

Tabelle 5.1 Gewicht und Referenzflüsse der untersuchten Produktsysteme

	f. E. [Stk.]	Material	Gewicht [g]	Referenzfluss [g]	Massenanteil
EWG450					
	10				
Behälterglas		Einwegglas	236,0	2360,0	94,4%
Schraubdeckel		Weißblech	14,0	140,0	5,6%
			250,0	2500,0	100,0%
Inhalt		Joghurt	450,0	4500,0	
			700,0	7000,0	
PP250					
	18				
Kunststoffbecher		PP	6,3	113,7	93,5%
Platine		Aluminium	0,4	7,9	6,5%
			6,8	121,6	100,0%
Inhalt		Joghurt	250,0	4500,0	
			256,8	4621,6	
PS250K					
	18				
Kunststoffbecher		PS	4,5	81,0	44,0%
Platine		Aluminium	0,4	8,0	4,4%
Mantel		Karton	5,3	94,9	51,60%
			10,2	184,0	100,0%
Inhalt		Joghurt	250,0	4500,0	
			260,2	4684,0	
PS500					
	9				
Kunststoffbecher		PS	13,4	120,9	94,3%
Platine		Aluminium	0,8	7,3	5,7%
			14,2	128,2	100,0%
Inhalt		Joghurt	500,0	4500,0	
			514,2	4628,2	
PS500K					
	9				
Kunststoffbecher		PS	5,5	49,3	37,4%
Platine		Aluminium	0,9	7,9	6,0%
Mantel		Karton	8,3	74,7	56,6%
			14,7	131,9	100,0%
Inhalt		Joghurt	500,0	4500,0	
			514,7	4631,9	

5.4.2 Sachbilanz zu Verkaufs- und Transportverpackungen

Informationen zu Art und Menge des Transportes der leeren Kunststoffbecher zur Molkerei wurden ebenfalls im Zuge der bereits erwähnten Marktstudie der TU Wien erhoben. Die Becher werden nach der Produktion in Kartons gestapelt und auf Paletten für den Transport zur Molkerei einfoliert. Da die Gläser nicht gestapelt werden können, wird angenommen, dass sie schichtweise mit Kartonlagen auf Paletten geschichtet und dann ebenfalls einfoliert werden. Für sämtliche Kartonverpackungen wird ein Datensatz, der die Herstellung von Wellpappe von der Rohstoffgewinnung bis zum Zuschnitt abbildet, verwendet. Der Datensatz für die PE-Stretchfolie deckt ebenfalls alle Lebensabschnitte bis zur Verwendung ab. Die Menge der Becher in einem Karton und auf einer Palette wurde durch Interviews ermittelt, die Menge der Gläser mit Hilfe der Abmaße und die Folienmenge pro Palette mit Hilfe von Herstellerinformationen aus dem Internet abgeschätzt.

Die Verkaufsverpackungen (Trays), die für den Transport der Becher und Gläser ins Zentrallager bestimmt sind, werden ebenfalls mit dem Wellpappe-Datensatz modelliert. Die Anzahl der Verkaufseinheiten pro Tray wurden in einem Supermarkt erhoben, Trays pro Palette anhand der Abmaße abgeschätzt. Sämtliche Paletten werden auch auf dieser Distributionsstufe einfoliert.

Tabelle 5.2 Verkaufs- und Transportverpackungen

	Inhalt [Stk.]	Menge [Stk./Palette]		Verpackungsmenge [g/fE]	
		DS 1	DS 2	Karton	PE-Stretchfolie
EWG450		1760	1152	181,9	7,180
Kartonplatte	135	13		31,9	
Tray	6		192	150,0	
PP250 & PP250K		25200	1600	101,7	5,987
Kartonschachtel	1050	24		13,5	
Tray	10		160	88,2	
PS500 & PS500K		12000	804	90,7	5,975
Kartonschachtel	500	24		14,2	
Tray	6		134	76,5	

5.4.3 Sachbilanz zu Transporten

Für das Basisszenario wurden die Standorte der Behälterproduzenten, der Molkerei und des Zentrallagers einer Supermarktkette ebenfalls im Zuge der bereits erwähnten Marktstudie der TU Wien erhoben. In allen fünf betrachteten Systemen werden das Gebinde und der Verschluss von unterschiedlichen Herstellern an die Molkerei geliefert (vgl. Tab. 5.3). Die abgefüllten und verschlossenen Gebinde werden anschließend über eine Distanz von 167 km in das Zentrallager transportiert. Dieses wurde beispielhaft im Süden von Wien angenommen. Für die Sensitivitätsanalyse werden fiktive Entfernungen von 1000 km (Produktion-Molkerei) und 500 km (Molkerei-Zentrallager) angenommen.

In sämtlichen Szenarien werden die Emissionen der LKW-Transporte durch GaBi-Datensätze abgebildet. Gebinde und Verschlüsse werden mit einem 40t-Sattelzug zur Molkerei, die mit Joghurt befüllten Gläser und Becher mit einem 28t-Kühllastwagen zum Zentrallager geliefert. Die Produktion von Diesel (EU-Mix) ist in diesen beiden LKW-Datensätzen bereits enthalten, die zuvor ermittelten Transportgewichte und Distanzen werden mittels Tonnenkilometer durch Multiplikation der Systemgewichte und der Transportdistanzen eingepflegt.

Tabelle 5.3 Transportdistanzen

	Produktion-Molkerei		Molkerei-Zentrallager	
	Basisszenario	Europaszenario	Basisszenario	Europaszenario
EWG450		1000	167	500
Einwegglas	44,5			
Schraubdeckel	663			
PP250 & PP500		1000	167	500
Becher	694			
Platine	663			
PS250K & PS500K		1000	167	500
Becher	694			
Platine	663			
Kartonsleeve	694			

5.4.4 Sachbilanz zu Verwertung

Für das Basisszenario werden die Kunststoff-Verwertungsquoten in Anlehnung an Van Eygen et al. gewählt, der 2017 die Abfallströme von PP- und PS-Behältern in Österreich untersuchte (vgl. Kap. 1.4). Die Karton-Verwertungsquoten nach Tabelle 5.4 für die Systeme PS250K und PS500K wurden in einem Expertengespräch erhoben (Archodoulaki, 2021). Die Verwertung von Einwegglas (EWG450) wird mit den Zahlen aus Kapitel 3.2.3 modelliert. Die Verwertungsquoten für die Verschlüsse aller Produktsysteme werden der Bestandsanalyse der österreichischen Abfallwirtschaft 2021 entnommen (BMK, 2021). Sämtliche Quoten sind in Tab. 5.4 dargestellt.

Die Allokation der durch die Recyclingprozesse entstandenen Emissionen erfolgt durch den in Kap. 3.3.1 beschriebenen *Cut Off*-Ansatz, bei dem die entstandenen Aufwände für die Aufbereitung des Kunststoffabfalls dem Produkt zuzurechnen sind, das die Sekundärrohstoffe benötigt (open-loop Recycling). Sie werden somit nicht in der vorliegenden Ökobilanz berücksichtigt.

Für die Sensitivitätsanalyse der *End of Life*-Prozesse, die das österreichische SOLL-

Szenario abbildet, werden für alle Materialien die von der EU-Kommission für 2025 geforderten Verwertungsquoten verwendet. Quoten, die bereits schon heute erreicht wurden, werden in diesem Szenario nicht verändert.

Tabelle 5.4 Verwertungsquoten im Basisszenario (Van Eygen et al., 2018) und der EoL-Sensitivitätsanalyse (EU-Kommission, 2018). *Es werden die Werte des Basisszenarios verwendet, da die Ziele der EU-Kommission für 2025 für Glas (70%) und Metalle (60% Aluminium, 70% Fe-Metalle) in Österreich bereits heute erreicht sind (ARA, 2019).

Material (Produkt)	IST			SOLL		
	Recycling	Verbrennung	Deponie	Recycling	Verbrennung	Deponie
Kunststoff (Becher)	13,5	82,5	4	50	50	0
Glas (Behälterglas)	84	0	16	84*	0	16
Karton (Mantel)	17,5	82,5	0	75	25	0
Metall (Verschluss)	86	0	14	86*	0	14

5.5 Wirkungsabschätzung

5.5.1 Auswahl der Wirkungskategorien

Die Wirkungsabschätzung der vorliegenden Ökobilanz erfolgt in sieben Kategorien:

- Treibhauspotential
- Versauerung
- Terrestrische Eutrophierung
- Abbau der stratosphärischen Ozonschicht
- Bildung photochemischer Oxidantien (Sommersmog)
- Feinstaubbildung
- Wasserverbrauch

Die Auswahl der Wirkungskategorien, in denen die Daten aus der Sachbilanz ausgewertet werden, orientiert sich an den Ergebnissen der Literaturrecherche in Kapitel 4, weiterer Primärliteratur (Frischknecht, 2020; Klöpffer et al., 2009) und den Empfehlungen der Europäischen Kommission im PEFCR-Leitfaden (EU-Kommission, 2017).² Die weit verbreitete Anwendung in den Literaturquellen bestätigt die allgemeine wissenschaftliche Akzeptanz der Kategorien, die damit auch als in der ökobilanziellen Praxis standardmäßig verwendete Umweltwirkungskategorien gewertet werden können. Die Auswahl der Wirkungsindikatoren und Charakterisierungsmodelle erfolgt ebenfalls anhand der Empfehlungen der EU-Kommission (EU-Kommission, 2017).

Da Wirkungskategorien aus verschiedenen Charakterisierungsmodellen ausgewählt werden, ist eine Wirkungsabschätzung auf Schadensebene nicht möglich und wird somit auch nicht durchgeführt.

Treibhauspotential

Die UV-Absorption bildet die physikalische Grundlage für die vom Menschen verursachte Erwärmung der Erdatmosphäre. Das Treibhauspotential ist aktuell die Wirkungskategorie mit der höchsten gesellschaftlichen Priorität (Fehringer, 2019). Neben dem natürlich ablaufenden Treibhauseffekt, der durch Kohlenstoffdioxid und Wasser hervorgerufen wird, tragen menschliche Aktivitäten wie das Verbrennen fossiler Rohstoffe und Landwirtschaft zum anthropogenen Treibhauseffekt bei (Klöpffer et al., 2009). Die wichtigsten verstärkenden Substanzen sind neben CO₂ Methan und Distickstoffmonoxid (Lachgas). Als Charakterisierungsfaktoren dienen die Daten des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimawandel (IPCC), die die Verstärkung der Infrarotstrahlung von Substanzen im Vergleich zur Referenzsubstanz CO₂ bewerten. Der Wirkungsindikatorwert wird mit CO₂-Äquivalenten angegeben (IPCC, 2014).

²Die Auswahl der sieben Wirkungskategorien stellt eine Momentaufnahme aktuell erforschter Umweltauswirkungen dar, deckt jedoch bei Weitem nicht alle Kategorien ab. Aufgrund des Umfangs der vorliegenden Diplomarbeit wurde von der Auswertung weiterer Wirkungskategorien abgesehen.

Versauerungspotential

Versauernde Substanzen tragen zur Senkung des pH-Wertes in Böden und Gewässern bei und führen zu einer Mobilisierung von Schwermetallen, die damit für Menschen, Tiere und Pflanzen verfügbar werden. Das Versauerungspotential gibt an, welchen Beitrag emittierte Substanzen zur Versauerung terrestrischer und aquatischer Systeme leisten. Neben Schwefeldioxid tragen auch Schwefelsäure, Phosphorsäure und Salpetersäure zur Versauerung bei, deren Potential wird in kg SO₂-Äquivalenten angegeben (Frischknecht, 2020). Die empfohlenen Charakterisierungsfaktoren wurden 2006 im Int. Journal of Life Cycle Assessment publiziert (Seppälä et al., 2006).

Terrestrische Eutrophierung

Besteht ein Überangebot an Nährstoffen, kommt es zum vermehrten photosynthetischen Aufbau von Biomasse, zB. zum Wachstum von Algen. Aufgrund der Änderung des Nährstoffangebots kann sich in einem Ökosystem auch das Artenspektrum ändern. Diese Effekte berücksichtigt die Wirkungskategorie Eutrophierung, die weiter in terrestrische und aquatische Eutrophierung unterschieden werden kann (Klöpffer et al., 2009). Als Indikator empfiehlt die EU-Kommission die *Accumulated Exceedance*, also das Ausmaß des Nährstoff-Überangebots. Das Eutrophierungspotential ausgestoßener Substanzen wird in Mol N-Äquivalenten angegeben, die Charakterisierungsfaktoren stammen wie schon bei der Versauerung aus Seppälä et al., 2006.

Abbau der stratosphärischen Ozonschicht

Neben dem Treibhauspotential stellt auch der Abbau der stratosphärischen Ozonschicht eine global wichtige Wirkungskategorie dar. Diese Schicht absorbiert den kurzwelligen Anteil der Sonnenstrahlung und besteht aus Ozon, dessen sensibles Gleichgewicht aus Bildung und Zersetzung u.a. durch den Ausstoß von Fluorchlorkohlenwasserstoffen (FCKW) gestört wird. Durch internationale Verbote der Verursachersubstanzen konnte in den letzten Jahrzehnten ein starker Rückgang dieses Effektes beobachtet werden (Klöpffer et al., 2009). Die Charakterisierungsfaktoren der verschiedenen Substanzen,

deren Bezugsgröße das Abbaupotential von FCKW11 (Trichlorfluormethan) ist, werden laufend von der Weltorganisation für Meteorologie veröffentlicht. Sie werden in kg CFC11-Äquivalenten angegeben (WMO, 2018).

Bildung photochemischer Oxidantien

Bildet sich das in der Stratosphäre zur Absorption kurzwelliger UV-Strahlung gewünschte Ozon in Bodennähe (Troposphäre), so entsteht der für Mensch und Umwelt gefährliche Sommersmog. Neben Ozon, das als Leitparameter für die Schädlichkeit dieses Smogs dient, gibt es auch eine Reihe weiterer Schadstoffe, die in dieser Kategorie als schädlich betrachtet werden. Die Bildung dieser Photooxidantien wird begünstigt durch (Klöpffer et al., 2009):

- intensive Sonneneinstrahlung,
- die Bildung von Stickstoffoxiden (z.B. durch starken PKW- bzw. LKW-Verkehr),
- und die Bildung von Kohlenwasserstoffen (z.B. durch Industrieanlagen).

Zu den Schadstoffen dieser Kategorie zählen neben flüchtigen organischen Verbindungen ohne Methan (NMVOC) auch Feinstaubpartikel ($<10\mu\text{m}$) und Stickstoffoxide, die mittels des LOTOS-EUROS-Modells zu NMVOC-Äquivalenten zusammengefasst werden (van Zelm et al., 2008).

Feinstaubbildung

Eine Erhöhung der Feinstaubkonzentration in der Atmosphäre führt zu steigenden Raten chronischer und akuter Atemwegserkrankungen. Diese Gesundheitsprobleme des Menschen entstehen u.a. durch in der Lunge oder den Atemwegen deponierte Partikel (Frischknecht, 2020). Als Charakterisierungsmodell wird die vom Umweltprogramm der Vereinten Nationen empfohlene Methode herangezogen, die die Emissionen von Feinstaubpartikel ($<2,5\mu\text{m}$), Stickstoffoxiden, Schwefeldioxid und Ammoniak als Auswirkungen und Schäden auf den Menschen zusammenfasst. Die Quantifizierung dieser Schadstoffmengen erfolgt durch den Indikatorwert "Veränderung der Krankheitsinzidenz pro kg PM_{2,5}-Emissionen"(UNEP, 2016).

Wasserverbrauch

Der Wasserverbrauch stellt neben den sechs vorangegangenen emissionsbezogenen Wirkungskategorien die einzige ressourcenbezogene Kategorie dar. Die UNEP empfiehlt für die Wirkungsabschätzung das *AWARE*-Modell, welches das relative Potenzial des Wasserverbrauchs bewertet. Der Wirkungsindikator, der in der Einheit m^3 Wasser-Äquivalente angegeben wird, bewertet das Potential des Wasserverbrauches zur Benachteiligung anderer Wassernutzer. Die Charakterisierungsfaktoren werden für verschiedene Weltregionen wie Europa, Afrika und Asien angegeben (UNEP, 2016).

Tabelle 5.5 zeigt zusammenfassend die ausgewählten Wirkungskategorien und deren Indikatoren, Einheiten und Charakterisierungsmodelle.

Tabelle 5.5 Indikatoren, Einheiten und Charakterisierungsmodelle der sieben ausgewählten Wirkungskategorien (In der Kategorie *Ozonabbau* wird für die Indikatoren statt der chemischen Summenformel die Kurzbezeichnung für organische Kältemittel nach DIN 8960 angegeben)

Wirkungskategorie	Indikatoren	Einheit	Charakterisierungsmodell
Treibhauspotential	CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O, CF ₄	[kg CO ₂ -Äqu.]	IPCC, 2014
Versauerung	SO ₂ , NO, NO ₂	[mol H ⁺ -Äqu.]	Seppälä et al., 2006
Eutrophierung	NO, NO ₂ , NO _x	[mol N-Äqu.]	Seppälä et al., 2006
Ozonabbau	R12-B1, R13-B1, R-10	[kg CFC11-Äqu.]	WMO, 2018
Sommersmog	NO, NO ₂ , NO _x	[g NMVOC-Äqu.]	van Zelm et al., 2008
Feinstaubbelastung	PM2.5, PM10, SO ₂ , NO	[Krankheitsinzidenz/Mt]	UNEP, 2016
Wasserverbrauch	H ₂ O	[m ³ -Äqu.]	UNEP, 2016

5.6 Ergebnisse

5.6.1 Basisszenario

Die Darstellung der Ergebnisse der Wirkungsabschätzung erfolgt in diesem Kapitel in mehreren Teilen. Zur Veranschaulichung der Größenordnungen und Relationen werden in einem ersten Schritt die absoluten Ergebnisse für die wichtigste Wirkungskategorie

Treibhauspotential in Abb. 5.3 dargestellt.³ In Tab. 5.6 werden die absoluten Ergebnisse der anderen sechs untersuchten Wirkungskategorien zusammengefasst.

