BIOGENE ROHSTOFFE IN VERPACKUNGEN

Warum sie nicht automatisch nachhaltiger sind

IMPRESSUM

Herausgeber	WWF Deutschland (Stiftung bürgerlichen Rechts, vertreten durch die Vorständin Meike Rothschädl), Reinhardtstraße 18, D-10117 Berlin
Stand	November 2025
Autor:innen	Mirjam Busch, Simon Früh, Benedikt Kauertz (ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg gGmbH) Bastian Größl, Kurt Schüler (GVM – Gesellschaft für Verpackungsmarktforschung mbH)
Redaktion:	Tina Kussin, Tom Ohlendorf (beide WWF Deutschland)
Mitwirkende	Laura Griestop, Laura Prill, Rebecca Tauer, Johannes Zahnen (alle WWF Deutschland)
Koordination	Tina Kussin (WWF Deutschland)
Kontakt	tina.kussin@wwf.de
Bildredaktion	Sonja Ritter (WWF Deutschland)

Bildnachweise

Titelbild: DaLiu via Getty Images

1. Auflage

©2025 WWF Deutschland, Berlin. Nachdruck, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung des Herausgebers.

Abstract

Deutsch

Die ifeu/GVM-Studie „Einsatz biobasierter Rohstoffe in Verpackungen im Sinn der Kreislaufwirtschaft sowie des Natur- und Klimaschutzes“ untersucht, inwieweit der künftige Bedarf an Verpackungen in Deutschland aus biobasierten Rohstoffen mit möglichst geringem und ökologisch verträglichem Biomasseeinsatz gedeckt werden kann. Die Studie zeigt, dass trotz eines rückläufigen Verpackungsaufkommens und eines steigenden Anteils an Recyclingmaterialien der Flächen- und Wasserbedarf durch den wachsenden Einsatz biobasierter Kunststoffe zunimmt. Zudem verursacht die Nutzung von Biomasse in Kunststoffen im Vergleich zu Papier höhere Umweltbelastungen. Daraus leitet die Studie drei zentrale Handlungsempfehlungen ab: (1) Vorrang für Vermeidung, Wiederverwendung und Recycling vor einer großflächigen Verwendung biobasierter Kunststoffe, (2) deutliche Reduktion des Primärholzeinsatzes zugunsten von Altholz und Reststoffen sowie (3) ein gezielter, aber verantwortlicher Einsatz von Power-to-X-Kunststoffen als Ergänzung, um ökologische Zielkonflikte zu verringern und die Nachhaltigkeit im Verpackungssektor zu stärken.

English

The ifeu/GVM study “Use of Bio-Based Raw Materials in Packaging in the Context of Circular Economy, Nature and Climate Protection” examines to what extent future demand for packaging in Germany can be met using bio-based raw materials while keeping biomass use as low and environmentally compatible as possible. The study shows that, despite declining packaging volumes and an increasing share of recycled materials, land and water requirements are rising with use of bio-based plastics.
Furthermore, the use of biomass in plastics causes higher environmental pressure compared with paper. From this, the study derives three key recommendations: (1) giving priority to prevention, reuse, and recycling over the widespread use of bio-based plastics, (2) substantially reducing the use of primary wood in favour of recycled wood and residual materials, and (3) employing Power-to-X plastics in a targeted yet responsible manner as a complementary option to ease ecological pressure and enhance sustainability in the packaging sector.

Inhalt

Abstract **2**
Abbildungsverzeichnis **5**
Tabellenverzeichnis **6**
Abkürzungsverzeichnis **7**
Kurzfassung **8**

1 Hintergrund und Ziel der Studie **10**

2 Vorgehensweise und Methodik **11**
2.1 Bearbeitungskonzept 11
2.2 Definitionen und Einordnungen 13
2.3 Methodische Festlegungen 14

3 Biogene Rohstoffe für Verpackungen: Auswahl, Verfügbarkeit und Anwendungspotenziale **16**
3.1 Auswahl und Kategorisierung potenzieller biogener Rohstoffe 16
3.2 Globale Verfügbarkeit und Erschließungspotenziale biogener Rohstoffe 18
3.3 Exkurs zum Dilemma der Primärholznutzung: Auswirkungen auf Kohlenstoffspeicherung und Biodiversität 19

4 Darstellung und Bewertung der ökologischen Herausforderungen **21**
4.1 Quantitative Bewertung – Berechnung von Umweltkennwerten 21
4.2 Qualitative Bewertung der Verfügbarkeit und Identifikation möglicher Konkurrenzen 26

5 Aufstellung eines Stoffstrommodells für Verpackungen bis zum Jahr 2045 **30**
5.1 Vorgehen bei der Ableitung der Verpackungsstoffströme 30
5.2 Prognose des Verpackungsverbrauchs bis 2045 32
5.3 Rezyklateinsatzquoten 37
5.4 Recyclingquoten 38
5.5 Aufstellen des Stoffstroms 40

6 Bewertung des Stoffstrommodells für Verpackungen bis 2045 **44**
6.1 Bewertung BAU-Szenario 44
6.2 Analyse und Bewertung möglicher Optimierungen 48

7 Schlussfolgerungen und Empfehlungen **56**
7.1 Zusammenfassung der Ergebnisse der Studie 57
7.2 Ableitung von Schlussfolgerungen aus den Ergebnissen der Studie 58

Inhalt

7.3 Beantwortung der Forschungsfragen 60
7.4 Ableitung von Empfehlungen an die Politik 61
7.5 Ableitung von Empfehlungen für Unternehmen 61

Literaturverzeichnis 64

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Bearbeitungsstruktur des Projekts	12
Abbildung 2:	Vorgehen bei der Ableitung der Stoffströme 2023/2030/2045	32
Abbildung 3:	Prognose des Verpackungsverbrauchs in Kilotonnen (kt)	34
Abbildung 4:	Vergleich der Recyclingquote für 2022	39
Abbildung 5:	Prognose der Recyclingquote (outputorientiert)	40
Abbildung 6:	Ergebnis der Berechnung des Verpackungsstoffstroms für das Jahr 2023	41
Abbildung 7:	Ergebnis der Berechnung des Verpackungsstoffstroms für das Jahr 2030	41
Abbildung 8:	Ergebnis der Berechnung des Verpackungsstoffstroms für das Jahr 2045	41
Abbildung 9:	Bewertung BAU-Szenario für den Parameter Fläche	45
Abbildung 10:	Bewertung BAU-Szenario für den Parameter Energie	46
Abbildung 11:	Bewertung BAU-Szenario für den Parameter Wasser	47
Abbildung 12:	Bewertung Optimierungsszenarien für den Parameter Fläche	51
Abbildung 13:	Bewertung Optimierungsszenarien für den Parameter Energie	52
Abbildung 14:	Bewertung Optimierungsszenarien für den Parameter Wasser	53

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Erläuterung der biogenen Rohstoffe	16
Tabelle 2:	Vorgehen bei der Berechnung der Umweltkennwerte inkl. Angabe der wesentlichen verwendeten Quellen	22
Tabelle 3:	Emissionsfaktoren für die identifizierten Biomassepotenziale	25
Tabelle 4:	Qualitative Bewertung der in der Studie betrachteten biobasierten Rohstoffe	28
Tabelle 5:	Verpackungsverbrauch vergleichend für 2023 und 2045	35
Tabelle 6:	Rezyklateinsatz in Verpackungen (inkl. Um- und Transportverpackung) in Prozent	37
Tabelle 7:	Errechneter Primärmaterialinput in den Verpackungsstoffstrom	42
Tabelle 8:	Zusammenführende Bewertung zur Identifikation des Optimierungspotenzials bei Verpackungspapieren	49
Tabelle 9:	Zusammenführende Bewertung zur Identifikation des Optimierungspotenzials bei Verpackungskunststoffen	49
Tabelle 10:	Übersicht über die Szenarien	50
Tabelle 11:	Zusammenführende Bewertung zur Identifikation des Optimierungspotenzials bei Verpackungskunststoffen	54

Abkürzungsverzeichnis

aF-Äq	artifizielle Flächenäquivalente
BAU-Szenario	„Business-as-usual“-Szenario
BLE	Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung
BMEL	Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (heute: BMLEH)
EUDR	European Union Deforestation Regulation
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations
FEFCO	Fédération Européenne des Fabricantes de Papiers pour Ondulé
FKN	Flüssigkeitskarton (auch als Name für die Abfallfraktion gebräuchlich)
KEA	Kumulierter Energieaufwand
LDPE	Low-Density Polyethylene
LPB	Liquid Paper Board – Rohstoff für Getränkeverbundkartons aus 100 % Primärfaser
LVP	Leichtverpackungen
MVA	Müllverbrennungsanlage
NFP	Naturfernepotenzial
PA	Polyamid
PE	Polyethylen
PEV	Privater Endverbrauch
PLA	Polylactid
P-Mat	Primärmaterial
PPK	Papier, Pappe, Karton
PPWR	Packaging & Packaging Waste Regulation
PTT	Polytrimethylenterephthalat
PtX	Power-to-X
REC	Recycled Content
S-Mat	Sekundärmaterial

Kurzfassung

Ausgangssituation und Zielsetzung

Deutschland verfolgt das Ziel, bis zum Jahr 2045 Treibhausgasneutralität zu erreichen. Die Nutzung von Biomasse stellt dabei einen zentralen Baustein der erforderlichen Defossilisierungsstrategie dar. Die vorliegende Studie untersucht, welche biobasierten Rohstoffe künftig zur Deckung des prognostizierten Verpackungsbedarfs verfügbar sein werden, welche ökologischen Herausforderungen mit deren Einsatz verbunden sind und welche Alternativen sowie Optimierungspotenziale sich daraus ableiten lassen.

Biobasierte Rohstoffe und ihre Bewertung

Insgesamt wurden 13 biobasierte Rohstoffe einer vertieften Analyse unterzogen. Die Bewertung konzentriert sich auf drei zentrale Indikatoren: den *Flächenverbrauch*, gemessen über das Naturfernepotenzial (NFP), den *kumulierten Energieaufwand* (KEA) sowie den *Wasserverbrauch*. Dabei wird unterschieden, ob aus dem jeweiligen Rohstoff eine papierbasierte Verpackung (PPK-Verpackung) oder eine Kunststoffverpackung produziert wird. Die Bewertung hat folgende zentrale Ergebnisse:

- Biobasierte Kunststoffe sind in der Herstellung energieintensiver als papierbasierte Verpackungen bei identischen Ausgangsrohstoffen.
- Alternative Zellstoffquellen wie Laub, Gras, Silphie und Agrarreststoffe können den Flächenfußabdruck signifikant reduzieren, ohne den Energie- oder Wasserverbrauch wesentlich zu erhöhen.
- Die Nutzung von Neben- und Reststoffe wie Tallöl, Altholz und Altpapier verursacht die geringsten Umweltwirkungen in Bezug auf Flächen- und Energiebedarf, wobei bei Altholz und Altpapier der Wasserverbrauch bei der Kunststoffherstellung höher liegt.
- Zwischen Flächen- und Energiebedarf besteht ein Zielkonflikt: Verbesserungen in einem Bereich gehen häufig zulasten des anderen.

Prognose des Verpackungsverbrauchs bis 2045 und Ableitung des Bedarfs biobasierter Rohstoffe bis 2045

Die Bewertung der Umwelteffekte erfolgt nicht ausschließlich auf Ebene der einzelnen Packstoffe, sondern wird im Kontext des aktuellen und künftig erwarteten Verpackungsverbrauchs in Deutschland interpretiert. In Kombination mit Daten und Abschätzungen zum Aufkommen an Verpackungen, zur Verwertungssituation und zum Stand des Einsatzes von Rezyklaten wird ein Stoffstrommodell für Verpackungen in Deutschland für die Jahre 2023, 2030 und 2045 entwickelt. Das Modell zeigt, dass der Primärmaterialeinsatz bis 2045 um 37 % gegenüber 2023 sinkt und der Anteil wieder in den Verpackungsstoffstrom zurückgeführter Materialien von 52 % auf 64 % steigt. Trotz des rückläufigen Verpackungsverbrauchs in Deutschland und des deutlichen Ausbaus der Kreislaufwirtschaft steigt der Anteil biobasierter Materialien am Primärmaterialinput in den Verpackungsstoffstrom signifikant an – insbesondere infolge der zunehmenden Verwendung biobasierter Kunststoffe bis zum Jahr 2045. Der Anteil biobasierter Primärkunststoffe an allen Kunststoffverpackungen wächst von derzeit 3 % (68 kt) auf 43 % (363 kt) im Jahr 2045. Zugleich zeigt sich, dass auch 2045 noch ein erheblicher Teil der Verpackungen am Lebensende mangels Recyclingfähigkeit einer thermischen Verwertung zugeführt wird oder den Stoffstrom in Richtung anderer, nicht verpackungsbezogener Anwendungen verlässt.

Zusammenführung Umweltbewertung und Rohstoffbedarf

Zur Analyse der Fragestellung, inwieweit die Veränderungen im Verpackungsverbrauch in Deutschland – insbesondere durch die langfristige Reduktion des Gesamtverbrauchs – sowie die Verschiebungen in der Nutzung der eingesetzten Biomasse biobasierter Rohstoffe – weniger PPK, dafür mehr biobasierte Kunststoffe – Auswirkungen auf die Beiträge zu den analysierten Parametern Flächenbedarf, Energieverbrauch und Wasserbedarf haben, werden die erarbeitete Bewertung und der Bedarf biobasierter Rohstoffe miteinander in Verbindung gesetzt. Die Ergebnisse zeigen, dass die Vermeidung von Verpackungen, der Ausbau funktionaler Mehrweglösungen sowie die Steigerung von Recyclingquoten und des Rezyklateinsatzes zentrale Hebel zur Reduktion des Rohstoffbedarfs und der damit verbunden Umweltbelastungen sind. So sinken alle bilanzierten Beiträge zu den drei analysierten Parametern zunächst bis zum Jahr 2030. Erst ab dem Zeitpunkt, an dem biobasierte Rohstoffe vermehrt als Ausgangsstoff für biobasierte Kunststoffe in das System einfließen, steigen die Beiträge deutlich an und überschreiten das Ausgangsniveau von 2023.

Im Rahmen einer Szenarienanalyse wurden daher verschiedene Optimierungsansätze untersucht: die Nutzung von Anbaubiomasse, die verstärkte Verwendung von Reststoffen und Nebenprodukten, die Nutzung von Verpackungsabfällen, die derzeit in andere Anwendungen fließen – beispielsweise in die thermische Verwertung – sowie der Einsatz von PtX-Kunststoffen als synthetische Alternativen. Die Ergebnisse der Optimierungsszenarien zeigen:

- Die größten Potenziale liegen bei Reststoffen und Nebenprodukten sowie Verpackungsabfällen, die derzeit außerhalb des Verpackungsstoffstroms genutzt werden, da sie signifikante Reduktionen bei Flächen-, Energie- und Wasserverbrauch ermöglichen.
- Altholz bietet aufgrund des großen Massenstroms ein hohes Potenzial zur Substitution von Primärholz.

Fazit

Um die Umweltfolgen des zukünftigen Aufkommens an Verpackungen wirksam zu begrenzen, sind eine konsequente Reduktion des Verpackungsverbrauchs, der Ausbau funktionaler Mehrwegsysteme, die Auslegung auf hochgradiges Recycling sowie die verstärkte Nutzung von Recyclingmaterialien zwingend erforderlich. Biobasierte Kunststoffe können zwar fossile Rohstoffe substituieren, sollten jedoch vorrangig dort eingesetzt werden, wo Kreislauflösungen technisch und ökonomisch nicht umsetzbar sind – und nicht als pauschale Alternativlösung für eine Kreislaufwirtschaft verstanden werden. Altholz und andere Sekundärrohstoffe besitzen zudem ein hohes Substitutionspotenzial für Primärholz. Insgesamt ist eine systemische Transformation der Verpackungswirtschaft notwendig, um ihre Umweltwirkungen langfristig und nachhaltig zu minimieren.

Auf Grundlage der Analyse wird deutlich, dass der Einsatz biobasierter Rohstoffe für die Herstellung von Kunststoffverpackungen weder als vorrangige Handlungsoption noch als gleichwertiger Ersatz einzustufen ist.

1 Hintergrund und Ziel der Studie

Der vorliegende Bericht wurde im Auftrag des WWF Deutschland vom ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg und der GVM Gesellschaft für Verpackungsmarktforschung im Zeitraum von Oktober 2024 bis Oktober 2025 erstellt. Der Bericht ist eine Dokumentation der im Rahmen des Projekts erarbeiteten Ergebnisse.

Ausgangslage

Deutschland hat sich das Ziel gesetzt, bis zum Jahr 2045 treibhausgasneutral zu werden. Dafür bedarf es einer weitreichenden Dekarbonisierung aller Wirtschaftssektoren – einschließlich der Wertschöpfungsketten im Bereich der Verpackungen. Die Nutzung von Biomasse stellt dabei eine Möglichkeit dar, Treibhausgasemissionen signifikant zu reduzieren. Gleichzeitig steht nur ein begrenztes und nachhaltig nutzbares Biomassepotenzial aus land- und forstwirtschaftlichem Anbau zur Verfügung. Ein effizienter und zielgerichteter Einsatz biogener Rohstoffe ist daher essenziell, um ökologische und wirtschaftliche Zielsetzungen in Einklang zu bringen.

Bereits heute sind über 60 % aller Verpackungen in Deutschland biobasiert: Holz, Flüssigkeitskartons (FKN), Papier/Pappe/Karton (PPK) sowie zu einem geringen Anteil auch Kunststoffe in Form biobasierter Kunststoffe. Es ist davon auszugehen, dass sich der Trend zur Substitution fossiler Kunststoffverpackungen durch biogene Rohstoffe in den nächsten Jahren fortsetzen wird. Wesentliche Treiber dieser Entwicklung sind insbesondere regulatorische Vorgaben der Europäischen Union, wie etwa verpflichtende kunststoffspezifische Rezyklateinsatzquoten, sowie unternehmensseitige Strategien zur Reduktion fossiler Verpackungsmaterialien.

Forschungsfragen

Vor diesem Hintergrund behandelt dieser Bericht folgende zentrale Fragestellungen:

- Welche Rolle können biobasierte Rohstoffe im Bereich Verpackungen zukünftig ökologisch sinnvoll einnehmen?
- Inwieweit stehen ausreichend (nachhaltige) biobasierte Rohstoffe zur Verfügung, um den prognostizierten Bedarf biobasierter Verpackungen in Deutschland zu decken?
- Wie sind die ökologischen Herausforderungen der unterschiedlichen biobasierten Rohstoffe zu bewerten?
- Welche alternativen Kohlenstoffquellen stehen heute und in Zukunft zur Verfügung und wie sind diese im Vergleich zu biobasierten Rohstoffen zu bewerten?

Zielstellung

Ziel der Untersuchung ist es, konkrete Optionen für einen ökologisch sinnvollen und ressourcenschonenden Einsatz biogener Rohstoffe in Verpackungen aufzuzeigen – stets im Einklang mit den übergeordneten Zielen der Treibhausgasneutralität, Ressourceneffizienz und Biodiversitätssicherung. Auf Basis der im Bericht durchgeführten Analysen werden faktenbasierte Schlussfolgerungen gezogen, die eine sachgerechte Einschätzung der untersuchten Optionen ermöglichen. Ergänzend werden Handlungsempfehlungen formuliert, die sich sowohl an Entscheidungsträger:innen aus der Politik als auch an Akteur:innen entlang der Verpackungswertschöpfungskette richten.

2 Vorgehensweise und Methodik

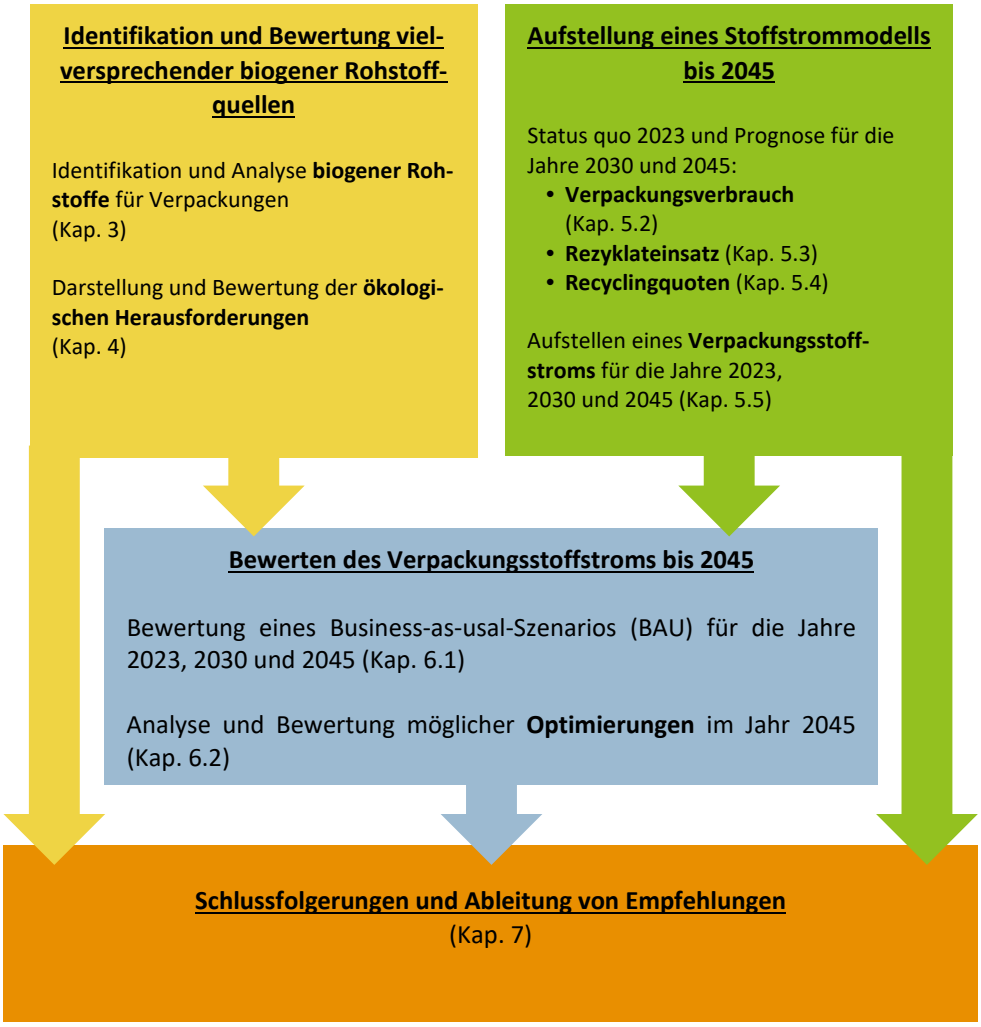
Für die Umsetzung des Projekts wurde eine systematische Vorgehensweise gewählt, die sowohl qualitative als auch quantitative Methoden kombiniert. Dieses Kapitel stellt das Bearbeitungskonzept vor, erläutert zentrale Begriffe im Kontext biogener Rohstoffe für Verpackungen und beschreibt die methodischen Grundlagen der durchgeführten ökologischen Bewertung. Zudem wird aufgezeigt, wie die einzelnen Arbeitsschritte aufgebaut sind und welche Kriterien zur Analyse und Einordnung herangezogen werden.

2.1 Bearbeitungskonzept

Die inhaltliche Auseinandersetzung mit den in Kapitel 1 definierten Forschungsfragen erfolgte im Rahmen einer mehrstufigen Bearbeitungslogik. Diese gliedert sich in mehrere Arbeitspakete und -schritte, die jeweils unterschiedliche Schwerpunkte verfolgten. Die Ergebnisse der einzelnen Arbeitsschritte wurden abschließend in einer Gesamtauswertung zusammengeführt.

Abbildung 1 veranschaulicht die Struktur und den Ablauf der Projektbearbeitung. Sie zeigt die inhaltliche Abfolge der Arbeitspakete sowie deren logische Verknüpfung im Rahmen des Gesamtprojekts.

Abbildung 1: Bearbeitungsstruktur des Projekts



Im Folgenden werden die einzelnen Arbeitsschritte kurz beschrieben:

- **Identifikation und Bewertung vielversprechender biogener Rohstoffquellen:** Im ersten Arbeitsschritt der Untersuchung erfolgen Auswahl und Beschreibung der für die weitere Analyse relevanten biogenen Rohstoffe. Anschließend werden diese Rohstoffe im Hinblick auf ihre Umweltwirkungen analysiert. Soweit verfügbar werden ökobilanzielle Kennwerte herangezogen, um zentrale Umweltaspekte – wie Flächen-, Energie- und Wasserverbrauch zu bewerten. Ziel dieses Arbeitsschritts ist es, jene biogenen Rohstoffe zu identifizieren, deren Nutzung mit möglichst geringen Umweltbelastungen einhergeht und die somit aus ökologischer Sicht besonders geeignet für den Einsatz in Verpackungen sind.

Inhalte der Kapitel 3 und 4

- **Aufstellen eines Stoffstrommodells für Verpackungen bis zum Jahr 2045:** Parallel zur Identifikation und ökologischen Bewertung geeigneter biogener Rohstoffe wird eine Prognose des Verpackungsverbrauchs in Deutschland bis zum Jahr 2045 erstellt. Das Jahr 2030 dient dabei als Stützjahr. Ziel dieses Arbeitsschritts ist es, den zukünftigen Bedarf biobasierter Verpackungen sowie den damit verbundenen Rohstoffbedarf abzuleiten. Ergänzend zur Prognose des zukünftigen Verpackungsverbrauchs erfolgt eine Abschätzung der Entwicklung der Recyclingquoten sowie der Einsatzquoten von Sekundärmaterialien bis zum Jahr 2045. Auf dieser Datenbasis wird ein Stoffstrommodell für Verpackungen in

Inhalt des Kapitels 5

Deutschland erstellt, mit dem Ziel, den Bedarf an primären biogenen Verpackungsmaterialien zu quantifizieren.

Inhalt des Kapitels 6

- **Bewerten des Verpackungsstoffstroms:** In Kapitel 6 wird der im Rahmen von Kapitel 5 erarbeitete Bedarf an primären biogenen Verpackungsmaterialien unter Berücksichtigung der in Kapitel 4 erarbeiteten ökologischen Kennwerte und weiterer qualitativer Umweltaspekte bewertet. Die Bewertung erfolgt sowohl im Rahmen eines Business-as-usual-Szenarios (BAU), in dem antizipiert wird, dass bis 2045 noch die gleichen Rohstoffe wie heute zur Bedienung des Bedarfs an biobasierten Verpackungen genutzt werden, als auch im Kontext verschiedener Optimierungsszenarien. Ziel ist es aufzuzeigen, wie sich die Umweltwirkungen des Bedarfs an Primärmaterialien im Stoffstrom der Verpackungen voraussichtlich entwickeln, welche Potenziale zur Optimierung bestehen und inwieweit sich diese Maßnahmen ergänzen oder gegebenenfalls auch widersprechen.

Inhalt des Kapitels 7

- Auf Grundlage der in den Arbeitspaketen gewonnenen wissenschaftlichen Erkenntnisse werden im abschließenden Kapitel des Berichts fundierte **Schlussfolgerungen** abgeleitet. Diese dienen dazu, die Forschungsfragen sachgerecht und faktenbasiert zu beantworten. Neben der direkten Beantwortung dieser Fragen erfolgt eine weiterführende Ableitung von Empfehlungen, die sich am erarbeiteten Wissensstand orientieren.

2.2 Definitionen und Einordnungen

Für das Verständnis des Berichts ist eine klare Abgrenzung zentraler Begriffe erforderlich. Dieses Kapitel definiert die wichtigsten Begriffe im Kontext von Verpackungen sowie biobasierten Rohstoffen und Verpackungsmaterialien.

Verpackungen

Verpackungen erfüllen zentrale Funktionen entlang der Wertschöpfungskette von Produkten. Sie dienen dem Schutz, der Lagerung, dem Transport sowie der Verkaufsförderung von Waren. Dabei kommen verschiedene Materialien wie Kunststoff, Papier, Metall oder Glas zum Einsatz. Funktional lassen sich Verpackungen in drei Kategorien unterteilen: die direkte Primärverpackung, die mittlere Sekundärverpackung und die äußere Tertiärverpackung. Über ihre grundlegenden Schutzfunktionen hinaus leisten Verpackungen wichtige Beiträge zu Hygiene, Haltbarkeit, Verbraucherinformation und Marketing. Sie tragen wesentlich zur Produktsicherheit bei, helfen, Lebensmittelverluste zu reduzieren, und entfalten eine starke Kommunikationswirkung am Point of Sale.

