

Bewertung von biobasierten und rezyklierten Kunststoffen in Automotive-Leitungssätzen

X. Jiang, R. Dahlmann
N. Langmaack

September 2026

Bewertung von biobasierten und rezyklierten Kunststoffen in Automotive-Leitungssätzen

X. Jiang, R. Dahlmann – Institut für Kunststoffverarbeitung (IKV)
in Industrie und Handwerk an der RWTH Aachen
N. Langmaack – OHLF e.V. & TU Braunschweig

Vorwort

Liebe Leserin, lieber Leser,

die vorliegende Studie wurde im Rahmen des Projektes „Transformations-Hub Leitungssatz“ vom Open Hybrid LabFactory (OHLF) e.V. beauftragt, vom Institut für Kunststoffverarbeitung (IKV) in Industrie und Handwerk an der RWTH Aachen bearbeitet und angefertigt und durch das Expertenteam des Arbeitskreises „Grünes Bordnetz“ einem kritischen Review unterzogen.

Die Ergebnisse der Recherchen und Analysen sollen eine Grundlage für die Bewertung unterschiedlicher nachhaltiger Ersatzmaterialien für Kunststoffe darstellen, die in Automotive-Leitungssätzen und ihren Komponenten Anwendung finden. Während sich eine separate Studie mit wirtschaftlichen Aspekten von Recycling-Kunststoffen beschäftigt, stehen hier grundsätzliche technische Eigenschaften, Einflussfaktoren auf Rezyklierbarkeit und Verarbeitbarkeit sowie bereits konkret verfügbare biobasierte und rezyklierte Materialien im Mittelpunkt der Betrachtungen.

Neben der reinen Verfügbarkeit von Rezyklaten und biobasierten Varianten der wichtigsten Kunststoffe in Leitungssatzkomponenten werden deren relevanteste technische Eigenschaften und Besonderheiten hinsichtlich Herstellung und Verarbeitung analysiert und dargestellt. Weiterhin wird die Wiederverwertbarkeit der unterschiedlichen Materialien und damit ihre grundsätzliche Eignung für geschlossene Stoffkreisläufe untersucht. Über die Einführung und Anwendung von geeigneten Punktesystemen erfolgt eine systematische Bewertung der unterschiedlichen Materialien, die die Auswahl von Vorzugsmaterialien unterstützen soll.

Aufgrund der großen Vielfalt an Materialien und der teilweise sehr spezifischen Anforderungen an konkrete Leitungssatzprodukte und deren Materialzusammensetzung, kann die Studie naturgemäß noch keine abschließende Empfehlung zur Materialauswahl im Einzelfall geben. Die grundsätzlichen Überlegungen und Bewertungen sollen und können hierzu aber einen guten ersten Anhaltspunkt liefern.

Stellvertretend für die Autoren, den OHLF e.V. und das gesamte Projektteam des Leitungssatz-Hubs hoffe ich, dass Ihnen die Lektüre dieser Studie und die Interpretation der Ergebnisse helfen, in Ihrem jeweiligen Wirkungsbereich die Nachhaltigkeit von Produkten und Prozessen im Leitungssatz und darüber hinaus zu verbessern.

Niklas Langmaack

Wolfsburg im September 2026

Beiträge der Autoren

X. Jiang: Recherche, Analyse, Berichtsentwurf

R. Dahlmann: Projektmanagement, internes Review

N. Langmaack: Beauftragung, Projektleitung, Vorwort, Herausgeber

Veröffentlicht unter der Creative-Commons-Lizenz CC BY-NC-ND 4.0

Gefördert vom



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines
Beschlusses des
Deutschen Bundestages.