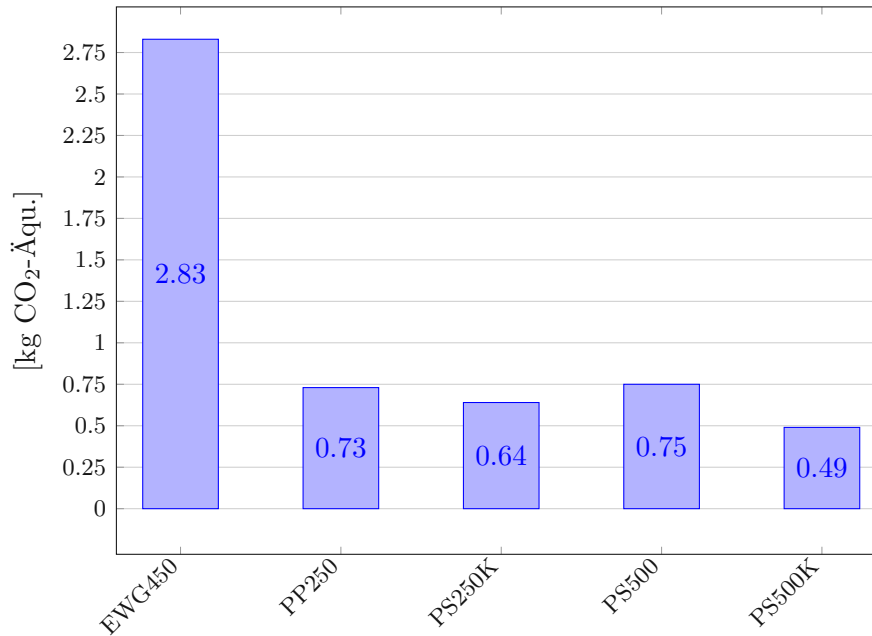


Abb. 5.3 Ergebnisse in der Wirkungskategorie Treibhauspotential

Tabelle 5.6 Absolute Ergebnisse der untersuchten Wirkungskategorien (Kennzeichnung des Systems mit den geringsten Auswirkungen mit ▼)

Wirkungskategorie	Einheit	EWG450	PP250	PS250K	PS500	PS500K
Versauerung	[mmol H ⁺ -Äqu.]	16,41	1,53	1,81	▼ 1,50	1,53
Eutrophierung	[mmol N-Äqu.]	52,08	4,55	5,24	4,48	▼ 4,44
Ozonabbau	[µg CFC11-Äqu.]	▼ 0,02	0,03	4,96	0,03	3,90
Sommersmog	[g NMVOC-Äqu.]	9,97	1,21	1,38	1,19	▼ 1,15
Feinstaubbelastung	[Krankheitsinzidenz/Mt]	0,13	0,01	0,02	▼ 0,01	0,02
Wasserverbrauch	[m ³ -Äqu.]	0,56	0,25	0,29	▼ 0,23	0,25

In einem zweiten Schritt werden nun die Auswirkungen des Systems EWG450 und der Verpackungslösungen mit und ohne Kartonsleeve separat erörtert und dargestellt. In

³Auf die Abbildung der absoluten Ergebnisse aller genannten Wirkungskategorien in Form von Diagrammen im Fließtext wurde aus Gründen der Übersichtlichkeit verzichtet.

einem vierten Teil erfolgt der Vergleich der Ergebnisse aller Kunststofflösungen, um etwaige Unterschiede innerhalb dieser Gruppe festzustellen. Die gesamten Umweltwirkungen der untersuchten Verpackungssysteme werden dazu in folgende Gruppen bzw. Teilsysteme unterteilt:

- Primärverpackung: Herstellung sämtlicher Bestandteile der Primärverpackung, insbesondere Einwegglas, Kunststoffbecher und Kartonmantel
- Sonstige Verpackung: Herstellung sämtlicher sonstiger Sekundär- und Transportverpackungen, insbesondere Wellpappe-Kartons, Wellpappe-Trays und Kunststofffolie für jeglichen Palettentransport.
- Transporte: Distribution der Behälter vom Produzenten über die Molkerei zum Zentrallager des Lebensmittelhändlers
- EoL: Sämtliche Prozesse im Rahmen der Verwertung der Primärverpackung

Die relativen Anteile der vier Teilmodule am Gesamtsystem (100%) werden in Abb. 5.5 und Abb. 5.6 dargestellt. Negative Balkenabschnitte der EoL-Prozesse entstehen, wenn dem Produktsystem Gutschriften zugeordnet werden. Dabei handelt es sich um elektrische und thermische Energie, die durch die Verbrennung der Kunststoffbecher und Kartonmäntel erzeugt wird und somit für andere Produkte außerhalb der Systemgrenzen bereitgestellt werden kann. Dieses Vorgehen bei der Berechnung der Ergebnisse entspricht der in Kapitel 3.3.2 beschriebenen Allokation, bei der Gutschriften dem System zuzurechnen sind, durch das primäre Rohstoffe bei der Bereitstellung von Energie substituiert werden können. Sämtliche dargestellten Ergebnisse sind Nettowerte (System minus Gutschrift) und beziehen sich auf die in Kap. 5.3 beschriebene funktionelle Einheit.

Einwegglas

Das Verpackungssystem EWG450 zeigt mit Ausnahme des Abbaus der stratosphärischen Ozonschicht in allen betrachteten Kategorien die größten Umweltauswirkungen. Die Primärverpackung weist bei allen Umweltauswirkungen mit einem durchschnittlichen Anteil von 90 % die höchsten Werte auf. An dieser Stelle wird auf das Kapitel 3.2.2 verwiesen,

in dem auf Behälterglasproduktion, notwendige Prozesstemperaturen und dem daraus resultierenden Energieverbrauch eingegangen wird.

Durch hohe CO₂- und CH₄-Ausstöße trägt die Produktion der Primärverpackung mit 88 % zu den Ergebnissen in der Kategorie Treibhauspotential bei. Besonders hohe Einzelwerte für die Produktion des Behälterglases zeigen sich in den Kategorien Eutrophierung (82 %), Versauerung (79 %) und Sommersmog (75 %) durch hohe NO- und NO₂-Emissionen. Der Schraubdeckel aus Weißblech trägt in großem Maß zu den Ergebnissen des Ozonabbaus (89 %) und der Feinstaubbelastung (33 %) bei. Der hohe Wasserverbrauch bei der Kartonproduktion für den Transport führt in dieser Kategorie zu mehr als doppelt so hohen Werten der Transport- und Verkaufsverpackungen, verglichen zur Primärverpackung. Die geringsten Auswirkungen in allen Kategorien zeigen die EoL-Prozesse durch die niedrigen Verbrennungs- und Deponierungsraten von Behälterglas.

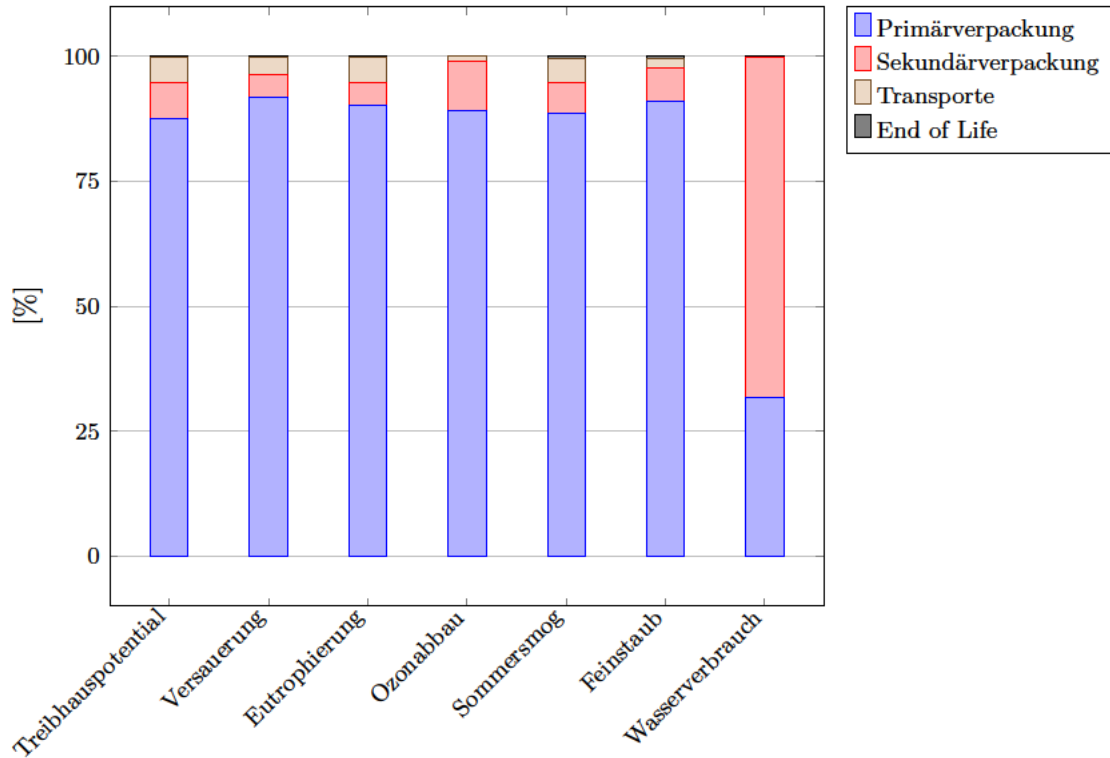


Abb. 5.4 Relative Anteile der Umweltauswirkungen des Produktsystems EWG450

Kunststoffbecher ohne Kartonmantel

In der Kategorie Treibhauspotential zeigen v. a. die Produktion der Kunststoffbecher (>40 %) und deren Verbrennung (knapp 30 %) große relative Anteile innerhalb der Produktsysteme. Grund dafür sind die hohen CO_2 -Emissionen bei der Granulatherstellung und der Müllverbrennung. Obwohl die Aluminiumplatte einen Massenanteil von nur 6,5 % an der Primärverpackung hat, ist sie durch hohe Partikel- und SO_2 -Emissionen zu einem knappen Viertel für die Ergebnisse in der Kategorie Feinstaub verantwortlich. Großes Eutrophierungspotential zeigt der Transport der abgefüllten Becher von der Molkerei zum Zentrallager, der durch hohe NO-Werte über 25 % dieses Kategorieergebnisses ausmacht.

In den Wirkungskategorien Versauerung, Eutrophierung und Feinstaub übersteigen die

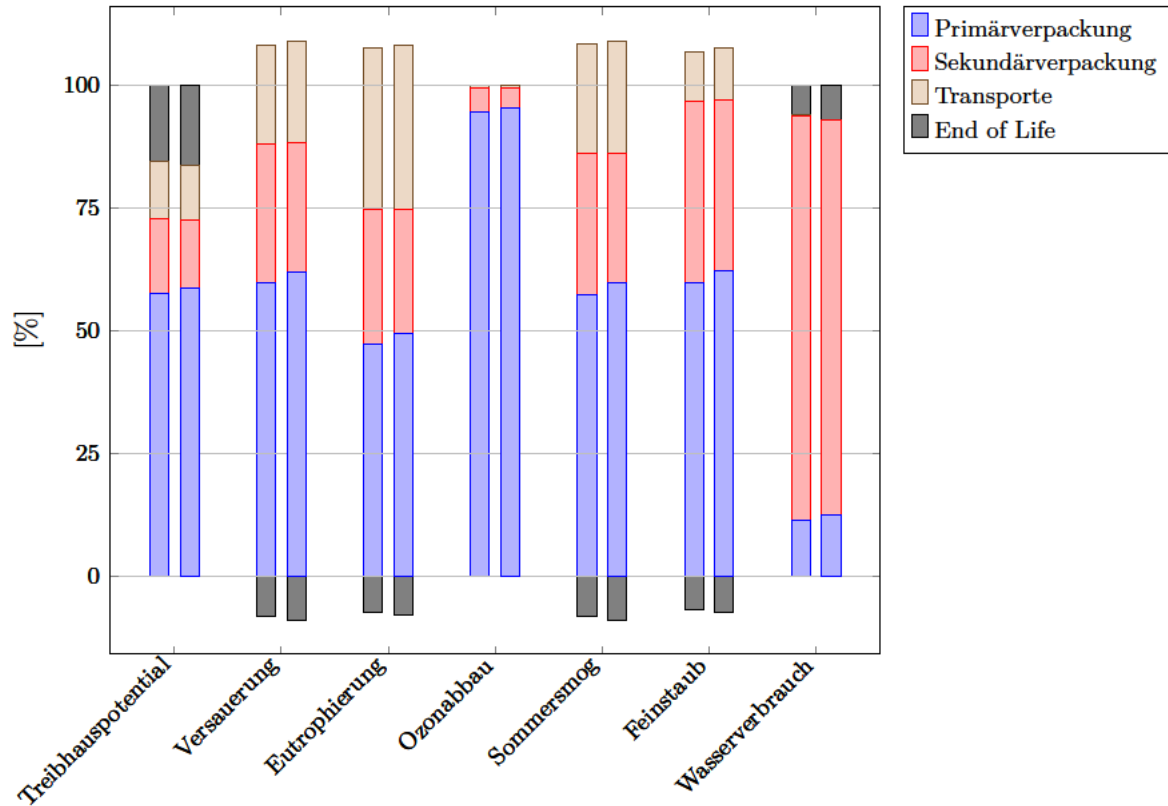


Abb. 5.5 Relative Anteile der Umweltauswirkungen der Produktsysteme PP250 (linke Säulen) und PS500 (rechte Säulen), Absolutwerte siehe Anhang

Werte der Gutschriften die der Verbrennung, da die CO_2 - und in geringerem Maße auch CH_4 -intensive Bereitstellung von Elektrizität und thermischer Erdgas-Energie ersetzt werden kann. Den mit Abstand größten Anteil am Ozonabbau besitzt die Herstellung der Becher und insbesondere das Thermiformen mit einem Prozentsatz von 95%. Für mehr als 80 % des Wasserverbrauchs sind in beiden Produktsystemen Transport- und Verkaufsverpackungen verantwortlich.

Kunststoffbecher mit Kartonmantel

Die Verpackungssysteme PS250K und PS500K zeigen v. a. in der Wirkungskategorie Ozonabbau hohe relative Anteile der Primärverpackung, für die fast ausschließlich der Kartonmantel verantwortlich ist. Durch die hohen Emissionen an Feinstaubpartikel und Schwefeloxiden bei der Produktion zeigt er auch in der Kategorie Feinstaub die größten Auswirkungen innerhalb der Systeme.

Die Aluminium-Platine, deren Massen-Anteil an den Produktsystemen nur ca. 5 % beträgt, zeigt bei der Feinstaubbelastung höhere Auswirkungen als der Kunststoffbecher (ca. 40 % Massenanteil). In der Kategorie Versauerung spielen die Produktion des Kunststoffbechers, der Platine und des Mantels eine ähnlich große Rolle im Bereich von jeweils fast 20 %. In den Kategorien Versauerung, Eutrophierung und Sommersmog zeigt die Verbrennung des Kartons durch hohe NO_x -Emissionen größere Auswirkungen als die von Kunststoff. Beim Treibhauspotential zeigen die Produktion der Kunststoffbecher und deren Verbrennung die größten Anteile im Bereich von rund 30 % bzw. 20 %.

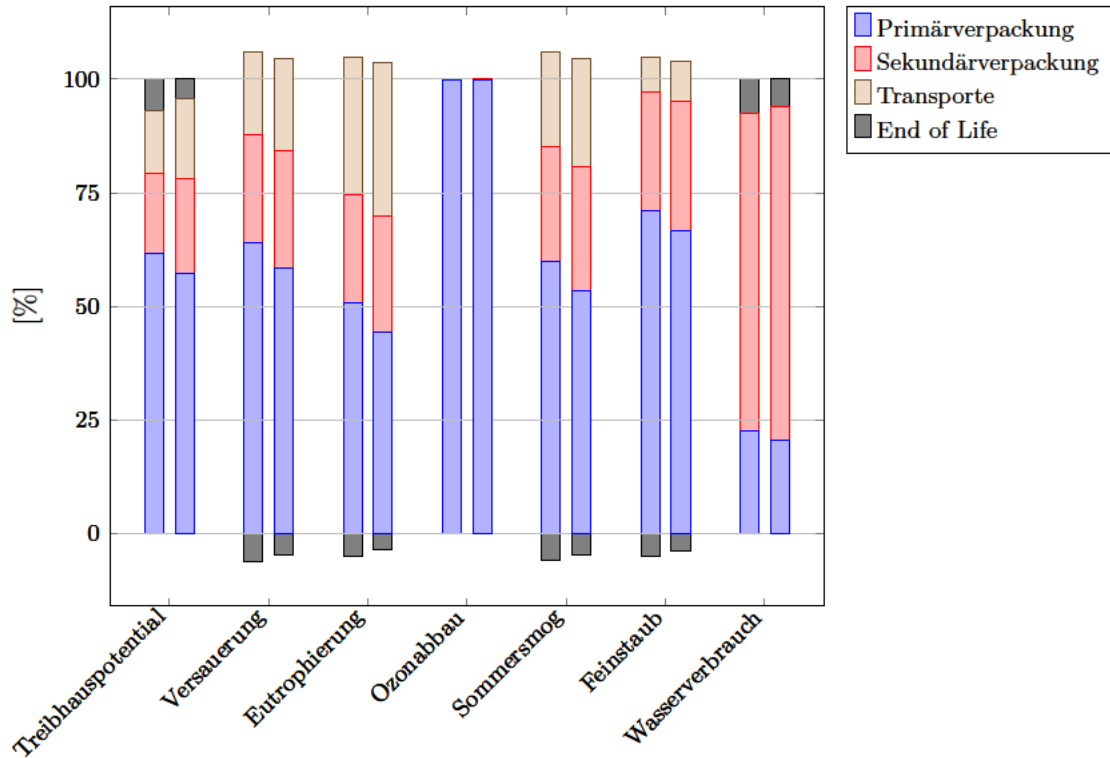


Abb. 5.6 Relative Anteile der Umweltauswirkungen der Produktsysteme PS250K (linke Säulen) und PS500K (rechte Säulen), Absolutwerte siehe Anhang

Direkter Vergleich der Kunststoffsysteme

Die größten Unterschiede zeigen sich in den Kategorien Versauerung, Eutrophierung, Sommersmog und Feinstaub, in denen die verschiedenen Schadstoff-Emissionen der Kunststoffsysteme im Schnitt 90 % geringer sind als jene des Einwegglases. Tendenziell ist das System PS500K das umweltfreundlichste unter den betrachteten Kunststoffsystemen und den ausgewerteten Wirkungskategorien (vgl. Tab. 5.7). Durch den hohen Ausstoß an Schadstoffpartikel bei der Kartonmantelproduktion zeigen die kartonlosen Systeme PP250 und PS500 bei der Feinstaubbelastung geringere Auswirkungen (-15 % bzw. -18 %).

Bedingt durch den größten Kunststoff-Referenzfluss der untersuchten Systeme zeigt

PS500 beim Treibhauspotential die höchsten Werte. In allen anderen Kategorien ist PS250K die Alternative mit den größten Umweltauswirkungen, da dieses System die größte Masse an Primärverpackung benötigt. Vor allem der Kartonmantel, dessen Referenzfluss um fast 30 % größer ist als bei PS500K, ist durch hohe Stickoxid-Emissionen bei der Produktion für diese Ergebnisse verantwortlich.