Biobasierte Rohstoffe

Biobasierte (oder biogene) Rohstoffe sind nachwachsende Alternativen zu fossilen Rohstoffen. Neben Materialien pflanzlicher Herkunft können damit auch Rohstoffe tierischer Herkunft gemeint sein. Dabei kann es sich sowohl um gezielt angebaute nachwachsende Rohstoffe aus der Land- und Forstwirtschaft handeln als auch um andere Formen von Biomasse, etwa Nebenprodukte, Rest- und Abfallstoffe aus der Agrar-, Tier- und Forstwirtschaft.

Biobasierte Kunststoffe

Biobasierte Kunststoffe sind Kunststoffe, die ausschließlich oder teilweise aus nachwachsenden Rohstoffen hergestellt werden (Umweltbundesamt 2023). Im Jahr 2022 wurden weltweit 4,5 Mio. Tonnen biobasierte Kunststoffe hergestellt (Nova Institut 2024). Dies entspricht 1 % des Gesamtproduktionsvolumen von Kunststoffen auf fossiler Basis. Unter den biobasierten Kunststoffen dominieren Polylactide (PLA) mit einem Anteil von 22 %, gefolgt von biobasiertem Polyamid (PA) mit einem Anteil von 20 %, Polytrimethylenterephthalat (PTT, 17 %) und Polyethylen (PE, 5 %) (EUWID Verpackung 2024).

Holz und PPK-Verpackungen als biobasierte Verpackungen

Biobasierte Verpackungen aus Holz und holzbasierten Materialien wie **Papier, Pappe und Kartonagen** zählen zu den ältesten Formen biobasierter Verpackungen. Sie bestehen aus lignocellulosischer Biomasse und sind somit erneuerbar, gut recycelbar und häufig biologisch abbaubar. Die Einsatzbereiche reichen von Transportverpackungen aus Voll- und Sperrholz über Wellpappenverpackungen bis hin zu Faltschachteln und Papierbeuteln im Einzelhandel. Ihr Marktanteil ist besonders im Bereich der Lebensmittel-, Versand- und Konsumgüterverpackungen hoch.

2.3 Methodische Festlegungen

Untersuchungsrahmen

Der Untersuchungsrahmen der vorliegenden Studie konzentriert sich ausschließlich auf den Verpackungssektor in Deutschland. Im Fokus stehen die folgenden biobasierten Materialfraktionen:

- Verpackungen aus Holz,
- Verpackungen aus Papier, Pappe und Kartonagen (PPK),
- Verpackungen aus biobasierten Kunststoffen.

Quantitative Umweltbewertung auf Basis ökobilanzieller Kennwerte

Die Bewertung der ökologischen Herausforderungen erfolgt auf Basis einer qualitativ-quantitativen Methodenkombination. Die **quantitative Umweltbewertung** konzentriert sich auf drei zentrale Umweltindikatoren:

- Flächennutzung,
- Energieaufwand,
- Wasserverbrauch.

Die für diese Bewertung erforderlichen Daten stammen aus einschlägigen Literaturquellen, bestehenden Studien sowie öffentlich zugänglichen Datenbanken und werden vergleichend gegenübergestellt.

Qualitativ beschreibende Umweltbewertung auf Basis von Expertenwissen

Ergänzend zur quantitativen ökologischen Bewertung erfolgt eine **qualitative Umweltbewertung** der Daten im Kontext bestehender Nutzungskonkurrenzen und ökologischer Belastungsgrenzen. Dabei werden insbesondere quantitative Umweltbewertungen anhand messbarer Parameter berücksichtigt:

- aktuelle Verfügbarkeit,
- Flächeneffizienz,
- Nutzungskonkurrenzen.

Abgrenzung und Einschränkungen

Die vorliegende Studie erhebt **nicht** den Anspruch, umfassende Ökobilanzen für die untersuchten biogenen Rohstoffe zu erstellen. Vielmehr erfolgt eine indikative, vergleichende Umweltbewertung auf Basis ausgewählter Parameter. Diese bewusste Eingrenzung erfolgt vor dem Hintergrund bestehender methodischer und datenbasierter Limitationen. Eine umfassende Integration aller umweltbezogenen, wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Anforderungen sowie konkurrierender Nutzungen biogener Materialien ist gegenwärtig nicht umsetzbar. Ebenso kann keine ganzheitliche Betrachtung entlang der gesamten Wertschöpfungskette – einschließlich vor- und nachgelagerter Prozesse – erfolgen. Wechselwirkungen mit anderen Industriesektoren werden qualitativ und in Bezug auf potenzielle Nutzungskonkurrenzen einbezogen.

Interpretation und Einordnung

Die Umweltbewertung erfolgt nicht als statisches Ranking der untersuchten Materialien, sondern als kritische Einordnung der jeweiligen Umweltwirkungen. Der Bericht verfolgt dabei ausdrücklich nicht das Ziel, biobasierte Kunststoffe oder die stoffliche Nutzung von Biomasse grundsätzlich zu kritisieren. Die Ergebnisse sind als Orientierungshilfe zu verstehen und zielen darauf ab, eine differenzierte Auseinandersetzung mit nachhaltigen Verpackungslösungen zu ermöglichen. Sie sollen Entscheidungsträger:innen darin unterstützen, ökologische Potenziale und Zielkonflikte besser zu erkennen und darauf aufbauend fundierte Strategien für den ressourcenschonenden Einsatz biogener Verpackungsmaterialien zu entwickeln.

3 Biogene Rohstoffe für Verpackungen: Auswahl, Verfügbarkeit und Anwendungspotenziale

Für die vertiefte Betrachtung im Rahmen des Projekts wurden 13 biogene Rohstoffe ausgewählt, die aufgrund ihrer aktuellen Nutzung und ihres Entwicklungspotenzials für biobasierte Wertschöpfungsketten eine besondere Relevanz aufweisen.

3.1 Auswahl und Kategorisierung potenzieller biogener Rohstoffe

Kriterien der Auswahl

Die Kriterien der Auswahl beruhten auf einer Kombination aus Marktrelevanz, Innovationspotenzial und ökologischer Bewertung. Neben heute schon genutzten biobasierten Materialien wie Holz, Zellstoff und ausgewählte Anbaubiomassen wie Mais und Zuckerrübe/Zuckerrohr wurden auch vielversprechende Rohstoffe in frühen Entwicklungsstadien berücksichtigt, etwa Laub oder Gräser. Zudem flossen Neben- und Abfallprodukte mit Potenzial für die stoffliche Nutzung in die Auswahl ein, darunter Bagasse aus der Zuckerrohrverarbeitung, Tallöl und Lignin aus der Papierherstellung sowie Verpackungsabfälle wie Altpapier und Altholz.

Auch weniger etablierte Materialien wie Silphie (auch durchwachsene Silphie genannt), Bambus oder Paludikulturpflanzen wurden einbezogen, um neue Wege für Verpackungsanwendungen zu erschließen. Der Fokus lag dabei insbesondere auf Rohstoffen, die zur Herstellung faserbasierter Verpackungen geeignet sind, da der Bedarf an Papierverpackungen aktuell deutlich höher ist als der an biobasierten Kunststoffen.

Tabelle 1 gibt einen Überblick über die 13 ausgewählten biogenen Rohstoffe.

Tabelle 1: Erläuterung der biogenen Rohstoffe

Rohstoff	Materialbeispiele/Quellen	Kurzbeschreibung	Im Studienkontext betrachtete Anwendung
Primärholz	Häufig: Fichte, Kiefer; selten: Buche, Eiche, Eukalyptus	Direkt aus frisch geschlagenen Bäumen, unbehandelt	Holzverpackungen (Paletten, Obstkisten) & Primärfaser in PPK-Verpackungen
Laub	Städtisch gesammeltes Laub	Sammlung saisonaler Biomasse-Abfälle – meist aus Forst & Stadtgrün	Ersatz für Primärfaser in PPK-Verpackungen

Rohstoff	Materialbeispiele/Quellen	Kurzbeschreibung	Im Studienkontext betrachtete Anwendung
Altholz	Industrierestholz, Gebrauchtholz	Holzabfallprodukte aus Verarbeitung oder Nutzung	Ersatz für Primärholz in Zellstoff & Rohstoff für Biokunststoff
Altpapier	Papier, Pappe, Karton aus Recycling	Sekundärrohstoff mit Zellulose, Füllstoffen etc.	(Etabliert) Ersatz in Zellstoffproduktion, Rohstoff für Biokunststoffe
Gräser	Gras von Dauergrünland	Mahd von ungedüngten Wiesen- oder Überschussflächen	Ersatz für Primärfaser in PPK-Verpackungen
Silphie	Gesamte Pflanze	Mahd des mehrjährigen Korbblütengewächses mit hohem Ertrag	Ersatz für Primärfaser in PPK-Verpackungen
Paludikulturen	Schilf, Rohrkolben, Torfmoos etc.	Schilfmahd aus der Bewirtschaftung nasser Moorstandorte	Ersatz für Primärfaser in PPK-Verpackungen
Bambus	Riesenbambus, Schirmbambus, Flachrohrbambus	Mahd des schnell wachsenden Riesengrases, stabil und leicht	Ersatz für Primärfaser in PPK-Verpackungen
Mais	Silomais, Körnermais, Maislaub	Ernte der Nutzpflanze mit Frucht, Laub und Stroh	Laub/Stroh: Ersatz für Primärfaser in PPK-Verpackungen Frucht: Rohstoff für Biokunststoffe
Zuckerrübe	Schnitzel, Melasse, Rückstände	Zuckerreiche Pflanze, Nebenprodukte industriell nutzbar	Laub/Stroh: Ersatz für Primärfaser in PPK-Verpackungen Frucht: Rohstoff für Biokunststoffe
Zuckerrohr/ Bagasse	Zuckerrohrsaft, Pressrückstände	Saft für Ethanol, Bagasse als Faserstoff	Bagasse: Ersatz für Primärfaser in PPK-Verpackungen Saft (Ethanol): Rohstoff für Biokunststoffe
Tallöl	Nebenprodukt der Zellstoffherstellung	Mischung aus Harzsäuren, Fettsäuren, Alkoholen	Rohstoff für Biokunststoffe
Lignin	Nebenprodukt der Papierindustrie	Biopolymer, verholzt pflanzliche Zellwände	Rohstoff für Biokunststoffe

3.2 Globale Verfügbarkeit und Erschließungspotenziale biogener Rohstoffe

Die globale Verfügbarkeit biogener Rohstoffe variiert stark in Abhängigkeit von klimatischen, geografischen und agrarwirtschaftlichen Faktoren sowie aufgrund bestehender Nutzungskonkurrenz mit anderen Wirtschaftssektoren – etwa der Lebensmittel-, Futtermittel- oder Bioenergieproduktion. Diese Faktoren beeinflussen sowohl die aktuelle als auch die potenzielle Nutzung biogener Materialien für Verpackungsanwendungen maßgeblich.

Im Folgenden werden die globale Verfügbarkeit und die Erschließungspotenziale der 13 untersuchten Rohstoffe jeweils separat dargestellt. Für jeden Rohstoff erfolgt eine Einschätzung seiner regionalen Verbreitung, der derzeitigen Nutzung sowie möglicher Nutzungskonkurrenzen, um eine fundierte Grundlage für die Bewertung seines Potenzials im Verpackungsbereich zu schaffen.

- **Primärholz**: Im Jahr 2020 lag der weltweite Holzverbrauch bei rund 4,3–5 Mrd. m³ (Rundholz inkl. Rinde; WWF Deutschland 2022). Rund 31 % der globalen Landmasse sind bewaldet (FAO 2020a). Der größte Anteil des Vorkommens liegt in Russland (20 %) (Suhr 2020). Die langfristige Nutzung soll durch nachhaltige Forstwirtschaft und Biodiversitätskriterien sichergestellt werden. Zertifizierungssysteme wie PEFC und FSC sollen gewährleisten, dass Holz aus verantwortungsvoller Bewirtschaftung stammt. Derzeit werden jedoch lediglich rund 8,5 % der weltweiten Waldfläche gemäß den PEFC-Richtlinien (PEFC o. D.) und etwa 4 % nach den strengeren FSC-Kriterien (FSC Connect o. D.) bewirtschaftet.
- **Laub**: Laub fällt saisonal in großen Mengen an, vor allem in den Laub- und Mischwäldern gemäßigter Zonen. Eine quantitative globale Angabe fehlt, die Verfügbarkeit ist stark von der geografischen Region und Jahreszeit abhängig. Nutzungspotenziale bestehen, werden jedoch derzeit kaum systematisch ausgeschöpft.
- **Altholz**: Altholz wird weltweit vor allem aus Bau- und Abbruchholz, Möbeln und Verpackungen gewonnen. In Deutschland werden etwa 70 % energetisch und 30 % stofflich genutzt (BAV e. V. 2018). Für die werkstoffliche Verwertung in der Holzwerkstoffindustrie kommt derzeit in erster Linie Verpackungsholz infrage, weil es in aller Regel erkennbar unbehandelt ist.
- **Altpapier (Papier, Pappe, Karton)**: Global werden jährlich etwa 252 Mio. Tonnen Papier recycelt (Die Papierindustrie 2020; European Paper Recycling Council 2023). Der Rohstoff fällt vor allem in industrialisierten Ländern in großer Menge an und ist durch etablierte Sammelsysteme gut erschlossen. Nutzungskonkurrenz besteht vor allem in der Papierindustrie selbst.
- **Gräser**: Gräser kommen auf allen Kontinenten (außer Antarktika) vor und sind potenziell in großer Menge verfügbar. Es handelt sich meist um wildwachsende oder wenig kultivierte Bestände. Eine flächendeckende Erhebung der nutzbaren Biomassemengen existiert bislang nicht.
- **Silphie**: Die Silphie ist eine mehrjährige Pflanze mit Trockenmasseerträgen von 16–36,6 t/ha jährlich (Daniel & Rompf 1994). Der Anbau ist derzeit regional begrenzt, vor allem in Deutschland, aber ausbaubar. Weltweite Verfügbarkeitsdaten fehlen, allerdings besteht Potenzial für größere Flächenerschließungen in Europa und darüber hinaus.

- Paludikulturen auf wiedervernässten Moorböden befinden sich noch in einem frühen Entwicklungsstadium. Ihre großflächige Nutzung ist derzeit noch nicht etabliert. Die globale Verfügbarkeit ist daher gering, mit zukünftigem Potenzial. **Paludikulturen**
- Bambus kommt vor allem in den Tropen, Subtropen und Teilen gemäßigter Zonen vor. Die Pflanze ist sehr schnellwüchsig, jedoch nicht flächendeckend erschlossen. China ist einer der Hauptproduzenten. In Deutschland ist Bambus nicht heimisch, aber potenziell ökonomisch nutzbar – wenngleich die Pflanze bisher eher im Garten- und Landschaftsbau eingesetzt wird. **Bambus**
- Mit weltweit ca. 1.158 Mio. Tonnen Ernte pro Jahr gehört Mais zu den häufigsten angebauten Nutzpflanzen (1.157,88 Mio. Tonnen; Deutsches Maiskomitee e. V. o. D.). Die USA produzieren allein 32,6 % der globalen Menge (US Department of Agriculture 2024). Nutzungskonkurrenz besteht vor allem zu Nahrungsmittel-, Futtermittel- und Energieanwendungen. **Mais**
- Mit einem globalen Ertrag von ca. 260 Mio. Tonnen jährlich ist die Verfügbarkeit von Zuckerrüben hoch, insbesondere in Europa (FAO 2023b). Der Ertrag beträgt ca. 76 t/ha jährlich (Wirtschaftsvereinigung Zucker 2024). Eine Fruchtfolge ist erforderlich, was die kontinuierliche Verfügbarkeit regional einschränkt. **Zuckerrübe**
- Laut FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations) wurden 2022 weltweit etwa 1,92 Mrd. Tonnen Zuckerrohr produziert. Als Nebenprodukt der Zuckerrohrverarbeitung fällt auch Bagasse weltweit in großen Mengen an (ca. 570 Mio. Tonnen pro Jahr; eigene Berechnung nach FAO 2023a). Bagasse ist besonders verbreitet in tropischen Ländern wie Brasilien und Indien. In Deutschland fällt keine Bagasse an, sie kann jedoch importiert werden. **Zuckerrohr und Bagasse**
- Tallöl entsteht als Nebenprodukt bei der Zellstoffherstellung aus Nadelholz. Die Verfügbarkeit ist an die Holz- und Zellstoffindustrie gebunden, weltweit jedoch relevant. **Tallöl (aus der Forstwirtschaft)**
- Als Bestandteil von Holz fällt Lignin bei der Zellstoffherstellung in großen Mengen an. Es wird bislang meist energetisch genutzt. Konkrete globale Produktionszahlen fehlen, das Potenzial für die stoffliche Nutzung steigt mit dem technischen Fortschritt. **Lignin**

Fazit

Die in diesem Kapitel zusammengetragenen Daten zu Verfügbarkeit, regionaler Verbreitung und Nutzungskonkurrenzen der untersuchten biogenen Rohstoffe bilden die inhaltliche Grundlage für die qualitative Bewertung in Kapitel 4.2. Dort werden diese Informationen systematisch eingeordnet, um neben der quantitativen Analyse auch nicht standardisierbare Faktoren wie Flächeneffizienz, Verfügbarkeit und Nutzungskonflikte in die Gesamtbewertung einzubeziehen.

3.3 Exkurs zum Dilemma der Primärholznutzung: Auswirkungen auf Kohlenstoffspeicherung und Biodiversität

Wälder – insbesondere Primärwälder – sind zentrale Kohlenstoffsenken und Lebensräume für einen Großteil der terrestrischen Biodiversität (FAO & UNEP 2020). Trotz eines rückläufigen Nettoverlusts an Waldflächen bleibt die Abholzung, vor allem für Agrar- und Weidezwecke, ein globales Problem. Die weltweite Holzentnahme erreichte 2022 ein Rekordniveau von 4 Mrd. m³, davon etwa 50 % als Industrieholz, wovon rund ein Drittel zur Zellstoffherstellung genutzt wurde (FAO 2024, 2025). Europa trägt rund 20 % zur globalen Produktion bei, mit etwa 25 % Anteil für Zellstoff.

In Europa steigt die Fläche der Baumkronenverluste – besonders in den baltischen Staaten – durch verstärkte Holzernte und klimabedingte Störungen wie Stürme, Insektenbefall und Brände (Turubanova et al. 2023). Diese Entwicklung reduziert die Kohlenstoffsenkenleistung: Seit 2017 sind deutsche Wälder laut Bundeswaldinventur keine Netto-Kohlenstoffsenken mehr, sondern waren 2022 Emissionsquelle (BMEL[1] 2024). Modelle prognostizieren einen weiteren Rückgang der Senkenleistung; unter starkem Klimawandel (RCP8.5) ist sogar bei moderaten Störungen mit zusätzlicher CO_2-Freisetzung zu rechnen (Albrich et al. 2023; Korosuo et al. 2023).

Umwandlungsrisiko gem. EUDR

Die EU-Verordnung 2023/1115 (EUDR) für entwaldungsfreie Produkte verbietet ab Ende 2025 Holzimporte und -exporte aus Flächen, die nach dem 31.12.2020 entwaldet oder strukturell geschädigt wurden. Dazu zählt auch die Umwandlung von Primär- oder Naturwäldern in Holzplantagen. Das Risiko solcher Umwandlungen variiert je nach Herkunftsregion:

- gering in Mittel-, West- und Südeuropa,
- erhöht in Nord- und Osteuropa (z. B. Baltikum, Skandinavien, Ukraine),
- erhöht in Südosteuropa,
- erhöht in Nordamerika (trotz Waldflächenausweitung Rückgang intakter Wälder),
- erhöht in Russland (weitreichende Primärwaldflächen, forstwirtschaftlicher Nutzungsdruck).

Fazit

Die Herkunft des Holzes ist damit ein entscheidender Faktor für die Bewertung seiner Auswirkungen auf Klima und Biodiversität. Vor dem Hintergrund begrenzter Ressourcen und ökologischer Risiken verstärkt die stoffliche Nutzung von Primärholz – insbesondere in kurzlebigen Produkten wie Papier – die Nutzungskonkurrenz zwischen Klimaschutz, Biodiversitätserhalt und industrieller Verwertung.

[1] Seit Frühjahr 2025 BMLEH (Bundesministerium für Landwirtschaft, Ernährung und Heimat).

4 Darstellung und Bewertung der ökologischen Herausforderungen

In diesem Kapitel werden die ökologischen Herausforderungen der 13 ausgewählten biogenen Rohstoffe für Verpackungen sowohl quantitativ als auch qualitativ bewertet. Ergänzend erfolgt eine Betrachtung von Power-to-X-Kunststoffen, deren potenzielle Umweltauswirkungen im Vergleich zu biogenen Alternativen im Hinblick auf Forschungsfrage 4 *(„Welche alternativen Kohlenstoffquellen stehen heute und in Zukunft zur Verfügung und wie sind diese im Vergleich zu biobasierten Rohstoffen zu bewerten?“*) untersucht werden.

PtX-Kunststoffe als alternative Kohlenstoffquelle

Power-to-X (PtX) bezeichnet Technologien, die elektrische Energie in andere Energieträger oder chemische Grundstoffe umwandeln. Hierzu zählen auch Kunststoffe. PtX-basierte Kunststoffe weisen hinsichtlich ihrer chemischen Zusammensetzung keine Unterschiede zu herkömmlichen Kunststoffen auf, sodass sie sich für gleiche Anwendungen eignen, beispielsweise Verpackungen (PE), Textilfasern (PET) oder technische Bauteile (PP). Der häufigste Umwandlungsprozess von elektrischer Energie in Kunststoffe ist die Synthese: Durch katalytische Prozesse (z. B. Fischer-Tropsch-Synthese) entstehen Kohlenwasserstoffe als Grundbausteine für Kunststoffe wie Polyethylen (PE) oder Polypropylen (PP). PtX-Kunststoffe können fossilfreie Alternativen bieten, wenn der Strom aus erneuerbaren Quellen stammt. Dabei ist jedoch zu beachten, dass die Umwandlungskette (Strom → Wasserstoff (H_2) → Kohlenwasserstoffe) mit hohen Energieverlusten verbunden ist.

4.1 Quantitative Bewertung – Berechnung von Umweltkennwerten

Die quantitative Umweltbewertung konzentriert sich auf drei zentrale Umweltindikatoren:

- **Flächennutzung:** Die für die Bereitstellung der betrachteten biogenen Rohstoffe benötigte Fläche dient als zentraler Parameter zur Einschätzung potenzieller Flächenkonkurrenzen.
- **Energieaufwand:** Erfasst wird der Energieverbrauch entlang der Wertschöpfungskette biogener Roh- und Reststoffe zu Verpackungsmaterialien – z. B. bei der Herstellung von Papier, Pappe oder biobasierten Kunststoffen. Insbesondere energieintensive Prozesse wie die Trocknung oder chemische Aufbereitung werden berücksichtigt, da deren Energieverbräuche erhebliche ökologische Auswirkungen nach sich ziehen können.
- **Wasserverbrauch:** Auch der Wasserbedarf der betrachteten Systeme fließt in die Bewertung ein. Aufgrund einer unzureichenden Datenverfügbarkeit kann jedoch keine regionalspezifische Analyse der Wasserverfügbarkeit erfolgen. Es wird darauf hingewiesen, dass die ökologische Relevanz des Wasserverbrauchs stark von der regionalen Wassersituation abhängt.

Bei der Entwicklung der Emissionsfaktoren wird zwischen den Zielprodukten Holz, Kunststoff und Papier differenziert, da sich deren Aufbereitungsprozesse deutlich unterscheiden. Da jedoch nicht alle in Kapitel 3 identifizierten Rohstoffe gleichermaßen zur Herstellung von Verpackungspapieren oder Kunststoffen geeignet sind, erfolgt eine gezielte Zuordnung der einzelnen Rohstoffe zu den entsprechenden Zielprodukten.

Das methodische Vorgehen zur Berechnung der Umweltkennwerte sowie die für die Modellierung herangezogenen Datenquellen sind in Tabelle 2 dokumentiert.

Tabelle 2: Vorgehen bei der Berechnung der Umweltkennwerte inkl. Angabe der wesentlichen verwendeten Quellen

Zielprodukt und Rohstoff	Bilanziertes Produkt	Vorgehen bei der Modellierung/verwendete Quellen
Verpackungsholz aus Forstwirtschaft	Holzpalette ohne Stahl	Ecoinvent 3.10 (2023) – Datensatz für Europaletten, abzüglich des Stahlanteils
Verpackungspapiere aus Primärholz	Papier aus 100 % Zellstoff aus Primärholz	Primärpapier (LPB), basierend auf ACE & ifeu (2020)
Verpackungspapiere aus Silphie	Verpackungspapier/Kartonage aus 50 % Silphiefaser und 50 % Zellstoff aus Primärholz	Eigene Berechnungen basierend auf Maga et al. (2021) und Out-Nature (o. D.), Silphiefasern durchlaufen mit Zellstoffen aus Holzfasern den Produktionsprozess, deshalb mit Primärpapierprozess verschnitten, Heizwert von Silphie basierend auf Stroh
Verpackungspapiere aus Laub	Verpackungspapier/Kartonage aus 40 % Laubfaser und 60 % Zellstoff aus Primärholz	Eigene Berechnungen basierend auf Silphie-Papier, da (Releaf Paper o. D.) Laub mittels fortschrittlicher Technologie ohne Sulfate, Sulfite und Chlor in Fasern umgewandelt. Eigene Annahmen zu Sammlung, Ernte und Trocknung, Zelluloseausbeute (Releaf Paper o. D.) und nachhaltigem Papier (Herbstlaub 2024), Heizwert von Stroh und Primärpapierherstellung
Verpackungspapiere aus Gras	Verpackungspapier/Kartonage aus 50 % Grasfaser und 50 % Zellstoff aus Primärholz	Eigene Berechnungen basierend auf Terlau et al. (2017) und ifeu-internen Daten
Verpackungspapiere aus Paludikultur	Verpackungspapier/Kartonage aus 50 % Strohfaser aus Paludikultur und 50 % Zellstoff aus Primärholz	Eigene Berechnungen basierend auf Silphie-Papier, Annahme: 50 % Schilf, Ernte basierend auf Grasernte – extensive Nutzung, Ertrag/Feuchtegehalt/Heizwert und Zellulosegehalt basierend auf Greifswald Moor Centrum (2016), Fiedler et al. (2023) und VIP (o. D.) und Primärpapierherstellung
Verpackungspapiere aus Bambus	Verpackungspapier/Kartonage aus 100 % Bambusfaser	Eigene Berechnungen, Papierherstellung basierend auf Ecoinvent 3.10 (2023), FEFCO-Kraftliner-Datensatz, Input Bambus basierend auf Braskem (2018)
Verpackungspapiere aus Bagasse	Verpackungspapier/Kartonage aus 100 % Bagassefaser	Eigene Berechnungen basierend auf FEFCO & Cepi Container Board (2022) sowie Poopak & Roodan (2012): 100 % Bagasse-Papier, FEFCO als Basis, 100 % Bagasse Einsatz und Änderungen in Chemikalien (keine Bleichmittel), Bagasse-Datensatz aus Ecoinvent 3.10 (2023)

Zielprodukt und Rohstoff	Bilanziertes Produkt	Vorgehen bei der Modellierung/verwendete Quellen
Verpackungspapiere aus Zuckerrübe	Verpackungspapier/Kartonage aus 35 % Zuckerrübenschnitzel und 65 % Zellstoff aus Primärholz	Eigene Berechnungen, Papierherstellung basierend auf FEFCO & Cepi Container Board (2022), Ersatz von Pulp und Altpapier durch trockenen Pulp basierend auf Menge aus Vaccari et al. (1995)
Verpackungspapiere aus Altholz	Verpackungspapier/Kartonage aus Altholz	Literaturauswertung aus M'hamdi et al. (2017), Heizwert berechnet mit Formel aus Orbit-Online (o. D.)
Verpackungspapiere aus Agrarreststoffen	Foodschalen aus 75 % Agrarresten, restliche Fasern aus Primärholz	Berechnung basierend auf ifeu-internen Daten
Zuckerrohrbasierte Kunststoffe	Bio-PE aus Zuckerrohr	Berechnung basierend auf Braskem (2018) und ifeu-internen Daten
Kunststoffe aus Primärholz	Zellophan aus Primärholz	Eigene Berechnungen, basierend auf Ecoinvent 3.10 (2023) – Datensatz zu Viskosefasern und ifeu-internen Daten für Prozessierung zum Zellophan
Maisbasierte Kunststoffe (PLA)	PLA aus Mais	Literaturauswertung aus Vink & Davies (2015)
Kunststoffe aus Zuckerrübe	Bio-PE aus Zuckerrüben	Eigene Berechnung, basierend auf Ecoinvent 3.10 (2023) – Datensatz für Ethanol aus Zuckerrüben, Polymerisation aus Tallöl und Ethylene modelliert basierend auf Braskem (2018)
Kunststoffe aus Tallöl	HDPE auf Tallöl-Basis	ifeu-interne Daten
Kunststoffe aus Lignin	Carbonfaservertsärkter Kunststoff aus 100 % Lignin-Fasern	Eigene Berechnung, basierend auf Ecoinvent 3.10 (2023) – Datensatz für carbonfaserverstärkten Kunststoff Datensatzanpassungen: - Ersatz von fossilem Input durch Lignin-Fasern - Energieinput angepasst basierend auf Hermansson et al. (2020) und Obasa (2022) - Spinnen der Ligninfasern basierend auf Hermansson et al. (2020) - Lignin-Gewinnung basierend auf LCA Commons (2018), Datensatz zu Kraft-Lignin-Extraktion und Culbertson et al. (2016), Anpassung der Allokation auf 5 % (ökonomisch) basierend auf Hermansson et al. (2019), Heizwert basierend auf trockener Faser aus Stockschläder et al. (2022)
Kunststoffe aus Altholz	Zellophan aus Altholz	Eigene Berechnungen, basierend auf Ecoinvent 3.10 (2023) – Datensatz zu Viskosefaser, Ersatz von Primärholz im Pulp, das in die Viskoseherstellung geht, Nutzung ifeu-interner Daten für Prozessierung zu Zellophan

Zielprodukt und Rohstoff	Bilanziertes Produkt	Vorgehen bei der Modellierung/verwendete Quellen
Kunststoffe aus Altpapier	Zellophan aus Altpapier	Eigene Berechnungen, basierend auf Ecoinvent 3.10 (2023) – Datensatz zu Viskosefaser, Nutzung ifeu-interner Datensätze für Altpapier-Pulp, das in die Viskoseherstellung geht, und für die Prozessierung zu Zellophan.
PtX-Kunststoffe	HDPE PtX-basiert	Verwendung von Daten aus Dittrich et al. (2020)

Bemessung des Flächenverbrauchs

Bei der Bilanzierung des Flächenbedarfs der untersuchten biogenen Ressourcen wird zwischen folgenden Landnutzungstypen unterschieden: *Forst, Holzplantagen, Grünland, Ackerland* und *Siedlungsflächen*. Die Flächennutzung dieser Kategorien wird über das Hemerobie-Konzept zu dem Indikatorwert NFP aggregiert. Das Hemerobie-Konzept beschreibt den Grad der menschlichen Beeinflussung von Ökosystemen, indem Flächen in sieben Hemerobie-Klassen von *naturnah* bis *artifiziell* eingeteilt werden. Es ermöglicht, unterschiedliche Landnutzungsformen in einem einheitlichen Indikatorwert zusammenzuführen, der für Ökobilanzen genutzt wird. Die methodische Grundlage bilden u. a. die Arbeiten von Schmitz & Paulini (1999) sowie Weiterentwicklungen durch Fehrenbach et al. (2015, 2021) und Lindner et al. (2020).