1	Zusammenfassung	1
2	Problemstellung und Zielsetzung.....	2
3	Vorgehensweise zur Datenerhebung und Bewertung.....	2
3.1	Kategorisierung und Spezifizierung der untersuchten Materialklassen	2
3.2	Bewertungsmethodik.....	5
4	Verfügbarkeit der Ersatzmaterialien.....	6
4.1	Verfügbarkeit von Rezyklaten	8
4.2	Bewertung der Verfügbarkeit von Rezyklaten	11
4.3	Verfügbarkeit von Biokunststoffen	14
4.4	Bewertung der Verfügbarkeit von biobasierten Kunststoffen	18
5	Material- und Produkteigenschaften.....	20
6	Besonderheiten bei der Produktion und Verarbeitung	28
6.1	Besonderheit der Rezyklatproduktion und -verarbeitung.....	29
6.2	Bewertung der Besonderheiten der Rezyklatproduktion und -verarbeitung	29
6.3	Besonderheiten der biobasierten Polymerproduktion und -verarbeitung	31
6.4	Bewertung der Besonderheiten bei der Produktion und Verarbeitung von Biomaterialien.....	32
7	Gesamtbewertung	33
8	Kosten	35
8.1	Datenerhebung und Bewertung	36
8.2	Zwischenfazit	39
9	Umwelteinflüsse	40
9.1	Ökobilanzierung	41
9.1.1	Ökobilanzierung von Rezyklaten	41
9.1.2	Bewertung der Rezyklate.....	42
9.2	Bewertung der Umwelteinflüsse bei biobasierten Ersatzstoffen	43
9.3	Ökobilanzierung von Biokunststoffen	45
9.3.1	Beispielhaftes Vorgehen zur gezielten Bewertung spezifischer Materialien	45
9.4	Zwischenfazit	47
10	Wiederverwertbarkeit und Wirkungsgrad beim Recycling.....	47
10.1	Wiederverwertbarkeit von Rezyklaten.....	48
10.2	Wiederverwertbarkeit von Biokunststoffen	49
10.3	Wirkungsgrad beim Recycling	50
11	Fazit.....	52
12	Quellenverzeichnis.....	54
13	Anhang	67

1 Zusammenfassung

Im Rahmen der *Studie zur Bewertung von biobasierten und rezyklierten Kunststoffen in Automotive-Leitungssätzen* wurden biobasierte und rezyklierte Ersatzmaterialien für ausgewählte Werkstoffe analysiert. Die Entscheidung über die Wahl eines rezyklierten oder biobasierten Werkstoffes wurde auf Basis der Verfügbarkeit bzw. des technologischen Reifegrads getroffen. Weiterhin wurden bevorzugt Post-Consumer Rezyklate anstelle von Post-Industrial Rezyklaten betrachtet, um die Nachhaltigkeit der Materialauswahl zu fördern. Die Analyse erfolgte über mehrere Vergleichsebenen, einschließlich der Material- und Produkteigenschaften (dielektrisch, thermisch, mechanisch und chemisch) sowie deren Varianz und Toleranz in Kombination mit besonderen Eigenschaften während der Produktion und Verarbeitung. Zudem wurden die Umweltauswirkungen der Materialien recherchiert. Zur Bewertung wurden soweit möglich bestehende Lebenszyklusanalysen (LCA) herangezogen. Zusätzlich zu ökonomischen Aspekten, wie Kosten und regionaler Verfügbarkeit, wurde die Wiederverwertbarkeit sowie Recyclingeffizienz betrachtet.

Zur Bewertung der einzelnen Materialien wird für die Kriterien *Verfügbarkeit, Material- und Produkteigenschaften* sowie *Besonderheiten bei der Produktion und Verarbeitung* ein Punktesystem entwickelt. Dieses wird in der Bewertung des *technologischen Reifegrads* zusammengezogen. Anschließend werden die *Kosten* der verschiedenen Neuware und Ersatzmaterialien im durchschnittlichen Vergleich in Kombination mit Einzelanfragen dargestellt. Die Kategorien *Umwelteinflüsse* und *Wiederverwertbarkeit und Wirkungsgrad* werden in Form von materialspezifischen Beispielen betrachtet, wobei zum Abschluss Handlungsempfehlungen zur Bewertung anhand von Herstellerinformationen abgeleitet werden.