Die einzige Wirkungskategorie, in der das Einwegglas die umweltfreundlichsten Werte zeigt, ist der stratosphärische Ozonabbau. Hier zeigen die Systeme PS250K und PS500K die mit Abstand größten Auswirkungen. Der Ausstoß an halogenierten, organischen Verbindungen, der auf die Kartonmantel-Produktion zurückzuführen ist, ist hier um das 160-fache (PS500K) bzw. 200-fache (PS250K) höher als bei EWG450.

Tabelle 5.7 Vergleich der Kunststoffsysteme (Die Systeme mit den geringsten und größten Auswirkungen in der jeweiligen Kategorie werden mit ▼ und ▲ gekennzeichnet, die Prozentwerte in den Klammern geben die Steigerung im Vergleich zur umweltfreundlichsten Alternative an)

Wirkungskategorie	PP250	PS250K	PS500	PS500K
Treibhauspotential	+50,90 %	+31,81 %	▲ +53 %	▼
Versauerung	+2,25 %	▲ +20,84 %	▼	+2,32 %
Eutrophierung	+2,48 %	▲ +17,86 %	+0,87 %	▼
Sommersmog	+5,17 %	▲ +20,41 %	+3,66 %	▼
Feinstaubbelastung	+3,69 %	▲ +46,29 %	▼	+22,41 %
Wasserverbrauch	+8,67 %	▲ +28,34 %	▼	+9,78 %

5.6.2 Sensitivitätsanalyse der EoL-Prozesse

Um zu untersuchen, wie empfindlich die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung auf eine Veränderung der verschiedenen Verwertungsquoten reagieren, wird eine Sensitivitätsanalyse der EoL-Prozesse mit den Recyclingzielen der EU-Kommission durchgeführt (SOLL-Szenario, vgl. Tab. 5.4).

Die größten Effekte für die Produktsysteme PP250 und PS500 zeigen sich in der Kategorie Treibhauspotential. In beiden Fällen werden bei einer Erhöhung der Recycling-Quote mehr als 6% Kohlenstoffdioxid-Emissionen durch die verringerte Verbrennungsrate eingespart. Steigerungen der Emissionen zeigen die Ergebnisse in den Kategorien Versauerung,

Eutrophierung, Sommersmog und Feinstaubbelastung. Wie schon die Ergebnisse des Basisszenarios gezeigt haben, übersteigen hier die Gutschriften für die Energiesubstitution die Emissionen bei der Verbrennung. Dies hat zur Folge, dass bei einer Verringerung der Verbrennungsquote weniger Gutschriften ausgestellt werden, wodurch dieser Effekt zwar nicht verloren geht, jedoch deutlich verringert wird. Das System PS500K zeigt in allen Wirkungskategorien die geringsten Veränderungen. Grund dafür ist das kleine Verhältnis zwischen Kunststoffgewicht und Füllinhalt.

5.6.3 Sensitivitätsanalyse der Transportdistanzen

Die vorgenommene Erhöhung der Distributionsdistanzen (vgl. Tab. 5.3) zeigt keinen Einfluss auf den Abbau der stratosphärischen Ozonschicht und den Wasserverbrauch. Erwartungsgemäß sprechen jene Wirkungskategorien sensitiv auf die Erhöhung der Distanzen an, die auf die Verbrennung fossiler Rohstoffe reagieren bzw. durch Schadstoffemissionen von Güterverkehr beeinflusst werden. Dazu zählen:

- Treibhauspotential durch Kohlenstoffdioxid (CO₂)
- Versauerung, Eutrophierung und Sommersmog durch Stickstoffoxide (NO_x)
- Feinstaub durch Feinpartikel (< 2,5 µm)

Durch die in den Datensätzen verwendeten Gewichtskilometer (Gewicht*Distanz) steigen die Umweltauswirkungen mit denselben Prozentsätzen wie die Erhöhung der Distributionsdistanzen von 167 km auf 500 km (Molkerei-Zentrallager) bzw. von 44,5 km, 663 km und 694 km auf 1000 km (Produktion-Molkerei). Gemessen in absoluten Zahlen zeigen sich die größten Emissionserhöhungen bei den Produktsystemen mit den größten Referenzflüssen (Masse, EWG450 und PS250K innerhalb der Gruppe der Kunststoffalternativen). Die relativen Vergrößerungen der Auswirkungen stellt Tabelle 5.8 dar. Tendenziell erhöhen sich die Emissionen des Systems PP250 relativ zum Basisszenario am stärksten, da es die Verpackung mit dem geringsten Gewicht pro funktioneller Einheit darstellt. Am sensitivsten reagiert die Wirkungskategorie Eutrophierung durch die emittierten Stickstoffoxide, die die absoluten Ergebnisse aus dem Basisszenario um bis zu 60 % steigen lassen. Trotz der größten Distanzerhöhung in der Analyse von 44 km

auf 500 km von der Glashütte zur Molkerei, zeigt das Produktsystem EWG450 in allen Kategorien die geringsten relativen Steigerungen.

Tabelle 5.8 Relative Änderungen der Umweltauswirkungen bei Erhöhung der Transportdistanzen im Vergleich zum Basisszenario (Kennzeichnung der größten Steigerungen je Wirkungskategorie mit ▲)

Wirkungskategorie	EWG450	PP250	PS250K	PS500	PS500K
Treibhauspotential	+19,96 %	+21,91 %	+25,60 %	+29,85 %	▲ +32,97 %
Versauerung	+18,79 %	▲ +37,13 %	+32,21 %	+33,32 %	+34,33 %
Eutrophierung	+29,77 %	▲ +59,33 %	+52,99 %	+55,42 %	+58,58 %
Ozonabbau	+00,02 %	▲ +01,25 %	+00,01 %	+01,19 %	+00,01 %
Sommersmog	+25,38 %	▲ +40,94 %	+36,69 %	+36,73 %	+40,31 %
Feinstaubbelastung	+10,30 %	▲ +18,09 %	+13,20 %	+15,39 %	+13,21 %
Wasserverbrauch	+00,20 %	+00,11 %	+00,09 %	+02,99 %	▲ +03,62 %

5.6.4 Normierung

Wie in Kapitel 3.3.3 ausführlich erklärt, wird die Normierung vorgenommen, um Erkenntnisse über die relative Bedeutung der Ergebnisse der Wirkungsabschätzung zu gewinnen. Der PEFCR-Leitfaden der europäischen Kommission stellt hierzu jeweils zwei Normierungsfaktoren für alle 16 angeführten Wirkungskategorien zur Verfügung:

- Globale Normierungsfaktoren
- Globale Normierungsfaktoren pro Person, bezogen auf eine Weltbevölkerung von 6.895.889.018 Menschen

Diese Faktoren beziehen sich auf die jeweiligen globalen Umweltlasten, um der Natur bzw. den Dimensionen heutiger globaler Lieferketten gerecht zu werden (Sala et al., 2017). Die Normierung der Indikatorergebnisse aus Kapitel 3.3.3 zeigt, dass die betrachteten Verpackungssysteme in der Wirkungskategorie Treibhauspotential die größten spezifischen Beiträge liefern. Die niedrigsten normierten Indikatorergebnisse weist die Kategorie Ozonabbau auf.

Tabelle 5.9 Globale Normierung

Wirkungskategorie	NF p. P.	EWG450	PP250	PS250K	PS500	PS500K
Treibhauspotential	$7,76 \cdot 10^{+3}$	$3,64 \cdot 10^{-4}$	$9,43 \cdot 10^{-5}$	$8,24 \cdot 10^{-5}$	$9,61 \cdot 10^{-5}$	$6,25 \cdot 10^{-5}$
Versauerung	$5,55 \cdot 10^{+1}$	$2,96 \cdot 10^{-4}$	$2,76 \cdot 10^{-5}$	$3,26 \cdot 10^{-5}$	$2,70 \cdot 10^{-5}$	$2,76 \cdot 10^{-5}$
Eutrophierung	$1,77 \cdot 10^{+2}$	$2,94 \cdot 10^{-4}$	$2,57 \cdot 10^{-5}$	$2,96 \cdot 10^{-5}$	$2,53 \cdot 10^{-5}$	$2,51 \cdot 10^{-5}$
Ozonabbau	$2,34 \cdot 10^{-2}$	$1,05 \cdot 10^{-9}$	$1,11 \cdot 10^{-9}$	$2,12 \cdot 10^{-7}$	$1,17 \cdot 10^{-9}$	$1,67 \cdot 10^{-7}$
Sommersmog	$4,06 \cdot 10^{+1}$	$2,45 \cdot 10^{-4}$	$2,97 \cdot 10^{-5}$	$3,40 \cdot 10^{-5}$	$2,93 \cdot 10^{-5}$	$2,83 \cdot 10^{-5}$
Feinstaub	$6,37 \cdot 10^{-4}$	$2,06 \cdot 10^{-4}$	$2,11 \cdot 10^{-5}$	$2,97 \cdot 10^{-5}$	$2,03 \cdot 10^{-5}$	$2,49 \cdot 10^{-5}$
Wasserverbrauch	$1,15 \cdot 10^{+4}$	$4,84 \cdot 10^{-5}$	$2,15 \cdot 10^{-5}$	$2,54 \cdot 10^{-5}$	$1,98 \cdot 10^{-5}$	$2,17 \cdot 10^{-5}$

2014 unternahm die EU-Kommission auch einen Versuch, Normierungsfaktoren zu entwickeln, die sich auf die Union beziehen (Benini et al., 2014). Ziel war es, ein umfassendes Bild der Umweltauswirkungen europäischer Konsumprozesse zu erhalten. Tab. 5.9 stellt die normierten Ergebnisse dar, die mit Hilfe dieser Faktoren berechnet wurden. Auch wenn die Faktoren dabei helfen, Auswirkungen auf europäischer Ebene zu skizzieren, warnen Benini et al. vor einer Überinterpretation der Ergebnisse. Dieser ›inländische‹ Ansatz trage z. B. den großen Mengen an importierten Rohstoffen nicht Rechnung, die als Energieträger verwendet werden.

5.7 Diskussion

Mit der normgerechten Erstellung der vergleichenden Ökobilanz von Joghurtbehältnissen wird der aktuelle Stand bzw. die Methodik im Modellieren von Produktsystemen gezeigt. Es kann festgehalten werden, dass sich in allen vier Phasen gemäß ISO 14040 bzw. ISO 14044 individuelle Freiräume für das Modellieren der untersuchten Produktsysteme ergeben. Dieser Umstand eröffnet dem Ersteller der Ökobilanz zahlreiche Möglichkeiten, die Ergebnisse in Richtung der eigenen Interessen zu lenken. Dies ist speziell im Auge zu behalten, wenn unterschiedliche Interessensgruppen die Ergebnisse der Ökobilanz verwenden, um wichtige Entscheidungen zu treffen. Sowohl Produzent als auch Konsument müssen sich mit einer Vielzahl von Fragen betreffend Produktions- und Kaufentscheidungen befassen.

Gerade bei der Untersuchung von recycelten oder recyclebaren Materialien ist bei der Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens auf eine situationsgerechte Allokation

tionsmethode zu achten. Der verwendete *cut off*-Ansatz bietet vor allem bei den vier untersuchten Kunststoffsystemen die Möglichkeit, auf der einen Seite 100 % Primärmaterial zu modellieren und auf der anderen Seite das Recycling des Kunststoffabfalls außerhalb der Systemgrenze zu legen und somit einem anderen Produktsystem zuzuordnen.

Im Zuge der Sachbilanz hat die Datenherkunft und -qualität erheblichen Einfluss auf das Studienergebnis. So müssen beispielsweise generische Datensätze, die von den jeweiligen Interessenvertretungen zur Verfügung gestellt werden (z.B. PP-Pellets von PlasticsEurope), kritisch hinterfragt werden, da mittels Einsatz dieser Daten das Studienergebnis positiv in Richtung Kunststoffbehälter gelenkt werden kann.

In der Phase der Wirkungsabschätzung kann eine Vielzahl an Bewertungsmethoden zu verschiedenen Ergebnissen in ein und derselben Wirkungskategorie führen. Auch dieser Umstand macht es den Studienautor*innen möglich, die Aussagen der Ökobilanz nach deren individuellen Interessen zu beeinflussen. Die Aufnahme weiterer Wirkungskategorien wie Human Toxicity, Environmental Toxicity und Ressourcenabbau in die Wirkungsabschätzung der vorliegenden Diplomarbeit wäre im Hinblick auf die Aussagekraft der Studienergebnisse bedeutsam. Erste Analysen des Ressourcenverbrauchs zeigen ähnliche Trends wie die der bereits untersuchten Kategorien.

Auch in der letzten Phase der Ökobilanz, der Auswertung, kann das Ergebnis unterschiedlich dargestellt werden. Vor allem bieten die Schlussfolgerungen und Empfehlungen der Studienautor*innen an die Adressaten der Ökobilanz bzw. an Entscheidungsträger weitere Möglichkeiten und Freiräume für individuelle Auslegungen.

6 Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurden in mehreren Teilen die theoretischen und praktischen Grundlagen der untersuchten Materialien und verwendeten Methoden erarbeitet, um anschließend eine Ökobilanz von fünf verschiedenen Verpackungsalternativen für Joghurt zu erstellen. Aufgrund dieser Ergebnisse kann der Stand der Praxis in der Methodik und die Möglichkeiten der Beeinflussung von Ergebnissen von Ökobilanzen gezeigt werden.

Hauptfunktion von Verpackungen wie Joghurtbechern, die in vielen Fällen aus PP und PS bestehen, ist die Aufbewahrung und der Schutz von Lebensmitteln. Um diese Aufgaben unter Einhaltung geltender Gesetze & Normen zu erfüllen, verursachen Lebensmittelverpackungen entlang ihres Lebensweges von der Förderung der Rohstoffe bis zur Verwertung der Altmaterialien zahlreiche Umweltauswirkungen. In den letzten Jahren wurden zahlreiche Alternativen wie Einweggläser oder gewichtsreduzierte Becher mit Kartonmantel auf den Markt gebracht, um das wachsende öffentliche Bewusstsein gegenüber der Reduzierung bzw. Vermeidung von Kunststoffabfällen zu befriedigen. Hinter diesen Neuentwicklungen steht neben dem eigentlichen Umweltgedanken nicht zuletzt auch der Wille der Lebensmittelproduzenten, ihr Produkt als nachhaltig zu bewerben. Das macht es für Konsument*innen meist schwierig, die umweltfreundlichste Alternative zu erkennen. Um die Umweltauswirkungen eines Produktes abzuschätzen und zu bewerten, hat sich in den letzten Jahrzehnten v. a. im Verpackungsbereich die Methode der Ökobilanzierung etabliert.

In Kap. 3 wurde die Basischemie von PP, PS und Glas erläutert und die damit verbundenen, gewünschten Eigenschaften dieser Verpackungsmaterialien für den Lebensmittelbereich erörtert. Kalknatron-Silicatglas, das als Einweg-Behälterglas verwendet wird, zeichnet sich durch hohe chemische Beständigkeit aus. Durch diese Eigenschaft eignet sich das Material sehr gut für das werkstoffliche Recycling. Demgegenüber steht durch

hohe Prozesstemperaturen ein großer Energieaufwand. Die Polymere PP und PS zeichnen sich wegen der Zugabe verschiedener Additive beim Herstellungsprozess zwar durch eine niedrige Verarbeitungstemperatur und hohe Steifigkeit aus, durch ihre begrenzte Beständigkeit gegenüber Reinigungschemikalien sind sie im Lebensmittelbereich im Moment aber nicht effizient recycelbar.

Mit der Norm *ISO14040* werden die Grundsätze und Rahmenbedingungen einer Ökobilanz vorgegeben. *ISO14044* gibt weiters genauere Anleitungen zur Durchführung der Methode vor, die aus den vier Phasen *Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens*, *Sachbilanz*, *Wirkungsabschätzung* und *Auswertung* besteht. In den letzten Jahren wurden einige Versuche unternommen, verschiedene Ökobilanzen durch ein einheitliches Vorgehen bei der Durchführung vergleichbar zu machen.

Um einen Einblick in die aktuelle ökobilanzielle Praxis im Sektor der Lebensmittelverpackungen zu gewinnen, wurde eine strukturierte Literaturrecherche mit Hilfe der wissenschaftlichen Suchmaschine *Google Scholar* durchgeführt. Seit 2015 wurden auf verschiedenen Datenbanken 19 Studien (Systemgrenze Europa) veröffentlicht, die verschiedene Umweltauswirkungen von Lebensmittelverpackungen mittels Ökobilanz bewerten. Während die Herstellung der verschiedenen Inhalte (Olivenöl, Wein, etc.) nur teilweise berücksichtigt wird, legen alle Autoren hohen Wert auf die normgerechte Durchführung der Methode der Ökobilanzierung. Auch auf die genaue Abbildung der Produktions- und Distributionsprozesse entlang des Lebensweges der Verpackung, teilweise unter Verwendung von spezifischen Primärdaten, wird in den meisten Fällen geachtet. Trotz dieser normgerechten Durchführung ist ein Vergleich verschiedener Studien schwierig, da unterschiedliche Bewertungsmethoden, unterschiedlich gesetzte Systemgrenzen und verschiedene generische Datensätze zum Einsatz kommen.

Die sieben in der Literaturrecherche gefundenen Berichte, die u. a. Einwegglas untersuchen, kommen alle zum Ergebnis, dass dieses Material die größten Umweltauswirkungen zeigt. Jedoch ist anzumerken, dass diese Auswirkungen bei Einführung eines Mehrwegsystems - vor allem bei kurzen Transportdistanzen, die einen großen Einfluss in der Bilanzierung haben - erheblich reduziert werden können und somit das Potential von Glas in der Wiederverwendung ausgeschöpft wird. Zwei weitere Studien zeigen, dass recycelte Kunststoffe im Sinne des Tertiärkreislaufes (100 % rPET) noch geringere Umweltauswirkungen in den untersuchten Wirkungskategorien aufweisen als Mehrwegglas. Diese

Ergebnisse machen deutlich, welches Potential Kunststoffe hätten, wenn sie sortenrein gesammelt werden und in einem geschlossenen Kreislauf wieder als Lebensmittelverpackung verwendet werden können.