Zu beachten ist, dass in der Analyse ausschließlich diejenigen Flächen berücksichtigt werden, die unmittelbar der Rohstoffgewinnung des Hauptrohstoffs dienen. Weitere Flächen, etwa für die Stärkeherstellung bei Papierproduktion, Transportinfrastruktur oder für Prozessierungsschritte, bleiben unberücksichtigt.

Bemessung des Energieverbrauchs als KEA_{Gesamt}

Der Fokus der Untersuchung liegt nicht nur auf dem Flächenbedarf, sondern auch auf dem Energieverbrauch der betrachteten Systeme. Um ihn umfassend zu erfassen, wird in dieser Studie der kumulierte Energieaufwand (KEA_{Gesamt}) als Bewertungsmaßstab herangezogen.

Bilanzierung des Wasserverbrauchs

Zur Vervollständigung der quantitativen Umweltbewertung wird neben den begrenzten Ressourcen *Fläche* und *Energie* auch die knappe Ressource *Wasser* bilanziert. Die hier dargestellten Wasserwerte sind aufgrund der in Kapitel 2 beschriebenen Unsicherheiten mit Vorsicht zu interpretieren. Dennoch ermöglichen sie grundsätzliche Aussagen zur Wasserintensität der untersuchten Systeme.

Zusammenschau der Emissionsfaktoren für die quantitative Umweltbewertung

In Tabelle 3 werden die Ergebnisse der Berechnung der Umweltkennwerte für die Parameter *Flächenbedarf*, *Energie* und *Wasser* dargestellt. Zur Gewährleistung einer eindeutigen und transparenten Darstellung werden die Resultate in Form von Wertetabellen dokumentiert. Die Werte werden je Parameter in sechs bis acht Klassen unterteilt, welche die Bandbreite zwischen den jeweiligen Minimal- und Maximalwerten abbilden. Zur besseren Verständlichkeit wird ein Farbcodierungssystem verwendet, bei dem *helle* Farben geringe und *dunkle* Farben hohe Umweltbelastungen kennzeichnen.

Zur besseren Unterscheidung werden die drei Emissionsfaktoren farblich differenziert dargestellt: Flächenbedarf in *Grün*, Energiebedarf in *Orange* und Wasserverbrauch in *Blau*.

Tabelle 3: Emissionsfaktoren für die identifizierten Biomassepotenziale

Zielprodukt	Rohstoff	Flächenbedarf		Energie als KEA Gesamt	Wasserverbrauch
		in ha/t	ha aF-Äq. *a /t[2]	in MJ/t	in m³/t
Verpackungsholz	Holz	< 0,35	< 0,045	≤ = 30.000	≤ = 20
PPK-Verpackungen	Primärholz	< 0,5	< 0,075	≤ = 45.000	≤ = 100
PPK-Verpackungen	Laub	< 0,25	< 0,035	≤ = 45.000	≤ = 80
PPK-Verpackungen	Gras	< 0,3	< 0,045	≤ = 45.000	≤ = 80
PPK-Verpackungen	Silphie	< 0,25	< 0,035	≤ = 45.000	≤ = 80
PPK-Verpackungen	Paludi	< 0,5	< 0,017	≤ = 45.000	≤ = 80
PPK-Verpackungen	Bambus	< 0,25	< 0,085	≤ = 55.000	≤ = 50
PPK-Verpackungen	Bagasse	< 0,01	< 0,001	≤ = 30.000	≤ = 50
PPK-Verpackungen	Zuckerrübe	< 0,35	< 0,045	≤ = 45.000	≤ = 50
PPK-Verpackungen	Altholz	0	0	≤ = 30.000	≤ = 100
PPK-Verpackungen	Agrarrest-stoffe	< 0,05	< 0,017	≤ = 45.000	≤ = 20
Kunststoffe	Zuckerrohr	< 0,5	< 0,25	≤ = 75.000	≤ = 50
Kunststoffe	Primärholz	< 0,3	< 0,045	≤ = 85.000	≤ = 200
Kunststoffe	Mais	< 0,2	< 0,085	≤ = 65.000	≤ = 100
Kunststoffe	Zuckerrübe	< 0,2	< 0,085	≤ = 75.000	≤ = 50
Kunststoffe	Tallöl	< 0,01	< 0,001	≤ = 45.000	≤ = 20
Kunststoffe	Lignin	< 0,6	< 0,085	> 500.000	≥ = 300
Kunststoffe	Altholz	0	0	≤ = 65.000	≤ = 200
Kunststoffe	Altpapier	0	0	≤ = 65.000	≤ = 200
Kunststoffe	PtX (Energie)	< 0,05	< 0,035	> 100.000	≤ = 20

Zur Bewertung der Umweltwirkungen der untersuchten biogenen Rohstoffe lassen sich – auf Grundlage der in Tabelle 3 dargestellten Vergleichswerte – folgende exemplarische Erkenntnisse ableiten:

Schlussfolgerungen der quantitativen Bewertung

- Die Herstellung von Kunststoffen erfordert grundsätzlich mehr Energie als die Produktion papierbasierter Verpackungsmaterialien, selbst wenn identische Rohstoffe (z. B. Primärholz, Altholz) verwendet werden.
- Bezogen auf eine identische Masse an Output (kg oder t) weisen Verpackungskunststoffe aus Anbaubiomasse im Vergleich zu papierbasierten Verpackungen (PPK) einen insgesamt höheren Flächen- und Energiebedarf auf.
- Der Einsatz alternativer Zellstoffquellen (z. B. Laub, Gras, Silphie, Paludi-Biomasse, Agrarreststoffe) kann den Flächenfußabdruck signifikant reduzieren, ohne den Energie- oder Wasserverbrauch wesentlich zu erhöhen.
- Neben- und Reststoffe wie Tallöl, Altholz oder Altpapier zeigen die geringsten Umweltwirkungen hinsichtlich Flächen- und Energieverbrauch. Allerdings ist bei Altpapier und Altholz ein vergleichsweise hoher Wasserverbrauch bei der Kunststoffherstellung zu berücksichtigen.

[2] Einheit des Hemerobieindikators.

Diese exemplarischen Ergebnisse verdeutlichen die große Spannbreite potenzieller Umweltwirkungen, die mit der Wahl des jeweiligen Rohstoffs verbunden sind. Sie unterstreichen die Notwendigkeit einer differenzierten ökologischen Bewertung bei der Entwicklung und Auswahl biobasierter Verpackungslösungen.

4.2 Qualitative Bewertung der Verfügbarkeit und Identifikation möglicher Konkurrenzen

Im Rahmen der qualitativen Bewertung werden die 13 betrachteten biogenen Rohstoffe systematisch und vergleichend anhand der Kriterien *aktuelle Verfügbarkeit, Flächeneffizienz* und *Nutzungskonkurrenzen* eingeordnet. Ziel ist es, bestehende Risiken, Nutzungskonflikte sowie mögliche Synergien transparent darzustellen und die Ergebnisse der quantitativen Analyse um eine kontextbezogene Perspektive zu erweitern.

Methodische Definition der ausgewählten Kriterien

Im Folgenden wird erläutert, wie die drei Parameter methodisch definiert sind und auf welcher Grundlage, die in Tabelle 4 dokumentierte Bewertung erfolgt.

- **Aktuelle Verfügbarkeit:** Die Bewertung der aktuellen Verfügbarkeit orientiert sich grundsätzlich an den globalen Erträgen der verschiedenen Biomassen. Im Rahmen der Analyse wird das in Kapitel 3.2 zusammengetragene Zahlenmaterial neu kontextualisiert und auf die spezifischen Anforderungen einer Rohstoffnutzung für biobasierte Verpackungen übertragen. Eine direkte Vergleichbarkeit mit der Verfügbarkeit alternativer Anbaubiomassen oder von Rest- und Abfallstofffraktionen, die primär für Verpackungszwecke genutzt werden können, ist dabei nur eingeschränkt möglich.
  - Rohstoffe mit hoher globaler Verfügbarkeit werden in der Bewertung als *hoch* eingestuft. Diese Einordnung ist im Rahmen der vorliegenden Untersuchung positiv konnotiert und entsprechend *grün* markiert, nicht impliziert ist dabei ökologische Vorteilhaftigkeit.[3]
  - Rohstoffe mit grundsätzlich hohem Potenzial, deren Verfügbarkeit jedoch auf bestimmte Regionen begrenzt ist – wie etwa Zuckerrübe oder Bambus – werden als *mittel* bewertet.
  - Rohstoffe, deren Nutzung derzeit noch nicht kommerziell erschlossen ist, werden als *neutral* eingestuft, da unklar ist, ob und in welchem Umfang ihr Potenzial bis zum Jahr 2045 erschlossen werden kann.

  Es ist zu beachten, dass diese Einstufung in diesem Fall keine Umweltbewertung darstellt.
- **Flächeneffizienz:** Die Bewertung der Flächeneffizienz basiert primär auf Angaben zum Ertrag pro Hektar – also der Menge an nutzbarer Biomasse, die unter gegebenen Bedingungen pro Flächeneinheit erzeugt werden kann. Dieser Indikator erlaubt insbesondere bei gezielt angebauten Primärrohstoffen eine direkte Einordnung hinsichtlich ihrer Flächennutzungseffizienz.

[3] Im Sinn von: Es steht grundsätzlich viel Rohstoff zur Verfügung. Welche Umweltfolgen aus dem Anbau und der Nutzung dieses Rohstoffangebots entstehen, wird an dieser Stelle allerdings nicht bewertet! Dabei wird betont, dass die aktuelle Verfügbarkeit eines Rohstoffs nicht automatisch auf eine ökologische Unbedenklichkeit hinweist. Die Bewertung muss auch die langfristige Tragfähigkeit der betroffenen Ökosysteme einbeziehen. Wenn ein Rohstoff wie Holz bereits in mehreren Sektoren stark beansprucht wird, kann seine weitere Nutzung als Verpackungsmaterial trotz formaler Verfügbarkeit ökologisch kritisch sein.

Im Fall von Reststoffen, Abfällen oder Nebenprodukten ist eine solche Bewertung nicht möglich, da für diese Fraktionen keine direkte Flächenzuordnung besteht. Sie fallen im Rahmen anderer Produktionsprozesse an – beispielsweise in der Landwirtschaft, der Holzverarbeitung oder der Lebensmittelindustrie – und sind daher nicht flächengebunden im herkömmlichen Sinn. In diesen Fällen wird keine Bewertung im Kontext der Flächeneffizienz vorgenommen.

- **Nutzungskonkurrenzen:** Die Bewertung potenzieller Nutzungskonkurrenzen erfolgt indikativ. So ist beispielsweise bei der Nutzung von Primärholz die Herkunft des Holzes ein entscheidender Faktor für die Bewertung seiner Auswirkungen auf Klima und Biodiversität. Vor dem Hintergrund begrenzter Ressourcen und ökologischer Risiken verstärkt die stoffliche Nutzung von Primärholz – insbesondere in kurzlebigen Produkten wie Verpackungen – die Nutzungskonkurrenz zwischen Klimaschutz, Biodiversitätserhalt und industrieller Verwertung.

  Für die anderen Biomassen gilt: Besteht eine Konkurrenzsituation zu hochwertigen Nutzungen mit globaler Relevanz – etwa zur Lebensmittelproduktion oder zur Bereitstellung essenzieller Ökosystemleistungen – wird dies als kritisch eingestuft und in der nachfolgenden Bewertungstabelle mit *hoch* bewertet. Diese Bewertung ist **negativ konnotiert** und weist auf eine potenziell problematische Ressourcenkonkurrenz hin.

  Liegt hingegen eine Konkurrenz zu anderen stofflichen Nutzungen vor, die zwar industriell relevant, jedoch weder existenziell noch ökologisch priorisiert sind (z. B. als Rohstoff für Nicht-Verpackungsprodukte), wird diese als *mittel* bewertet.

  Ist die betrachtete Biomasse primär in Konkurrenz zu eher geringwertigen Nutzungen – wie der Kompostierung oder der energetischen Verwertung (Mitverbrennung) – oder wird derzeit überhaupt keiner kommerziellen Nutzung zugeführt, so wird die Nutzungskonkurrenz als *gering* eingestuft.

Die folgende Tabelle 4 fasst zentrale Rahmenbedingungen der betrachteten biogenen Rohstoffe zusammen, insbesondere hinsichtlich ihrer aktuellen Verfügbarkeit, ihrer Flächeneffizienz sowie potenzieller Nutzungskonkurrenzen mit anderen Anwendungsfeldern (z. B. Nahrungsmittelproduktion, energetische Nutzung oder Ökosystemleistungen).

Tabelle 4: Qualitative Bewertung der in der Studie betrachteten biobasierten Rohstoffe

Rohstoff	Aktuelle Verfügbarkeit	Flächeneffizienz (Ertrag pro Hektar)	Nutzungskonkurrenzen
Primärholz	Hoch	Gering	Hoch Ökosystemleistung, Bauholz, Energieholz
Laub	keine Angabe, da derzeit nur geringe kommerzielle Nutzung	Mittel	Gering Laub als Material in Kompostierung
Altholz	Hoch	Keine Angabe	Mittel Altholz als Energieträger
Altpapier	Hoch	Keine Angabe	Mittel Altpapier als Ausgangsstoff für Magazin- und Hygienepapiere sowie als Energieträger
Gräser	keine Angabe, da derzeit nur geringe kommerzielle Nutzung	Mittel	Gering Gräser als Material in Kompostierung
Durchwachsene Silphie	keine Angabe, da derzeit nur geringe kommerzielle Nutzung	Mittel	Gering derzeit kaum kommerzielle Nutzung
Paludikulturen	keine Angabe, da derzeit nur geringe kommerzielle Nutzung	Mittel	Gering derzeit kaum kommerzielle Nutzung
Bambus	Mittel	Gering	Hoch Ökosystemleistung
Mais	Hoch	Gering	Hoch Nahrungsmittel
Zuckerrüben	Mittel	Hoch	Hoch Nahrungsmittel
Zuckerrohr	Hoch	Gering	Hoch Nahrungsmittel
Bagasse und Agrarreststoffe	Hoch	Keine Angabe	Mittel Bagasse als Energieträger Agrarreststoffe als Einstreu
Tallöl	keine Angabe, da derzeit nur geringe kommerzielle Nutzung	Keine Angabe	Gering derzeit kaum kommerzielle Nutzung – max. als Energieträger bei der Primärpapierherstellung
Lignin	keine Angabe, da derzeit nur geringe kommerzielle Nutzung	Keine Angabe	Mittel derzeit kaum kommerzielle stoffliche Nutzung – jedoch als Energieträger bei der Primärpapierherstellung

Fazit

Zusammenfassend werden im Folgenden die zentralen Erkenntnisse aus den vorangegangenen Analysen gebündelt dargestellt.

- Wald erfüllt zentrale Ökosystemleistungen und bietet mit dem Rohstoff Primärholz einen derzeit in großem Maßstab genutzten Ausgangsstoff für Verpackungen. Allerdings steht Primärholz für Verpackungen in Konkurrenz zu zahlreichen weiteren Verwendungszwecken. Daraus ergibt sich ein Zielkonflikt zwischen der ökologischen Belastungsgrenze der Wälder und der gegenwärtigen sowie prognostizierten Holznachfrage. Eine verstärkte Nutzung von Holz als Ausgangstoff für biobasierte Kunststoffverpackungen würde diesen Zielkonflikt weiter verstärken.
- Rohstoffe wie Mais, Zuckerrübe und Bambus stehen in deutlicher Nutzungskonkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion oder zur Bereitstellung von Ökosystemleistungen. Ihre Eignung für stoffliche Anwendungen ist daher einschränkt.
- Sekundärrohstoffe wie Altholz, Altpapier sowie Bagasse und Agrarreststoffe sind derzeit in hoher Verfügbarkeit vorhanden. Ihre Verwendung steht in geringer Nutzungskonkurrenz mit der energetischen Nutzung oder den etablierten Formen des Recyclings.
- Rohstoffoptionen wie Gräser, Silphie, Paludikulturen, Tallöl und Lignin besitzen gegenwärtig noch keine signifikante kommerzielle Bedeutung. Langfristig könnten sie jedoch relevante Potenziale entfalten – vorausgesetzt Verfügbarkeit, Erschließung und Stoffströme entwickeln sich weiter und Nutzungskonkurrenzen bleiben gering.

Diese Bewertung verdeutlicht, dass bei der Auswahl geeigneter biogener Rohstoffe für Verpackungslösungen neben ökologischen Kennwerten auch die Ressourcenzugänglichkeit sowie bestehende Nutzungskonflikte berücksichtigt werden müssen.

5 Aufstellung eines Stoffstrommodells für Verpackungen bis zum Jahr 2045

Key Facts:

Ermittlung des Bedarfs an Primärmaterial durch Aufstellung des Verpackungsstoffstroms auf Basis der Daten und Prognosen zum

- Verpackungsverbrauch 2023/2030/2045 → **sinkend bis 2045**
- Rezyklateinsatzquoten 2023/2030/2045 → **steigend bis 2045**
- Recyclingquoten 2023/2030/2045 → **leicht steigend bis 2045**

Resultat Vergleich der Stoffströme 2023 und 2045:

- Input Primärmaterial sinkt um 37 % von 8,5 Mio. Tonen auf 5,4 Mio. Tonnen
- Anteil Recycling innerhalb des Verpackungsstoffstroms steigt von 52 % (9,3 Mio. Tonnen) auf 64 % im Jahr 2045 (9,7 Mio. Tonnen)
- Anteil Papier am Primärmaterialinput steigt von 19 % (1,6 Mio. Tonnen) auf 42 % (1,6 Mio. Tonnen)
- Anteil Biokunststoffe am Primärmaterialinput steigt von 3 % (0,07 Mio. Tonnen) auf 43 % (0,36 Mio. Tonnen)

Zielsetzung

Ziel dieses Kapitels ist die Ermittlung des zukünftigen Bedarfs an biogenen Rohstoffen. Dieser Bedarf wird zunächst für das Basisjahr 2023 berechnet und anschließend für die Jahre 2030 und 2045 prognostiziert. Für die ökologische Bewertung biobasierter Verpackungsmaterialien ist nicht das gesamte Verpackungsaufkommen ausschlaggebend, sondern der **Einsatz von Primärmaterialien** – also von Materialien, die neu in das Verpackungssystem eingebracht werden und nicht aus Recyclingprozessen stammen.

5.1 Vorgehen bei der Ableitung der Verpackungsstoffströme

Zur Bestimmung des Bedarfs an biogenen Primärmaterialien wird ein Stoffstrommodell entwickelt, das den Zu- und Abfluss von Materialien im Verpackungskreislauf abbildet. Es zeigt, welche Materialmengen neu in den Kreislauf eintreten und welche diesen dauerhaft verlassen. Für jede Materialgruppe werden dabei die folgenden drei Parameter berücksichtigt, die in die Berechnung der Stoffströme einfließen:

- der gesamte Verpackungsverbrauch,
- der tatsächliche Rezyklateinsatz im Verpackungssystem,
- die outputorientierte Recyclingquote (Anteil des Abfalls, der dem Recycling zugeführt wird).

Für das Basisjahr 2023 liegen zu den drei Parametern Zahlen vor. Für die Jahre 2030 und 2045 werden die Zahlen prognostiziert.

Abgrenzung von Stoffkreisläufen

Das Modell geht davon aus, dass recycelte Materialien prioritär wieder im Verpackungsbereich eingesetzt werden – jedoch nur dann, wenn die Recyclingzuführungsquote größer ist als der Rezyklateinsatz. Andernfalls steht nicht genügend Sekundärmaterial zur Verfügung, um die Nachfrage im Verpackungssektor zu decken. Berücksichtigt werden dabei die Stoffströme, die innerhalb des Verpackungssystems verbleiben. Externe Stoffabflüsse, wie etwa

- die stoffliche Nutzung in anderen Bereichen (z. B. Bauwesen),
- die energetische Verwertung oder
- Verluste im Recyclingprozess

werden nicht als Beitrag zur Deckung des Verpackungsmaterialbedarfs angerechnet.

Beispielhafte Stoffflüsse

Die Verpackungsstoffströme umfassen sowohl bestehende als auch prognostizierte Stoffflüsse, differenziert nach Materialgruppen:

- Altpapier → Wellpappe und papierbasierte Verpackungen,
- Kunststoffe → Sekundärkunststoffe für Verpackungsanwendungen,
- Metalle und Glas → gleichwertige stoffliche Wiederverwendung.

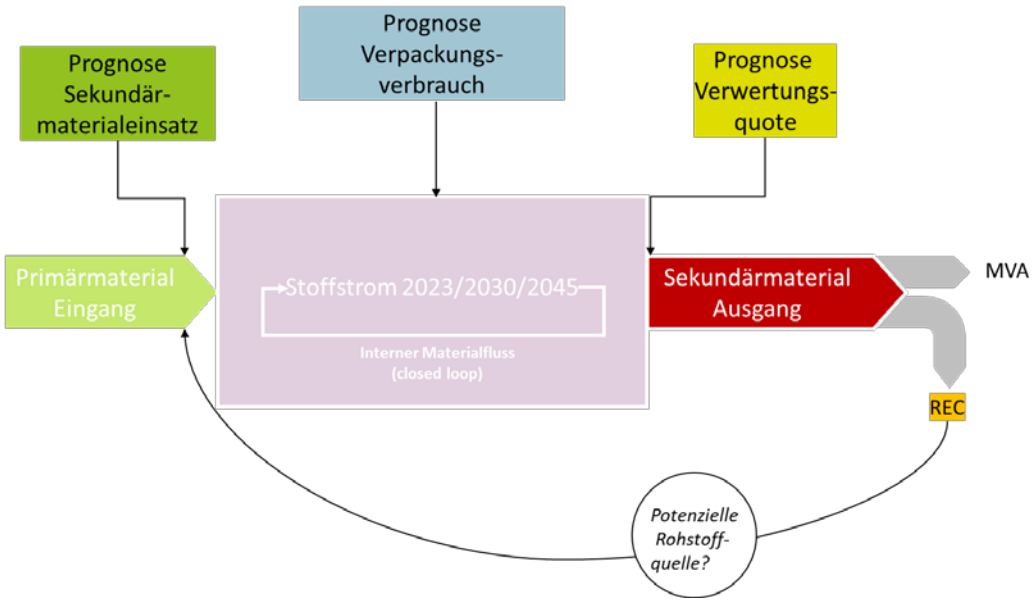
Ein Ersatz von Primärmaterialien durch extern recycelte Stoffe außerhalb dieser Verpackungsstoffströme ist explizit nicht vorgesehen, um eine konsistente und systemimmanente Bewertung sicherzustellen.

Relevanz für die Umweltbewertung

Die gewählte Methodik ermöglicht eine klare Abgrenzung zwischen intern geschlossenen Kreisläufen und externen Stoffabflüssen. Dies ist insbesondere für die umweltbezogene Bewertung biobasierter Verpackungslösungen relevant, da ausschließlich die tatsächlich im Verpackungssystem eingesetzten Materialien in die ökologische Bilanzierung einfließen.

Die folgende Abbildung 2 zeigt schematisch die Arbeitsweise bei der Aufstellung der Stoffströme:

Abbildung 2: Vorgehen bei der Ableitung der Stoffströme 2023/2030/2045



5.2 Prognose des Verpackungsverbrauchs bis 2045

Grundlagen der Prognose

Die Darstellung des Verpackungsverbrauchs im Jahr 2023 und die darauf aufbauende Prognose zukünftiger Entwicklungen erfolgt durch die GVM. Die Datenbasis für den Verpackungsverbrauch im Jahr 2023 stützt sich im Wesentlichen auf die Ergebnisse der GVM-Studie *Recycling-Bilanz für Verpackungen* (GVM 2024). Diese Werte bilden die Grundlage für die Fortschreibung des Verpackungsverbrauchs in Deutschland bis zum Jahr 2045. Das Jahr 2030 dient als Stützjahr zur Kalibrierung und Zwischenevaluierung der Projektion. Dabei werden aktuelle Entwicklungen und Trends sowie die politischen und regulatorischen Rahmenbedingungen im Verpackungsbereich berücksichtigt.

In die Untersuchung wurden die fünf zentralen Verpackungsmaterialgruppen einbezogen: *Holz, Papier/Pappe/Karton (PPK), Kunststoffe, Glas* sowie *Metalle*, einschließlich der jeweiligen *Verbundfraktion*. Die Verpackungsabfälle wurden nach ihren Anfallstellen unterteilt, sodass das Prognosemodell auf fünf Teilgesamtheiten ausgerichtet ist: *Haushalte, vergleichbare Anfallstellen, bepfandete Einweggetränkeverpackungen, Transportverpackungen* und *Verkaufsverpackungen* für Industrie und Großgewerbe.

Das verwendete Prognosemodell wird von der GVM seit mehreren Jahren fortgeschrieben und bildet die Grundlage verschiedener Publikationen (u. a. DVI 2023). Im Rahmen dieser Studie wurden aktuelle Erkenntnisse zu den relevanten Einflussparametern berücksichtigt und spezifische Prognosen für den Bereich der biobasierten Kunststoffe integriert.