Im zweiten Forschungsteil der vorliegenden Arbeit wurde eine eigene Ökobilanz verschiedener Joghurtbehältnisse durchgeführt. Untersucht wurden die Umweltauswirkungen von Einwegglas, Kunststoffbechern und gewichtsreduzierten Kunststoffbechern mit Kartonsleeve. Abgesehen vom Abbau der stratosphärischen Ozonschicht zeigt Einwegglas in allen untersuchten Wirkungskategorien die größten Umweltauswirkungen, die teilweise das Zehnfache des niedrigsten Ergebnisses übersteigen. Die geringsten Auswirkungen zeigen in allen anderen Fällen die zwei Kunststoffbecher mit einem Füllvolumen von 500 g. Hohe Emissionswerte in Verbindung mit einem hohen Gewichtsanteil der Verpackung am befüllten Becher machen die Kunststofflösung mit Kartonsleeve (250 g) nach Einwegglas in sechs der sieben untersuchten Wirkungskategorien zur Alternative mit den größten Auswirkungen. Nur die hohen CO₂-Emissionen bei der Produktion und Verbrennung des 500 g-Kunststoffbechers führen in der Kategorie Treibhauspotential zu den höchsten Werten der vier untersuchten Kunststofflösungen. Während die Produktion von Karton für die Primär-, Transport- und Verkaufsverpackungen große Mengen an Wasser verbraucht, ist die Aluminium- und Weißblechproduktion durch einen hohen Ausstoß an Feinstaubpartikel gekennzeichnet.

7 Ausblick

Die Literaturrecherche hat gezeigt, dass es aufgrund der vielen verschiedenen Annahmen, die notwendigerweise gemacht werden müssen, schwierig ist, verschiedene Ökobilanzen miteinander vergleichbar zu machen. In einem größeren Blickwinkel jedoch kommen alle Ökobilanzen zum Ergebnis, dass Behälter für Lebensmittel aus Einwegglas die Alternative mit den größten Umweltauswirkungen darstellt. Auch die vorliegende Ökobilanz kommt zu dem Ergebnis, dass im Vergleich zu PP und PS Einwegglas die Alternative mit den größten Auswirkungen darstellt. Vor allem die Kunststoffalternativen mit Kartonmantel zeigen eine hohe Resonanz auf die geeigneten Recyclingaktivitäten. Werden diese nicht durchgeführt, zeigt sich kein relevanter Unterschied zu den herkömmlichen Kunststoffbechern. Dementsprechend wäre es notwendig, die Recyclingquoten bzw. das Verständnis der Bevölkerung über das richtige Trennen von Karton und Kunststoffen zu erhöhen. In diesem Zusammenhang muss auch die Forschung im Bereich des effizienten Recyclings, d.h. die Trennung von gemischten Kunststoffströmen inklusive Klebe- und Farbreste vorangetrieben werden.

Während der Erstellung der Ökobilanz in der vorliegenden Diplomarbeit wurde deutlich, dass eine große Anzahl an Entscheidungen hinsichtlich des Untersuchungsrahmens und der Modellierung der untersuchten Produktsysteme getroffen werden muss. Dieser Umstand eröffnet Möglichkeiten, die Ergebnisse zugunsten bestimmter Interessen zu manipulieren. Um das Verständnis der angesprochenen Parteien über die Auswirkungen der getroffenen Entscheidungen auf das Ergebnis einer Ökobilanz zu erweitern, bieten weiteren Forschungsbedarf vor allem folgende Fragen:

- Wie verändern sich die Ergebnisse der Ökobilanz, wenn Datensätze ausgetauscht werden oder das Produktsystem auf einer anderen Datenbank modelliert wird?

- Wie verändern sich die Ergebnisse der Ökobilanz, wenn die Systemgrenze enger bzw. weiter gesetzt wird, insbesondere was Cut Off- bzw. Allokationsentscheidungen angeht?

Die Auswertung der Ergebnisse der Wirkungsabschätzung in Kapitel 5.6 hat gezeigt, dass die Kunststoffsysteme, die ein größeres Verhältnis zwischen Füllinhalt und Verpackungsgewicht aufweisen, tendenziell geringere Umweltauswirkungen haben. Im österreichischen Lebensmitteleinzelhandel werden u. a. Kunststoffkübel mit einem Fassungsvermögen von 1000 g zum Verkauf angeboten. Möglicher Inhalt weiterführender Studien könnte die Analyse anderer auf dem Markt erhältlicher Verpackungssysteme wie dieser sein.

Die in Kapitel 4 untersuchten Studien schlossen teilweise auch die Produktion des Inhaltes in die festgelegten Systemgrenzen ein. Um die in den letzten Jahren immer größer werdende Diskussion um die Umweltauswirkungen der Lebensmittelindustrie und insbesondere die der Milchindustrie aufzugreifen, wäre auch die Analyse des Inhalts ›Joghurt‹ aufschlussreich. Auch neue Produkte wie Haferdrinks und -joghurts, die Milchprodukte ersetzen sollen und geringere Umweltauswirkungen zeigen, könnten für einen Vergleich herangezogen werden.

Einige der in Kapitel 4 analysierten Ökobilanzen untersuchen auch den Einfluss verschiedener Produktsysteme auf Lebensmittelabfall, z. B. durch die Analyse der Entleerbarkeit von Behältnissen. Wohner et al. kommen in ihrer Studie zum Ergebnis, dass die indirekten Umweltauswirkungen durch Lebensmittelabfall größer sind als die direkten Auswirkungen der Verpackungsproduktion. Weiters kommt die Studie zum Schluss, dass auch die Produktion des Inhaltes weit höhere Umweltauswirkungen zeigt, als die der Behälter. Für die Durchführung zukünftiger Ökobilanzierungen kann also empfohlen werden, auch die Auswirkungen dieser Aspekte zu untersuchen um bereits vorhandene Studienergebnisse entweder zu widerlegen oder zu untermauern.

Die in Kap. 5 durchgeführte Ökobilanzierung basiert auf der Annahme, dass die untersuchten Verpackungsmaterialien entweder recycelt, verbrannt oder deponiert werden. Durch Littering, das in Europa und weltweit ein großes Problem darstellt, verschwindet jedoch ein großer Teil des Abfalls aus dem untersuchbaren Stoffstrom. Während Behälterglas bereits zu einem sehr großen Anteil in den Materialkreislauf zurückgeführt

wird, hat das ungeordnete Wegwerfen von Kunststoffverpackungen und die damit verbundene Freisetzung von Makro- und Mikroplastik großen Einfluss auf die biologische Vielfalt in verschiedenen Ökosystemen. Weiterführende Studien könnten die Größe und die ökologischen Auswirkungen auf die Biodiversität dieser Stoffströme in Bezug auf Lebensmittelverpackungen untersuchen.

Die angeführten Probleme, Fragestellungen und Szenarien konnten aufgrund des Umfangs der vorliegenden Diplomarbeit nicht geklärt werden, können aber Basis für weiterführende Arbeiten und Studien bilden.

Quellenverzeichnis

- Abejón, R. et al. (2020). »When plastic packaging should be preferred: Life cycle analysis of packages for fruit and vegetable distribution in the Spanish peninsular market«. In: *Resources, Conservation & Recycling* 155.104666, S. 1–16. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104666>.
- Accorsi, R.; Versari, L.; Manzini, R. (2015). »Glass vs. Plastic: Life Cycle Assessment of Extra-Virgin Olive Oil Bottles across Global Supply Chains«. In: *Sustainability* 7.3, S. 2818–2840. DOI: <https://doi.org/10.3390/su7032818>.
- Amienyo, D.; Azapagic, A. (2016). »Life cycle environmental impacts and costs of beer production and consumption in the UK«. In: *Int J Life Cycle Assess* 21.4, S. 492–509. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1028-6>.
- ARA (2019). *Rohstoff Kunststoff - Ressourcen und Kreislaufwirtschaft neu denken und neu machen*. URL: https://www.ara.at/fileadmin/user_upload/Downloads/Kunststoffbroschuere/ARA_Kunststoffbroschuere.pdf (besucht am 21.02.2022).
- Archodoulaki, M. (2021). *Joghurtverpackungen im heimischen Restmüll*. Experteninterview. Technische Universität Wien.
- Baron, M. et al. (2017). »Ressourcen- und Klimaschutz durch Kreislaufwirtschaft«. In: *Einführung in die Kreislaufwirtschaft*. Hrsg. von M. Kranert. 5. Aufl. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH.
- Benini, L. et al. (2014). »Normalisation method and data for Environmental Footprints«. In: DOI: 10.2788/16415.
- Berglandmilch eGen (2019). *Comeback der Mehrweg-Milchflasche*. URL: <https://www.berglandmilch.at/de/presse/comeback-der-mehrweg-milchflasche> (besucht am 31.01.2022).
- (2021). *Der nächste Schritt in Richtung nachhaltige Verpackungen - Joghurts im Mehrwegglas*. URL: <https://www.berglandmilch.at/de/presse/comeback-der-mehrweg-milchflasche> (besucht am 31.01.2022).

- Bergmann, W.; Leyens, C. (2021). *Werkstofftechnik 2. Anwendung*. 5. Aufl. München: Carl Hanser Verlag.
- Bergmann, W.; Leyens, C.; Fleck, C. (2013). *Werkstofftechnik 1. Grundlagen*. 7. Aufl. München: Carl Hanser Verlag.
- Bertolini, M. et al. (2016). »Comparative Life Cycle Assessment of Packaging Systems for Extended Shelf Life Milk«. In: *Packaging Technology and Science* 29.10, S. 525–546. DOI: <https://doi.org/10.1002/pts.2235>.
- Blesl, M.; Langfeld, R. (2017). *Energieeffizienz in der Industrie*. Berlin: Springer-Verlag GmbH Deutschland.
- BMK (2021). *Die Bestandsaufnahme der Abfallwirtschaft in Österreich - Statusbericht 2021. Statusbericht 2021 (Referenzjahr 2019)*. Techn. Ber. Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie Mobilität, Innovation und Technologie.
- BMSGPK (2021). *Österreichisches Lebensmittelbuch. Kapitel / B 36 / Gebrauchsgegenstände*.
- Boesen, S.; Bey, N.; Niero, M. (2019). »Environmental sustainability of liquid food packaging: Is there a gap between Danish consumers' perception and learnings from life cycle assessment?« In: *Journal of Cleaner Production* 210, S. 1193–1206. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.055>.
- Bonten, C. (2020). *Kunststofftechnik. Einführung und Grundlagen*. 3. Aufl. München: Carl Hanser Verlag.
- Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (2020). *Die Bestandsaufnahme der Abfallwirtschaft in Österreich*. Statusbericht. Wien: Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie.
- Cobbina, N. (2018). *Bio-Milch in Glasflaschen wird den Planeten nicht retten*. URL: <https://fm4.orf.at/stories/2922501/> (besucht am 31.01.2022).
- Conte, A. et al. (2015). »Environmental implications of food loss probability in packaging design«. In: *Food Research International* 78, S. 11–17. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2015.11.015>.
- DIN EN ISO 14040 (2006). »Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen (ISO 14040:2006)«. In:
- DIN EN ISO 14044 (2006). »Umweltmanagement — Ökobilanz — Anforderungen und Anleitungen (ISO 14044:2006 + Amd 1:2017)«. In:

- Fehring, R. (2019). *Ökobilanz für Gebinde aus PET und anderen Materialien*. Bericht. Lindau: c7-consult e.U.
- Ferrara, C.; Feo, G. D. (2020). »Comparative life cycle assessment of alternative systems for wine packaging in Italy«. In: *Journal of Cleaner Production* 259.120888, S. 1–12. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120888>.
- Frischknecht, R. (2020). *Lehrbuch der Ökobilanzierung*. Berlin: Springer-Verlag GmbH Deutschland.
- Gallego-Schmid, A.; F. Mendoza, J.; Azapagic, A. (2019). »Environmental impacts of takeaway food containers«. In: *Journal of Cleaner Production* 211, S. 417–427. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.220>.
- Garfi, M. et al. (2016). »Life cycle assessment of drinking water: Comparing conventional water treatment, reverse osmosis and mineral water in glass and plastic bottles«. In: *Journal of Cleaner Production* 137, S. 997–1003. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.218>.
- Geueke, B.; Groh, K.; Muncke, J. (2018). »Food packaging in the circular economy: Overview of chemical safety aspects for commonly used materials«. In: *Journal of Cleaner Production* 193, S. 491–505. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.05.005>.
- Ingarao, G. et al. (2016). »Life cycle energy and CO2 emissions analysis of food packaging: an insight into the methodology from an Italian perspective«. In: *International Journal of Sustainable Engineering* 10.1, S. 31–43. DOI: <https://doi.org/10.1080/19397038.2016.1233296>.
- Ingrao, C. et al. (2015). »Foamy polystyrene trays for fresh-meat packaging: Life-cycle inventory data collection and environmental impact assessment«. In: *Food Research International* 76.3, S. 418–426. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.foodres.2015.07.028>.
- IPCC (2014). »Anthropogenic and Natural Radiative Forcing«. In: *Climate Change 2013 – The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, S. 659–740. DOI: 10.1017/CB09781107415324.018.
- Jungbluth, N. (2021). »Bewertungsmethoden in der Ökobilanzierung«. In:
- Kaiser, W. (2021). *Kunststoffchemie für Ingenieure. Von der Synthese bis zur Anwendung*. 5. Aufl. München: Carl Hanser Verlag.

- Kaßmann, M., Hrsg. (2014). *Grundlagen der Verpackung. Leitfaden für fächerübergreifende Verpackungsausbildung*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- Klöppfer, W.; Grahl, B. (2009). *Ökobilanz (LCA). Ein Leitfaden für Ausbildung und Beruf*. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
- Koltzenburg, S.; Nuyken, O.; Maskos, M. (2014). *Polymere. Synthese, Eigenschaften und Anwendungen*. Berlin und Heidelberg: Springer Spektrum.
- EU-Kommission (2004). *Verordnung (EG) Nr. 1935/2004 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 27. Oktober 2004 über Materialien und Gegenstände, die dazu bestimmt sind, mit Lebensmitteln in Berührung zu kommen*.
- (2008). *Verordnung (EG) Nr. 282/2008 der Kommission vom 27. März 2008 über Materialien und Gegenstände aus recyceltem Kunststoff, die dazu bestimmt sind, mit Lebensmitteln in Berührung zu kommen*.
 - (2011). *Verordnung (EU) Nr. 10/2011 der Kommission vom 14. Januar 2011 über Materialien und Gegenstände aus Kunststoff, die dazu bestimmt sind, mit Lebensmitteln in Berührung zu kommen*.
 - (2015). *Den Kreislauf schließen – Ein Aktionsplan der EU für die Kreislaufwirtschaft*.
 - (2017). »PEFCR Guidance document. Guidance for the development of Product Environmental Footprint Category Rules (PEFCRs), version 6.3«. In:
 - (2018). *Kreislaufwirtschaft: Neue Vorschriften – EU übernimmt globale Vorreiterrolle in Abfallbewirtschaftung und Recycling*. Pressemitteilung.
- Landi, D.; Germani, M.; Marconi, M. (2019). »Analyzing the environmental sustainability of glass bottles reuse in an Italian wine consortium«. In: *Procedia CIRP* 80, S. 399–404. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.procir.2019.01.054>.
- Maga, D.; Hiebel, M.; Aryan, V. (2019). »A Comparative Life Cycle Assessment of Meat Trays Made of Various Packaging Materials«. In: *Sustainability* 11.5324. DOI: <https://doi.org/10.3390/su11195324>.
- Martens, H.; Goldmann, D. (2016). *Recyclingtechnik. Fachbuch für Lehre und Praxis*. 2. Aufl. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH.
- Menges, G.; Haberstroh, E. (2011). *Menges Werkstoffkunde Kunststoffe*. 6. Aufl. München: Hanser.
- Ryberg, M.; Laurent, A.; Hauschild, M. (2021). *Mapping of global plastics losses to the environment. With a particular focus on marine environment*. Techn. Ber. United Nations Environment Programme.

- Sala, S. et al. (2017). »Global normalisation factors for the Environmental Footprint and Life Cycle Assessment«. In: DOI: 10.2760/88930.
- Schaeffer, H.; Langfeld, R. (2020). *Werkstoff Glas. Alter Werkstoff mit großer Zukunft*. Berlin: Springer-Verlag GmbH Deutschland.
- Seppälä, J. et al. (2006). »Country-dependent Characterisation Factors for Acidification and Terrestrial Eutrophication Based on Accumulated Exceedance as an Impact Category Indicator«. In: *Int J Life Cycle Assess* 11, S. 403–416. DOI: <https://doi.org/10.1065/lca2005.06.215>.
- Simon, B.; Ben Amor, M.; Földényi, R. (2016). »Life cycle impact assessment of beverage packaging systems: focus on the collection of post-consumer bottles«. In: *Journal of Cleaner Production* 112.1, S. 238–248. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.06.008>.
- Stefanini, R. et al. (2021). »Plastic or glass: a new environmental assessment with a marine litter indicator for the comparison of pasteurized milk bottles«. In: *Int J Life Cycle Assess* 26, S. 767–784. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11367-020-01804-x>.
- Tua, C.; Grosso, M.; Rigamonti, L. (2020). »Reusing glass bottles in Italy: A life cycle assessment evaluation«. In: *Procedia CIRP* 90, S. 192–197. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.01.094>.
- UNEP (2016). *Global Guidance for Life Cycle Impact Assessment Indicators. Volume 1*. – (2018). *Single-use Plastics: A Roadmap for Sustainability*. Rev. ed., pp. vi; 6.
- van der Harst, E.; Potting, J.; Kroeze, C. (2016). »Comparison of different methods to include recycling in LCAs of aluminium cans and disposable polystyrene cups«. In: *Waste Management* 48, S. 565–583. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.09.027>.
- Van Eygen, E.; Laner, D.; Fellner, J. (2018). »Circular economy of plastic packaging: Current practice and perspectives in Austria«. In: *Waste Management* 72, S. 55–64. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.11.040>.
- van Zelm, R. et al. (2008). »European characterization factors for human health damage of PM10 and ozone in life cycle impact assessment«. In: *Atmospheric Environment* 42.3, S. 441–453. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2007.09.072>.
- WMO (2018). »Appendix A«. In: *Update on Ozone-Depleting Substances (ODSs) and Other Gases of Interest to the Montreal Protocol*. World Meteorological Organization.

Wohner, B. et al. (2020). »Environmental and economic assessment of food-packaging systems with a focus on food waste. Case study on tomato ketchup«. In: *Science of The Total Environment* 738.139846. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139846>.

Abbildungsverzeichnis

1.1	Recyclingkreisläufe	4
1.2	Kunststoffbedarf nach Industriezweigen	6
3.1	Strukturformeln von PP und PS	14
3.2	Schneckenstritzgussmaschine	16
3.3	Thermoformprozess	16
3.4	Blasen von Behälterglas	19
3.5	Phasen einer Ökobilanz	21
3.6	Systemfließbild eines Produktsystems	23
4.1	Methodisches Vorgehen bei der Literaturrecherche	29
5.1	Untersuchte Produktsysteme der Ökobilanz	42
5.2	Systemfließbild der untersuchten Produktsysteme	43
5.3	Ergebnisse in der Wirkungskategorie Treibhauspotential	56
5.4	Umweltauswirkungen von EWG450	59
5.5	Umweltauswirkungen von PP250 und PS500	60
5.6	Umweltauswirkungen von PS250K und PS500K	62

Tabellenverzeichnis

1.1	Abfallströme und Verwertungswege von PP und PS (vgl. Van Eygen et al., 2018)	8
3.1	Erklärung wichtiger Begriffe in der ökobilanziellen Praxis	26
4.1	Identifizierte Ökobilanzen	30
4.2	Identifizierte Wirkungskategorien	32
4.3	Identifizierte Verpackungsmaterialien	36
5.1	Gewicht und Referenzflüsse der untersuchten Produktsysteme	47
5.2	Verkaufs- und Transportverpackungen	49
5.3	Transportdistanzen	50
5.4	Verwertungsquoten: Basisszenario und EoL-Sensitivitätsanalyse	51
5.5	Ausgewählte Wirkungskategorien	55
5.6	Absolute Ergebnisse der untersuchten Wirkungskategorien	56
5.7	Vergleich der Kunststoffsysteme	63
5.8	Sensitivitätsanalyse der Transportdistanzen	65
5.9	Globale Normierung	66
A.1	Datenherkunft der Ökobilanzen	83
A.2	Verwendete Datensätze (Primärverpackung)	84
A.3	Verwendete Datensätze (Verkaufs- und Transportverpackung)	84
A.4	Verwendete Datensätze (Transporte)	84
A.5	Verwendete Datensätze End of Life	85
A.6	Ergebnisse EWG450, Wirkungskategorie Treibhauspotential	86
A.7	Ergebnisse EWG450, Wirkungskategorie Versauerung	86
A.8	Ergebnisse EWG450, Wirkungskategorie Eutrophierung	87

Tabellenverzeichnis

A.9	Ergebnisse EWG450, Wirkungskategorie Ozonabbau	87
A.10	Ergebnisse EWG450, Wirkungskategorie Sommersmog	88
A.11	Ergebnisse EWG450, Wirkungskategorie Feinstaubbelastung	88
A.12	Ergebnisse EWG450, Wirkungskategorie Wasserverbrauch	89
A.13	Ergebnisse PP250, Wirkungskategorie Treibhauspotential	90
A.14	Ergebnisse PP250, Wirkungskategorie Versauerung	90
A.15	Ergebnisse PP250, Wirkungskategorie Eutrophierung	91
A.16	Ergebnisse PP250, Wirkungskategorie Ozonabbau	91
A.17	Ergebnisse PP250, Wirkungskategorie Sommersmog	92
A.18	Ergebnisse PP250, Wirkungskategorie Feinstaubbelastung	92
A.19	Ergebnisse PP250, Wirkungskategorie Wasserverbrauch	93
A.20	Ergebnisse PS250K, Wirkungskategorie Treibhauspotential	94
A.21	Ergebnisse PS250K, Wirkungskategorie Versauerung	95
A.22	Ergebnisse PS250K, Wirkungskategorie Eutrophierung	96
A.23	Ergebnisse PS250K, Wirkungskategorie Ozonabbau	97
A.24	Ergebnisse PS250K, Wirkungskategorie Sommersmog	98
A.25	Ergebnisse PS250K, Wirkungskategorie Feinstaubbelastung	99
A.26	Ergebnisse PS250K, Wirkungskategorie Wasserverbrauch	100
A.27	Ergebnisse PS500, Wirkungskategorie Treibhauspotential	101
A.28	Ergebnisse PS500, Wirkungskategorie Versauerung	101
A.29	Ergebnisse PS500, Wirkungskategorie Eutrophierung	102
A.30	Ergebnisse PS500, Wirkungskategorie Ozonabbau	102
A.31	Ergebnisse PS500, Wirkungskategorie Sommersmog	103
A.32	Ergebnisse PS500, Wirkungskategorie Feinstaubbelastung	103
A.33	Ergebnisse PS500, Wirkungskategorie Wasserverbrauch	104
A.34	Ergebnisse PS500K, Wirkungskategorie Treibhauspotential	105
A.35	Ergebnisse PS500K, Wirkungskategorie Versauerung	106
A.36	Ergebnisse PS500K, Wirkungskategorie Eutrophierung	107
A.37	Ergebnisse PS500K, Wirkungskategorie Ozonabbau	108
A.38	Ergebnisse PS500K, Wirkungskategorie Sommersmog	109
A.39	Ergebnisse PS500K, Wirkungskategorie Feinstaubbelastung	110
A.40	Ergebnisse PS500K, Wirkungskategorie Wasserverbrauch	111

A Anhang

A.1 Diverses

Tabelle A.1 Spezifische (S) und generische (G) Daten der 19 identifizierten Ökobilanzen in den Kategorien Materialeinsatz (ME), Energieeinsatz (EE), Transportdistanzen (TD), Energieform (EF), Transportform (TF) und Material (M)

Ökobilanz	ME	EE	TD	EF	TF	M
Abejón et al., 2020	S	G	S	G	G	G
Accorsi et al., 2015	S	G	S	G	G	G
Amienyo et al., 2016	S	S	S	G	G	G
Bertolini et al., 2016	S	S	G	G	G	G
Boesen et al., 2019	S	G	G	G	G	G
Conte et al., 2015	S	G	G	G	G	G
Fehringer, 2019	S	S	G	G	G	G
Ferrara et al., 2020	S	S	G	G	G	G
Gallego-Schmid et al., 2019	S	S	S	G	G	G
Garfí et al., 2016	S	G	G	G	G	G
Ingarao et al., 2016	S	S	S	G	G	G
Ingrao et al., 2015	S	G	S	G	G	G
Landi et al., 2019	S	S	S	G	G	G
Maga et al., 2019	S	S	S	G	G	G
Simon et al., 2016	S	G	G	G	G	G
Stefanini et al., 2021	S	S	G	G	G	G
Tua et al., 2020	S	S		G	G	G
van der Harst et al., 2016	S	S	G	G	G	G
Wohner et al., 2020	S	G	G	G	G	G

Tabelle A.2 Verwendete Datensätze (Primärverpackung)

Teilsystem	Datensatz	Quelle
Produktion Behälterglas	EU-28: Container glass	Sphera
Produktion PP-Granulat	EU-28: Polypropylene, PP, granulate	Plastics Europe
Produktion PS-Granulat	D: Polystyrene granulate (PS) mix	Sphera
Thermoformen	EU-28+EFTA: Thermoforming, production mix, at plant, plastic thermoforming, 25% loss, 2.5 MJ electricity, 0.5 MJ	thinkstep
Produktion Kartonsleeve	EU-28+EFTA: Kraft paper, uncoated	thinkstep
Produktion Schraubdeckel	EU-28+EFTA: Cap, tin plated steel	thinkstep
Produktion Aluminiumplatine	EU-28: Aluminium foil	Sphera

Tabelle A.3 Verwendete Datensätze (Verkaufs- und Transportverpackung)

Teilsystem	Datensatz	Quelle
Stretchfolie	RER: Polyethylene film (PE-LD)	Plastics Europe
Kartonplatte	EU-28+EFTA: Carton board	thinkstep
Karton & Tray	EU-28+EFTA: Carton box	thinkstep

Tabelle A.4 Verwendete Datensätze (Transporte)

Teilsystem	Datensatz	Quelle
Produzent-Molkerei	EU-28: Articulated lorry transport incl. fuel, Euro 0-6 mix, 40 t total weight, 27 t max payload	Sphera
Molkerei-Zentrallager	EU-28+3: Articulated lorry transport, Euro 5, Total weight 28-32 t, cooled	Sphera

Tabelle A.5 Verwendete Datensätze End of Life

Teilsystem	Datensatz	Quelle
Verbrennungsanlage Kunststoffbecher	EU-28: Plastic packaging in municipal waste incineration plant	Sphera
Verbrennungsanlage Kartonsleeve	EU-28: Paper and board (water 0%) in waste incineration plant	Sphera
Gutschrift Elektrische Energie	EU-28: Electricity grid mix	Sphera
Gutschrift Thermische Energie	EU-28: Thermal energy from natural gas	Sphera
Deponie Behälterglas	EU-28: Inert matter (Glass) on landfill	Sphera
Deponie Kunststoffbecher	EU-28: Plastic waste on landfill	Sphera
Deponie Schraubdeckel	EU-28: Inert matter (Steel) on landfill	Sphera
Deponie Aluminiumplatine	EU-28: Inert matter (Aluminium) on landfill	Sphera

A.2 Wirkungsabschätzung EWG450

Tabelle A.6 Wirkungskategorie Treibhauspotential [kg CO₂-Äqu.]

Teilsystem	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	Sonstige	Summe
Herstellung Behälterglas	1,83E+00	1,07E-01	5,10E-03	7,67E-03	1,94E+00
Herstellung Schraubdeckel	4,86E-01	3,76E-02	1,53E-03	6,24E-03	5,31E-01
Tray Molkerei-Zentrallager	1,28E-01	1,07E-02	1,52E-03	2,22E-03	1,42E-01
Transport Molkerei-Zentrallager	1,15E-01	5,70E-03	3,20E-04	2,96E-03	1,24E-01
Karton Produzent-Molkerei	3,56E-02	2,98E-03	4,22E-04	6,17E-04	3,96E-02
Transport Produzent-Molkerei	1,73E-02	8,86E-04	2,64E-04	2,53E-04	1,87E-02
Stretchfolie Molkerei-Zentrallager	8,21E-03	3,08E-03	1,93E-10	3,00E-05	1,13E-02
Stretchfolie Produzent-Zentrallager	5,37E-03	2,02E-03	1,26E-10	1,97E-05	7,41E-03
Deponie (Behälterglas)	5,37E-03	2,82E-04	2,94E-05	6,77E-05	5,75E-03
Deponie (Schraubdeckel)	2,79E-04	1,46E-05	1,53E-06	3,51E-06	2,98E-04
Summe	2,63E+00	1,70E-01	9,18E-03	2,01E-02	2,83E+00

Tabelle A.7 Wirkungskategorie Versauerung [mol H⁺-Äqu.]

Teilsystem	SO ₂	NO	NO ₂	Sonstige	Summe
Herstellung Behälterglas	5,30E-03	5,13E-03	3,78E-04	2,18E-03	1,30E-02
Herstellung Schraubdeckel	1,28E-03	4,80E-05	7,43E-04	8,61E-06	2,07E-03
Tray Molkerei-Zentrallager	1,53E-04	3,81E-05	2,29E-04	9,85E-05	5,18E-04
Transport Molkerei-Zentrallager	7,68E-05	3,12E-04	4,29E-05	2,25E-06	4,34E-04
Karton Produzent-Molkerei	4,26E-05	1,06E-05	6,36E-05	2,74E-05	1,44E-04
Transport Produzent-Molkerei	5,89E-06	9,31E-05	5,44E-06	5,44E-06	1,10E-04
Stretchfolie Molkerei-Zentrallager	4,38E-05	0,00E+00	1,60E-05	3,05E-11	5,98E-05
Deponie (Behälterglas)	2,05E-05	5,74E-07	6,25E-08	1,69E-05	4,07E-05
Stretchfolie Produzent-Zentrallager	2,87E-05	0,00E+00	1,05E-05	2,00E-11	3,91E-05
Deponie (Schraubdeckel)	1,06E-06	2,98E-08	3,24E-09	1,02E-06	2,11E-06
Summe	6,95E-03	5,63E-03	1,49E-03	2,34E-03	1,64E-02

Tabelle A.8 Wirkungskategorie Eutrophierung [mol N-Äqu.]

Teilsystem	NO	NO ₂	NO _x	Sonstige	Summe
Herstellung Behälterglas	2,95E-02	2,18E-03	7,93E-03	2,81E-03	4,24E-02
Herstellung Schraubdeckel	2,76E-04	4,28E-03	0,00E+00	3,83E-05	4,59E-03
Transport Molkerei-Zentrallager	1,80E-03	2,47E-04	0,00E+00	1,00E-05	2,05E-03
Tray Molkerei-Zentrallager	2,19E-04	1,32E-03	0,00E+00	1,23E-04	1,66E-03
Transport Produzent-Molkerei	5,36E-04	3,13E-05	1,93E-05	9,31E-06	5,96E-04
Karton Produzent-Molkerei	6,10E-05	3,66E-04	0,00E+00	3,43E-05	4,61E-04
Deponie (Behälterglas)	3,30E-06	3,60E-07	1,11E-04	1,31E-06	1,16E-04
Stretchfolie Molkerei-Zentrallager	0,00E+00	9,20E-05	0,00E+00	1,36E-10	9,20E-05
Stretchfolie Produzent-Zentrallager	0,00E+00	6,02E-05	0,00E+00	8,90E-11	6,02E-05
Deponie (Schraubdeckel)	1,72E-07	1,87E-08	5,76E-06	6,78E-08	6,02E-06
Summe	3,24E-02	8,57E-03	8,07E-03	3,02E-03	5,21E-02

Tabelle A.9 Wirkungskategorie Abbau der stratosphärischen Ozonschicht [kg CFC11-Äqu.]

Teilsystem	C ₂ Cl ₂ F ₄	CHClF ₂	CH ₃ Cl	Sonstige	Summe
Herstellung Schraubdeckel	2,17E-11	1,24E-13	5,99E-15	1,72E-15	2,19E-11
Tray Molkerei-Zentrallager	1,74E-12	1,19E-13	3,55E-16	7,53E-16	1,86E-12
Karton Produzent-Molkerei	4,85E-13	3,31E-14	9,89E-17	2,09E-16	5,18E-13
Transport Molkerei-Zentrallager	2,54E-13	1,56E-15	7,53E-18	1,59E-17	2,55E-13
Herstellung Behälterglas	0,00E+00	0,00E+00	6,66E-15	1,46E-23	6,66E-15
Deponie (Behälterglas)	0,00E+00	0,00E+00	2,22E-17	9,11E-25	2,22E-17
Transport Produzent-Molkerei	0,00E+00	0,00E+00	2,42E-18	6,34E-24	2,42E-18
Deponie (Schraubdeckel)	0,00E+00	0,00E+00	1,15E-18	4,73E-26	1,15E-18
Stretchfolie Molkerei-Zentrallager	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Stretchfolie Produzent-Zentrallager	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Summe	2,42E-11	2,78E-13	1,31E-14	2,70E-15	2,45E-11

Tabelle A.10 Wirkungskategorie Bildung photochemischer Oxidantien [kg NMVOC-Äqu.]

Teilsystem	NO	NO ₂	NO _x	Sonstige	Summe
Deponie (Behälterglas)	4,52E-03	5,11E-04	1,86E-03	6,01E-04	7,50E-03
Herstellung Schraubdeckel	2,75E-04	5,80E-05	0,00E+00	4,35E-05	3,76E-04
Stretchfolie Molkerei-Zentrallager	8,20E-05	7,35E-06	4,54E-06	7,60E-06	1,02E-04
Deponie (Schraubdeckel)	4,23E-05	1,00E-03	0,00E+00	2,84E-04	1,33E-03
Herstellung Behälterglas	3,35E-05	3,09E-04	0,00E+00	1,13E-04	4,55E-04
Karton Produzent-Molkerei	9,33E-06	8,59E-05	0,00E+00	3,15E-05	1,27E-04
Stretchfolie Produzent-Zentrallager	5,06E-07	8,44E-08	2,61E-05	5,34E-06	3,20E-05
Tray Molkerei-Zentrallager	2,63E-08	4,38E-09	1,35E-06	2,77E-07	1,66E-06
Transport Molkerei-Zentrallager	0,00E+00	2,16E-05	0,00E+00	6,70E-06	2,83E-05
Transport Produzent-Molkerei	0,00E+00	1,41E-05	0,00E+00	4,38E-06	1,85E-05
Summe	4,96E-03	2,01E-03	1,89E-03	1,10E-03	9,97E-03

Tabelle A.11 Feinstaubbelastung [Krankheitsinzidenz/kg PM2,5]

Teilsystem	PM2.5	SO ₂	NO	Sonstige	Summe
Herstellung Behälterglas	2,67E-08	3,24E-08	7,23E-09	1,02E-08	7,65E-08
Herstellung Schraubdeckel	3,30E-08	7,79E-09	6,76E-11	2,03E-09	4,29E-08
Tray Molkerei-Zentrallager	3,21E-09	9,36E-10	5,37E-11	2,03E-09	6,23E-09
Transport Molkerei-Zentrallager	8,19E-10	4,69E-10	4,40E-10	1,08E-10	1,84E-09
Karton Produzent-Molkerei	8,93E-10	2,60E-10	1,49E-11	5,65E-10	1,73E-09
Transport Produzent-Molkerei	4,20E-10	3,60E-11	1,31E-10	3,36E-11	6,21E-10
Stretchfolie Molkerei-Zentrallager	1,25E-20	2,68E-10	0,00E+00	2,71E-10	5,38E-10
Deponie (Behälterglas)	3,35E-10	1,25E-10	8,09E-13	4,41E-11	5,05E-10
Stretchfolie Produzent-Zentrallager	8,21E-21	1,75E-10	0,00E+00	1,77E-10	3,52E-10
Deponie (Schraubdeckel)	1,74E-11	6,48E-12	4,20E-14	2,29E-12	2,62E-11
Summe	6,54E-08	4,24E-08	7,94E-09	1,55E-08	1,31E-07

Tabelle A.12 Wasserverbrauch [m³-Äqu.]

Teilsystem	H ₂ O (Verbrauch)	H ₂ O (Rückfuhr)	Summe
Herstellung Behälterglas	1,05E+01	-1,04E+01	1,04E-01
Herstellung Schraubdeckel	4,01E+00	-3,93E+00	7,28E-02
Tray Molkerei-Zentrallager	2,56E+00	-2,27E+00	2,87E-01
Karton Produzent-Molkerei	7,11E-01	-6,31E-01	7,97E-02
Transport Molkerei-Zentrallager	4,90E-02	-4,89E-02	1,87E-04
Deponie (Behälterglas)	1,32E-02	-1,26E-02	6,13E-04
Transport Produzent-Molkerei	7,99E-03	-7,82E-03	1,64E-04
Stretchfolie Molkerei-Zentrallager	7,21E-03	0,00E+00	7,21E-03
Stretchfolie Produzent-Zentrallager	4,72E-03	0,00E+00	4,72E-03
Deponie (Schraubdeckel)	6,84E-04	-6,52E-04	3,18E-05
Summe	1,79E+01	-1,73E+01	5,56E-01

A.3 Wirkungsabschätzung PP250

Tabelle A.13 Wirkungskategorie Treibhauspotential [kg CO₂-Äqu.]