Zentrale Einflussfaktoren auf die Prognose

Die prognostizierte Entwicklung des Verpackungsverbrauchs wird durch eine Vielzahl struktureller, technologischer, gesetzgeberischer und gesellschaftlicher Trends beeinflusst. Zu den wichtigsten Einflussfaktoren zählen:

Demografische Entwicklung

- Nach einem Bevölkerungsszenario des Statistischen Bundesamts wird die deutsche Bevölkerung unter als wahrscheinlich erachteten Annahmen (hoher Wanderungssaldo, moderate Abnahme der Geburtenrate) bis zum Jahr 2030 um etwa 2 % zunehmen. Bis 2045 wird angenommen, dass die Bevölkerungszahl wieder etwa auf das Niveau von 2022 zurückgeht.
- Diese Entwicklung wirkt sich direkt auf den Konsum und damit auch auf das Verpackungsaufkommen aus.

Wirtschaftliche Rahmenbedingungen

- Anhaltende wirtschaftliche Unsicherheiten, wie Inflation und Deindustrialisierung, bremsen insbesondere den Verpackungsbedarf im industriellen Bereich.
- Investitionen verlagern sich zunehmend in klimarelevante Infrastrukturen, wodurch bestimmte Verpackungstypen an Bedeutung verlieren.

Technische Innovation und Digitalisierung

- Fortschritte in der Materialtechnik ermöglichen leichtere Verpackungen und geringeren Ressourceneinsatz.
- Die fortschreitende Digitalisierung reduziert insbesondere den Papierverbrauch im Büro- und Dienstleistungssektor erheblich.
- Der Einsatz von künstlicher Intelligenz und Automatisierung führt zu effizienten Logistiksystemen mit reduziertem Verpackungsbedarf.

Gesetzliche und gesellschaftliche Rahmenbedingungen

- Regulierungen wie die EU-Verpackungsverordnung (PPWR) oder das Verbot einzelner Einwegprodukte aus Kunststoff (SUPD) wirken stark senkend auf den Einsatz von Kunststoffverpackungen.
- Gleichzeitig wird davon ausgegangen, dass die Bedeutung von Mehrwegverpackungen und biobasierten Materialien steigt.

Im Ergebnis zeigt die Prognose die folgenden Kernergebnisse:

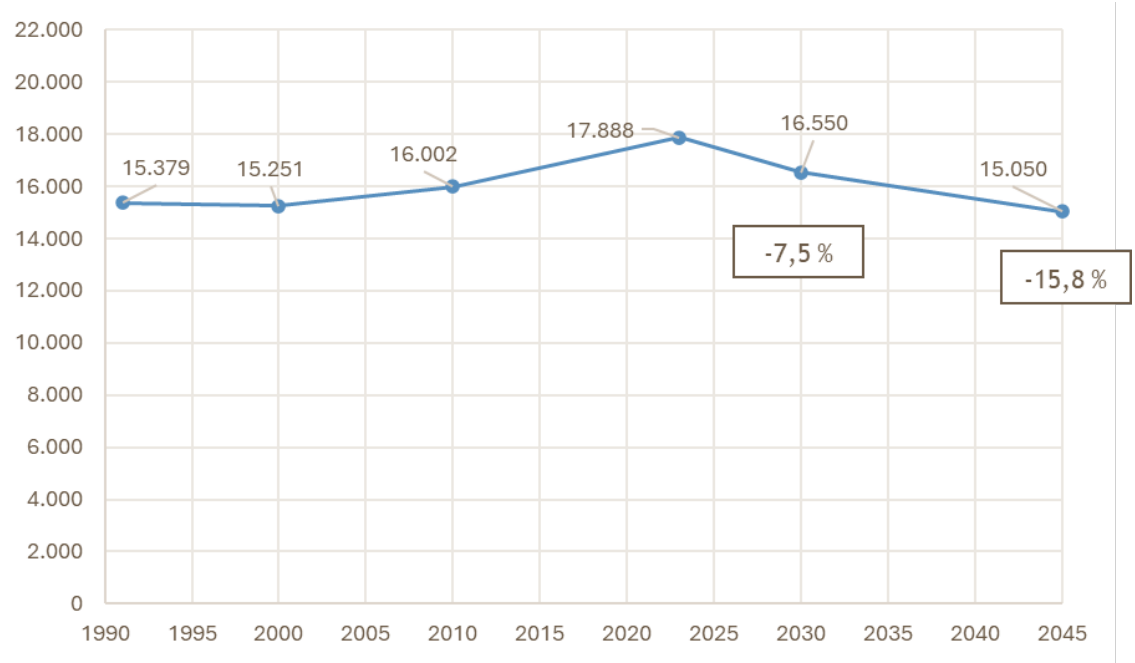
Ergebnisse für das Jahr 2023

- Der Verpackungsverbrauch aller relevanten Materialien erreichte 2023 mit 17.888 kt einen Höchststand. Den größten Anteil stellten Papier-, Pappe- und Kartonverpackungen (PPK) mit 44 % der Gesamttonnage dar. Holz- und Kunststoffverpackungen trugen jeweils 17 % bei, während Glasverpackungen einen Anteil von 16 % erreichten. Eisenmetalle und Aluminium machten zusammen etwa 5 % des gesamten Verpackungsverbrauchs aus. Der Anteil biobasierter Kunststoffe an Verpackungen lag in Deutschland bei 2 %.

Langfristiger Rückgang des Verpackungsverbrauchs nach Peak im Jahr 2023 prognostiziert

- Für die Folgejahre prognostiziert die Studie einen signifikanten Rückgang des Verpackungsverbrauchs von 17.888 kt im Jahr 2023 auf 15.050 kt im Jahr 2045, was einem Rückgang von etwa 15,8 % entspricht. Abbildung 3 zeigt die zeitliche Entwicklung des Verpackungsverbrauchs über den betrachteten Zeitraum und stellt sowohl das Ausgangsniveau als auch die erwartete Abnahme bis zum Jahr 2045 dar.

Abbildung 3: Prognose des Verpackungsverbrauchs in Kilotonnen (kt)



Der größte Anteil entfällt 2045 auf PPK-Verpackungen mit 48 %. Glasverpackungen machen jeweils 18 % der Gesamtmenge aus, während der Anteil von Holz bei 15 % und von Kunststoff bei 13 % liegt. Eisenmetall und Aluminium tragen zusammen 5 % zum Gesamtverbrauch bei. Der Anteil biobasierter Kunststoffe an Verpackungen steigt bis zum Jahr 2030 auf 9 % und bis zum Jahr 2045 auf 43 % an.

Die größten Reduktionen im Verpackungsaufkommen zeigen sich im nicht privaten Endverbrauch und sind somit für Endverbraucher nicht unmittelbar wahrnehmbar. Der nicht private Endverbrauch machte im Jahr 2023 mit 9,5 Mio. Tonnen 53,2 % des gesamten Verpackungsaufkommens aus und wird sich bis zum Jahr 2045 infolge von Deindustrialisierung, Digitalisierung und der Ausweitung von Mehrwegsystemen um 17,2 % auf 7,9 Mio. Tonnen verringern. Der Verpackungsverbrauch im privaten Bereich hingegen sinkt moderater um 14,3 % von 8,4 Mio. Tonnen auf 7,2 Mio. Tonnen.

Haupteinflussfaktoren auf den Verpackungsverbrauch im Jahr 2045

Tabelle 5 zeigt den Verpackungsverbrauch 2023 und den prognostizierten Verpackungsverbrauch 2045 für jede betrachtete Verpackungsmaterialgruppe sowie die Veränderung in Prozent. Zudem wird der Anteil biobasierter Materialien innerhalb der Verpackungsmaterialgruppen ausgewiesen. Zur Interpretation der Werte sind zudem die Haupteinflussfaktoren der Veränderung für die für diese Untersuchung relevanten Verpackungsmaterialgruppen dokumentiert.

Tabelle 5: Verpackungsverbrauch vergleichend für 2023 und 2045

	Verbrauch 2023		*Prognose 2045*			
Material (Gesamtmenge Primär- und Sekundärmaterial)	*Insgesamt*	*davon bio-basiert*	*Insgesamt*	*davon bio-basiert*	*VJ-%-Gesamt*	*Haupteinflussfaktoren*
Glas	2.911 kt	0 kt	2.708 kt	0 kt	−7,0 %	Substitution von Einwegglas durch Mehrwegverpackungen sowie durch alternative Einwegmaterialien aufgrund hoher Energieintensität der Glasproduktion.
Aluminium	156 kt	0 kt	127 kt	0 kt	−18,6 %	Prognostizierter Rückgang durch Verlagerung der energieintensiven Stahl- und Aluminiumproduktion ins Ausland.
Eisenmetall	779 kt	0 kt	660 kt	0 kt	−15,3 %	
***PPK** (Papier, Pappe, Karton)*	7.346 kt	7.346 kt	6.218 kt	6.218 kt	−15,4 %	Zunahme des Versandhandels bei gleichzeitiger Reduktion des Materialeinsatzes durch Leichtbauweise führt insgesamt zu einem moderaten Rückgang.
Verbunde Papierbasis	353 kt	319 kt	917 kt	830 kt	+159,8 %	Starke Zunahme erwartet, da Papierverbunde zunehmend Einwegverpackungen aus Kunststoff, Glas und Aluminium ersetzen. Ausnahme: FKN
Flüssigkeitskarton	167 kt	123 kt	109 kt	80 kt	−34,7 %	
Fossile Kunststoffe	2.898 kt	0 kt	1.053 kt	0 kt	−63,7 %	Rückläufiger Verbrauch infolge verschärfter regulatorischer Vorgaben, Imageproblemen und Substitution durch papierbasierte Verbundmaterialien.
Biobasierte Kunststoffe	80 kt	80 kt	806 kt	806 kt	+907,5 %	Erwarteter Anstieg durch zunehmende gesellschaftliche Akzeptanz („gefühlte Nachhaltigkeit“), staatliche Fördermaßnahmen und technischen Fortschritt.
Verbunde Kunststoffbasis	52 kt	0 kt	34 kt	0 kt	−34,6 %	Rückläufiger Verbrauch infolge verschärfter regulatorischer Vorgaben, Imageproblemen und Substitution durch papierbasierte Verbundmaterialien.
Holz	3.109 kt	3.109 kt	2.326 kt	2.326 kt	−25,2 %	Substitution von Einweg- durch Mehrwegpaletten sowie der Ersatz von Holzverpackungen durch Kunststoffe.
Textilien	27 kt	27 kt	81 kt	81 kt	+200,0 %	
Sonstiges	10 kt	2 kt	11 kt	2 kt	+10,0 %	
Insgesamt	17.888 kt	11.006 kt	15.050 kt	10.343 kt	−15,9 %	

Die Prognose zum Verpackungsverbrauch bis 2045 zeigt einen tiefgreifenden Strukturwandel im Verpackungsmarkt. Während der Verbrauch 2023 einen historischen Höchststand erreichte, wird für die kommenden Jahrzehnte ein signifikanter Rückgang für Deutschland erwartet – bedingt durch ein komplexes Zusammenspiel aus technologischen Innovationen, regulatorischen Maßnahmen, ökonomischen Entwicklungen und gesellschaftlichen Veränderungsprozessen. Besonders prägend sind dabei technologische Fortschritte in der Materialentwicklung, die Digitalisierung entlang der Wertschöpfungskette und der Ausbau kreislauforientierter Systeme wie Mehrweg- und Unverpacktlogistik, aber auch eine immer weiter fortschreitende Deindustrialisierung des Wirtschaftsstandorts Deutschland. Hinzu kommen Anpassungen gesetzlicher Rahmenbedingungen auf europäischer und nationaler Ebene sowie steigende gesellschaftliche Sensibilität gegenüber Umwelt- und Klimaschutz.

Der Rückgang betrifft nahezu alle Materialgruppen, insbesondere Kunststoff, PPK, Glas, Holz und Metalle. Auffällig ist jedoch die strukturelle Verschiebung hin zu Papierverbunden und biobasierten Kunststoffen, die zum Teil als Ersatz für fossile Rohstoffe positioniert werden und sowohl politisch als auch gesellschaftlich stark an Bedeutung gewinnen.

Einflussfaktoren für das Wachstum biobasierter Kunststoffe bis 2045

Tabelle 5 zeigt, dass der Verbrauch biobasierter Verpackungsmaterialien aller relevanten Kategorien im Jahr 2023 bei 11,0 Mio. Tonnen lag. Für das Jahr 2045 wird ein Rückgang auf 10,3 Mio. Tonnen prognostiziert. Der Rückgang des biobasierten Verpackungsverbrauchs lässt sich zum überwiegenden Teil auf den Rückgang des Verpackungsverbrauchs von PPK (Papier, Pappe, Karton) und Holz zurückführen. Der Verbrauch biobasierter Kunststoffe hingegen zeigt eine signifikante Zunahme von 80 kt im Jahr 2023 auf 806 kt im Jahr 2045. Treiber dieser Entwicklung sind das wachsende Interesse an Alternativen zu fossilen Rohstoffen und die damit verbundene Reduktion von CO_2-Emissionen. Auch geopolitische Unsicherheiten und der Wunsch nach geringerer Abhängigkeit von fossilen Importen spielen eine Rolle. Zudem gewinnt Nachhaltigkeit für die Industrie strategisch an Bedeutung: Viele internationale Unternehmen haben sich öffentlich dazu bekannt, fossile Kunststoffe zu reduzieren, und investieren verstärkt in biobasierte Verpackungslösungen.

Politisch wird dieser Trend durch EU-Programme und nationale Förderinitiativen – etwa des Bundesministeriums für Landwirtschaft, Ernährung und Heimat (BMLEH) – unterstützt. Forschung und Entwicklung im Bereich der Biokunststoffe werden gezielt gefördert. Technologische Innovationen verbessern zudem die Materialeigenschaften biobasierter Polymere und senken Produktionskosten, sodass sie zunehmend mit konventionellen Kunststoffen konkurrieren können. Im Zusammenhang mit der EU-Verpackungsverordnung wird seitens verschiedener Akteur:innen in die Diskussion eingebracht, den Einsatz nachhaltiger Biomasse in Verpackungen auf die Erfüllung der Rezyklateinsatzquoten anzurechnen. Ein entsprechender Legislativvorschlag könnte bereits bis 2028 vorgelegt werden. Ein dadurch möglicherweise ausgelöster verstärkter Nachfrageanstieg nach biobasierten Kunststoffen ist in den aktuellen Marktprognosen bislang noch nicht vollständig berücksichtigt.

Parallel zum Marktwachstum verlagert sich die Produktion biobasierter Kunststoffe zunehmend in Länder mit niedrigen Produktionskosten und starkem Wirtschaftswachstum – insbesondere nach Asien und Südamerika. Länder wie China, Thailand und Indonesien verzeichnen erhebliche Investitionen in die Chemie- und Biokunststoffindustrie, was langfristig auch den europäischen Markt beeinflussen dürfte (Nova Institut, 2024).

Fazit

Die Analyse des gegenwärtigen sowie prognostizierten Verpackungsverbrauchs bis zum Jahr 2045 zeigt ein differenziertes Bild: Das Gesamtvolumen an Verpackungen reduziert sich bis 2045 um 15,8 %. Parallel dazu geht auch der Einsatz biobasierter Verpackungen insgesamt zurück. Ausschlaggebend für diese Entwicklung ist insbesondere der Rückgang bei Verpa-

ckungen aus Papier, Pappe und Karton (PPK), während Papierverbund und biobasierte Kunststoffe einen deutlichen Zuwachs (Letzterer um den Faktor neun) verzeichnen.

Aus dem Rückgang des Verbrauchs biobasierter Verpackungen lässt sich jedoch nicht unmittelbar auf den Biomassebedarf schließen. Zur abschließenden Bewertung ist eine Verknüpfung der Verbrauchsdaten mit den ökobilanziellen Kennwerten erforderlich (Kapitel 4).

5.3 Rezyklateinsatzquoten

Die Rezyklateinsatzquoten für das Jahr 2023 basieren überwiegend auf Angaben von Verbänden, marktführenden Unternehmen und einschlägigen Fachstudien. Verbindliche regulatorische Rezyklateinsatzquoten und herstellerbezogene Selbstverpflichtungen tragen zu einem erhöhten Rezyklateinsatz bei. Das Optimierungspotenzial ist besonders bei Materialien mit bereits heute hohen Rezyklateinsatzquoten begrenzt. Aufgrund rechtlicher Rahmenbedingungen sowie einer Verbesserung der allgemeinen Erfassungs-, Sortier- und Recycling-Infrastruktur ist mit einer höheren Verfügbarkeit hochwertigen Rezyklats zu rechnen.

Die nachfolgende Tabelle 6 zeigt den Rezyklateinsatz in Verpackungen – einschließlich Um- und Transportverpackungen.

Tabelle 6: Rezyklateinsatz in Verpackungen (inkl. Um- und Transportverpackung) in Prozent

Material	2023	2030	2045
Glas	70,0 %	74,0 %	80,7 %
Aluminium	61,0 %	71,8 %	79,4 %
Eisenmetall	58,0 %	65,5 %	71,5 %
PPK (Papier, Pappe, Karton)	85,2 %	87,7 %	87,9 %
Verbundverpackungen auf Papierbasis	0,0 %	5,0 %	20,0 %
Flüssigkeitskarton	0,0 %	5,0 %	35,0 %
Kunststoff	15,1 %	40,0 %	55,0 %
Holz	1,5 %	3,5 %	7,5 %

Über alle betrachteten Prognosezeiträume hinweg weist Papier, Pappe, Karton (PPK) mit 85,2 % im Jahr 2023, 87,7 % im Jahr 2030 und 87,9 % im Jahr 2045 den höchsten Anteil an Rezyklateinsatz auf. Den deutlichsten Zuwachs verzeichnet hingegen der Bereich der Kunststoffverpackungen, für den von 2023 bis 2045 ein Anstieg des Rezyklatanteils um 40 Prozentpunkte prognostiziert wird.

Grundlegende Annahmen der Prognose zum Rezyklateinsatz

Im Rahmen der Prognose wird davon ausgegangen, dass in den kommenden Jahren umfangreiche strukturelle und regulatorische Maßnahmen umgesetzt werden, die den Verpackungssektor grundlegend verändern. Ein zentraler Schwerpunkt liegt dabei auf einem recyclinggerechten Verpackungsdesign. Durch die Vereinfachung und Harmonisierung der Materialzusammensetzungen sowie den Verzicht auf Störstoffe wie PVC, Pigmente oder komplexe Mehrschichtsysteme soll die Wiederverwertbarkeit von Verpackungen deutlich verbessert werden.

Ebenso wichtig ist der Erhalt von Rezyklaten im Verpackungskreislauf. Ziel ist es, den Einsatz von Rezyklaten in geschlossenen Materialkreisläufen zu priorisieren und so Downcycling zu vermeiden. Ergänzend dazu sollen Sammlung und Sortierung optimiert werden – etwa durch gezielte Erfassungssysteme für bestimmte Verpackungsarten oder die Ausweitung der Pfandpflicht auf zusätzliche Produktgruppen.

Darüber hinaus wird die Einführung materialübergreifender Einsatzquoten erwartet, um Ausweichbewegungen zwischen verschiedenen Verpackungsmaterialien zu verhindern und eine ausgewogene Nutzung sicherzustellen. Finanzielle Anreize nach § 21 VerpackG sollen gezielt recyclingfreundliche Verpackungslösungen und die Verwendung von Rezyklaten fördern.

Insgesamt sind diese Maßnahmen entscheidend, um den prognostizierten Rezyklateinsatz – insbesondere bei Kunststoffverpackungen – zu erreichen. Zugleich verdeutlichen sie, dass eine umfassende Transformation entlang der gesamten Wertschöpfungskette notwendig ist, um die Kreislaufführung von Verpackungsmaterialien nachhaltig zu stärken und Ressourcen effizienter zu nutzen.

5.4 Recyclingquoten

Die Recyclingquoten im Status quo orientieren sich an den Ergebnissen der GVM-Recyclingbilanz für das Bezugsjahr 2023 und den Ergebnissen aus dem Umweltbundesamt, die in den nächsten Monaten veröffentlicht werden. Die dort dokumentierten Quoten sind Recyclingzuführungsquoten. Die Recyclingzuführungsquote bezeichnet den Anteil eines bestimmten Materialstroms, der tatsächlich einer werkstofflichen Verwertung zugeführt wird – also dem Recyclingprozess übergeben wird, z. B. durch Sortieranlagen oder Aufbereitungsbetriebe. Es handelt sich nicht um den Anteil, der am Ende tatsächlich recycelt wird, sondern nur um das, was vom Abfallstrom ins Recycling eingespeist wird.

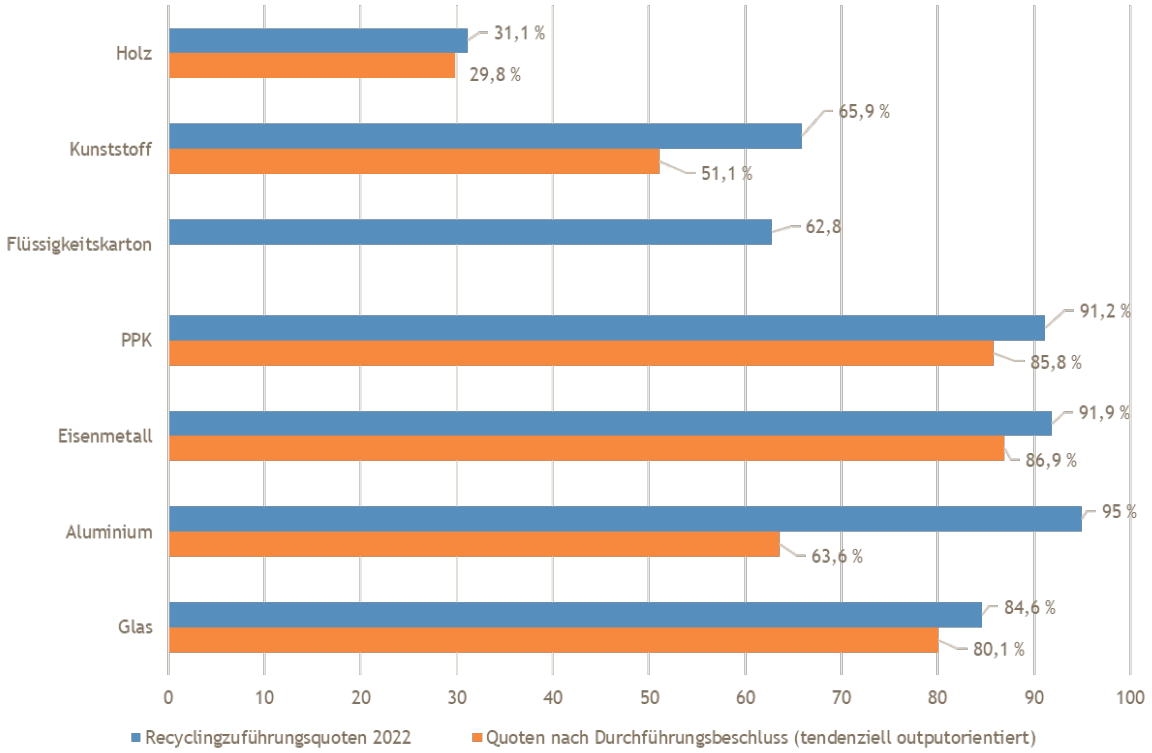
Recyclingzuführungsquoten sind somit nur eingeschränkt geeignet, um die tatsächlich für den Wiedereinsatz verfügbaren Materialmengen realistisch abzubilden. Daher bietet es sich an, ergänzend auch die Recyclingquoten gemäß dem EU-Durchführungsbeschluss[4] in die Betrachtung einzubeziehen. Diese Quoten, die häufig als „Output-Quoten“ bezeichnet werden, suggerieren durch ihre Bezeichnung eine direkte Aussage über die Wiedereinsatzfähigkeit der recycelten Materialien. Diese Interpretation ist jedoch irreführend, da auch die Recyclingquoten nach Durchführungsbeschluss keine direkte Aussage darüber zulassen, welche Materialmengen dem Markt tatsächlich als Sekundärrohstoff zur Verfügung stehen. Dennoch bieten die nach EU-Durchführungsbeschluss berechneten Quoten im Vergleich zu den Recyclingzuführungsquoten eine tendenziell realistischere Einschätzung des stofflichen Wiedereinsatzpotenzials. Eine weitere Besonderheit dieser Methodik besteht darin, dass die Quoten konsequent materialbasiert und nicht fraktionsbezogen ermittelt werden, was die Vergleichbarkeit und Aussagekraft hinsichtlich einzelner Materialströme erhöht.

Recyclingquoten nach Durchführungsbeschluss liegen für Deutschland derzeit erst für 2022 vor und fallen über alle Materialien hinweg niedriger aus als die bislang kommunizierten Verwertungszuführungsquoten. Abbildung 4 zeigt einen Vergleich der Quoten für das Jahr

[4] Durchführungsbeschluss (EU) 2019/665 der Kommission vom 17. April 2019 zur Änderung der Entscheidung 2005/270/EG zur Festlegung der Tabellenformate für die Datenbank gemäß der Richtlinie 94/62/EG des Europäischen Parlaments und des Rates über Verpackungen und Verpackungsabfälle.

2022. Besonders hoch ist die Differenz zu den Recyclingzuführungsquoten für die Materialien Aluminium (31 %) und Kunststoff (15 %).

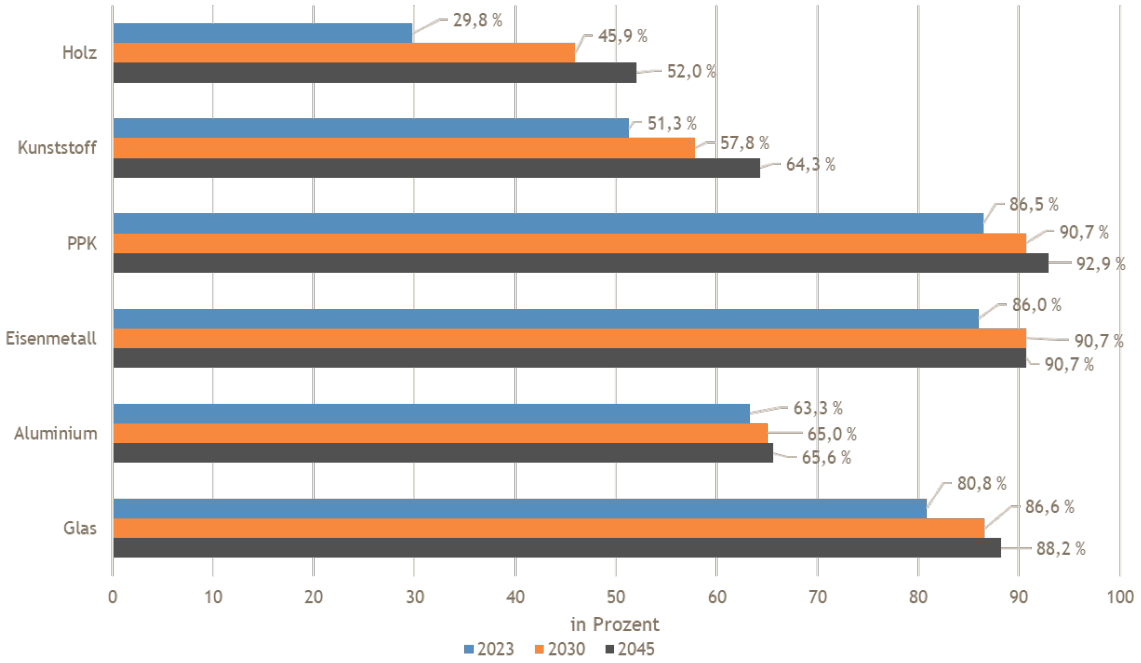
Abbildung 4: Vergleich der Recyclingquote für 2022



Für die weitere Bearbeitung der Studie werden die outputorientierten Recyclingquoten[5] genutzt. Abbildung 5 zeigt die outputorientierten Recyclingquoten für das Basisjahr 2023 sowie für die Prognosejahre 2030 und 2045.