Teilsystem	CO ₂	CH ₄	CF ₄	Sonstige	Summe
Produktion Kunststoffbecher	3,08E-01	3,65E-02	1,69E-06	3,69E-03	3,48E-01
Verbrennungsanlage (Kunststoffbecher)	2,33E-01	1,92E-03	6,82E-08	1,38E-04	2,35E-01
Tray Molkerei-Zentrallager	7,52E-02	6,29E-03	3,13E-05	2,16E-03	8,37E-02
Transport Molkerei-Zentrallager	7,34E-02	3,64E-03	5,44E-09	2,10E-03	7,92E-02
Produktion Aluminiumplatte	6,50E-02	4,28E-03	3,31E-03	5,02E-04	7,31E-02
Stretchfolie Molkerei-Zentrallager	1,06E-02	3,99E-03	0,00E+00	3,89E-05	1,47E-02
Karton Produzent-Molkerei	1,15E-02	9,66E-04	4,81E-06	3,32E-04	1,28E-02
Transport Produzent-Molkerei	5,19E-03	2,66E-04	8,86E-10	1,56E-04	5,62E-03
Stretchfolie Produzent-Molkerei	6,75E-04	2,53E-04	0,00E+00	2,47E-06	9,31E-04
Deponie Kunststoffbecher	2,71E-04	5,23E-05	9,78E-10	3,12E-06	3,27E-04
Deponie Aluminiumplatte	1,57E-05	8,25E-07	6,39E-11	2,84E-07	1,68E-05
Gutschrift Elektrische Energie	-5,37E-02	-3,15E-03	-1,29E-06	-1,12E-03	-5,79E-02
Gutschrift Thermische Energie	-5,89E-02	-3,90E-03	-1,18E-07	-3,65E-04	-6,32E-02
Summe	6,70E-01	5,11E-02	3,35E-03	7,64E-03	7,32E-01

Tabelle A.14 Wirkungskategorie Versauerung [mol H⁺-Äqu.]

Teilsystem	SO ₂	NO ₂	NO	Sonstige	Summe
Produktion Kunststoffbecher	2,83E-04	7,46E-05	7,12E-06	2,01E-04	5,66E-04
Produktion Aluminiumplatte	2,54E-04	2,99E-08	2,58E-07	9,37E-05	3,48E-04
Tray Molkerei-Zentrallager	9,01E-05	1,34E-04	2,24E-05	5,79E-05	3,05E-04
Transport Molkerei-Zentrallager	4,91E-05	2,74E-05	2,00E-04	1,44E-06	2,78E-04
Stretchfolie Molkerei-Zentrallager	5,68E-05	2,07E-05	0,00E+00	3,95E-11	7,75E-05
Karton Produzent-Molkerei	1,38E-05	2,06E-05	3,44E-06	8,89E-06	4,68E-05
Transport Produzent-Molkerei	1,77E-06	1,63E-06	2,80E-05	1,64E-06	3,30E-05
Verbrennungsanlage Kunststoffbecher	3,65E-06	2,47E-08	1,78E-07	2,62E-05	3,01E-05
Stretchfolie Produzent-Molkerei	3,61E-06	1,32E-06	0,00E+00	2,51E-12	4,92E-06
Deponie Kunststoffbecher	5,53E-07	1,23E-09	1,23E-08	4,10E-07	9,76E-07
Deponie Aluminiumplatte	5,98E-08	1,83E-10	1,68E-09	5,72E-08	1,19E-07
Gutschrift Thermische Energie	-6,40E-06	-2,15E-09	-2,98E-08	-3,17E-05	-3,81E-05
Gutschrift Elektrische Energie	-6,68E-05	-4,36E-08	-4,99E-07	-5,21E-05	-1,19E-04
Summe	6,84E-04	2,81E-04	2,60E-04	3,07E-04	1,53E-03

Tabelle A.15 Wirkungskategorie Eutrophierung [mol N-Äqu.]

Teilsystem	NO ₂	NO	NO _x	Sonstige	Summe
Produktion Kunststoffbecher	4,30E-04	4,10E-05	1,10E-03	4,57E-05	1,61E-03
Transport Molkerei-Zentrallager	1,58E-04	1,15E-03	0,00E+00	6,42E-06	1,31E-03
Tray Molkerei-Zentrallager	7,74E-04	1,29E-04	0,00E+00	7,25E-05	9,75E-04
Produktion Aluminiumplatte	1,72E-07	1,48E-06	5,29E-04	7,68E-06	5,39E-04
Transport Produzent-Molkerei	9,40E-06	1,61E-04	5,80E-06	2,80E-06	1,79E-04
Karton Produzent-Molkerei	1,19E-04	1,98E-05	0,00E+00	1,11E-05	1,50E-04
Verbrennungsanlage Kunststoffbecher	1,42E-07	1,02E-06	8,21E-05	5,33E-05	1,37E-04
Stretchfolie Molkerei-Zentrallager	1,19E-04	0,00E+00	0,00E+00	1,76E-10	1,19E-04
Stretchfolie Produzent-Molkerei	7,57E-06	0,00E+00	0,00E+00	1,12E-11	7,57E-06
Deponie Kunststoffbecher	7,06E-09	7,08E-08	2,32E-06	3,39E-08	2,43E-06
Deponie Aluminiumplatte	1,05E-09	9,66E-09	3,25E-07	3,82E-09	3,39E-07
Gutschrift Thermische Energie	-1,24E-08	-1,72E-07	-1,79E-04	-3,09E-06	-1,82E-04
Gutschrift Elektrische Energie	-2,51E-07	-2,87E-06	-2,77E-04	-1,72E-05	-2,98E-04
Summe	1,62E-03	1,50E-03	1,26E-03	1,79E-04	4,56E-03

Tabelle A.16 Wirkungskategorie Abbau der stratosphärischen Ozonschicht [kg CFC11-Äqu.]

Teilsystem	R 114	R 22	R 11	Sonstige	Summe
Produktion Kunststoffbecher	2,44E-11	1,15E-13	1,43E-15	1,65E-15	2,46E-11
Tray Molkerei-Zentrallager	1,02E-12	6,99E-14	3,73E-16	2,79E-16	1,10E-12
Karton Produzent-Molkerei	1,57E-13	1,07E-14	5,72E-17	4,28E-17	1,68E-13
Transport Molkerei-Zentrallager	1,62E-13	9,97E-16	8,55E-18	6,41E-18	1,63E-13
Produktion Aluminiumplatte	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	3,44E-16	3,44E-16
Verbrennungsanlage Kunststoffbecher	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	7,21E-17	7,21E-17
Deponie Kunststoffbecher	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	7,86E-19	7,86E-19
Transport Produzent-Molkerei	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	7,26E-19	7,26E-19
Deponie Aluminiumplatte	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	6,49E-20	6,49E-20
Stretchfolie Molkerei-Zentrallager	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Stretchfolie Produzent-Molkerei	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Gutschrift Thermische Energie	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	-4,74E-18	-4,74E-18
Gutschrift Elektrische Energie	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	-1,37E-15	-1,37E-15
Summe	2,58E-11	1,96E-13	1,87E-15	1,02E-15	2,60E-11

Tabelle A.17 Wirkungskategorie Bildung photochemischer Oxidantien [kg NMVOC-Äqu.]

Teilsystem	NO ₂	NO _x	NO	Sonstige	Summe
Produktion Kunststoffbecher	1,01E-04	2,58E-04	6,27E-06	1,58E-04	5,23E-04
Tray Molkerei-Zentrallager	1,82E-04	0,00E+00	1,97E-05	6,65E-05	2,68E-04
Transport Molkerei-Zentrallager	3,71E-05	0,00E+00	1,76E-04	2,78E-05	2,41E-04
Produktion Aluminiumplattine	4,04E-08	1,24E-04	2,27E-07	4,21E-05	1,67E-04
Karton Produzent-Molkerei	2,79E-05	0,00E+00	3,03E-06	1,02E-05	4,11E-05
Stretchfolie Molkerei-Zentrallager	2,80E-05	0,00E+00	0,00E+00	8,68E-06	3,67E-05
Transport Produzent-Molkerei	2,21E-06	1,36E-06	2,46E-05	2,28E-06	3,05E-05
Verbrennungsanlage Kunststoffbecher	3,34E-08	1,93E-05	1,57E-07	4,17E-06	2,36E-05
Stretchfolie Produzent-Molkerei	1,78E-06	0,00E+00	0,00E+00	5,51E-07	2,33E-06
Deponie Kunststoffbecher	1,66E-09	5,44E-07	1,08E-08	1,52E-07	7,08E-07
Deponie Aluminiumplattine	2,47E-10	7,62E-08	1,48E-09	1,56E-08	9,35E-08
Gutschrift Thermische Energie	-2,90E-09	-4,19E-05	-2,63E-08	-6,78E-06	-4,87E-05
Gutschrift Elektrische Energie	-5,89E-08	-6,51E-05	-4,40E-07	-1,13E-05	-7,70E-05
Summe	3,79E-04	2,96E-04	2,29E-04	3,03E-04	1,21E-03

Tabelle A.18 Feinstaubbelastung [Krankheitsinzidenz/kg PM2,5]

Teilsystem	PM2.5	SO ₂	PM10	Sonstige	Summe
Produktion Kunststoffbecher	2,07E-09	1,73E-09	1,30E-11	6,55E-10	4,46E-09
Tray Molkerei-Zentrallager	1,89E-09	5,50E-10	5,35E-10	6,90E-10	3,66E-09
Produktion Aluminiumplattine	1,78E-09	1,55E-09	4,45E-12	2,11E-10	3,55E-09
Transport Molkerei-Zentrallager	5,24E-10	3,00E-10	1,81E-14	3,51E-10	1,17E-09
Stretchfolie Molkerei-Zentrallager	1,63E-20	3,47E-10	3,05E-10	4,55E-11	6,98E-10
Karton Produzent-Molkerei	2,90E-10	8,45E-11	8,21E-11	1,06E-10	5,62E-10
Verbrennungsanlage Kunststoffbecher	2,88E-10	2,23E-11	2,93E-13	1,14E-10	4,25E-10
Transport Produzent-Molkerei	1,26E-10	1,08E-11	2,51E-14	4,95E-11	1,86E-10
Stretchfolie Produzent-Molkerei	1,03E-21	2,20E-11	1,94E-11	2,89E-12	4,43E-11
Deponie Kunststoffbecher	5,24E-12	3,38E-12	1,17E-14	9,43E-13	9,57E-12
Deponie Aluminiumplattine	9,80E-13	3,65E-13	6,19E-16	1,31E-13	1,48E-12
Gutschrift Thermische Energie	-2,34E-10	-3,91E-11	-3,64E-12	-7,19E-11	-3,48E-10
Gutschrift Elektrische Energie	-4,66E-10	-4,08E-10	-1,55E-12	-1,32E-10	-1,01E-09
Summe	6,27E-09	4,18E-09	9,54E-10	2,02E-09	1,34E-08

Tabelle A.19 Wasserverbrauch [m³-Äqu.]

Teilsystem	H ₂ O (Verbrauch)	H ₂ O (Rückfuhr)	Summe
Produktion Aluminiumplatine	1,01E+01	-1,00E+01	1,06E-02
Produktion Kunststoffbecher	3,11E+00	-3,10E+00	1,74E-02
Tray Molkerei-Zentrallager	1,50E+00	-1,33E+00	1,68E-01
Karton Produzent-Molkerei	2,31E-01	-2,05E-01	2,59E-02
Verbrennungsanlage Kunststoffbecher	6,00E-02	-3,56E-02	2,44E-02
Transport Molkerei-Zentrallager	3,14E-02	-3,13E-02	1,20E-04
Stretchfolie Molkerei-Zentrallager	9,35E-03	0,00E+00	9,35E-03
Transport Produzent-Molkerei	2,40E-03	-2,35E-03	4,94E-05
Deponie Kunststoffbecher	1,45E-03	-1,46E-03	-4,01E-06
Stretchfolie Produzent-Molkerei	5,93E-04	0,00E+00	5,93E-04
Deponie Aluminiumplatine	3,87E-05	-3,69E-05	1,79E-06
Gutschrift Thermische Energie	-8,86E-03	8,82E-03	-4,15E-05
Gutschrift Elektrische Energie	-2,19E+00	2,18E+00	-9,21E-03
Summe	1,28E+01	-1,26E+01	2,48E-01

A.4 Wirkungsabschätzung PS250K

Tabelle A.20 Wirkungskategorie Treibhauspotential [kg CO₂-Äqu.]

Teilsystem	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	Sonstige	Summe
Produktion Kunststoffbecher	2,19E-01	2,60E-02	1,34E-03	1,29E-03	2,48E-01
Verbrennungsanlage Kunststoffbecher	1,66E-01	1,36E-03	3,35E-05	6,46E-05	1,67E-01
Tray Molkerei-Zentrallager	7,52E-02	6,29E-03	8,92E-04	1,30E-03	8,37E-02
Transport Molkerei-Zentrallager	7,44E-02	3,69E-03	2,08E-04	1,92E-03	8,02E-02
Produktion Aluminiumplattine	6,97E-02	4,59E-03	3,15E-04	3,78E-03	7,84E-02
Produktion Kartonsleeve	5,83E-02	7,55E-03	1,34E-03	6,69E-04	6,79E-02
Stretchfolie Molkerei-Zentrallager	1,06E-02	3,99E-03	2,50E-10	3,89E-05	1,47E-02
Karton Produzent-Molkerei	1,15E-02	9,66E-04	1,37E-04	2,00E-04	1,28E-02
Transport Produzent-Molkerei	7,60E-03	3,90E-04	1,16E-04	1,11E-04	8,22E-03
Verbrennungsanlage Kartonsleeve	2,48E-03	2,33E-04	2,79E-05	3,03E-05	2,77E-03
Stretchfolie Produzent-Molkerei	6,75E-04	2,53E-04	1,59E-11	2,47E-06	9,31E-04
Deponie Kunststoffbecher	1,93E-04	3,73E-05	1,02E-06	1,20E-06	2,33E-04
Deponie Aluminiumplattine	1,60E-05	8,42E-07	8,79E-08	2,02E-07	1,71E-05
Gutschrift Elektrische Energie (Sleeve)	-1,74E-02	-1,02E-03	-1,58E-04	-2,06E-04	-1,87E-02
Gutschrift Thermische Energie (Sleeve)	-1,92E-02	-1,27E-03	-7,32E-05	-4,54E-05	-2,05E-02
Gutschrift Elektrische Energie (Becher)	-3,82E-02	-2,24E-03	-3,48E-04	-4,53E-04	-4,13E-02
Gutschrift Thermische Energie (Becher)	-4,20E-02	-2,78E-03	-1,60E-04	-9,95E-05	-4,50E-02
Summe	5,79E-01	4,80E-02	3,68E-03	8,60E-03	6,40E-01

Tabelle A.21 Wirkungskategorie Versauerung [mol H⁺-Äqu.]

Teilsystem	SO ₂	NO ₂	NO	Sonstige	Summe
Produktion Kunststoffbecher	2,02E-04	5,32E-05	5,07E-06	1,43E-04	4,03E-04
Produktion Kartonsleeve	2,15E-04	1,20E-04	2,29E-05	2,32E-05	3,81E-04
Produktion Aluminiumplatte	2,73E-04	3,21E-08	2,77E-07	1,01E-04	3,74E-04
Tray Molkerei-Zentrallager	9,01E-05	1,34E-04	2,24E-05	5,79E-05	3,05E-04
Transport Molkerei-Zentrallager	4,98E-05	2,78E-05	2,02E-04	1,46E-06	2,81E-04
Stretchfolie Molkerei-Zentrallager	5,68E-05	2,07E-05	0,00E+00	3,95E-11	7,75E-05
Transport Produzent-Molkerei	2,59E-06	2,39E-06	4,09E-05	2,39E-06	4,83E-05
Karton Produzent-Molkerei	1,38E-05	2,06E-05	3,44E-06	8,89E-06	4,68E-05
Verbrennungsanlage Kartonsleeve	5,50E-06	4,91E-09	3,18E-08	2,53E-05	3,08E-05
Verbrennungsanlage Kunststoffbecher	2,60E-06	1,76E-08	1,27E-07	1,87E-05	2,14E-05
Stretchfolie Produzent-Molkerei	3,61E-06	1,32E-06	0,00E+00	2,51E-12	4,92E-06
Deponie Kunststoffbecher	3,94E-07	8,74E-10	8,76E-09	2,92E-07	6,96E-07
Deponie Aluminiumplatte	6,10E-08	1,86E-10	1,71E-09	5,84E-08	1,21E-07
Gutschrift Thermische Energie (Sleeve)	-2,08E-06	-6,98E-10	-9,70E-09	-1,03E-05	-1,24E-05
Gutschrift Thermische Energie (Becher)	-4,56E-06	-1,53E-09	-2,13E-08	-2,26E-05	-2,72E-05
Gutschrift Elektrische Energie (Sleeve)	-2,16E-05	-1,41E-08	-1,61E-07	-1,68E-05	-3,86E-05
Gutschrift Elektrische Energie (Becher)	-4,76E-05	-3,11E-08	-3,56E-07	-3,71E-05	-8,51E-05
Summe	8,39E-04	3,80E-04	2,97E-04	2,95E-04	1,81E-03

Tabelle A.22 Wirkungskategorie Eutrophierung [mol N-Äqu.]

Teilsystem	NO ₂	NO	NO _x	Sonstige	Summe
Transport Molkerei-Zentrallager	1,60E-04	1,16E-03	0,00E+00	6,50E-06	1,33E-03
Produktion Kunststoffbecher	3,06E-04	2,92E-05	7,82E-04	3,25E-05	1,15E-03
Tray Molkerei-Zentrallager	7,74E-04	1,29E-04	0,00E+00	7,25E-05	9,75E-04
Produktion Kartonsleeve	6,91E-04	1,32E-04	0,00E+00	1,04E-04	9,27E-04
Produktion Aluminiumplatte	1,85E-07	1,59E-06	5,68E-04	8,24E-06	5,78E-04
Transport Produzent-Molkerei	1,38E-05	2,36E-04	8,49E-06	4,09E-06	2,62E-04
Karton Produzent-Molkerei	1,19E-04	1,98E-05	0,00E+00	1,11E-05	1,50E-04
Verbrennungsanlage Kartonsleeve	2,83E-08	1,83E-07	1,19E-04	2,05E-05	1,40E-04
Stretchfolie Molkerei-Zentrallager	1,19E-04	0,00E+00	0,00E+00	1,76E-10	1,19E-04
Verbrennungsanlage Kunststoffbecher	1,01E-07	7,28E-07	5,85E-05	3,80E-05	9,73E-05
Stretchfolie Produzent-Molkerei	7,57E-06	0,00E+00	0,00E+00	1,12E-11	7,57E-06
Deponie Kunststoffbecher	5,03E-09	5,04E-08	1,65E-06	2,42E-08	1,73E-06
Deponie Aluminiumplatte	1,07E-09	9,86E-09	3,31E-07	3,90E-09	3,46E-07
Gutschrift Thermische Energie (Sleeve)	-4,02E-09	-5,59E-08	-5,81E-05	-1,01E-06	-5,91E-05
Gutschrift Elektrische Energie (Sleeve)	-8,11E-08	-9,29E-07	-8,97E-05	-5,56E-06	-9,63E-05
Gutschrift Thermische Energie (Becher)	-8,80E-09	-1,22E-07	-1,27E-04	-2,20E-06	-1,30E-04
Gutschrift Elektrische Energie (Becher)	-1,79E-07	-2,05E-06	-1,98E-04	-1,23E-05	-2,12E-04
Summe	2,19E-03	1,71E-03	1,07E-03	2,76E-04	5,24E-03

Tabelle A.23 Wirkungskategorie Abbau der stratosphärischen Ozonschicht [kg CFC11-Äqu.]