[5] Die Recyclingquoten nach Durchführungsbeschluss sind nur tendenziell outputorientiert. Das ist darauf zurückzuführen, dass der Durchführungsbeschluss den Berechnungspunkt für die einzelnen Materialien unterschiedlich definiert. Das führt im Ergebnis dazu, dass z. B. der Berechnungspunkt für Aluminium den Recyclingoutput recht gut abbildet (weil der Berechnungspunkt nach Verlusten in der Pyrolyse angesiedelt ist), der Berechnungspunkt für Papier liegt dagegen weit entfernt vom Recyclingoutput (weil der Berechnungspunkt vor Verlusten im Trommelpulper liegt).

Abbildung 5: Prognose der Recyclingquote (outputorientiert)



** Glas, FE und Holz pauschal nach Zuführungsquote; Aluminium, PPK, Kunststoff mit technischen Effizienzfortschritten*

Im Ergebnis zeigt die Abbildung, dass nach dieser Prognose im Jahr 2045 lediglich PPK (93 %) und Eisenmetalle (91 %) die 90-%-Marke überschreiten. Für Kunststoffe wird bis zum Jahr 2045 eine Recyclingquote von 64,3 % prognostiziert.

5.5 Aufstellen des Stoffstroms

Für die Aufstellung der Verpackungsstoffströme für die Jahre 2023, 2030 und 2045 werden die in diesem Kapitel hergeleiteten Daten zum aktuellen und zukünftigen Aufkommen an Verpackungen (Kapitel 5.2) mit den Informationen zum Einsatz von Sekundärmaterialien (Kapitel 5.3) sowie den jeweiligen Verwertungsquoten (Kapitel 5.4) verknüpft. Ziel der folgenden Analyse ist es, die erforderlichen Mengen an Primärmaterial zur Deckung des Verpackungsbedarfs und die Menge des außerhalb der Verpackungsstoffströme zur Verfügung stehenden Materials für Sekundäranwendungen zu berechnen. Dabei wird unterstellt, dass keine über den aktuellen Sachstand herausgehenden, zusätzlichen Maßnahmen zur Lenkung und Schließung von Stoffströmen ergriffen werden.

Darstellung der Stoffstrombilder

Im Folgenden werden die Stoffstrombilder für die Jahre 2023, 2030 und 2045 gezeigt (Abbildung 6 bis Abbildung 8).

Abbildung 6: Ergebnis der Berechnung des Verpackungsstoffstroms für das Jahr 2023

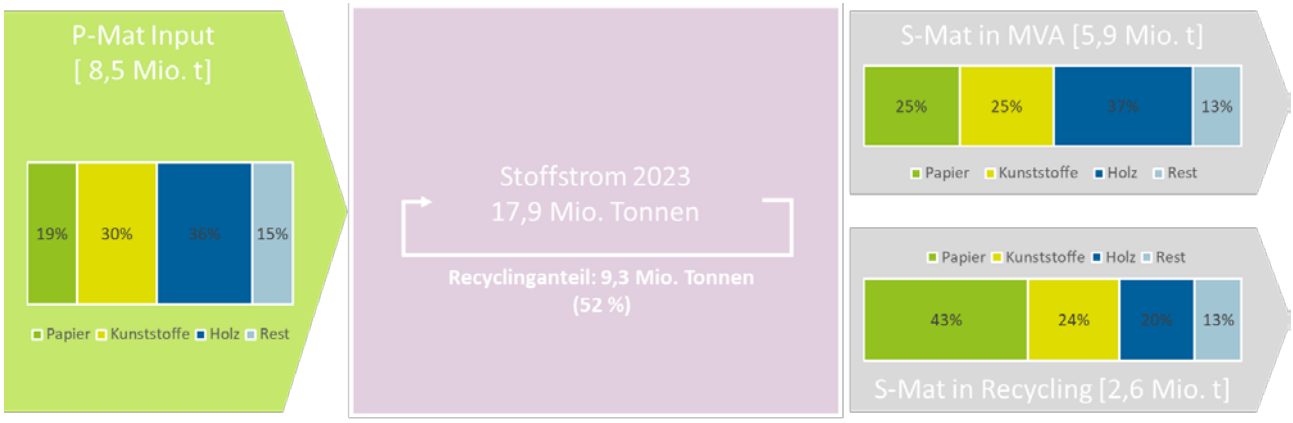


Abbildung 7: Ergebnis der Berechnung des Verpackungsstoffstroms für das Jahr 2030

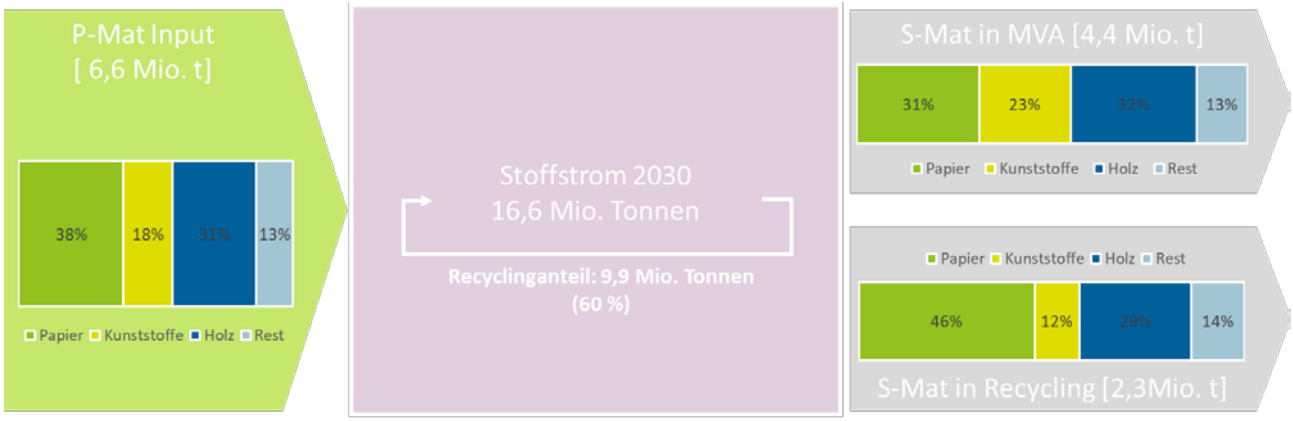
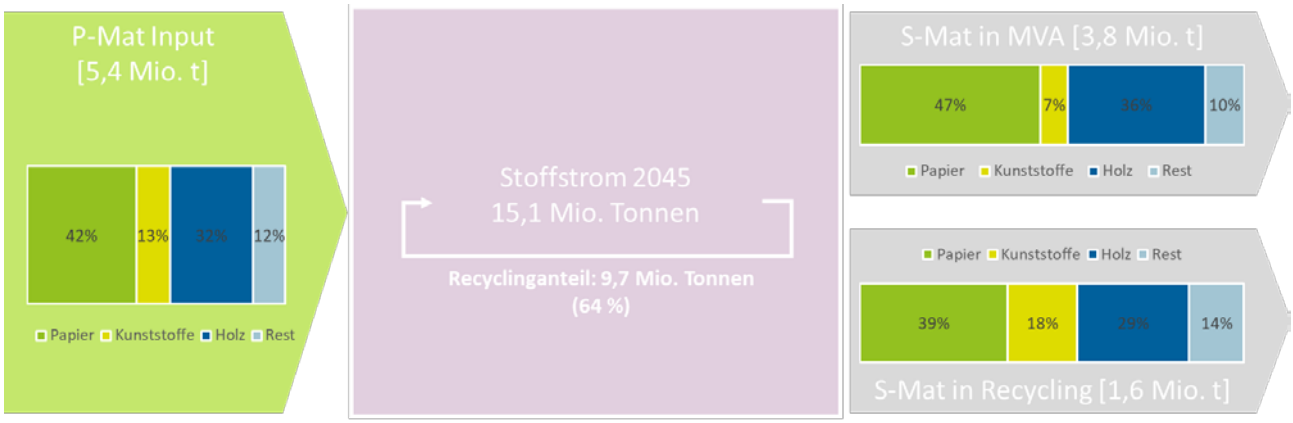


Abbildung 8: Ergebnis der Berechnung des Verpackungsstoffstroms für das Jahr 2045



Anmerkung für die Abbildungen 6– 8: Die Zahlen für Kunststoffe subsumieren fossil basierte und biobasierte Kunststoffe sowie ab 2045 auch PtX-Kunststoffe.

Beschreibung der Stoffstrombilder

Der zentrale Verpackungskreislauf innerhalb des untersuchten Stoffstromsystems ist in der *lila* Box in der Mitte der Grafik dargestellt. Sie zeigt, wie viel Verpackungsmaterial insgesamt eingesetzt und wie viel direkt wieder dem Verpackungskreislauf zugeführt wird. Im Jahr 2023 wurden 17,9 Mio. Tonnen Verpackungsmaterial verwendet, davon konnten 9,3 Mio. Tonnen stofflich zu neuen Verpackungen recycelt (Recyclinganteil) werden – vor allem Glas, Metall und Wellpappe. Auf der linken Seite der Abbildung zeigt der Blockpfeil die notwendige Menge an Primärmaterial (P-Mat), die in die Verpackungsstoffströme eingespeist wird: 2023 betrug dieser Anteil 8,5 Mio. Tonnen. Eine Bandgrafik innerhalb des Pfeils verdeutlicht die Verteilung nach Materialgruppen: 19 % Verpackungspapiere, 30 % Kunststoffe, 34 % Holz und 15 % sonstige Materialien.

Auf der rechten Seite der Abbildung zeigen zwei graue Blockpfeile, welche Materialmengen den Verpackungsstoffstrom verlassen und in welche Verwertungswege sie überführt werden. Dabei steht die Bezeichnung „S-Mat“ für das im System anfallende Sekundärmaterial. Der obere Pfeil kennzeichnet die thermische Verwertung in einer Müllverbrennungsanlage (MVA). Im Jahr 2023 lag die Gesamtmenge an Sekundärmaterial in der MVA bei 5,9 Mio. Tonnen. Der untere Pfeil steht für die stoffliche Verwertung außerhalb des Verpackungskreislaufs, bei der aufbereitete Sekundärrohstoffe in anderen Anwendungsbereichen eingesetzt werden. Im Jahr 2023 wurden auf diesem Weg 2,6 Mio. Tonnen Sekundärmaterial einer sekundären stofflichen Nutzung außerhalb des Verpackungsstoffstroms zugeführt.

Die in den Pfeilen dargestellten Bandgrafiken veranschaulichen die materialgruppenspezifische Zusammensetzung der jeweiligen Stoffströme. Dabei wird deutlich, dass insbesondere Holzverpackungen einen hohen Anteil am Gesamtaufkommen einnehmen. Auffällig ist, dass ein erheblicher Teil dieses Materials überwiegend thermisch verwertet wird. Dieses stoffliche Nutzungspotenzial bleibt somit weitgehend unerschlossen – sowohl für eine Kaskadennutzung innerhalb des Verpackungssektors als auch für sekundäre Anwendungen in anderen Materialkreisläufen. Die derzeitige Praxis führt dazu, dass wertvolle biogene Rohstoffe energetisch genutzt und damit dauerhaft dem Stoffkreislauf entzogen werden. Eine verstärkte stoffliche Verwertung von Holzverpackungen könnte daher einen wichtigen Beitrag zur Ressourcenschonung und zur Reduzierung des Primärmaterialbedarfs leisten.

Bestimmung des Primärmaterialinput in den Verpackungsstoffstrom

Aus den Abbildungen 6 bis 8 ergibt sich somit für den Primärmaterialinput in den Verpackungsstoffstrom in den Jahren 2023, 2030 und 2045 (Tabelle 7). Diese Mengen sind Grundlage für die Bilanzierung der Umweltfolgen in den Kapitel 6.1 und 6.2.

Tabelle 7: Errechneter Primärmaterialinput in den Verpackungsstoffstrom

Material	2023 in kt	2030 in kt	2045 in kt
Holz	3.062	2.554	2.152
PPK (inkl. FKN und Verbünde)	1.607	1.559	1.557
Biokunststoffe	68	133	363
PtX-Kunststoffe	–	–	489
fossile Kunststoffe	2.505	1.315	–
Sonstige Materialien	*1.298*	*1.081*	*829*
Summe	**8.540**	**6.643**	**5.389**
Veränderung gegenüber 2023		*–22 %*	*–37 %*

Vergleichende Auswertung der Stoffströme 2023 und 2045

Ein Vergleich der Verpackungsstoffströme der Jahre 2023 und 2045 zeigt deutliche strukturelle Veränderungen:

- Der Input an Primärmaterialien in den Verpackungsstoffstrom sinkt bis 2045 um 37 % im Vergleich zum Jahr 2023.
- Der Anteil der Verpackungen, die direkt innerhalb des Verpackungsstoffstroms wiederverwertet werden, steigt von 52 % im Jahr 2023 (9,3 Mio. Tonnen) auf 64 % im Jahr 2045 (9,7 Mio. Tonnen).
- Der relative Anteil von Papier am Primärmaterialinput nimmt signifikant zu – von 19 % im Jahr 2023 auf 42 % im Jahr 2045. In absoluten Zahlen hingegen bleibt die Masse an eingesetztem Primärpapier als Verpackungspapier nahezu gleich.
- Der Anteil biobasierter Rohstoffe am gesamten Primärmaterialinput steigt von 55 % im Jahr 2023 auf 76 % im Jahr 2045, was einem Zuwachs von 21 Prozentpunkten entspricht. Trotz dieses relativen Anstiegs verringert sich die absolute Menge biobasierter Primärmaterialien im selben Zeitraum um 666 kt.
- Der Anteil von Primärmaterial in Biokunststoffen an allen Kunststoffverpackungen nimmt sowohl relativ als auch absolut deutlich zu. Der relative Anteil steigt von 3 % im Jahr 2023 auf 43 % im Jahr 2045. In absoluten Zahlen wächst der Bedarf an Primär-Biokunststoffen von 68 kt auf 363 kt – eine Zunahme um den Faktor 5,3.
- Die Menge an Sekundärmaterialien, die den Verpackungsstoffstrom in Richtung anderer Anwendungen verlässt, sinkt im Prognosezeitraum von 2,6 Mio. Tonnen auf 1,6 Mio. Tonnen – ein Rückgang um 38 %. Diese Entwicklung ist maßgeblich auf das sinkende Verpackungsaufkommen sowie die zunehmende Kreislaufführung innerhalb des Verpackungsstoffstroms zurückzuführen.
- Trotz allen Bemühungen zur Reduktion des Verpackungsaufkommens und zur Schließung von Kreisläufen – auch auf regulatorischer Ebene (PPWR) – werden auch im Jahr 2045 voraussichtlich noch immer 3,8 Mio. Tonnen an Verpackungsabfällen einer thermischen Verwertung zugeführt. Darunter entfallen allein 1,5 Mio. Tonnen auf Verpackungspapiere sowie 1,1 Mio. Tonnen an Altholz aus Verpackungen.

Weniger Verpackungen, aber dafür mehr Kreislaufwirtschaft und auch mehr biobasierte Verpackungen

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass mit der prognostizierten Reduktion des Verpackungsaufkommens bis zum Jahr 2045 sowohl die Input- als auch die Outputströme innerhalb des Stoffstroms insgesamt zurückgehen werden. Gleichzeitig ist ein relativer Anstieg des Anteils der im Kreislauf geführten Materialien zu erwarten, was auf eine verbesserte Zirkularität innerhalb des Systems hindeutet.

Zudem ist zu berücksichtigen, dass der Anteil biobasierter Materialien im selben Zeitraum zunimmt. In der Folge gewinnen Umweltauswirkungen, die primär mit der Nutzung erneuerbarer Rohstoffe verbunden sind, wie etwa Landnutzung, Biodiversitätseinflüsse oder Emissionen aus landwirtschaftlicher Produktion, an Relevanz.

Eine umfassende Bewertung muss daher klären, inwieweit sich die Effekte des insgesamt rückläufigen Materialeinsatzes und der zunehmenden Verwendung biobasierter Rohstoffe gegenseitig verstärken, abschwächen oder kompensieren.

6 Bewertung des Stoffstrommodells für Verpackungen bis 2045

Key Facts:

Umweltbewertung der Zukunftsszenarien:

- Rückgang der bilanzierten (Umwelt-)Parameter Fläche, Energie und Wasser bis 2030
- Anstieg des Flächen- und Wasserbedarfs von 2030 bis 2045 über das Niveau von 2023 hinaus, bedingt durch den großmaßstäblichen Einsatz biobasierter Kunststoffe
- Energie maßgeblich beeinflusst durch das Phase-out fossiler Kunststoffe
- Optimierungen sind möglich bei konsequenter Nutzung von Agrarreststoffen, Altholz und Altpapier

Dieses Kapitel führt die Inhalte aus den Kapiteln 4 und 5 zusammen. Ziel dieser Gesamtbewertung ist es zu analysieren, in welchem Maß sich der insgesamt rückläufige Materialeinsatz und die zunehmende Nutzung biobasierter Rohstoffe gegenseitig beeinflussen und welche Auswirkungen sich daraus für die zukünftige Ausgestaltung des Verpackungssystems ergeben. Die Bewertung erfolgt sowohl im Rahmen eines Business-as-usual-Szenarios (BAU), in dem antizipiert wird, dass bis zum Jahr 2045 weiterhin die gleichen Rohstoffe wie heute zur Bedienung des Bedarfs an biobasierten Verpackungen genutzt werden. Ergänzend dazu werden verschiedene Optimierungsszenarien entwickelt und analysiert, in denen alternative Entwicklungs- und Steuerungspfade betrachtet werden.

6.1 Bewertung BAU-Szenario

Im Rahmen der Bewertung der BAU-Szenarien, deren Ergebnisse in den folgenden drei Abschnitten dargestellt sind, werden mithilfe ökobilanzieller Berechnungen die Beiträge zu den drei Parametern *Fläche*, *Energie* und *Wasser* ermittelt, die sich aus der Verwendung biobasierter Rohstoffe ergeben.

Definition des BAU-Szenarios

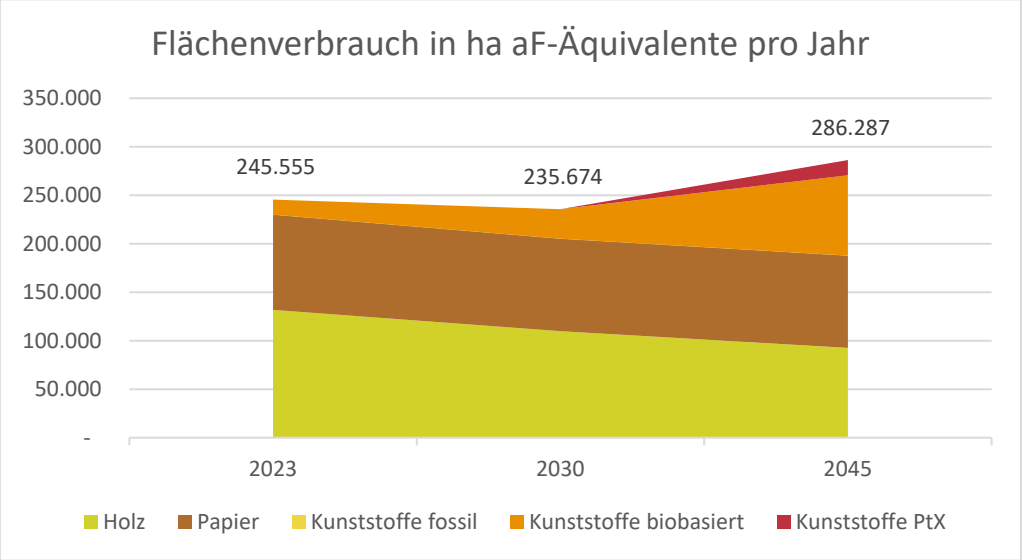
Für die Bilanzierung der BAU-Szenarien wird Folgendes angenommen:

- Holzverpackungen werden in allen Jahren (2023, 2030 und 2045) stets als Verpackungen aus Primärholz bilanziert.
- Papierverpackungen nutzen in allen Jahren (2023, 2030 und 2045) stets Zellstoff aus der Forstwirtschaft (also Primärholz).
- Biobasierte Kunststoffe werden in allen Jahren (2023, 2030 und 2045) stets als Kunststoffe auf Basis von Zuckerrohr bilanziert.

- Die nicht biobasierten Kunststoffe werden in den Jahren 2023 und 2030 als fossil basierte Kunststoffe bilanziert. Im Jahr 2045 werden die nicht-biobasierten Kunststoffe als PtX-Kunststoffe bilanziert, um den Bemühungen um eine vollständige Defossilisierung Rechnung zu tragen. Der Energiebedarf dieser PtX-Kunststoffe liegt innerhalb der Bilanzgrenze.
- Die in der Prognose zusätzlichen Materialgruppen (Glas, Metalle, Sonstige) sind in der Bilanzierung nicht weiter berücksichtigt, da für diese keine biobasierten Alternativen zur Verfügung stehen und sie somit außerhalb des Betrachtungsraums dieser Studie liegen.

Im Rahmen der vorliegenden Auswertung werden die in den Stoffstrommodellen ermittelten Primärmaterialbedarfe (Kapitel 5.5) mit den Umweltkennwerten aus Kapitel 4.1 verrechnet. Die Darstellung erfolgt jeweils getrennt für die Parameter *Fläche*, *Energie* und *Wasser* in Form von Flächendiagrammen, welche die Entwicklung für die Jahre 2023, 2030 und 2045 darstellen (Abbildung 9 bis Abbildung 11). Die einzelnen Segmente der Balkendiagramme zeigen jeweils die berechneten Ergebnisse für Holz (*Grün*), Papier (*Braun*), Kunststoffe fossil (*Gelb*), Kunststoffe biobasiert (*Orange*) und PtX-Kunststoffe (*Rot*).

Abbildung 9: Bewertung BAU-Szenario für den Parameter Fläche



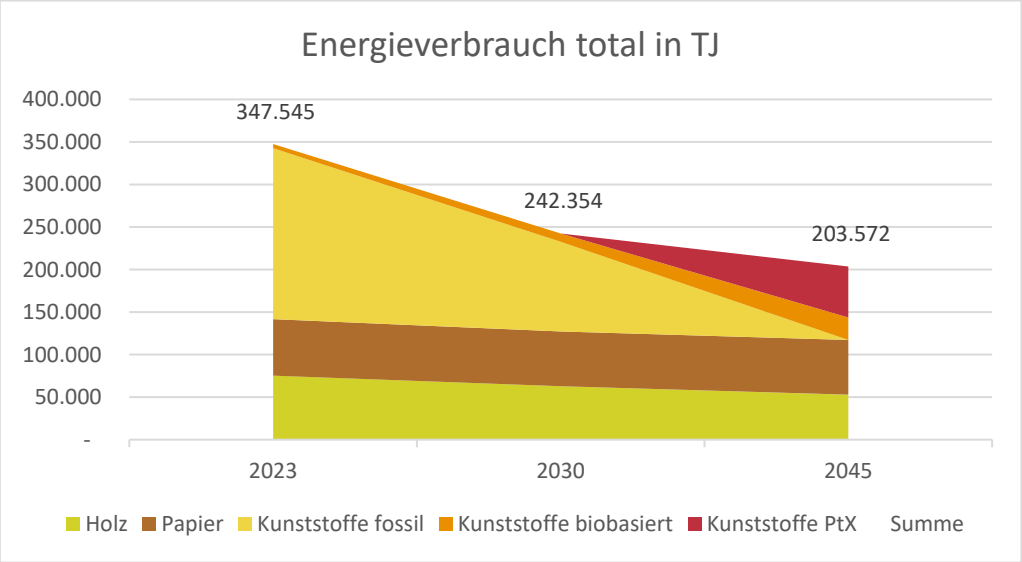
Beschreibung der Ergebnisse Parameter Fläche

Die Entwicklung des Flächenbedarfs im BAU-Szenario zeigt, dass bis zum Jahr 2030 die bilanzierten Flächenbedarfe um rund 4 % sinken. Ursache hierfür ist der rückläufige Verpackungsverbrauch, insbesondere die Reduktion der Holzverpackungen, deren Herstellung mit einem vergleichsweise hohen Flächenbedarf für den Anbau nachwachsender Rohstoffe verbunden ist.

Ab dem Jahr 2030 zeigt sich hingegen ein deutlicher Anstieg der bilanzierten Flächenbedarfe, der bis 2045 das Ausgangsniveau von 2023 um 16,6 % übersteigt. Haupttreiber dieser Zunahme ist der großflächige Einsatz biobasierter Kunststoffe. Parallel dazu steigt auch der Anteil der PtX-Kunststoffe bis zum Jahr 2045, bleibt jedoch geringer als derjenige der biobasierten Kunststoffe. Trotz ihres höheren Massenstroms im Jahr 2045 führen PtX-Kunststoffe zu einem geringeren Flächenbedarf, da sie auf strombasierten Synthesewegen beruhen und der Flächenbedarf somit geringer ausfällt (nur direkter Standort der Energieerzeugung und ggf. Nutzungseinschränkungen auf Abstandsflächen). Die fossilbasierten Kunststoffe tragen aufgrund ihres sehr geringen Flächenfußabdrucks weiterhin nicht signifikant zum Flächenverbrauch bei. insgesamt verdeutlicht die Entwicklung, dass der Übergang zu biobasierten

Rohstoffen zwar zur Substitution fossiler Ressourcen beiträgt, jedoch mit einem erhöhten Flächenanspruch einhergeht und damit Ressourcenkonkurrenzen im Landnutzungssektor verstärken kann.

Abbildung 10: Bewertung BAU-Szenario für den Parameter Energie

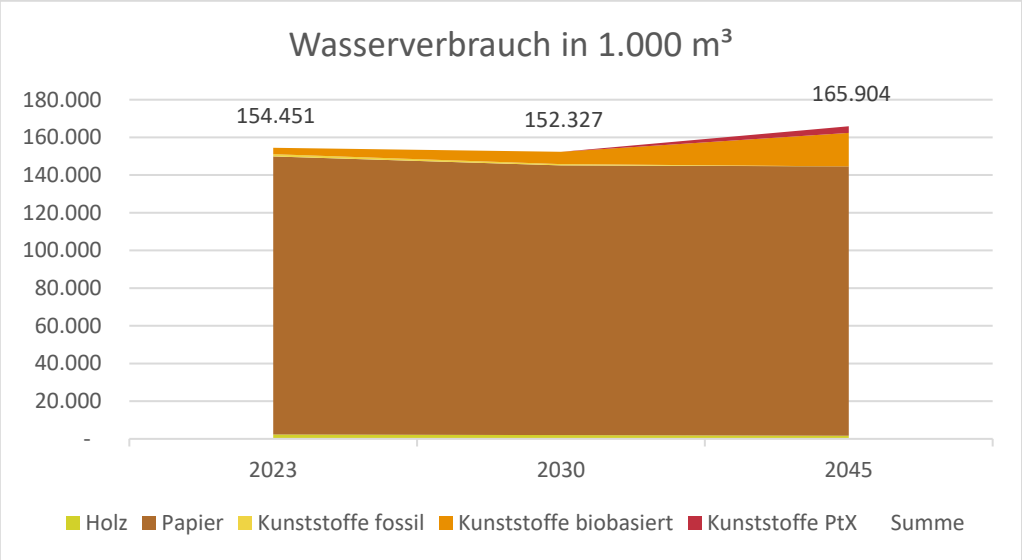


Beschreibung der Ergebnisse Parameter Energie

Die Entwicklung des Energieverbrauchs im BAU-Szenario ist durch den stetigen und vollständigen Phase-out der fossilbasierten Kunststoffe bis zum Jahr 2045 geprägt. Bis zum Jahr 2030 verringern sich die bilanzierten Energiebeiträge deutlich um rund 30 %. Ab 2030 nimmt die Dynamik der Reduktion jedoch ab, was vor allem auf den großflächigen Einsatz von biobasierten und insbesondere PtX-Kunststoffe zurückzuführen ist.

Insgesamt führt diese Entwicklung bis 2045 zu einer bilanzierten Reduktion des gesamten Energieverbrauchs um 41 %. Gegenüber dem Jahr 2023. Die größten Energieverbraucher innerhalb des Verpackungsstoffstroms im Jahr 2045 sind – in absteigender Reihenfolge – die PtX-Kunststoffe, Verpackungspapiere, Holzverpackungen und, mit dem geringsten Anteil, biobasierte Kunststoffe.

Abbildung 11: Bewertung BAU-Szenario für den Parameter Wasser



Beschreibung der Ergebnisse Parameter Wasser

Die Entwicklung des Wasserverbrauchs im BAU-Szenario wird maßgeblich durch die Beiträge der Primärpapierherstellung bestimmt. Da sich der Primärmaterialeinsatz von frischen Papierfasern über die betrachteten Jahre nur marginal reduziert, bleiben die Ergebnisse der Wasserbilanz insgesamt weitgehend stabil. Bis zum Jahr 2030 zeigt sich lediglich eine geringfügige Abnahme des bilanzierten Wasserverbrauchs um etwa 1 %. Mit Beginn des großflächigen Einsatzes biobasierter Kunststoffe steigt der bilanzierte Wasserverbrauch bis 2045 um rund 7 % an. Diese Entwicklung verdeutlicht, dass die Wasserressourcennutzung im Verpackungssektor vor allem durch die Papierproduktion geprägt ist, während die Substitution fossiler durch biobasierte Kunststoffe einen moderaten zusätzlichen Wasserbedarf induziert.

Zusammenfassung der Ergebnisse

Die dokumentierten Ergebnisse nutzen die im Rahmen der quantitativen Bewertung erarbeitetem Emissionsfaktoren für die Parameter *Fläche*, *Energie* und *Wasser*. Im Ergebnis zeigt sich:

- **Bis zum Jahr 2030** ist bei allen drei Parametern (*Fläche*, *Energie* und *Wasser*) ein **Rückgang** zu verzeichnen, der als Umweltentlastung verstanden werden kann. Diese positive Entwicklung ist insbesondere auf den Rückgang des Verpackungsaufkommens zurückzuführen. Insbesondere der geringe Anteil an Biokunststoffen sowie der bis zum Jahr 2030 nur in begrenztem Umfang prognostizierte Umstieg von Kunststoff- auf PPK-Verpackungen tragen zu diesem Ergebnis bei. Den Parameter *Energie* betreffend wird der Rückgang bis zum Jahr 2030 maßgeblich durch den prognostizierte Phase-out der fossilbasierten Kunststoffe beeinflusst.
- **Ab dem Jahr 2030 nehmen die Beiträge zu den bilanzierten Parametern *Fläche* und *Wasser* bis zum Jahr 2045 zu** und übersteigen sogar das Niveau des Jahres 2023.
  - Diese Entwicklung ist insbesondere auf die **steigenden Anteile biobasierter Kunststoffe auf Zuckerrohrbasis** zurückzuführen.
  - Während der Anteil biobasierter Kunststoffe im Jahr 2023 bei 3 % liegt und bis 2030 auf 9 % ansteigt, wird für das Jahr 2045 ein Anteil von 43 % prognostiziert. Wird dieser Bedarf weiterhin auf Basis der gleichen Rohstoffe wie 2023 gedeckt (also biobasierte

Kunststoffe auf Basis von Zuckerrohr), resultiert daraus eine **Verfünffachung des Flächen- und Energiebedarfs** – im Vergleich zu 2023.

- Hinsichtlich der Verteilung der Umweltwirkungen im Jahr 2045 zwischen biobasierten und PtX-Kunststoffen ergibt sich ein differenziertes Bild: Nur 5 % Anteile der Beiträge zum Parameter *Fläche* bzw. 2 % Anteile der Beiträge zum Parameter *Wasser* entfallen auf PtX-Kunststoffe, während ihr Anteil beim Parameter *Energie* mit 29 % deutlich höher liegt. Diese Verteilung verdeutlicht, dass die Verwendung von PtX-Kunststoffen den Druck in der Flächendiskussion verringern kann, die Problemstellung jedoch auf die Frage der Energieverfügbarkeit verlagert wird.

Notwendigkeit für Optimierungen

De facto heben sich die Effekte auf die Parameter *Fläche* und *Energie* weitgehend gegenseitig auf: Potenzielle positive Umwelteffekte infolge des Rückgangs des Verpackungsaufkommens sowie des Phase-out der fossilbasierten Kunststoffe werden im Hinblick auf diese beiden Parameter durch die zunehmende Verwendung biobasierter Rohstoffe entweder aufgehoben oder zumindest deutlich abgeschwächt. Eine umfassende Analyse der vorliegenden Ergebnisse verdeutlicht die Notwendigkeit einer gezielten **Optimierung** des Einsatzes biogener Rohstoffe, sowohl im Bereich der Kunststoffe als auch bei Verpackungspapieren. Die zu erwartenden Optimierungspotenziale im Bereich der Kunststoffe sind aller Voraussicht nach nicht ausreichend, um das Belastungsniveau in den bilanzierten Parametern *Fläche* und *Wasser* unterhalb des errechneten Niveaus von 2023 zu halten.

6.2 Analyse und Bewertung möglicher Optimierungen

Zur Ermittlung möglicher Optimierungspotenziale werden die im Rahmen des vorherigen Kapitels 6.1 erarbeiteten Ergebnisse für die BAU-Szenarien um Szenarien zu möglichen Optimierungen ergänzt. Dabei wird auf die im Rahmen von Kapitel 4 erarbeite qualitative und quantitative Bewertung zurückgegriffen.

Vorgehen bei der Auswahl der Optimierungspotenziale

Um aus den 13 analysierten Rohstoffen diejenigen herauszufiltern, die sowohl in der qualitativen als auch in der quantitativen Bewertung Optimierungspotenziale zeigen, werden die Bewertungen in den Tabellen 8 und 9 zusammengeführt.

Für die quantitative Bewertung werden die in Kapitel 4.1 (Tabelle 3) dokumentierten Ergebnisse der einzelnen Rohstoffe so aufbereitet, dass die Werte für Verpackungspapiere in Relation zum Referenzrohstoff *Primärholz* und die Werte für Verpackungskunststoffe in Relation zum Referenzrohstoff *Zuckerrohr* dargestellt werden. Dieses Vorgehen ermöglicht eine klare Darstellung der zu erwartenden Umweltbelastungen und -entlastungen im Vergleich zu den BAU-Szenarien – also gegenüber dem aktuellen Nutzungsmuster. Für die Darstellung dieser quantitativen Bewertung gilt dabei:

- Werte größer +25 % werden als signifikante Belastung klassifiziert und in *Rot* dargestellt.
- Werte zwischen +25 % und −25 % zeigen keinen signifikanten Unterschied und werden in *Grau* dargestellt.
- Werte kleiner −25 % gelten als signifikante Entlastung und werden in *Grün* dargestellt.
- Werte kleiner −50 % werden als sehr signifikante Entlastung bewertet und in *Grün* sowie fettgedruckt dargestellt.

Die qualitative Bewertung bedarf keiner derartigen Einordnung. Um ein vergleichbares Farbmuster auch für die qualitative Bewertung zu erhalten, werden die Einstufungen aus Kapitel 4.2, Tabelle 4 herangezogen und kondensiert.

Tabelle 8: Zusammenführende Bewertung zur Identifikation des Optimierungspotenzials bei Verpackungspapieren

	Quantitative Bewertung			Qualitative Bewertung		
Verpackungs-papiere aus:	Fläche	Energie	Wasser	Verfügbarkeit	Flächen-effizienz	Nutzungs-konkurrenzen
Primärholz	o	o	o	A	C	C
Laub	**−50 %**	−15 %	−17 %	o	B	A
Gras	−43 %	−18 %	−19 %	o	B	A
Silphie	**−51 %**	1 %	−15 %	o	B	A
Paludi	**−80 %**	−2 %	−17 %	o	B	A
Bambus	31 %	27 %	**−58 %**	B	C	C
Bagasse	**−100 %**	−35 %	**−60 %**	A	o	B
Zuckerrübe	−34 %	−14 %	**−61 %**	B	A	C
Altholz	**−100 %**	−36 %	9 %	A	o	B
Agrarreststoff	**−73 %**	−12 %	**−91 %**	A	A	B

Tabelle 8 zeigt die Bewertung für Verpackungspapiere aus verschiedenen biogenen Rohstoffquellen. Für die Optimierungen sind die biogenen Rohstoffe geeignet, die in der qualitativen und quantitativen Bewertung möglichst wenige Einschränkungen aufweisen. Für Verpackungspapiere sind dies:

- Silphie, Paludi und Zuckerrübe als Anbaubiomasse,
- Agrarreststoffe und Bagasse als Reststoffe und Nebenprodukte,
- Altholz als Abfall aus dem Verpackungsstoffstrom.

Anmerkung: Altpapier spielt in dieser Betrachtung als Rohstoff keine Rolle, da ausschließlich Ersatzstoffe für die Frischfaserproduktion aus Primärholz gesucht werden.

Tabelle 9: Zusammenführende Bewertung zur Identifikation des Optimierungspotenzials bei Verpackungskunststoffen

	Quantitative Bewertung			Qualitative Bewertung		
Kunststoffe aus:	Fläche	Energie	Wasser	Verfügbarkeit	Flächen-effizienz	Nutzungs-konkurrenzen
Zuckerrohr	o	o	o	A	C	C
Primärholz	**−83 %**	12 %	289 %	A	C	C
Mais	**−67 %**	−11 %	76 %	A	C	C
Zuckerrübe	**−65 %**	−1 %	−1 %	B	A	C
Tallöl	**−100 %**	**−52 %**	**−78 %**	o	o	A
Lignin	**−66 %**	597 %	524 %	o	o	A
Altholz	**−100 %**	−17 %	301 %	A	o	B
Altpapier	**−100 %**	−15 %	244 %	A	o	B
PtX	**−86 %**	68 %	**−85 %**	o	o	o

Tabelle 9 zeigt die Bewertung für Verpackungskunststoffe aus verschiedenen biogenen Rohstoffquellen. Die folgenden Rohstoffe zeigen Optimierungspotenziale für Kunststoffe gegenüber dem BAU-Szenario:

- Mais und Zuckerrübe als Anbaubiomasse,
- Tallöl als Nebenprodukt,
- Altpapier als Abfall aus dem Verpackungsstoffstrom,
- PtX als synthetischer Kunststoff.

Vier Szenarien für die Bewertung möglicher Optimierungen

Zur besseren Übersicht erfolgt eine Einteilung in vier Szenarien:

- Szenario **Anbaubiomasse:** Betrachtet werden Silphie und Paludi als Rohstoffe für die Papierproduktion sowie Mais für die Kunststoffherstellung. Zusätzlich wird ein Szenario berechnet, in dem ausschließlich Zuckerrübe für beide Produktgruppen eingesetzt wird.
- Szenario **Reststoffe und Nebenprodukte:** Eingerechnet werden Agrarreststoffe und Bagasse für die Papierproduktion sowie Tallöl für die Kunststoffherstellung.
- Szenario **Verpackungsabfälle:** Berücksichtigt werden Altholz für die Herstellung von Verpackungspapier und PPK-Abfälle für die Produktion von Verpackungskunststoffen.
- Szenario **Synthetische Kunststoffe:** Dieses Szenario orientiert sich am BAU-Pfad 2045: Verpackungspapiere basieren weiterhin auf Primärholz, biobasierte Kunststoffe werden durch PtX-basierte Kunststoffe ersetzt.

In Summe werden neben dem BAU-Szenario für 2023 und 2045 und den oben beschriebenen vier Szenarien sieben Optimierungsoptionen bilanziert. Tabelle 10 fasst die grundlegenden Annahmen für die Modellierung der Optimierungsszenarien zusammen.

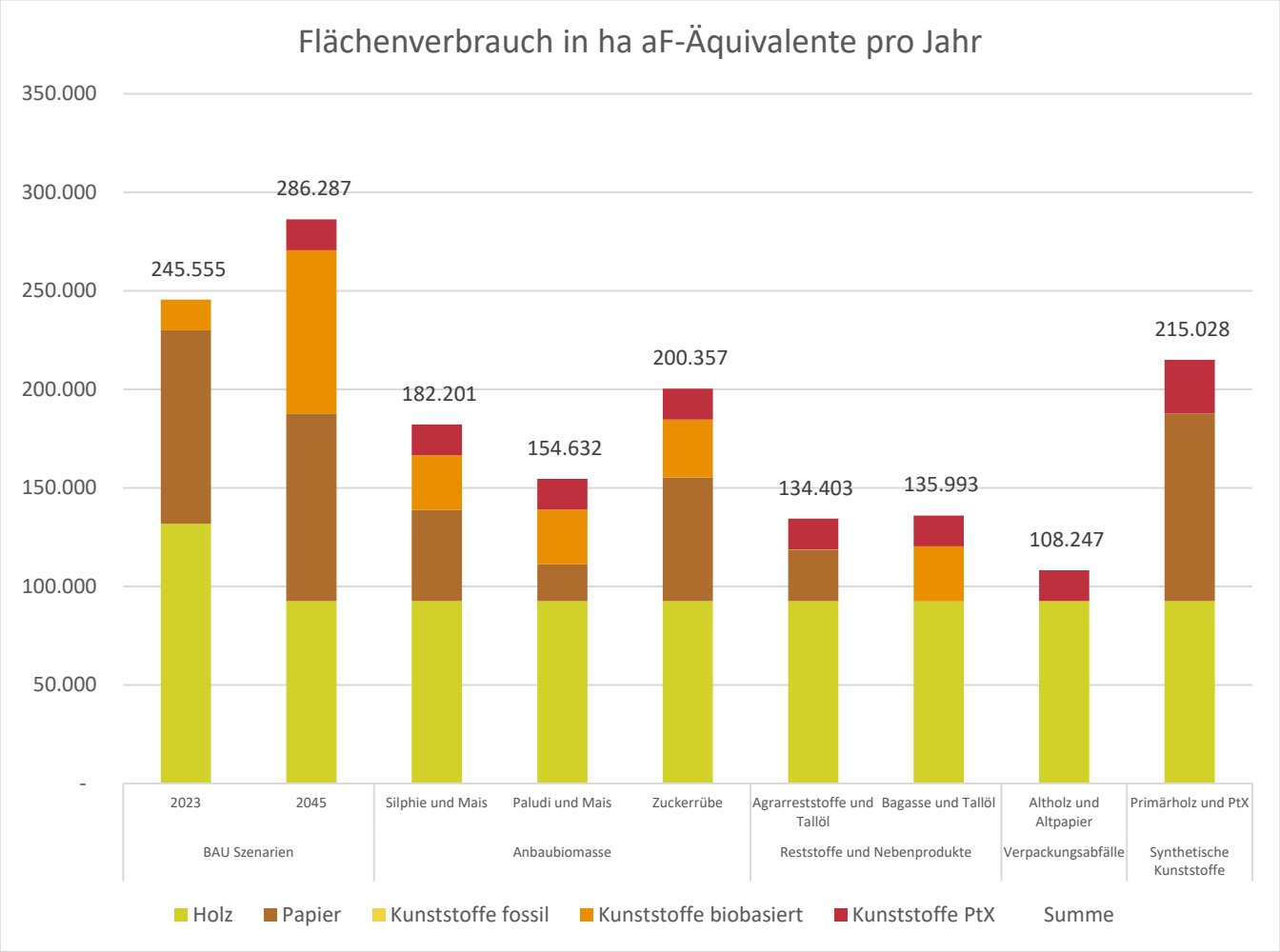
Tabelle 10: Übersicht über die Szenarien

Szenario		Verpackungen aus Holz	Verpackungen aus Papier	Verpackungen aus biobasiertem Kunststoff
BAU-Szenario	BAU 2023	aus Holz	aus Frischfaser aus Forstwirtschaft	auf Basis von Zuckerrohr
	BAU 2045	aus Holz	aus Frischfaser aus Forstwirtschaft	auf Basis von Zuckerrohr
Anbaubiomasse	Silphie und Mais	aus Holz	aus Frischfaser aus Silphie Anbau	auf Basis von Mais
	Paludi und Mais	aus Holz	aus Frischfaser aus Paludi Anbau	auf Basis von Mais
	Zuckerrübe	aus Holz	aus Frischfaser aus Rübenpressschnitzel und Rübenlaub	auf Basis von Zuckerrübe
Reststoffe und Nebenprodukte	Agrarreststoffe und Tallöl	aus Holz	aus Faser aus Agrarreststoffen	auf Basis von Tallöl
	Bagasse und Tallöl	aus Holz	aus Faser aus Bagasse	auf Basis von Tallöl
Verpackungsabfälle	Altholz und Altpapier	aus Holz	auf Faser aus Altholz	auf Basis von Altpapier
Synthetische Kunststoffe	Primärholz und PtX	aus Holz	aus Frischfaser aus Forstwirtschaft	biobasierte Kunststoffe durch PtX Kunststoffe ersetzt

Die Bilanzierung erfolgt gemäß der in Kapitel 6.1 dargestellten Methodik: Es werden die in den Stoffstrommodellen ermittelten Primärmaterialbedarfe (Kapitel 5.5) mit den Umweltkennwerten aus Kapitel 4.1 verrechnet. Die Ergebnisse dieser Berechnungen sind in den folgenden Abbildungen 12 bis 14 dargestellt.

Zunächst werden die Resultate der BAU-Szenarien für die Jahre 2023 und 2045 vorgestellt. Anschließend folgen die Optimierungsszenarien in der aus Tabelle 10 bekannten Reihenfolge. Die Darstellung erfolgt jeweils getrennt für die Umweltparameter Fläche, Energie und Wasser in Form gestapelter Balkendiagramme für die Jahre 2023, 2030 und 2045. Die Segmente der Balkendiagramme zeigen die Beiträge der Materialien Holz (Grün), Papier (Braun), Kunststoffe fossil (Gelb), Kunststoffe biobasiert (Orange) und PtX Kunststoffe (Rot)[6].

Abbildung 12: Bewertung Optimierungsszenarien für den Parameter Fläche

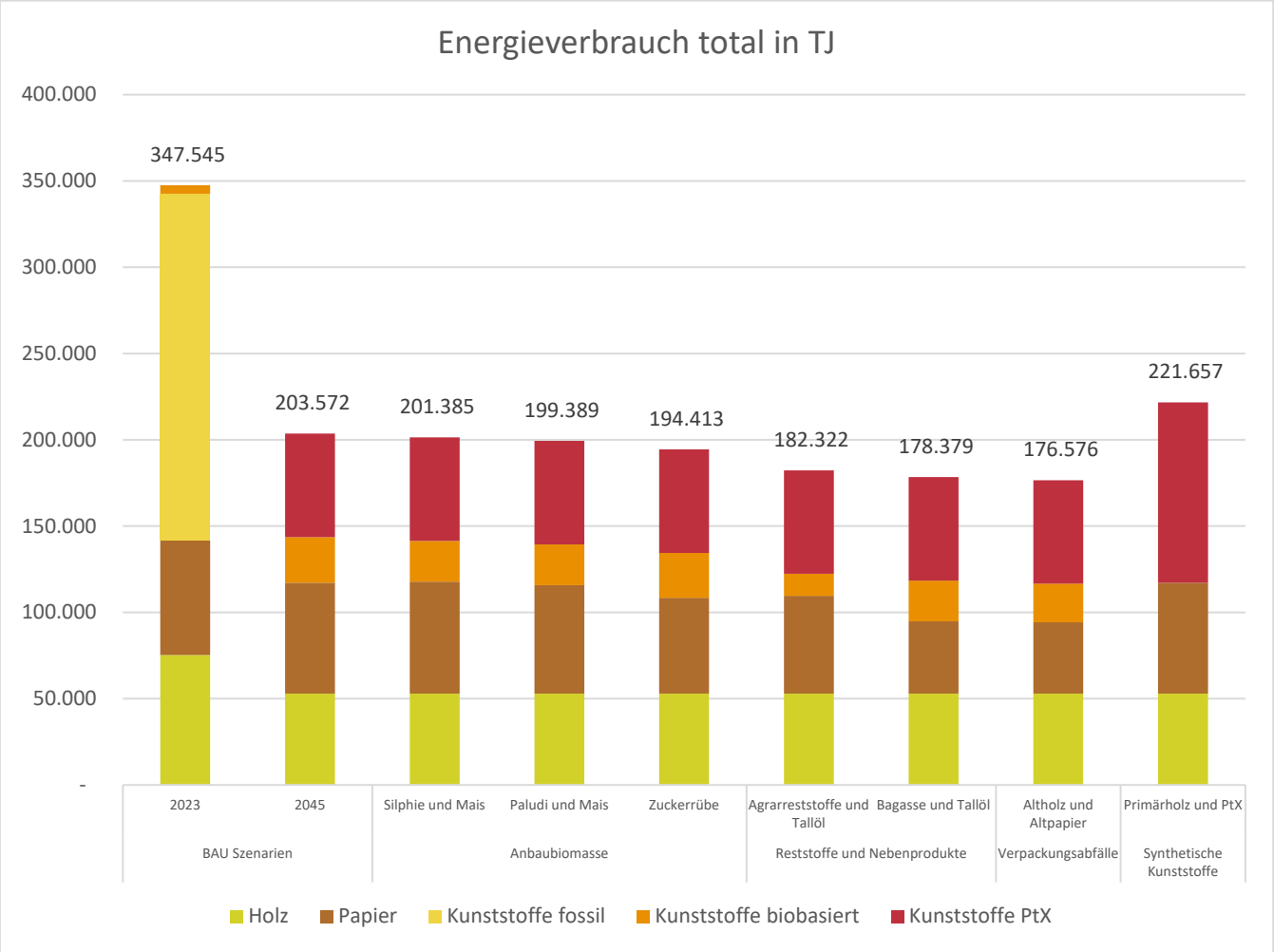


Die Ergebnisse der Bewertung der Optimierungsszenarien für den Parameter Fläche zeigen:

[6] Keine Beiträge bedeutet, dass keine Lasten bilanziert wurden (bspw. keine Beiträge zum Parameter Fläche für Papierverpackungen aus Bagasse oder Altholz, da keine Anbaubiomasse genutzt wird – auch nicht in Anteilen).

- Alle Optimierungspotenziale zeigen insgesamt geringere Beiträge als das BAU-2045-Szenario und sind zudem dazu geeignet, den Gesamtflächenbedarf unter das Niveau von 2023 zu bringen.
- Die größten Einsparungen zeigen die Szenarien aus den Fokusgruppen *Reststoffe und Nebenprodukte* sowie *Anbaubiomasse*.
  - Das Szenario *Papier aus Altholz und biobasierte Kunststoffe aus Altpapier* zeigt die geringsten Beiträge. Ähnlich große Einsparungen erzielt das Szenario *Bagasse und Tallöl*.
  - Die Szenarien der Fokusgruppe *Anbaubiomasse* zeigen insgesamt deutliche Verbesserungen, die jedoch in erster Linie auf die geringeren Beiträge bei den Papierverpackungen zurückzuführen sind. Die Beiträge der biobasierten Kunststoffe liegen hingegen über denjenigen des Sektors Kunststoffe im BAU-2023-Szenario. Dies bedeutet, dass die Nutzung von Biokunststoffen aus Anbaubiomasse im Jahr 2045 mit einem höheren Flächenbedarf verbunden ist als im Jahr 2023.
- Das Szenario *Primärholz und PtX* zeigt nur geringfügige Verbesserungen. Der Flächenimpact der PtX-Kunststoffe ist jedoch besser als bei Anbaubiomasse.

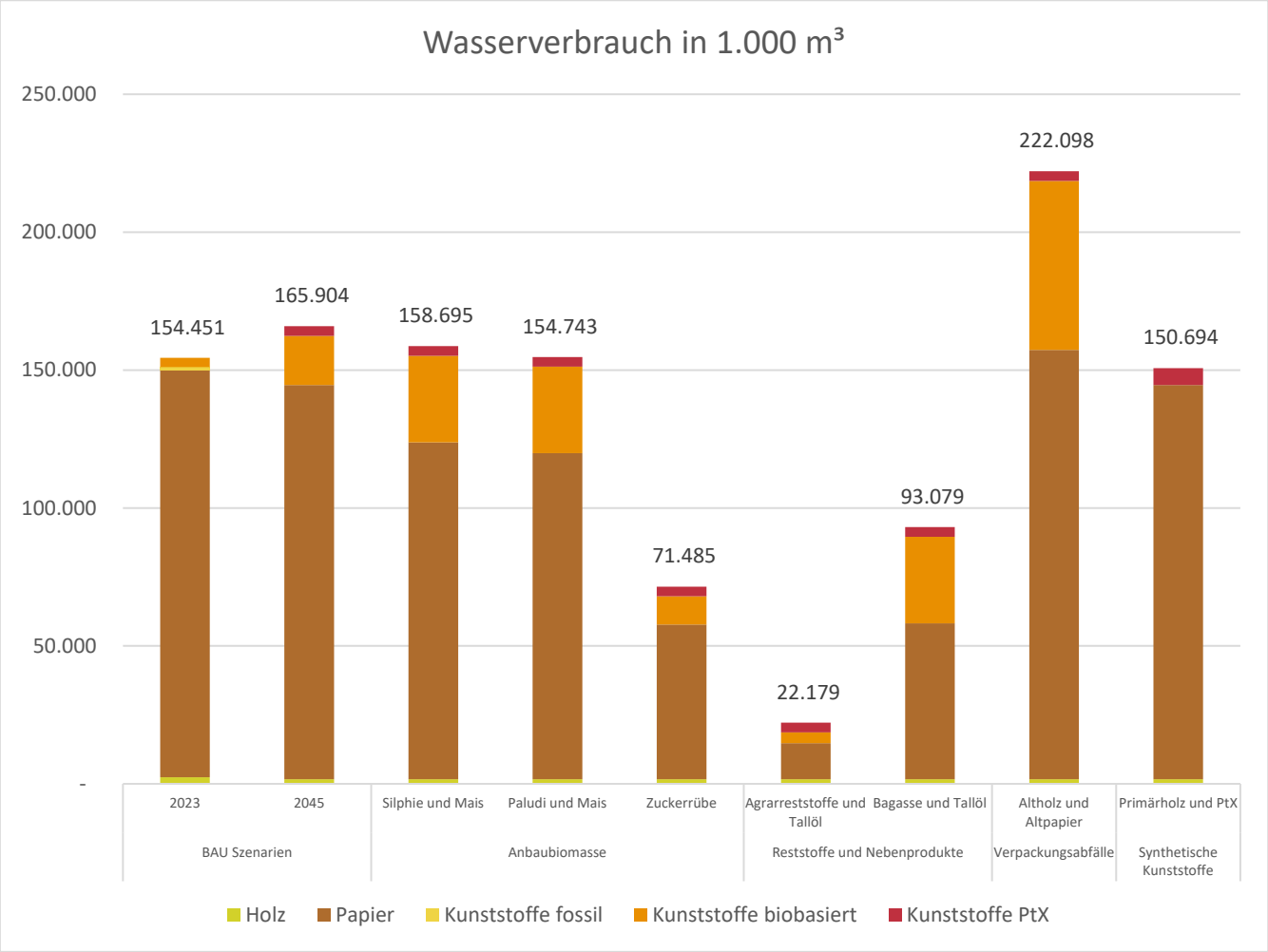
Abbildung 13: Bewertung Optimierungsszenarien für den Parameter Energie



Die Ergebnisse der Bewertung der Optimierungsszenarien für den Parameter Energie zeigen:

- Verglichen mit dem BAU-2045-Szenario zeigen nur die Szenarien der Fokusgruppen *Anbaubiomasse* sowie *Reststoffe und Nebenprodukte* eine nennenswerte Reduktion des Energieverbrauchs, wobei die Einsparungen aus *Anbaubiomasse* lediglich geringfügig sind.
- Das Szenario *Bagasse und Tallöl* weist den geringsten Energieverbrauch auf. Dies ist darauf zurückzuführen, dass biobasierte Kunststoffe aus Tallöl einen geringeren Energiebedarf aufweisen als die energetisch aufwendige Aufbereitung von Altpapier zu biobasierten Kunststoffen.
- PtX-Kunststoffe verursachen hingegen aufgrund ihres sehr hohen Energiebedarfs bei der Herstellung die insgesamt höchsten Beiträge im Vergleich der betrachteten Szenarien für das Jahr 2045.

Abbildung 14: Bewertung Optimierungsszenarien für den Parameter Wasser



Die Ergebnisse der Bewertung der Optimierungsszenarien für den Parameter Wasser zeigen:

- Innerhalb der Fokusgruppe *Anbaubiomasse* weisen die Szenarien mit Silphie und Paludikulturen für die Papierherstellung nur geringe Reduktionspotenziale auf. Der Einsatz von Mais zur Herstellung biobasierter Kunststoffe führt zu einem höheren Wasserverbrauch als im BAU-Szenario mit Zuckerrohr. Die Zuckerrübe als Rohstoff für Verpackungen aus Papier und Kunststoff verursacht im Vergleich zu anderen Anbaubiomassen die geringsten Beiträge zum Wasserverbrauch.