Teilsystem	R13 B1	R 10	R12 B1	Sonstige	Summe
Produktion Kartonsleeve	3,37E-09	7,88E-10	4,32E-10	3,50E-10	4,94E-09
Produktion Kunststoffbecher	9,62E-18	0,00E+00	0,00E+00	1,75E-11	1,75E-11
Tray Molkerei-Zentrallager	3,52E-18	0,00E+00	0,00E+00	1,10E-12	1,10E-12
Karton Produzent-Molkerei	5,40E-19	0,00E+00	0,00E+00	1,68E-13	1,68E-13
Transport Molkerei-Zentrallager	8,18E-20	0,00E+00	0,00E+00	1,66E-13	1,66E-13
Produktion Aluminiumplatte	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	3,70E-16	3,70E-16
Verbrennungsanlage Kunststoffbecher	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	5,14E-17	5,14E-17
Verbrennungsanlage Kartonsleeve	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	2,14E-17	2,14E-17
Transport Produzent-Molkerei	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,06E-18	1,06E-18
Deponie Kunststoffbecher	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	5,60E-19	5,60E-19
Deponie Aluminiumplatte	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	6,63E-20	6,63E-20
Stretchfolie Molkerei-Zentrallager	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Stretchfolie Produzent-Molkerei	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Gutschrift Thermische Energie (Sleeve)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	-1,54E-18	-1,54E-18
Gutschrift Thermische Energie (Becher)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	-3,38E-18	-3,38E-18
Gutschrift Elektrische Energie (Sleeve)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	-4,44E-16	-4,44E-16
Gutschrift Elektrische Energie (Becher)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	-9,79E-16	-9,79E-16
Summe	3,37E-09	7,88E-10	4,32E-10	3,69E-10	4,96E-09

Tabelle A.24 Wirkungskategorie Bildung photochemischer Oxidantien [kg NMVOC-Äqu.]

Teilsystem	NO ₂	NO	NO _x	Sonstige	Summe
Produktion Kunststoffbecher	7,19E-05	4,47E-06	1,84E-04	1,13E-04	3,73E-04
Produktion Kartonsleeve	1,62E-04	2,02E-05	0,00E+00	9,57E-05	2,78E-04
Tray Molkerei-Zentrallager	1,82E-04	1,97E-05	0,00E+00	6,65E-05	2,68E-04
Transport Molkerei-Zentrallager	3,76E-05	1,78E-04	0,00E+00	2,82E-05	2,44E-04
Produktion Aluminiumplatine	4,34E-08	2,44E-07	1,33E-04	4,52E-05	1,79E-04
Transport Produzent-Molkerei	3,23E-06	3,61E-05	1,99E-06	3,34E-06	4,46E-05
Karton Produzent-Molkerei	2,79E-05	3,03E-06	0,00E+00	1,02E-05	4,11E-05
Stretchfolie Molkerei-Zentrallager	2,80E-05	0,00E+00	0,00E+00	8,68E-06	3,67E-05
Verbrennungsanlage Kartonsleeve	6,64E-09	2,80E-08	2,80E-05	1,71E-06	2,97E-05
Verbrennungsanlage Kunststoffbecher	2,38E-08	1,12E-07	1,37E-05	2,97E-06	1,68E-05
Stretchfolie Produzent-Molkerei	1,78E-06	0,00E+00	0,00E+00	5,51E-07	2,33E-06
Deponie Kunststoffbecher	1,18E-09	7,72E-09	3,87E-07	1,08E-07	5,05E-07
Deponie Aluminiumplatine	2,52E-10	1,51E-09	7,78E-08	1,59E-08	9,54E-08
Gutschrift Thermische Energie (Sleeve)	-9,43E-10	-8,55E-09	-1,36E-05	-2,21E-06	-1,58E-05
Gutschrift Elektrische Energie (Sleeve)	-1,90E-08	-1,42E-07	-2,11E-05	-3,66E-06	-2,49E-05
Gutschrift Thermische Energie (Becher)	-2,07E-09	-1,87E-08	-2,99E-05	-4,83E-06	-3,47E-05
Gutschrift Elektrische Energie (Becher)	-4,20E-08	-3,13E-07	-4,64E-05	-8,07E-06	-5,48E-05
Summe	5,14E-04	2,62E-04	2,50E-04	3,57E-04	1,38E-03

Tabelle A.25 Feinstaubbelastung [Krankheitsinzidenz/kg PM2,5]

Teilsystem	PM2.5	SO ₂	PM10	Sonstige	Summe
Produktion Kartonsleeve	4,66E-09	1,31E-09	1,44E-11	4,53E-10	6,44E-09
Produktion Aluminiumplatte	1,91E-09	1,67E-09	4,78E-12	2,27E-10	3,81E-09
Tray Molkerei-Zentrallager	1,89E-09	5,50E-10	5,35E-10	6,90E-10	3,66E-09
Produktion Kunststoffbecher	1,47E-09	1,23E-09	9,29E-12	4,67E-10	3,18E-09
Transport Molkerei-Zentrallager	5,31E-10	3,04E-10	1,83E-14	3,55E-10	1,19E-09
Stretchfolie Molkerei-Zentrallager	1,63E-20	3,47E-10	3,05E-10	4,55E-11	6,98E-10
Karton Produzent-Molkerei	2,90E-10	8,45E-11	8,21E-11	1,06E-10	5,62E-10
Verbrennungsanlage Kunststoffbecher	2,05E-10	1,59E-11	2,09E-13	8,14E-11	3,03E-10
Transport Produzent-Molkerei	1,85E-10	1,58E-11	3,67E-14	7,24E-11	2,73E-10
Verbrennungsanlage Kartonsleeve	5,96E-11	3,36E-11	1,75E-13	7,67E-11	1,70E-10
Stretchfolie Produzent-Molkerei	1,03E-21	2,20E-11	1,94E-11	2,89E-12	4,43E-11
Deponie Kunststoffbecher	3,73E-12	2,41E-12	8,35E-15	6,72E-13	6,82E-12
Deponie Aluminiumplatte	1,00E-12	3,73E-13	6,32E-16	1,33E-13	1,51E-12
Gutschrift Thermische Energie (Sleeve)	-7,60E-11	-1,27E-11	-1,18E-12	-2,34E-11	-1,13E-10
Gutschrift Thermische Energie (Becher)	-1,66E-10	-2,79E-11	-2,59E-12	-5,12E-11	-2,48E-10
Gutschrift Elektrische Energie (Sleeve)	-1,51E-10	-1,32E-10	-5,01E-13	-4,27E-11	-3,26E-10
Gutschrift Elektrische Energie (Kunststoff)	-3,32E-10	-2,91E-10	-1,10E-12	-9,40E-11	-7,17E-10
Summe	1,05E-08	5,12E-09	9,65E-10	2,37E-09	1,89E-08

Tabelle A.26 Wasserverbrauch [m³-Äqu.]

Teilsystem	H ₂ O (Verbrauch)	H ₂ O (Rückfuhr)	Summe
Tray Molkerei-Zentrallager	1,50E+00	-1,33E+00	1,68E-01
Produktion Kartonsleeve	5,10E+00	-5,06E+00	4,26E-02
Karton Produzent-Molkerei	2,31E-01	-2,05E-01	2,59E-02
Verbrennungsanlage Kunststoffbecher	4,27E-02	-2,53E-02	1,74E-02
Verbrennungsanlage Kartonsleeve	3,77E-02	-2,40E-02	1,37E-02
Produktion Kunststoffbecher	2,22E+00	-2,21E+00	1,24E-02
Produktion Aluminiumplatine	1,08E+01	-1,08E+01	1,14E-02
Stretchfolie Molkerei-Zentrallager	9,35E-03	0,00E+00	9,35E-03
Stretchfolie Produzent-Molkerei	5,93E-04	0,00E+00	5,93E-04
Transport Molkerei-Zentrallager	3,18E-02	-3,17E-02	1,21E-04
Transport Produzent-Molkerei	3,51E-03	-3,44E-03	7,22E-05
Deponie Aluminiumplatine	3,95E-05	-3,77E-05	1,83E-06
Deponie Kunststoffbecher	1,04E-03	-1,04E-03	-2,86E-06
Gutschrift Thermische Energie (Sleeve)	-2,88E-03	2,87E-03	-1,35E-05
Gutschrift Thermische Energie (Becher)	-6,31E-03	6,28E-03	-2,96E-05
Gutschrift Elektrische Energie (Sleeve)	-7,08E-01	7,05E-01	-2,98E-03
Gutschrift Elektrische Energie (Becher)	-1,56E+00	1,55E+00	-6,56E-03
Summe	1,77E+01	-1,74E+01	12,92E-01

A.5 Wirkungsabschätzung PS500

Tabelle A.27 Wirkungskategorie Treibhauspotential [kg CO₂-Äqu.]

Teilsystem	CO ₂	CH ₄	CF ₄	Sonstige	Summe
Produktion Kunststoffbecher	3,28E-01	3,88E-02	1,80E-06	3,93E-03	3,70E-01
Verbrennungsanlage Kunststoffbecher	2,47E-01	2,04E-03	7,25E-08	1,46E-04	2,50E-01
Transport Molkerei-Zentrallager	7,33E-02	3,64E-03	5,44E-09	2,10E-03	7,91E-02
Tray Molkerei-Zentrallager	6,52E-02	5,46E-03	2,72E-05	1,88E-03	7,26E-02
Produktion Aluminiumplatte	6,04E-02	3,97E-03	3,08E-03	4,67E-04	6,79E-02
Stretchfolie Molkerei-Zentrallager	1,06E-02	3,97E-03	0,00E+00	3,87E-05	1,46E-02
Karton Produzent-Molkerei	1,21E-02	1,01E-03	5,05E-06	3,49E-04	1,35E-02
Transport Produzent-Molkerei	5,47E-03	2,81E-04	9,34E-10	1,64E-04	5,92E-03
Stretchfolie Produzent-Molkerei	7,09E-04	2,66E-04	0,00E+00	2,59E-06	9,78E-04
Deponie Kunststoffbecher	2,89E-04	5,57E-05	1,04E-09	3,31E-06	3,47E-04
Deponie Aluminiumplatte	1,46E-05	7,66E-07	5,94E-11	2,64E-07	1,56E-05
Gutschrift Elektrische Energie	-5,71E-02	-3,35E-03	-1,37E-06	-1,19E-03	-6,16E-02
Gutschrift Thermische Energie	-6,26E-02	-4,14E-03	-1,26E-07	-3,88E-04	-6,72E-02
Summe	6,83E-01	5,20E-02	3,11E-03	7,49E-03	7,46E-01

Tabelle A.28 Wirkungskategorie Versauerung [mol H⁺-Äqu.]

Teilsystem	SO ₂	NO ₂	NO	Sonstige	Summe
Produktion Kunststoffbecher	3,01E-04	7,94E-05	7,57E-06	2,14E-04	6,02E-04
Produktion Aluminiumplatte	2,36E-04	2,78E-08	2,40E-07	8,70E-05	3,24E-04
Transport Molkerei-Zentrallager	4,91E-05	2,74E-05	1,99E-04	1,44E-06	2,77E-04
Tray Molkerei-Zentrallager	7,82E-05	1,17E-04	1,94E-05	5,02E-05	2,64E-04
Stretchfolie Molkerei-Zentrallager	5,65E-05	2,06E-05	0,00E+00	3,93E-11	7,71E-05
Karton Produzent-Molkerei	1,45E-05	2,17E-05	3,61E-06	9,34E-06	4,91E-05
Transport Produzent-Molkerei	1,87E-06	1,72E-06	2,95E-05	1,72E-06	3,48E-05
Verbrennungsanlage Kunststoffbecher	3,88E-06	2,63E-08	1,89E-07	2,79E-05	3,20E-05
Stretchfolie Produzent-Molkerei	3,79E-06	1,38E-06	0,00E+00	2,63E-12	5,17E-06
Deponie Kunststoffbecher	5,88E-07	1,30E-09	1,31E-08	4,36E-07	1,04E-06
Deponie Aluminiumplatte	5,56E-08	1,70E-10	1,56E-09	5,32E-08	1,10E-07
Gutschrift Thermische Energie	-6,81E-06	-2,28E-09	-3,17E-08	-3,37E-05	-4,05E-05
Gutschrift Elektrische Energie	-7,10E-05	-4,63E-08	-5,31E-07	-5,54E-05	-1,27E-04
Summe	6,68E-04	2,69E-04	2,59E-04	3,03E-04	1,50E-03

Tabelle A.29 Wirkungskategorie Eutrophierung [mol N-Äqu.]

Teilsystem	NO ₂	NO	NO _x	Sonstige	Summe
Produktion Kunststoffbecher	4,57E-04	4,36E-05	1,17E-03	4,86E-05	1,72E-03
Transport Molkerei-Zentrallager	1,58E-04	1,15E-03	0,00E+00	6,41E-06	1,31E-03
Tray Molkerei-Zentrallager	6,71E-04	1,12E-04	0,00E+00	6,29E-05	8,46E-04
Produktion Aluminiumplatte	1,60E-07	1,38E-06	4,92E-04	7,14E-06	5,00E-04
Transport Produzent-Molkerei	9,91E-06	1,70E-04	6,12E-06	2,95E-06	1,89E-04
Karton Produzent-Molkerei	1,25E-04	2,08E-05	0,00E+00	1,17E-05	1,57E-04
Verbrennungsanlage Kunststoffbecher	1,51E-07	1,09E-06	8,73E-05	5,67E-05	1,45E-04
Stretchfolie Molkerei-Zentrallager	1,19E-04	0,00E+00	0,00E+00	1,75E-10	1,19E-04
Stretchfolie Produzent-Molkerei	7,95E-06	0,00E+00	0,00E+00	1,17E-11	7,95E-06
Deponie Kunststoffbecher	7,51E-09	7,52E-08	2,46E-06	3,61E-08	2,58E-06
Deponie Aluminiumplatte	9,77E-10	8,98E-09	3,02E-07	3,55E-09	3,15E-07
Gutschrift Thermische Energie	-1,31E-08	-1,83E-07	-1,90E-04	-3,29E-06	-1,93E-04
Gutschrift Elektrische Energie	-2,67E-07	-3,05E-06	-2,95E-04	-1,83E-05	-3,17E-04
Summe	1,55E-03	1,49E-03	1,27E-03	1,75E-04	4,49E-03

Tabelle A.30 Wirkungskategorie Abbau der stratosphärischen Ozonschicht [kg CFC11-Äqu.]

Teilsystem	R 114	R 22	R 11	Sonstige	Summe
Produktion Kunststoffbecher	2,60E-11	1,22E-13	1,52E-15	1,76E-15	2,61E-11
Tray Molkerei-Zentrallager	8,89E-13	6,06E-14	3,23E-16	2,42E-16	9,50E-13
Karton Produzent-Molkerei	1,65E-13	1,13E-14	6,01E-17	4,50E-17	1,77E-13
Transport Molkerei-Zentrallager	1,62E-13	9,96E-16	8,54E-18	6,41E-18	1,63E-13
Produktion Aluminiumplatte	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	3,20E-16	3,20E-16
Verbrennungsanlage Kunststoffbecher	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	7,67E-17	7,67E-17
Deponie Kunststoffbecher	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	8,36E-19	8,36E-19
Transport Produzent-Molkerei	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	7,65E-19	7,65E-19
Deponie Aluminiumplatte	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	6,03E-20	6,03E-20
Stretchfolie Molkerei-Zentrallager	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Stretchfolie Produzent-Molkerei	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Gutschrift Thermische Energie	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	-5,04E-18	-5,04E-18
Gutschrift Elektrische Energie	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	-1,46E-15	-1,46E-15
Summe	2,72E-11	1,95E-13	1,92E-15	9,82E-16	2,74E-11

Tabelle A.31 Wirkungskategorie Bildung photochemischer Oxidantien [kg NMVOC-Äqu.]

Teilsystem	NO ₂	NO _x	NO	Sonstige	Summe
Produktion Kunststoffbecher	1,07E-04	2,74E-04	6,67E-06	1,68E-04	5,56E-04
Transport Molkerei-Zentrallager	3,70E-05	0,00E+00	1,76E-04	2,78E-05	2,41E-04
Tray Molkerei-Zentrallager	1,57E-04	0,00E+00	1,71E-05	5,77E-05	2,32E-04
Produktion Aluminiumplattine	3,76E-08	1,15E-04	2,11E-07	3,92E-05	1,55E-04
Karton Produzent-Molkerei	2,93E-05	0,00E+00	3,18E-06	1,07E-05	4,32E-05
Stretchfolie Molkerei-Zentrallager	2,79E-05	0,00E+00	0,00E+00	8,64E-06	3,65E-05
Transport Produzent-Molkerei	2,33E-06	1,44E-06	2,60E-05	2,41E-06	3,21E-05
Verbrennungsanlage Kunststoffbecher	3,55E-08	2,05E-05	1,66E-07	4,43E-06	2,51E-05
Stretchfolie Produzent-Molkerei	1,87E-06	0,00E+00	0,00E+00	5,79E-07	2,44E-06
Deponie Kunststoffbecher	1,76E-09	5,78E-07	1,15E-08	1,62E-07	7,53E-07
Deponie Aluminiumplattine	2,29E-10	7,08E-08	1,37E-09	1,45E-08	8,69E-08
Gutschrift Thermische Energie	-3,08E-09	-4,45E-05	-2,80E-08	-7,21E-06	-5,18E-05
Gutschrift Elektrische Energie	-6,26E-08	-6,92E-05	-4,68E-07	-1,21E-05	-8,18E-05
Summe	3,63E-04	2,98E-04	2,29E-04	3,01E-04	1,19E-03

Tabelle A.32 Feinstaubbelastung [Krankheitsinzidenz/kg PM2,5]

Teilsystem	PM2.5	SO ₂	PM10	Sonstige	Summe
Produktion Kunststoffbecher	2,20E-09	1,84E-09	1,39E-11	6,97E-10	4,75E-09
Produktion Aluminiumplattine	1,66E-09	1,44E-09	4,14E-12	1,96E-10	3,30E-09
Tray Molkerei-Zentrallager	1,64E-09	4,77E-10	4,64E-10	5,98E-10	3,18E-09
Transport Molkerei-Zentrallager	5,23E-10	3,00E-10	1,81E-14	3,50E-10	1,17E-09
Stretchfolie Molkerei-Zentrallager	1,62E-20	3,45E-10	3,04E-10	4,53E-11	6,94E-10
Karton Produzent-Molkerei	3,04E-10	8,87E-11	8,63E-11	1,11E-10	5,90E-10
Verbrennungsanlage Kunststoffbecher	3,06E-10	2,37E-11	3,11E-13	1,21E-10	4,52E-10
Transport Produzent-Molkerei	1,33E-10	1,14E-11	2,64E-14	5,22E-11	1,96E-10
Stretchfolie Produzent-Molkerei	1,08E-21	2,31E-11	2,03E-11	3,03E-12	4,65E-11
Deponie Kunststoffbecher	5,57E-12	3,59E-12	1,25E-14	1,00E-12	1,02E-11
Deponie Aluminiumplattine	9,11E-13	3,39E-13	5,75E-16	1,21E-13	1,37E-12
Gutschrift Thermische Energie	-2,48E-10	-4,16E-11	-3,87E-12	-7,65E-11	-3,70E-10
Gutschrift Elektrische Energie	-4,95E-10	-4,34E-10	-1,65E-12	-1,40E-10	-1,07E-09
Summe	6,02E-09	4,08E-09	8,87E-10	1,96E-09	1,29E-08

Tabelle A.33 Wirkungskategorie Wasserverbrauch [m³-Äqu.]