- Die geringsten Wasserbedarfe im gesamten Vergleich zeigen Szenarien mit *Agrarreststoffen* und *Tallöl*. Das Szenario mit *Bagasse* liegt darüber vergleichbar mit dem Szenario *Zuckerrübe*.
- Deutlich höhere Wasserverbräuche zeigen hingegen die Szenarien, in denen *Altholz* und *Altpapier* verwendet werden. Diese übersteigen sogar die Beiträge des BAU-Szenarios, da die Aufbereitung dieser Materialien mit besonders wasserintensiven Prozessen verbunden ist.
- *PtX*-Kunststoffe weisen im Vergleich aller untersuchten Optionen den geringsten Wasserverbrauch auf.

Schlussfolgerungen

Die Ergebnisse zeigen für die gewählten Optimierungsoptionen grundsätzlich ein hohes Potenzial zur Flächeneinsparung im Vergleich zu den BAU-Szenarien im Jahr 2023 und 2045. Allerdings gehen viele der betrachteten Szenarien mit nur geringen Verbesserungen oder sogar Verschlechterungen in den Parametern *Energie* und/oder *Wasser* einher (Vergleich BAU 2045 mit Optimierung 2045). Eine vergleichende Übersicht der Ergebnisse verdeutlicht diese Zielkonflikte (Tabelle 11)[7].

Tabelle 11: Zusammenführende Bewertung zur Identifikation des Optimierungspotenzials bei Verpackungskunststoffen

Fokusgruppe:		Anbaubiomasse			Reststoffe und Nebenprodukte		Verpackungs-abfälle	Synthetische Kunststoffe
Szenario:		2045 Silphie + Mais	2045 Paludi + Mais	2045 Zuckerrübe	2045 Agrarreststoffe + Tallöl	2045 Bagasse + Tallöl	2045 Altholz + Altpapier	2045 Primärholz + PtX
Vergleich zu BAU 2045	Fläche	−36%	−46%	−30%	−53%	−52%	−62%	−25%
	Energie	−1%	−2%	−4%	−10%	−12%	−13%	9%
	Wasser	−4%	−7%	−57%	−87%	−44%	34%	−9%
Vergleich zu BAU 2023	Fläche	−26%	−37%	−18%	−45%	−45%	−56%	−12%
	Energie	−42%	−43%	−44%	−48%	−49%	−49%	−36%
	Wasser	3%	0%	−54%	−86%	−40%	44%	−2%

Die in den Parametern *Energie* und *Wasser* sichtbaren Effekte resultieren überwiegend aus der Nutzung der untersuchten Rohstoffe zur Produktion biobasierter Kunststoffe (Abbildung 12 bis Abbildung 14). Dabei geht, insbesondere bei biobasierten Kunststoffen, eine Reduktion des Flächenbedarfs häufig mit einem Anstieg des Energiebedarfs einher.

Auch wenn nahezu alle analysierten biogenen Rohstoffe im Vergleich zu zuckerrohrbasierten Kunststoffen tendenziell positive Umwelteffekte aufweisen, kann eine großmaßstäbliche Anwendung biobasierter Kunststoffe für Verpackungen nicht empfohlen werden. Grund dafür ist das Wechselspiel zwischen Flächen- und Energiebedarf: Die Reduktion eines Umweltparameters erfolgt in der Regel zulasten eines anderen.

Analyse der Fokusgruppen „Reststoffe und Nebenprodukte“ sowie „Verpackungsabfälle“

Die Analyse der Szenarien der Fokusgruppen *Reststoffe und Nebenprodukte* sowie *Verpackungsabfälle* zeigt, dass beide Gruppen über alle untersuchten Parameter hinweg das größte Optimierungspotenzial aufweisen.

[7] Die Skaleneinteilung folgt der in Tabelle 8 verwendeten Systematik.

Beim Parameter *Wasser* ist zu beachten, dass die Ergebnisse aufgrund der zugrunde liegenden ökobilanziellen Datensätze mit Unsicherheiten behaftet sind. Diese sollten bei der Interpretation berücksichtigt werden. Die teilweise negativ bewerteten Wasserwerte stellen weder ein Ausschlusskriterium für die Fokusgruppe *Verpackungsabfälle* noch eine Abwertung gegenüber der Fokusgruppe *Reststoffe und Nebenprodukte* dar.

Verfügbarkeit biogener Ausgangsstoffe

Unter Berücksichtigung qualitativer Bewertungskriterien zeigt sich, dass Altholz und Altpapier als Reststoffe aus Verpackungsstoffströmen hinsichtlich ihrer Verfügbarkeit besser abschneiden als die Szenarien mit Tallöl. Dies ist kritisch zu betrachten, da Tallöl ausschließlich bei der Primärpapierproduktion aus forstwirtschaftlicher Biomasse anfällt. Die Verfügbarkeit von Tallöl als Rohstoff für Verpackungen und andere Nutzungen ist daher unmittelbar an die Papierproduktion und deren forstwirtschaftliche Rohstoffbasis gekoppelt. Eine fundierte Bewertung der Verfügbarkeit von Tallöl ist daher ohne die Berücksichtigung des Zielkonflikts zwischen den ökologischen Belastungsgrenzen der Wälder und der bereits bestehenden sowie prognostizierten (hohen) Nachfrage nach Holz nicht möglich.

Vergleich von Bagasse und anderen Agrarreststoffen

Ein Vergleich zwischen Bagasse und anderen Agrarreststoffen wie Weizen- oder Maisstroh liefert kein eindeutiges Ergebnis. Es sei jedoch darauf hingewiesen, dass Bagasse als global gehandelter Rohstoff verfügbar ist, während Weizen- und Maisstroh meist regional erzeugt und gehandelt werden. Eine vertiefte Bewertung dieser regionalen Aspekte erfolgt jedoch nicht im Rahmen der vorliegenden Studie.

Funktionale Eigenschaften alternativer biogener Produkte

Abschließend ist hervorzuheben, dass die durchgeführte Potenzialabschätzung keine Aussagen zu den funktionalen Eigenschaften, wie z. B. Langlebigkeit, Bearbeitbarkeit, der aus den analysierten biogenen Ausgangsstoffen hergestellten Produkte ermöglicht. Offen bleibt, inwieweit diese Eigenschaften mit denen konventioneller Papiere oder biobasierter Kunststoffe vergleichbar sind.

Die gewonnenen Erkenntnisse stellen somit nur einen Teilaspekt in der umfassenden Bewertung zukünftiger biogener Potenziale dar.

7 Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Key Facts:

Intensivierung der Reduktion des Verpackungsaufkommens unerlässlich:

- Die prognostizierte Reduktion ist nicht ausreichend, um die Umweltfolgen des zunehmenden Einsatzes biogener Rohstoffe auf dem aktuellen Niveau zu halten.
- Eine stärkere Reduktion durch Verpackungsvermeidung, konsequenten Einsatz funktioneller Mehrweglösungen und noch intensivere Nutzung von Recyclingmaterialien ist zwingend erforderlich.

Keine umweltverträgliche Nutzung von Biomasse für Biokunststoffe in schnelllebigen Verpackungsprodukten:

- Der Ersatz fossiler Kunststoffe durch biobasierte Alternativen führt zu keiner ganzheitlichen Verbesserung der bilanzierten Umweltparameter Fläche und Wasser.
- Biomasse kann effizienter in weniger aufwendig verarbeiteten Materialien wie Papier und Pappe als in Kunststoffen eingesetzt werden.

Priorität für geschlossene Kunststoffkreisläufe und Rezyklateinsatz:

- Es ist entscheidend, den Materialkreislauf im Bereich der Kunststoffverpackungen zu schließen, insbesondere durch den verstärkten Einsatz von Recyclingmaterialien.
- Dies erfordert recyclinggerechtes Verpackungsdesign, bessere Sammlung und Sortierung sowie Investitionen in Recyclingtechnologien.
- Dort, wo Kreislauflösungen nicht möglich sind, können neue Materialien (z. B. über PtX-Technologien) zum Einsatz kommen.

Reduktion des Primärholzeinsatzes für PPK-Verpackungen:

- Um eine Übernutzung der Waldflächen zu verhindern, muss der Einsatz von Primärholz drastisch reduziert werden.
- Altholz bietet hier ein großes Potenzial zur Substitution.
- Auch Silphie-, Paludikulturen und Agrarreststoffe sind vielversprechende, wenn auch nicht singuläre Alternativen.

Das folgende Kapitel fasst die zentralen Ergebnisse der Studie zusammen. Auch das grundlegende Dilemma der gegenwärtigen und zukünftigen Holznutzung wird nochmals prägnant herausgestellt. Aufbauend auf den im Verlauf der Studie entwickelten Bausteinen werden anschließend zentrale Schlussfolgerungen gezogen und daraus konkrete Handlungsempfehlungen abgeleitet.

Im weiteren Verlauf werden die zentralen Schlussfolgerungen systematisch aus den Studienergebnissen herausgearbeitet. Darauf aufbauend erfolgt eine gezielte Beantwortung der zu Beginn der Studie formulierten Forschungsfragen.

7.1 Zusammenfassung der Ergebnisse der Studie

Inhaltliche Kernaussagen der Studie

Im Sinne einer kompakten und pointierten Zusammenfassung werden die zentralen Ergebnisse der Studie in den folgenden Stichpunkten dargestellt. Sie bieten einen konzentrierten Überblick über die wesentlichen Aussagen und Erkenntnisse.

- **Breites Spektrum biogener Rohstoffe identifiziert:** Neben etablierten Rohstoffen wie Holz und Anbaubiomasse zeigen auch Reststoffe, Nebenprodukte und biogene Abfälle relevante Potenziale für biobasierte Verpackungen. Es wurden 13 Rohstoffe ausgewählt und beschrieben (Kapitel 3), die sich hinsichtlich Verfügbarkeit, Nutzungskonkurrenzen, technischer Umsetzbarkeit und ökologischer Bewertung unterscheiden.
- **Rückläufiges Verpackungsaufkommen bei steigendem Anteil biobasierter Materialien:** Die Modellrechnungen prognostizieren einen Rückgang des Gesamtverpackungsverbrauchs um fast 16 % bis zum Jahr 2045 (Kapitel 5.2). Gleichzeitig ist ein signifikanter Anstieg des Anteils biobasierter Verpackungen zu erwarten – insbesondere infolge einer verstärkten Nutzung von Papier/Pappe/Karton (PPK) und biobasierten Kunststoffen (Kapitel 5.5).
- **Rückläufiger Primärmaterialeinsatz durch verstärkten Wertstoffkreislauf:** Mit der prognostizierten Reduktion des Verpackungsaufkommens bis 2045 gehen sowohl die Inputals auch die Outputströme innerhalb des Stoffstroms insgesamt zurück. Da gleichzeitig der Anteil der im Kreislauf geführten Materialien deutlich zunimmt, verringert sich der Bedarf an Primärrohstoffen überproportional zum Rückgang des Verpackungsaufkommens. Trotz dieser Fortschritte bleibt jedoch ein beträchtlicher Reststrom bestehen: Jedoch werden auch im Jahr 2045 noch immer rund 3,8 Mio. Tonnen Verpackungsabfälle einer thermischen Verwertung zugeführt – darunter etwa 1,5 Mio. Tonnen Verpackungspapier und rund 1,1 Mio. Tonnen Altholz aus Verpackungen (Kapitel 5.5).
- **Steigender Flächenbedarf trotz weniger Verpackungsmengen:** Trotz prognostizierter Verringerung der Verpackungsmenge und Primärmaterialinputs vergrößert sich der ökologische Fußabdruck: Der Flächenverbrauch – gemessen über das NFP – nimmt deutlich zu. Ursache hierfür ist die verstärkte Nutzung biogener Rohstoffe, insbesondere im Bereich energieintensiver biobasierter Kunststoffe ab dem Jahr 2030, deren Herstellung und Verarbeitung mit einem hohen Ressourcenaufwand verbunden sind (Kapitel 6.1 und 6.2).
- **Abschwächung positiver Effekte durch den Phase-out fossiler Kunststoffe:** Im Jahr 2023 entfallen 58 % des bilanzierten Energieverbrauchs der betrachteten Verpackungen auf fossilbasierte Kunststoffe. Bis 2045 lässt sich trotz vollständigen Ausstiegs lediglich eine Reduktion des Energieverbrauchs um 41 % erreichen. Ursache hierfür ist der zunehmende Einsatz von biobasierten Kunststoffen und PtX-Kunststoffen, deren Herstellung ebenfalls energieintensiv ist (Kapitel 4.1).
- **Zielkonflikt zwischen Flächenbedarf und Energieverbrauch:** Die Analysen im Rahmen der Studie zeigen einen grundlegenden Zielkonflikt zwischen Flächenbedarf und Energieverbrauch: Maßnahmen zur Reduktion des Flächenverbrauchs – etwa durch die Nutzung von Reststoffbiomasse oder Abfallprodukten – führen in der Regel zu einem höheren Energieaufwand (Kapitel 6.2).

- **Gezielte und effizienter Ressourcennutzung als zentrale Voraussetzung:** Die Ergebnisse verdeutlichen, dass die Nutzung biogener Rohstoffe nicht per se ökologisch vorteilhaft ist. Die Verfügbarkeit vieler Materialien ist begrenzt und Nutzungskonkurrenzen – etwa mit Lebensmitteln oder Ökosystemleistungen – können ökologische Zielkonflikte verstärken. Entscheidend sind daher eine hohe Ressourceneffizienz, eine ausgeprägte Kreislauffähigkeit sowie eine standort- und kontextbezogene Bewertung der Rohstoffe und Einsatzgebiete (Kapitel 4.2).
- **Vermeidung, Mehrweg und Recycling als Schlüsselstrategie:** Das in Kapitel 5.5 entwickelte Stoffstrommodell quantifiziert die Auswirkungen verschiedener Substitutions- und Recyclingpfade und zeigt, dass sowohl Vermeidung und Kreislaufführung auf Produktebene (z. B. durch Mehrweg) als auch auf Materialebene (z. B. durch den Einsatz von Rezyklaten) zentrale Hebel zur Reduktion des Rohstoffbedarfs darstellen und zur Minimierung ökologischer Belastungen führen.

Zum Dilemma der Holznutzung

- **Dilemma der Holznutzung:** Die Substitution fossiler durch nachwachsende Rohstoffe ist aus Sicht der Defossilisierung sinnvoll. Nachwachsende Rohstoffe aus der Forstindustrie zeigen viele Vorteile hinsichtlich ihrer allgemeinen Verfügbarkeit, der Flächeneffizienz und der benötigten Energie, um die Rohstoffe nutzbar zu machen. Jedoch zeigt sich insbesondere beim Thema Holz zunehmend ein Zielkonflikt zwischen der ökologischen Belastungsgrenze der Wälder und der bereits bestehenden und prognostizierten Nachfrage nach Holz – etwa für Verpackungspapiere, als Energieträger und als Grundstoff für die Bau- und Möbelindustrie. **Eine Nutzung von Holz als Ausgangstoff für biobasierte Kunststoffverpackungen wird diesen Zielkonflikt noch verstärken und kann daher auf Basis dieser Studie nicht empfohlen werden**. Angesichts klimabedingter Stressfaktoren wie Trockenheit, Schädlingsbefall und einer steigenden Häufigkeit von Waldbränden geraten insbesondere die Wälder Europas, allen voran die skandinavischen Forstökosysteme, an die Grenzen ihrer Regenerationsfähigkeit. Inzwischen kehren viele Waldgebiete ihre Funktion als CO_2-Senke um und werden zur Quelle klimarelevanter Emissionen. Eine im Rahmen dieser Studie durchgeführte Kurzanalyse der wesentlichen wissenschaftlichen Publikationen zur Bewertung der aktuellen Holznutzung zeigt darüber hinaus, dass insbesondere die intensive industrielle Holznutzung – etwa durch die Papierproduktion – maßgeblich zur Übernutzung beiträgt (Kapitel 4.2). Vor dem Hintergrund multipler Nutzungskonkurrenzen ist eine weitere Ausweitung der Holznutzung aus ökologischer Sicht nicht tragfähig. Daher ist eine grundlegende Neuausrichtung erforderlich: Die Holzentnahme muss künftig strikt an der Belastbarkeit der Wälder ausgerichtet werden. Eine signifikante Reduktion der Nutzung in naher Zukunft erscheint nicht nur sinnvoll, sondern unvermeidlich, um die Klimaschutzfunktion der Wälder langfristig zu erhalten.

7.2 Ableitung von Schlussfolgerungen aus den Ergebnissen der Studie

In diesem Kapitel werden die wesentlichen Schlussfolgerungen zusammengefasst, die sich aus den Untersuchungsergebnissen ableiten lassen. Sie sollen als Grundlage für eine evidenzbasierte Beantwortung der Forschungsfragen dienen.

Reduktion des Verpackungsaufkommens als wichtigste ökologische Stellschraube

- **Reduktion des Verpackungsaufkommens als Schlüsselfaktor**: Es ist von entscheidender Bedeutung, die Anstrengungen zur **Reduktion des Verpackungsaufkommens** weiter zu intensivieren. Zwar zeigt die Prognose zum künftigen Verpackungsverbrauch eine deutliche Verringerung auf, doch wird diese nicht ausreichen, um die Umweltfolgen des prognostizierten Zugriffs auf biogene Rohstoffe auf dem aktuellen Niveau zu halten. Das BAU-

Szenario zeigt, dass die **verstärkte Nutzung biogener Rohstoffe – insbesondere zur Herstellung biobasierter Kunststoffe – zu steigenden Umweltbelastungen** in Bezug auf Flächen- und Wasserverbrauch führt. Die positiven Effekte auf den Energieverbrauch (KEA_{Gesamt}), die sich aus dem Phase-out der fossilbasierten Kunststoffe ergeben, werden durch den energieintensiven Einsatz biobasierter Kunststoffe weitgehend abgeschwächt. Um die ökologischen Zielsetzungen zu erreichen, ist daher eine deutlich stärkere Reduktion des Verpackungsverbrauchs erforderlich als prognostiziert. Dies setzt voraus, dass **Ressourcenflüsse insgesamt reduziert und verlangsamt sowie Materialkreisläufe konsequent geschlossen werden**. Die weitreichende Vermeidung von Verpackungen als oberste Priorität sowie der Auf- und Ausbau standardisierter und optimierter Mehrweglösungen sind in diesem Zusammenhang essenziell.

Vorrang für geschlossene Materialkreisläufe

- **Priorisierung der werkstofflichen Verwertung von Kunststoffen:** Die Ergebnisse der Verpackungsstoffströme weisen auch für das Jahr 2045 676 kt Kunststoffe aus Verpackungen in Deutschland auf, die weiterhin der thermischen Verwertung zugeführt werden.[8] Dieses vorhandene Potenzial ist kurz- bis mittelfristig zu heben, anstatt biobasierte Rohstoffquellen zu erschließen und energieaufwendig zu Primärmaterial aufzubereiten.
  Gleichzeitig ist klar: Auch ein weitgehend geschlossener Kunststoffkreislauf im Verpackungssektor kann den Bedarf an Primärkunststoffen nicht vollständig ersetzen. Systembedingte Verluste sowie nicht eindämmbare Materialabflüsse in andere Nutzungsbereiche erfordern einen gewissen Nachspeisebedarf an Primärmaterialien. Die Herstellung neuer Materialien – etwa über PtX-Technologien – bleibt daher erforderlich. Obwohl diese Verfahren mit einem deutlich höheren Energieeinsatz verbunden sind, können sie den Druck aus der Flächendiskussion und der Biodiversitätsdebatte verringern. Wesentlich für die Erreichung nationaler und internationaler Umweltziele ist jedoch die Nutzung erneuerbarer Energieträger für die PtX-Produktion.

Keine umweltverträgliche Nutzung von Biomasse für Biokunststoffe als Verpackungsmaterial

- **Keine Nutzung von Biomasse für Biokunststoffe als Verpackungsmaterial:** Die Analyse zeigt eindeutig, dass es **keine vollständig umweltverträgliche Nutzung der in dieser Studie untersuchten Biomasse für Biokunststoffe** als Material für die Produktion von Kunststoffverpackungen als schnelldrehende Produkte gibt. Die im Rahmen der Studie durchgeführten Analysen zeigen einen grundlegenden Zielkonflikt: **Eine Reduktion des Flächenverbrauchs geht in der Regel mit einem erhöhten Energiebedarf einher – und umgekehrt.** Im Vergleich hierzu erweist sich der Einsatz in papier- und kartonbasierten Verpackungsmaterialien als deutlich effizienter, da deren Verarbeitung mit einem vergleichsweise geringeren Energieaufwand verbunden ist (Kapitel 4.1).

Primärholzeinsatz reduzieren

- Auch der **Einsatz von Primärholz für PPK-Verpackungen muss deutlich reduziert werden**, um eine Übernutzung der Waldflächen und entsprechende ökologische Folgewirkungen zu verhindern. Die Analyse zeigt, dass verschiedene Alternativen zur Biomasse aus dem Forst vorhanden sind, die eine bessere Flächen- und Energiebilanz (sowie Wasserbilanz) aufweisen.

Stattdessen: Altholz, Silphie und Paludi nutzen

- Besonders hervorzuheben ist das erhebliche **Potenzial von Altholz**, das bereits heute als Substitut für Primärholz im Verpackungsbereich zur Verfügung steht. Auch **Silphie-** und **Paludikulturen sind vielversprechende Alternativen** für eine nachhaltigere Rohstoffbasis. Hinsichtlich der Nutzung von **Laub und Agrarreststoffen** ist jedoch festzustellen, dass diese Rohstoffe keine vollständige Substitution der Biomasse aus dem Forst ermöglichen und daher keine singuläre Lösung darstellen.

[8] Bei gleichzeitigem Bedarf an Neukunststoffen in Höhe von 852 kt im Jahr 2045.

7.3 Beantwortung der Forschungsfragen

Im Folgenden sollen die in Kapitel 1 formulierten Forschungsfragen auf Grundlage der im Studientext abgeleiteten sowie in den Schlussfolgerungen zusammengefassten Inhalte möglichst konkret und zielgerichtet beantwortet werden.

Biobasierte Rohstoffe idealerweise in PPK-Verpackungen

- **Welche Rolle können biobasierte Rohstoffe im Bereich Verpackungen zukünftig ökologisch sinnvoll einnehmen?**
  Im Sektor Verpackungen ist eine ökologisch sinnvolle Nutzung der untersuchten biobasierten Rohstoffe in erster Linie im Bereich papierbasierter Verpackungen (PPK) möglich. In anderen Verpackungsbereichen ist der Einsatz biobasierter Materialien meist mit erheblichen ökologischen Nachteilen verbunden und daher kritisch zu bewerten.

Gesamtbedarf ist nicht nachhaltig abdeckbar …

… daher die Optionen Vermeidung, Wiedernutzung und Kreislaufführung priorisieren!

- **Inwieweit stehen ausreichend (nachhaltige) biobasierte Rohstoffe zur Verfügung, um den prognostizierten Bedarf biobasierter Verpackungen in Deutschland zu decken?**
  Der derzeit prognostizierte Bedarf an biobasierten Kunststoffen für Verpackungen und PPK-Verpackungen kann mit nachhaltig verfügbaren biobasierten Rohstoffen **nicht** gedeckt werden. Eine weitergehende Reduktion des Verpackungsaufkommens ist deshalb zwingend erforderlich. Ein zusätzlicher „Shift“ weg von Kunststoff- hin zu papierbasierten Verpackungen ist **kontraproduktiv**, da dies das Ziel der Aufkommensreduktion konterkariert. Altholz stellt eine vielversprechende Quelle für die Produktion von PPK-Verpackungen dar und bietet großes Potenzial zur Substitution von Primärholz. Darüber hinaus können alternative Rohstoffe wie Silphie, Paludikulturen und Agrarreststoffe als Ersatz für forstbasierte PPK-Rohstoffe genutzt werden. Nach derzeitigem Kenntnisstand können diese biobasierten Rohstoffe jedoch Primärholz aus technischen Gründen nicht in allen Anwendungen Primärholz ersetzen, sondern lediglich in Teilen substituieren. Ziel muss es daher sein, den Anteil an Fasern aus Primärholz so weit wie möglich zu reduzieren und alternative, umweltverträglichere Quellen zu erschließen.

Energieaufwand für die Umwandlung der Rohstoffe in Verpackungsmaterialien als größte Herausforderung – gerade bei Kunststoffen

- **Wie sind die ökologischen Herausforderungen der unterschiedlichen biobasierten Rohstoffe zu bewerten?**
  Die durchgeführten Analysen für das Jahr 2045 zeigen, dass eine Optimierung im Hinblick auf den Parameter *Fläche* in vielen Fällen mit einem erhöhten Energiebedarf einhergeht. Ein zentraler Aspekt der Bewertung ist der Energieaufwand, der für die Umwandlung der Rohstoffe in Verpackungsmaterialien erforderlich ist. Besonders deutlich wird dies bei der Betrachtung biobasierter Kunststoffe. Vereinfacht lässt sich sagen: Je weiter die eingesetzte Biomasse in der Wertschöpfungskette in Richtung Rest- oder Abfallstoff verschoben ist, desto geringer fallen die zugeordneten Flächenwirkungen aus – jedoch steigt zugleich der notwendige Energieaufwand für deren Aufschluss erheblich. Es gilt daher, bei der Nutzung der biobasierten Rohstoffe stets das Zusammenspiel aus Flächenbedarf und Energiebedarf im Blick zu behalten. Eine einseitige Optimierung hin zu einem Parameter kann unter Umständen zu negativen Auswirkungen auf den anderen Parameter führen.

PtX und Tallöl als Ultima Ratio…

- **Welche alternativen Kohlenstoffquellen stehen heute und in Zukunft zur Verfügung und wie sind diese im Vergleich zu biobasierten Rohstoffen zu bewerten?**
  Kunststoffe auf Basis von Power-to-X (PtX) stellen aus gesamtökologischer Sicht eine vorteilhaftere Alternative zu biobasierten Kunststoffen für Verpackungen dar, sind jedoch mit einem hohen Energiebedarf verbunden und daher nicht uneingeschränkt zu empfehlen. Vorrangig sollten Maßnahmen zur Einsparung von Verpackungen sowie zur Schließung von Materialkreisläufen verfolgt werden. Der Einsatz von PtX-Materialien sollte – wie bei Tallöl-basierten Kunststoffen auch – nur dort erfolgen, wo Kreislauflösungen nicht möglich sind.

7.4 Ableitung von Empfehlungen an die Politik

Auf Grundlage der in der Studie gezogenen Schlussfolgerungen lassen sich Empfehlungen ableiten, die dazu dienen die Ergebnisse der Studie **aktiv** in den **politischen Diskurs** einzubringen. Denn insbesondere die folgenden Handlungsfelder bedürfen ambitionierter politischer Impulse, um den umweltverträglichen Umbau der Verpackungswirtschaft rechts- und planungssicher zu forcieren:

- Biogene Rohstoffe sollen nicht als vorrangige Lösungsstrategie zur Defossilisierung im Kontext der Verpackungsdebatte propagiert werden. **Überlegungen einzelner Akteur:innen, Anteile biogener Rohstoffe in Kunststoffverpackungen auf geltende Mindestrezyklatquoten anzurechnen, sind aus ökologischer Perspektive nicht zu empfehlen.**

Fokus Vermeidung, Mehrweg und Kreislaufwirtschaft nicht aus den Augen verlieren

- Die bisherigen Anstrengungen zum Aufbau und zur Weiterentwicklung einer funktionierenden Kreislaufwirtschaft für (Kunststoff-)Verpackungen sind konsequent fortzusetzen. Vorrang sollte dabei entsprechend der Abfallhierarchie der **Vermeidung** von Verpackungen als oberste Priorität eingeräumt werden. **Unvermeidbare Verpackungen sind ressourcenschonend zu gestalten und auf das für den Produktschutz erforderliche Minimum zu reduzieren.** Zur effektiven Abfallvermeidung sollten **standardisierte Mehrwegverpackungen, -komponenten und -systeme etabliert, flächendeckend implementiert und gezielt gefördert werden – wo sinnvoll auch über die Vorgaben der EU-Verpackungsverordnung hinaus.** Eine konsistente politische Rahmensetzung kann dabei helfen, bestehende Hemmnisse abzubauen und die Marktakzeptanz von Mehrweglösungen zu erhöhen.