Teilsystem	H ₂ O (Verbrauch)	H ₂ O (Rückfuhr)	Summe
Tray Molkerei-Zentrallager	1,30E+00	-1,16E+00	1,46E-01
Karton Produzent-Molkerei	2,42E-01	-2,15E-01	2,72E-02
Verbrennungsanlage Kunststoffbecher	6,38E-02	-3,78E-02	2,60E-02
Produktion Kunststoffbecher	3,31E+00	-3,29E+00	1,85E-02
Produktion Aluminiumplattine	9,35E+00	-9,34E+00	9,84E-03
Stretchfolie Molkerei-Zentrallager	9,30E-03	0,00E+00	9,30E-03
Stretchfolie Produzent-Molkerei	6,23E-04	0,00E+00	6,23E-04
Transport Molkerei-Zentrallager	3,13E-02	-3,12E-02	1,20E-04
Transport Produzent-Molkerei	2,53E-03	-2,48E-03	5,20E-05
Deponie Aluminiumplattine	3,60E-05	-3,43E-05	1,67E-06
Deponie Kunststoffbecher	1,55E-03	-1,55E-03	-4,27E-06
Gutschrift Thermische Energie	-9,42E-03	9,37E-03	-4,42E-05
Gutschrift Elektrische Energie	-2,33E+00	2,32E+00	-9,79E-03
Summe	1,20E+01	-1,17E+01	2,28E-01

A.6 Wirkungsabschätzung PS500K

Tabelle A.34 Wirkungskategorie Treibhauspotential [kg CO₂-Äqu.]

Teilsystem	CO ₂	CH ₄	CF ₄	Sonstige	Summe
Produktion Kunststoffbecher	1,33E-01	1,58E-02	7,33E-07	1,60E-03	1,51E-01
Verbrennungsanlage Kunststoffbecher	1,01E-01	8,30E-04	2,95E-08	5,96E-05	1,02E-01
Transport Molkerei-Zentrallager	7,34E-02	3,64E-03	5,44E-09	2,10E-03	7,91E-02
Produktion Aluminiumplatte	6,54E-02	4,30E-03	3,33E-03	5,05E-04	7,35E-02
Tray Molkerei-Zentrallager	6,52E-02	5,46E-03	2,72E-05	1,88E-03	7,26E-02
Produktion Kartonsleeve	4,59E-02	5,94E-03	3,96E-06	1,58E-03	5,34E-02
Stretchfolie Molkerei-Zentrallager	1,06E-02	3,97E-03	0,00E+00	3,87E-05	1,46E-02
Karton Produzent-Molkerei	1,21E-02	1,01E-03	5,05E-06	3,49E-04	1,35E-02
Transport Produzent-Molkerei	5,61E-03	2,88E-04	9,58E-10	1,68E-04	6,07E-03
Verbrennungsanlage Kartonsleeve	1,95E-03	1,83E-04	1,66E-08	4,58E-05	2,18E-03
Stretchfolie Produzent-Molkerei	7,09E-04	2,66E-04	0,00E+00	2,59E-06	9,78E-04
Deponie Kunststoffbecher	1,18E-04	2,27E-05	4,24E-10	1,35E-06	1,42E-04
Deponie Aluminiumplatte	1,58E-05	8,29E-07	6,43E-11	2,86E-07	1,69E-05
Gutschrift Elektrische Energie (Sleeve)	-1,37E-02	-8,00E-04	-3,28E-07	-2,86E-04	-1,47E-02
Gutschrift Thermische Energie (Sleeve)	-1,51E-02	-9,98E-04	-3,03E-08	-9,33E-05	-1,62E-02
Gutschrift Elektrische Energie (Becher)	-2,33E-02	-1,36E-03	-5,59E-07	-4,87E-04	-2,51E-02
Gutschrift Thermische Energie (Becher)	-2,55E-02	-1,69E-03	-5,12E-08	-1,58E-04	-2,74E-02
Summe	4,38E-01	3,69E-02	3,37E-03	7,30E-03	4,85E-01

Tabelle A.35 Wirkungskategorie Versauerung [mol H⁺-Äqu.]

Teilsystem	SO ₂	NO ₂	NO	Sonstige	Summe
Produktion Aluminiumplatte	2,56E-04	3,01E-08	2,59E-07	9,42E-05	3,50E-04
Produktion Kartonsleeve	1,69E-04	9,44E-05	1,80E-05	1,83E-05	3,00E-04
Transport Molkerei-Zentrallager	4,91E-05	2,74E-05	2,00E-04	1,44E-06	2,77E-04
Tray Molkerei-Zentrallager	7,82E-05	1,17E-04	1,94E-05	5,02E-05	2,64E-04
Produktion Kunststoffbecher	1,23E-04	3,23E-05	3,08E-06	8,71E-05	2,45E-04
Stretchfolie Molkerei-Zentrallager	5,65E-05	2,06E-05	0,00E+00	3,93E-11	7,71E-05
Karton Produzent-Molkerei	1,45E-05	2,17E-05	3,61E-06	9,34E-06	4,91E-05
Transport Produzent-Molkerei	1,91E-06	1,77E-06	3,02E-05	1,77E-06	3,57E-05
Verbrennungsanlage Kartonsleeve	4,33E-06	3,87E-09	2,50E-08	1,99E-05	2,42E-05
Verbrennungsanlage Kunststoffbecher	1,58E-06	1,07E-08	7,69E-08	1,14E-05	1,30E-05
Stretchfolie Produzent-Molkerei	3,79E-06	1,38E-06	0,00E+00	2,63E-12	5,17E-06
Deponie Kunststoffbecher	2,40E-07	5,31E-10	5,33E-09	1,78E-07	4,23E-07
Deponie Aluminiumplatte	6,01E-08	1,84E-10	1,69E-09	5,76E-08	1,20E-07
Gutschrift Thermische Energie (Sleeve)	-1,64E-06	-5,49E-10	-7,63E-09	-8,11E-06	-9,76E-06
Gutschrift Thermische Energie (Becher)	-2,77E-06	-9,30E-10	-1,29E-08	-1,37E-05	-1,65E-05
Gutschrift Elektrische Energie (Sleeve)	-1,70E-05	-1,11E-08	-1,27E-07	-1,32E-05	-3,04E-05
Gutschrift Elektrische Energie (Becher)	-2,89E-05	-1,89E-08	-2,16E-07	-2,26E-05	-5,17E-05
Summe	7,07E-04	3,16E-04	2,74E-04	2,36E-04	1,53E-03

Tabelle A.36 Wirkungskategorie Eutrophierung [mol N-Äqu.]

Teilsystem	NO ₂	NO	NO _x	Sonstige	Summe
Transport Molkerei-Zentrallager	1,58E-04	1,15E-03	0,00E+00	6,42E-06	1,31E-03
Tray Molkerei-Zentrallager	6,71E-04	1,12E-04	0,00E+00	6,29E-05	8,46E-04
Produktion Kartonsleeve	5,44E-04	1,04E-04	0,00E+00	8,18E-05	7,29E-04
Produktion Kunststoffbecher	1,86E-04	1,77E-05	4,76E-04	1,98E-05	6,99E-04
Produktion Aluminiumplatte	1,73E-07	1,49E-06	5,32E-04	7,73E-06	5,42E-04
Transport Produzent-Molkerei	1,02E-05	1,74E-04	6,27E-06	3,02E-06	1,93E-04
Karton Produzent-Molkerei	1,25E-04	2,08E-05	0,00E+00	1,17E-05	1,57E-04
Stretchfolie Molkerei-Zentrallager	1,19E-04	0,00E+00	0,00E+00	1,75E-10	1,19E-04
Verbrennungsanlage Kartonsleeve	2,23E-08	1,44E-07	9,37E-05	1,61E-05	1,10E-04
Verbrennungsanlage Kunststoffbecher	6,17E-08	4,43E-07	3,56E-05	2,31E-05	5,91E-05
Stretchfolie Produzent-Molkerei	7,95E-06	0,00E+00	0,00E+00	1,17E-11	7,95E-06
Deponie Kunststoffbecher	3,06E-09	3,07E-08	1,00E-06	1,47E-08	1,05E-06
Deponie Aluminiumplatte	1,06E-09	9,71E-09	3,26E-07	3,84E-09	3,41E-07
Gutschrift Thermische Energie (Sleeve)	-3,16E-09	-4,39E-08	-4,57E-05	-7,92E-07	-4,65E-05
Gutschrift Elektrische Energie (Sleeve)	-6,38E-08	-7,31E-07	-7,06E-05	-4,37E-06	-7,57E-05
Gutschrift Thermische Energie (Becher)	-5,35E-09	-7,44E-08	-7,73E-05	-1,34E-06	-7,87E-05
Gutschrift Elektrische Energie (Becher)	-1,09E-07	-1,24E-06	-1,20E-04	-7,45E-06	-1,29E-04
Summe	1,82E-03	1,58E-03	8,31E-04	2,19E-04	4,45E-03

Tabelle A.37 Wirkungskategorie Abbau der stratosphärischen Ozonschicht [kg CFC11-Äqu.]

Teilsystem	R13 B1	R 10	R12 B1	Sonstige	Summe
Produktion Kartonsleeve	2,65E-09	6,20E-10	3,40E-10	2,75E-10	3,89E-09
Produktion Kunststoffbecher	5,85E-18	0,00E+00	0,00E+00	1,06E-11	1,06E-11
Tray Molkerei-Zentrallager	3,05E-18	0,00E+00	0,00E+00	9,50E-13	9,50E-13
Karton Produzent-Molkerei	5,68E-19	0,00E+00	0,00E+00	1,77E-13	1,77E-13
Transport Molkerei-Zentrallager	8,07E-20	0,00E+00	0,00E+00	1,63E-13	1,63E-13
Produktion Aluminiumplatte	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	3,46E-16	3,46E-16
Verbrennungsanlage Kunststoffbecher	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	3,12E-17	3,12E-17
Verbrennungsanlage Kartonsleeve	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,68E-17	1,68E-17
Transport Produzent-Molkerei	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	7,85E-19	7,85E-19
Deponie Kunststoffbecher	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	3,41E-19	3,41E-19
Deponie Aluminiumplatte	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	6,53E-20	6,53E-20
Stretchfolie Molkerei-Zentrallager	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Stretchfolie Produzent-Molkerei	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Gutschrift Thermische Energie (Sleeve)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	-1,21E-18	-1,21E-18
Gutschrift Thermische Energie (Becher)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	-2,05E-18	-2,05E-18
Gutschrift Elektrische Energie (Sleeve)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	-3,49E-16	-3,49E-16
Gutschrift Elektrische Energie (Becher)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	-5,95E-16	-5,95E-16
Summe	2,65E-09	6,20E-10	3,40E-10	2,87E-10	3,90E-09

Tabelle A.38 Wirkungskategorie Bildung photochemischer Oxidantien [kg NMVOC-Äqu.]

Teilsystem	NO ₂	NO	NO _x	Sonstige	Summe
Transport Molkerei-Zentrallager	3,71E-05	1,76E-04	0,00E+00	2,78E-05	2,41E-04
Tray Molkerei-Zentrallager	1,57E-04	1,71E-05	0,00E+00	5,77E-05	2,32E-04
Produktion Kunststoffbecher	4,37E-05	2,72E-06	1,12E-04	6,86E-05	2,27E-04
Produktion Kartonsleeve	1,28E-04	1,59E-05	0,00E+00	7,53E-05	2,19E-04
Produktion Aluminiumplatine	4,06E-08	2,29E-07	1,25E-04	4,24E-05	1,68E-04
Karton Produzent-Molkerei	2,93E-05	3,18E-06	0,00E+00	1,07E-05	4,32E-05
Stretchfolie Molkerei-Zentrallager	2,79E-05	0,00E+00	0,00E+00	8,64E-06	3,65E-05
Transport Produzent-Molkerei	2,39E-06	2,66E-05	1,47E-06	2,47E-06	3,30E-05
Verbrennungsanlage Kartonsleeve	5,22E-09	2,20E-08	2,20E-05	1,34E-06	2,34E-05
Verbrennungsanlage Kunststoffbecher	1,45E-08	6,78E-08	8,35E-06	1,80E-06	1,02E-05
Stretchfolie Produzent-Molkerei	1,87E-06	0,00E+00	0,00E+00	5,79E-07	2,44E-06
Deponie Kunststoffbecher	7,18E-10	4,69E-09	2,36E-07	6,59E-08	3,07E-07
Deponie Aluminiumplatine	2,48E-10	1,49E-09	7,66E-08	1,57E-08	9,41E-08
Gutschrift Thermische Energie (Sleeve)	-7,42E-10	-6,73E-09	-1,07E-05	-1,74E-06	-1,25E-05
Gutschrift Elektrische Energie (Sleeve)	-1,50E-08	-1,12E-07	-1,66E-05	-2,88E-06	-1,96E-05
Gutschrift Thermische Energie (Becher)	-1,26E-09	-1,14E-08	-1,82E-05	-2,94E-06	-2,11E-05
Gutschrift Elektrische Energie (Becher)	-2,55E-08	-1,91E-07	-2,82E-05	-4,91E-06	-3,33E-05
Summe	4,27E-04	2,41E-04	1,95E-04	2,85E-04	1,15E-03

Tabelle A.39 Wirkungskategorie Feinstaubbelastung [Krankheitsinzidenz/kg PM_{2,5}]

Teilsystem	PM _{2.5}	SO ₂	PM ₁₀	Sonstige	Summe
Produktion Kartonsleeve	3,67E-09	1,03E-09	1,13E-11	3,57E-10	5,07E-09
Produktion Aluminiumplatte	1,79E-09	1,56E-09	4,48E-12	2,12E-10	3,57E-09
Tray Molkerei-Zentrallager	1,64E-09	4,77E-10	4,64E-10	5,98E-10	3,18E-09
Produktion Kunststoffbecher	8,96E-10	7,49E-10	5,65E-12	2,84E-10	1,93E-09
Transport Molkerei-Zentrallager	5,24E-10	3,00E-10	1,81E-14	3,51E-10	1,17E-09
Stretchfolie Molkerei-Zentrallager	1,62E-20	3,45E-10	3,04E-10	4,53E-11	6,94E-10
Karton Produzent-Molkerei	3,04E-10	8,87E-11	8,63E-11	1,11E-10	5,90E-10
Transport Produzent-Molkerei	1,36E-10	1,17E-11	2,71E-14	5,35E-11	2,02E-10
Verbrennungsanlage Kunststoffbecher	1,25E-10	9,65E-12	1,27E-13	4,95E-11	1,84E-10
Verbrennungsanlage Kartonsleeve	4,69E-11	2,64E-11	1,38E-13	6,03E-11	1,34E-10
Stretchfolie Produzent-Molkerei	1,08E-21	2,31E-11	2,03E-11	3,03E-12	4,65E-11
Deponie Kunststoffbecher	2,27E-12	1,46E-12	5,08E-15	4,09E-13	4,14E-12
Deponie Aluminiumplatte	9,86E-13	3,67E-13	6,22E-16	1,31E-13	1,48E-12
Gutschrift Thermische Energie (Sleeve)	-5,98E-11	-1,00E-11	-9,31E-13	-1,84E-11	-8,91E-11
Gutschrift Thermische Energie (Becher)	-1,01E-10	-1,69E-11	-1,58E-12	-3,12E-11	-1,51E-10
Gutschrift Elektrische Energie (Sleeve)	-1,18E-10	-1,04E-10	-3,94E-13	-3,36E-11	-2,56E-10
Gutschrift Elektrische Energie (Kunststoff)	-2,02E-10	-1,77E-10	-6,72E-13	-5,71E-11	-4,36E-10
Summe	8,65E-09	4,32E-09	8,93E-10	1,98E-09	1,59E-08

Tabelle A.40 Wirkungskategorie Wasserverbrauch [m³-Äqu.]

Teilsystem	H ₂ O (Verbrauch)	H ₂ O (Rückfuhr)	Summe
Tray Molkerei-Zentrallager	1,30E+00	-1,16E+00	1,46E-01
Produktion Kartonsleeve	4,01E+00	-3,98E+00	3,35E-02
Karton Produzent-Molkerei	2,42E-01	-2,15E-01	2,72E-02
Verbrennungsanlage Kartonsleeve	2,96E-02	-1,88E-02	1,08E-02
Produktion Aluminiumplatine	1,01E+01	-1,01E+01	1,07E-02
Verbrennungsanlage Kunststoffbecher	2,60E-02	-1,54E-02	1,06E-02
Stretchfolie Molkerei-Zentrallager	9,30E-03	0,00E+00	9,30E-03
Produktion Kunststoffbecher	1,35E+00	-1,34E+00	7,54E-03
Stretchfolie Produzent-Molkerei	6,23E-04	0,00E+00	6,23E-04
Transport Molkerei-Zentrallager	3,14E-02	-3,12E-02	1,20E-04
Transport Produzent-Molkerei	2,59E-03	-2,54E-03	5,33E-05
Deponie Aluminiumplatine	3,89E-05	-3,71E-05	1,80E-06
Deponie Kunststoffbecher	6,30E-04	-6,32E-04	-1,74E-06
Gutschrift Thermische Energie (Sleeve)	-2,27E-03	2,26E-03	-1,06E-05
Gutschrift Thermische Energie (Becher)	-3,84E-03	3,82E-03	-1,80E-05
Gutschrift Elektrische Energie (Sleeve)	-5,57E-01	5,55E-01	-2,34E-03
Gutschrift Elektrische Energie (Becher)	-9,49E-01	9,45E-01	-3,99E-03
Summe	1,56E+01	-1,54E+01	2,50E-01