Ökologische Ausgestaltung der Beteiligungsentgelte gemäß § 21 VerpackG notwendig

- Im Jahr 2023 wurden 5,9 Mio. Tonnen Verpackungen thermisch verwertet. Die Prognose zeigt, dass auch 2045 noch immer rund 3,8 Mio. Tonnen Verpackungen der thermischen Verwertung zugeführt werden. Um diesen Anteil deutlich zu verringern, müssen Hersteller und Inverkehrbringer bereits heute motiviert werden, ressourcenschonende Lösungen entlang der gesamten Wertschöpfungskette zu entwickeln. **Eine zügige Umsetzung des § 21 VerpackG ist daher entscheidend**, um wirksame finanzielle Anreize für recyclinggerechtes Verpackungsdesign und den verstärkten Einsatz von Rezyklaten zu schaffen. Zudem müssen die rechtlichen Rahmenbedingungen verbessert, ergänzt und vor allen Dingen vollzogen werden, damit die Stoffströme aus Handel und Gewerbe sowie Haushaltsrestmüll als neue Quellen für hochwertige Rezyklate erschlossen werden können.

Forschungsbedarf benennen und umsetzen

- Es wird empfohlen, den Forschungsbedarf hinsichtlich des **Einsatzes von Recyclingfasern in PPK-Verpackungen mit Lebensmittelkontakt** – etwa im Bereich von Pizzakartons – gezielt weiterzuverfolgen. Parallel dazu sollten die **regulatorischen Rahmenbedingungen** überprüft und, sofern erforderlich, angepasst werden, um den Einsatz entsprechender Materialien rechtssicher zu ermöglichen.

7.5 Ableitung von Empfehlungen für Unternehmen

Die Schlussfolgerungen dieser Studie bieten zugleich praxisorientierte Orientierungspunkte für unternehmensstrategische Entscheidungsprozesse im Kontext einer nachhaltigen Verpackungswirtschaft. Vor diesem Hintergrund richten sich die folgenden Empfehlungen explizit an Unternehmen.

Kunststoffverpackungen nicht kategorisch ablehnen, sondern optimieren:
… durch Abmagerung,
… durch Mehrweg,
… durch geschlossene Kreisläufe

- Unternehmen, die ihre **Kunststoffverpackungen** im Sinn einer geringeren Umweltbelastung verbessern möchten, wird empfohlen, auf eine pauschale Substitution leichtgewichtiger Kunststoffverpackungen durch schwerere Papier- oder Papierverbundlösungen zu verzichten. Solche Ansätze führen häufig zu einer Verschiebung der Umweltwirkungen, ohne die ökologische Gesamtbelastung tatsächlich zu verringern. Stattdessen sollten folgende Strategien verfolgt werden:
  - **Kurzfristig:** Potenziale zur **Verpackungsvermeidung** sowie zur Einführung von **Mehrweglösungen** sind Priorität und systematisch zu prüfen und zu fördern. Parallel sollte die Weiterentwicklung bestehender Kunststoffverpackungen im Fokus stehen – insbesondere durch **Materialeinsparung** („Abmagerung"), den verstärkten **Einsatz von Rezyklaten** sowie die Optimierung der **Recyclingfähigkeit**.
  - **Mittel- und langfristig:** Eine **strategische, gesamtunternehmerische Ausrichtung** ist notwendig, die auf die **Reduktion** und Verlangsamung der **Ressourcenströme** sowie die **Schließung von Stoffkreisläufen** abzielt. Dies beinhaltet insbesondere die konsequente Umsetzung von **Design for Circularity** über alle Verpackungsarten hinweg sowie eine enge Abstimmung und Zusammenarbeit entlang der gesamten Verpackungswertschöpfungskette, um Materialkreisläufe effizient und nachhaltig zu schließen.

Insbesondere tallölbasierte Kunststoffe ganzheitlich betrachten

- Tallöl wurde im Rahmen der vorliegenden Analyse als vergleichsweise positiv zu bewertender Rohstoff für biobasierte Kunststoffverpackungen eingestuft. Für die Hersteller von Verpackungen ist aber **zu beachten, dass seine Nutzung unweigerlich mit dem Einsatz forstbasierter Biomasse verbunden ist.** Die **Verwendung von Tallöl sollte aus ökologischen Gründen streng begrenzt werden**, da der Einsatz von Forstbiomasse bereits heute ein ökologisch kritisches Maß erreicht hat. Ob Tallöl daher für kurzlebige Produkte wie Kunststoffverpackungen aus Nachhaltigkeitssicht sinnvoll ist, erscheint fraglich. Die Studie zeigt, dass es gleichwertige Alternativen, wie Kunststoffe aus Verpackungsabfällen oder auch synthetische Kunststoffe, gibt, deren Auswirkungen auf die Parameter *Fläche* und *Energie* mit geringeren ökologischen Auswirkungen verbunden sind. Solche Alternativen, insbesondere im Kontext geschlossener Wertschöpfungsketten, sind vorrangig zu berücksichtigen.

Gezielte Investitionen in die Erschließung neuer Inputströme

- Unternehmen der **Wertschöpfungskette Verpackung** (Rohstofflieferanten, Packmittelproduzenten und -anwender, Handel sowie Verwertungspartner) sollten gemeinsam darauf hinarbeiten, die Verfügbarkeit von Recyclingmaterialien zu erhöhen, bestehende Quellen effizienter zu nutzen und neue Quellen zu erschließen. Entscheidend ist dabei, den Materialkreislauf – insbesondere im Bereich der Kunststoffverpackungen – konsequent zu schließen. Ein recyclinggerechtes Verpackungsdesign bildet dafür die zentrale Voraussetzung, ebenso wie der verstärkte Einsatz von Rezyklaten in der Produktion. Neben der optimierten Nutzung vorhandener Rezyklatquellen gilt es, **zusätzliche Inputströme** zu erschließen, etwa aus Gewerbe- und Haushaltsrestmüll. Dies erfordert innovative Unternehmen, die **gezielte Investitionen in Design, Sammel- und Sortierinfrastrukturen** sowie vorrangig in mechanische Recyclingtechnologien tätigen. Um größere Mengen und höhere Qualitäten von Rezyklaten – auch für kontaktsensible Anwendungen – bereitzustellen, müssen sortenreine Wertstoffströme ausgebaut werden. Voraussetzung dafür sind ein konsequent recyclingorientiertes Verpackungsdesign und besser koordinierte Systeme entlang der gesamten Wertschöpfungskette – von der Materialentwicklung bis zur Wiederverwertung.

PPK-Verpackungen weitestgehend auf alternative Rohstoffe wie Altholz, Reststoffe, Silphie oder Paludi umstellen

- Unternehmen, die ihre **PPK-Verpackungen** im Sinn einer geringeren Umweltbelastung weiterentwickeln möchten, sollten den Markt **für alternative Zellstoffquellen** aktiv beobachten und **geeignete Holzsubstitute entsprechend ihren produktspezifischen Anforderungen** identifizieren und in der Verpackungsentwicklung berücksichtigen. Der vorliegende Bericht hebt insbesondere **chemisch unbehandelte Agrarreststoffe**, **Silphie** sowie

Paludikulturen als vielversprechende Alternativen mit vergleichsweise geringer Umweltbelastung hervor. Auch die **Zellstoffgewinnung aus Altholz** sollte verstärkt in den Forschungsfokus rücken, da sie das Potenzial bietet, a) die Recyclingquote von Holzverpackungen zu erhöhen und b) den Stoffkreislauf innerhalb der Verpackungswirtschaft zu stärken.

Die konsequente Umsetzung dieser Empfehlungen kann einen wesentlichen Beitrag dazu leisten, die Umweltwirkungen von Verpackungen wirksam zu reduzieren, die Ressourceneffizienz entlang der Wertschöpfungsketten zu steigern und tragfähige Strategien für eine zukunftsfähige und kreislauforientierte Verpackungswirtschaft zu etablieren.

Literaturverzeichnis

ACE; ifeu (2020): *LCI dataset for Liquid Packaging Board (LPB) production – Reference year 2018*. Erstellt von ifeu (Institute for Energy and Environmental Research).

Albrich, K.; Seidl, R.; Rammer, W.; Thom, D. (2023): From sink to source: changing climate and disturbance regimes could tip the 21st century carbon balance of an unmanaged mountain forest landscape. *Forestry: An International Journal of Forest Research*, Jg. 96, Nr. 3, S. 399–409. https://doi.org/10.1093/forestry/cpac022.

BLE (2024): *Entwaldungsfreie Produkte – 4. FAQ zu Definitionen*. https://www.ble.de/DE/Themen/Wald-Holz/Entwaldungsfreie-Produkte/FAQs/4-FAQs-Definitionen/FAQs-Definitionen.html?nn=621366#doc646736bodyText5.

BMEL (Hrsg.) (2024): *Der Wald in Deutschland. Ausgewählte Ergebnisse der vierten Bundeswaldinventur*. https://www.bmleh.de/SharedDocs/Downloads/DE/Broschueren/vierte-bundeswaldinventur.pdf?__blob=publicationFile&v=17.

Braskem (2018): *LCA datasets for bio-based HDPE and LDPE* (economical allocation).

Churchill, J. G. B.; Borugadda, V. B.; Dalai, A. K. (2024): A review on the production and application of tall oil with a focus on sustainable fuels. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Nr. 191, Artikel 114098.

CONVERSIO (2024, November): *Stoffstrombild Kunststoffe in Deutschland 2023 – Zahlen und Fakten zum Lebensweg von Kunststoffen*.

Culbertson, C.; Treasure, T.; Venditti, R.; Gonzalez, R. (2016): Life Cycle Assessment of lignin extraction in a softwood kraft pulp mill. *Nordic Pulp & Paper Research Journal*, Jg. 31, Nr. 1, S. 30–U247. https://doi.org/10.3183/NPPRJ-2016-31-01-p030-040.

Daniel, P.; Rompf, R. (1994): Possibilities and limits in the utilization of Silphium perfoliatum as a fodder plant, renewable raw material and a landscape conservation-plant. *Agribiological research – Zeitschrift für Agrarbiologie Agrikulturchemie Ökologie*, Jg. 47, Nr. 3/4, S. 345–353.

Detzel, A.; Kauertz, B.; Grahl, D. B.; Heinisch, J. (2016): *Prüfung und Aktualisierung der Ökobilanzen für Getränkeverpackungen*. Umweltbundesamt. https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/pruefung-aktualisierung-der-oekobilanzen-fuer.

Deutsches Maiskomitee e. V. (DMK) (o. D.): *Welt – Erntemengen in Körnermais in Mio. t*. https://www.maiskomitee.de/Fakten/Statistik/Welt.

Die Papierindustrie (2020, 17. September): *Weltweiter Verbrauch* von Papier, Karton und Pappe in den Jahren 2008 bis 2018* (in Millionen Tonnen). https://de.statista.

com/statistik/daten/studie/167110/umfrage/verbrauch-von-papier-karton-und-pappe-seit-2006/.

Dittrich, M.; Dünnebeil, F.; Köppen, S.; Oehsen, A. von; Vogt, R.; Biemann, K. et al. (2020): *Transformationsprozess zum treibhausgasneutralen und ressourcenschonenden Deutschland – GreenSupreme*. Umweltbundesamt (Climate Change, 05/2020). https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/transformationsprozess-treibhausgasneutrales-ressourcenschonendes-deutschland-greensupreme.

DVI (2023): Aktuelles zu Verpackung und Nachhaltigkeit. AVU Verpackungsmonitor 2025. https://www.avu-online.de/avu-verpackungsmonitor-2024/.

EcoInvent (2023): *EcoInvent Life Cycle Inventory (LCI) database – Version 3.10*. https://ecoquery.ecoinvent.org/3.10/cutoff/search.

European Paper Recycling Council (2023, 2. August): *Monitoring Report 2022*. https://www.cepi.org/wp-content/uploads/2023/09/EPRC-Monitoring-Report-2022_Final.pdf.

EUWID Verpackung (2024, 20. Dezember): European Bioplastics: Verpackungsbereich 2024 weiterhin der größte Abnehmer für Biokunststoffe. *EUWID – Europäischer Wirtschaftsdienst Verpackung*, Nr. 98, S. 3.

FAO (2012): *FRA (Forest Resources Assessment Programm) 2015 Terms and Definitions.* Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rom. http://www.fao.org/3/a-ap862e.pdf.

FAO (2020a). *Global Forest Resources Assessment 2020 – Key findings*. Rom. https://doi.org/10.4060/ca8753en.

FAO (2020b): *Global Forest Resources Assessments 2020| Report| Latvia*.

FAO (2020c): *Global Forest Resources Assessments 2020| Report| USA*.

FAO (2020d): *Global Forest Resources Assessments 2020| Report| Canada*.

FAO (2020e): *Global Forest Resources Assessments 2020| Report| Russia*.

FAO (2024): *The State of the World's Forests 2024*. FAO

FAO (2025): *FAOSTAT: Forestry production and trade*. https://www.fao.org/faostat/en/#data/FO.

FAO (2023a, 27. Dezember): *Erntemenge von Zuckerrohr weltweit in den Jahren 1961 bis 2022* (in Millionen Tonnen). https://de.statista.com/statistik/daten/studie/454405/umfrage/erntemenge-von-zuckerrohr-weltweit/.

FAO (2023b, 27. Dezember): *Erntemenge von Zuckerrüben weltweit in den Jahren 1961 bis 2022* (in 1.000 Tonnen). https://de.statista.com/statistik/daten/studie/454445/umfrage/erntemenge-von-zuckerrueben-weltweit/.

FAO; UNEP (2020): *The State of the World's Forests 2020: Forests, Biodiversity and People*. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), United Nations En-

vironment Programme (UNEP), Rom. http://www.fao.org/3/ca8642en/CA8642EN.pdf.

FEFCO; Cepi Container Board (2022): *European Database for Corrugated Board Life Cycle Studies 2021*. Fédération Européenne des Fabricantes de Papiers pour Ondulé (FEFCO) and Cepi Container Board.

Fehrenbach, H.; Busch, M.; Bürck, S.; Bischoff, M.; Theis, S.; Reinhardt, J.; Blömer, J.; Grahl, B. (2021a): *Flächenrucksäcke von Gütern und Dienstleistungen. Ermittlung und Verifizierung von Datenquellen und Datengrundlagen für die Berechnung der Flächenrucksäcke von Gütern und Dienstleistungen für Ökobilanzen – Teilbericht II: Fallbeispiele*. Umweltbundesamt. https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/flaechenrucksaecke-von-guetern-dienstleistungen-0.

Fehrenbach, H.; Busch, M.; Bürck, S.; Bischoff, M.; Theis, S.; Reinhardt, J.; Blömer, J.; Grahl, B. (2021b): *Flächenrucksäcke von Gütern und Dienstleistungen. Ermittlung und Verifizierung von Datenquellen und Datengrundlagen für die Berechnung der Flächenrucksäcke von Gütern und Dienstleistungen für Ökobilanzen – Teilbericht III: Daten*. Umweltbundesamt.

Fehrenbach, H.; Busch, M.; Bürck, S.; Bischoff, M.; Theis, S.; Reinhardt, J.; Blömer, J.; Grahl, B. (2021c): *Flächenrucksäcke von Gütern und Dienstleistungen. Ermittlung und Verifizierung von Datenquellen und Datengrundlagen für die Berechnung der Flächenrucksäcke von Gütern und Dienstleistungen für Ökobilanzen – Teilbericht I: Methoden*. Umweltbundesamt.

Fehrenbach, H.; Grahl, B.; Giegrich, J.; Busch, M. (2015): Hemeroby as an impact category indicator for the integration of land use into life cycle (impact) assessment. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, Jg. 20, Nr. 11, S. 1511–1527. https://doi.org/10.1007/s11367-015-0955-y.

Fernholz, K.; Frank, M.; Howe, D. J.; Bratkovich, D. S. (2014): *Bamboo Products and their Environmental Impacts: Revisited*.

Fiedler, M.; Tech, S.; Lindner, M. (2023): *Schaffung von Wertschöpfungsketten für den Einsatz von Miscanthusfasern aus nachhaltig bewirtschafteten Grenzflächen und Bergbaufolgeflächen (MiscanValue)*.

Forest Europe (2020): *State of Europe's Forests 2020. Ministerial Conference on the Protection of Forests in Europe*. Liaison Unit Bratislava. https://foresteurope.org/state-europes-forests-2020/.

FSC Connect (o. D.) *Facts & Figures*. https://connect.fsc.org/impact/facts-figures.

GFW (2023): *Monitoring Forest Degradation for the EUDR | GFW Blog*. Global Forest Watch Content. https://www.globalforestwatch.org/blog/data-and-tools/monitoring-forest-degradation-eudr.

GVM (2024): Blickpunkt. Recycling-Bilanz für Verpackungen Dezember 2024. https://gvmonline.de/wordpress/wp-content/uploads/2025/03/2025-03-rb32_de-1.pdf.

Greifswald Moor Centrum (2016): *Schilf (Phragmites australis). Landwirtschaft auf nassen Mooren*. https://www.moorwissen.de/files/doc/paludikultur/imdetail/steckbriefe_pflanzenarten/Flyer%20Schilf.pdf.

Hermansson, F.; Janssen, M.; Svanström, M. (2020): *Life cycle assessment of lignin-based carbon fibres – Future environmental opportunities*. Studie durchgeführt im Projekt LIBRE (Lignin Based Carbon Fibres for Composites). H2020 – Grant Agreement No 720707.

Hermansson, F.; Janssen, M.; Svanström, M. (2019): Prospective study of lignin-based and recycled carbon fibers in composites through meta-analysis of life cycle assessments. *Journal of Cleaner Production*, Nr. 223, S. 946–956. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.022.

Hochschule für Nachhaltige Entwicklung Eberswalde; Peatland Science Center; Greifswald Moor Centrum (Hrsg.) (2024): Informationspapier zu Paludikultur und Biodiversität. *Naturschutz und Landschaftsplanung*.

Hyyrynen, M.; Ollikainen, M.; Seppälä, J. (2023): European forest sinks and climate targets: past trends, main drivers, and future forecasts. *European Journal of Forest Research*, Jg. 142, Nr. 5, S. 1207–1224. https://doi.org/10.1007/s10342-023-01587-4.

Korosuo, A.; Pilli, R.; Abad Viñas, R.; Blujdea, V. N. B.; Colditz, R. R.; Fiorese, G.; Rossi, S.; Vizzarri, M.; Grassi, G. (2023): The role of forests in the EU climate policy: are we on the right track? *Carbon Balance and Management*, Jg. 18, Nr. 1, S. 15. https://doi.org/10.1186/s13021-023-00234-0.

LCA Commons (2018): *Kraft lignin extraction; from southern bleached softwood kraft, elemental chlorine free (ECF) bleached process; at mill*. https://www.lcacommons.gov/lca-collaboration/NC_State_Dept_Forest_Biomaterials/Kraft_pulp/dataset/PROCESS/4bedddf6-2341-471d-a972-48f8cb707562.

Lindner, J. P.; Fehrenbach, H.; Winter, L.; Bischoff, M.; Bloemer, J.; Knüpffer, E. (2020): *Biodiversität in Ökobilanzen. Weiterentwicklung und vergleichende Studien*. Bundesamt für Naturschutz, Bonn.

M'hamdi, A. I.; Kandri, N. I.; Zerouale, A.; Blumberga, D.; Gusca, J. (2017): Life cycle assessment of paper production from treated wood. In: Energy Procedia. International Scientific Conference "Environmental and Climate Technologies", CONECT 2017, 10.–12. Mai 2017, Riga. Bd. 128, S. 461–468. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.031.

Maga, D.; Thonemann, N.; Hiebel, M. (2021): *Vergleichende Ökobilanz von Silphiepapier mit konventionellem Zellstoffkarton*. Oberhausen: Fraunhofer Umsicht.

Nachhaltiges Papier aus Herbstlaub (2024): *chemie.de*. https://www.chemie.de/news/1183678/nachhaltiges-papier-aus-herbstlaub.html.

Nova-Institut (2024): *Bio-based Building Blocks and Polymers — Global Capacities, Production and Trends 2022–2027*. https://circularplasticsnl.org/wp-content/uploads/2024/03/24-03-07-Bio-based_Building_Blocks_and_Polymers_Global_Capacities_Production_and_Trends_2023-2028_Short_Version-o3asan-1.pdf.

Obasa, V. D.; Olanrewaju, O. A.; Gbenebor, O. P.; Ochulor, E. F.; Odili, C. C.; Abiodun, Y. O.; Adeosun, S. O. (2022): A Review on Lignin-Based Carbon Fibres for Carbon Footprint Reduction. *Atmosphere. Multidisciplinary Digital Publishing Institute*, Jg. 13, Nr. 10, S. 1605. https://doi.org/10.3390/atmos13101605.

Orbit-Online (o. D.): *Formelsammlung Abfallwirtschaft – Heizwertberechnung*. https://www.orbit-online.net/images/orbit-downloads/3_Formula/3_3_Verbrennung/de/3_3_01-Formel-Heizwert-Brennwert.pdf.

Out-Nature (o.D.): Silphie Fiber. https://out-nature.de/en/silphie-fiber/.

Pan, Y.; Birdsey, R. A.; Phillips, O. L.; Houghton, R. A.; Fang, J.; Kauppi, P. E.; Keith, H.; Kurz, W. A.; Ito, A.; Lewis, S. L.; Nabuurs, G.-J.; Shvidenko, A.; Hashimoto, S.; Lerink, B.; Schepaschenko, D.; Castanho, A.; Murdiyarso, D. (2024): The enduring world forest carbon sink. *Nature*, Jg. 631, Nr. 8021, S. 563–569. https://doi.org/10.1038/s41586-024-07602-x.

PEFC (o. D.). *Alles über das PEFC-Siegel*. https://www.pefc.de/pefc-siegel/.

Plastics Europe (2024) *Plastics – the fast Facts 2024*. https://plasticseurope.org/wp-content/uploads/2024/11/PE_TheFacts_24_digital-1pager.pdf.

Poopak, S.; Roodan, A. (2012): *Environmental Benefit of Using Bagasse in Paper Production – A Case Study of LCA in Iran*. https://doi.org/10.5772/51553.

Potapov, P.; Yaroshenko, A.; Turubanova, S.; Dubinin, M.; Laestadius, L.; Thies, C.; Aksenov, D.; Egorov, A.; Yesipova, Y.; Glushkov, I.; Karpachevskiy, M.; Kostikova, A.; Manisha, A.; Tsybikova, E.; Zhuravleva, I. (2008): Mapping the World's Intact Forest Landscapes by Remote Sensing. *Ecology and Society*, Jg. 13, Nr. 2, S. 51. https://doi.org/10.5751/ES-02670-130251.

Releaf Paper (o. D.): *Releaf Technology*. https://www.releaf-paper.com/releaf-technology/.

Roberntz, P.; Suominen, M. (2025): *Primary and old-growth forests at risk in Finland and Sweden – What will the EUs impact be on protecting them?*

Sabatini, F. M.; Burrascano, S.; Keeton, W. S.; Levers, C.; Lindner, M.; Pötzschner, F.; Verkerk, P. J.; Bauhus, J.; Buchwald, E.; Chaskovsky, O.; Debaive, N.; Horváth, F.; Garbarino, M.; Grigoriadis, N.; Lombardi, F.; Duarte, I. M.; Meyer, P.; Midteng, R.; Mikac, S.; Mikoláš, M.; Motta, R.; Mozgeris, G.; Nunes, L.; Panayotov, M.; Ódor, P.; Ruete, A.; Simovski, B.; Stillhard, J.; Svoboda, M.; Szwagrzyk, J.; Tikkanen, O.-P.; Volosyanchuk, R.; Vrska, T.; Zlatanov, T.; Kuemmerle, T. (2018): Where are Europe's last primary forests? *Diversity and Distributions*, Jg. 24, Nr. 10, S. 1426–1439. https://doi.org/10.1111/ddi.12778.

Schmitz, S.; Paulini, I. (1999): *Bewertung in Ökobilanzen: Methode des Umweltbundesamtes zur Normierung von Wirkungsindikatoren, Ordnung (Rangbildung) von Wirkungskategorien und zur Auswertung nach ISO 14042 und 14043*. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/3619.pdf.

Stockschläder, J.; Quicker, P.; Baumann, W.; Wexler, M.; Stapf, D.; Beckmann, M.; Thiel, C.; Hoppe, H. (2022): Thermal treatment of carbon-fibre-reinforced polymers (Part 2: Energy recovery and feedstock recycling). *Waste Management & Research*, Jg. 40, Nr. 6, S. 685–697. https://doi.org/10.1177/0734242X211038192.

Suhr, F. (2020, 15. September): *In diesen Ländern wächst am meisten Wald. Statista Daily Data*. https://de.statista.com/infografik/22898/anteil-der-globalen-wald-flaeche-nach-laendern/.

Terlau, W.; Fuchshofen, N.; Klement, J. (2017): *Ökologischer Vergleich des Einsatzes von Sulfat-Zellstoff Altpapierstoff grasbasiertem Zellstoff in der deutschen Papierproduktion*. Internationales Zentrum für Nachhaltige Entwicklung (IZNE).

Turubanova, S.; Potapov, P.; Hansen, M. C.; Li, X.; Tyukavina, A.; Pickens, A. H.; Hernandez-Serna, A.; Arranz, A. P.; Guerra-Hernandez, J.; Senf, C.; Häme, T.; Valbuena, R.; Eklundh, L.; Brovkina, O.; Navrátilová, B.; Novotný, J.; Harris, N.; Stolle, F. (2023): Tree canopy extent and height change in Europe, 2001–2021, quantified using Landsat data archive. *Remote Sensing of Environment*, Bd. 298, S. 113797. https://doi.org/10.1016/j.rse.2023.113797.

Umweltbundesamt (2023, 15. August): *Biobasierte und biologisch abbaubare Kunststoffe.* https://www.umweltbundesamt.de/biobasierte-biologisch-abbaubare-kunststoffe#11-was-ist-der-unterschied-zwischen-biobasierten-und-biologisch-abbaubaren-kunststoffen.

Universität Rostock (o. D.). *Forschungsschwerpunkt Biogene Rohstoffe*. http://www.biogene-rohstoffe.de/.

US Department of Agriculture (2024, 10. Mai): *Erntemenge der führenden Anbauländer von Mais weltweit in den Jahren 2018/19 bis 2024/2025* (in Millionen Tonnen). https://de.statista.com/statistik/daten/studie/156066/umfrage/groesste-maisproduzenten-der-welt/.

Vaccari, G.; Nicolucci, C.; Mantovani, G.; Monegato, A. (1995): *EP0644293A1. Process for manufacturing paper from sugar-beet pulp and paper thus obtained*. https://patents.google.com/patent/EP0644293A1/en.

Vink, E. T. H.; Davies, S. (2015): Life Cycle Inventory and Impact Assessment Data for 2014 Ingeo TM Polylactide Production. *Industrial Biotechnology*, Jg. 11, Nr. 3, S. 167–180. https://doi.org/10.1089/ind.2015.0003.

VIP (o. D.): *Ernte von Paludi-Biomasse – Verfahren und Bereitstellungskosten*. VIP (Vorpommern Initiative Paludikultur).

Wellenreuther, F.; Detzel, A.; Krüger, M.; Busch, M. (2022): *Aktualisierte Ökobilanz von Grafik- und Hygienepapier*. UBA TEXTE 123/2022, ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg gGmbH. Im Auftrag des Umweltbundesamtes.

Wirtschaftliche Vereinigung Zucker (2024, 24. April): *Ertrag je Hektar Anbaufläche von Zuckerrüben in Deutschland in den Erntejahren 2009/10 bis 2023/24*. https://de.statista.com/statistik/daten/studie/283526/umfrage/ruebenertrag-je-hektar-anbauflaeche-in-deutschland/.

WWF Deutschland (2022, 7. Juli). *Alles aus Holz? WWF-Studie fordert dringend Umdenken.* https://www.wwf.de/themen-projekte/waelder/verantwortungsvollere-waldnutzung/alles-aus-holz.

Mehr WWF-Wissen
in unserer App.
Jetzt herunterladen!

iOS

Android

Auch zugänglich
über einen Browser

Unterstützen Sie den WWF
IBAN: DE06 5502 0500 0222 2222 22

WWF

Unser Ziel
Wir wollen die weltweite Zerstörung der Natur und Umwelt stoppen und eine Zukunft gestalten, in der Mensch und Natur in Einklang miteinander leben.

WWF Deutschland
Reinhardtstr. 18 | 10117 Berlin
Tel.: +49 30 311777-700
info@wwf.de | wwf.de