Die Recherche und durchgeführte Bewertung zeigen sowohl bestehende Hindernisse für den Einsatz der untersuchten Materialien als auch potenzielle Lösungsansätze zur Überwindung dieser Herausforderungen auf. Die Analyse berücksichtigte folgende Ursprungsmaterialien:

- Polyvinylchlorid (PVC),
- Polypropylen (PP),
- Polyamid 6.6 (PA 6.6) – mit und ohne Glasfaserverstärkung,
- Polyamid 6 (PA 6) – mit und ohne Glasfaserverstärkung,
- Polybutylenterephthalat (PBT),
- Polyurethan (PUR),
- Silikon-Kautschuk ((V)MQ),
- Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuke (EPDM),
- Polyethylen (PE) → Zu Beginn High-Density PE, geändert zu vernetztem (crosslinked (XL)) XLPE,
- Polyethylenterephthalat (PET),
- Thermoplastische Elastomere (TPE).

2 Problemstellung und Zielsetzung

Die gezielte Förderung von Forschung und Entwicklung, die Implementierung umweltfreundlicher Verfahren und der Einsatz innovativer Recyclingtechnologien sind entscheidend, um die ökologische Nachhaltigkeit der Kunststoffbranche zu gewährleisten und Ressourcen effizient zu nutzen. Der im Rahmen des Projektes „Transformations-Hub Leitungssatz“ gegründete Arbeitskreis „Grünes Bordnetz“ zielt darauf ab, die Nachhaltigkeit von Automotive-Leitungssätzen durch verschiedene Aspekte und Fragestellungen zu verbessern. Ein zentrales Ziel dieses Arbeitskreises ist die Erstellung eines Whitepapers, das als Projektbericht dient und den gegenwärtigen Stand der Technik, relevante regulatorische Anforderungen sowie Strategien zur Förderung der Kreislauffähigkeit von automotive-Leitungssätzen und deren Ausgangsmaterialien darstellt. In diesem Kontext soll eine Studie durchgeführt werden.

Ziel der Arbeiten am IKV war es, durch Recherche die Einsetzbarkeit biobasierter und rezyklierter Kunststoffe in Automotive-Leitungssätzen zu evaluieren. Hierbei wurden relevante technische, wirtschaftliche und ökologische Aspekte berücksichtigt, um fundierte Empfehlungen zur Integration nachhaltiger Materialalternativen in die Produktion abzuleiten.

3 Vorgehensweise zur Datenerhebung und Bewertung

Im Rahmen der Studie wurde zunächst für jedes zuvor spezifizierte Material geprüft, ob biobasierte und/oder rezyklierte Varianten verfügbar sind. Sofern entsprechende Varianten existieren, erfolgt eine vergleichende Analyse auf mehreren Bewertungsebenen. Diese Vergleichsebenen umfassten:

- (Regionale) Verfügbarkeit,
- Material- und Produkteigenschaften (dielektrisch, thermisch, mechanisch und chemisch) unter Berücksichtigung der Eigenschaftsvarianz und Toleranzen,
- Besondere Anforderungen oder Herausforderungen bei Verarbeitung und Produktion,
- Technologischer Reifegrad bei (biobasierten) Materialien im Entwicklungsstadium,
- Kosten,
- Umwelteinflüsse (LCA), bevorzugt ecoinvent GWP100 und EU-Markt,
- Wiederverwertbarkeit, Wirkungsgrad beim Recycling, Optimum zwischen Aufwand und Ertrag,
- (Konfliktpotenzial mit Anwendungen in anderen Industriezweigen).

Ziel dieser Studie war es, auf Grundlage der oben genannten Bewertungskriterien die Einsetzbarkeit biobasierter und rezyklierter Alternativen im Automobilbereich realistisch und praxisnah zu beurteilen.

3.1 Kategorisierung und Spezifizierung der untersuchten Materialklassen

Für die Analyse möglicher Ersatzmaterialien in Form von Kunststoff-Rezyklaten und biobasierten Kunststoffen ist eine Spezifizierung der Materialklassen für den Untersuchungsrahmen notwendig.

Rezyklate werden konventionell in Post-Consumer-Recycled (PCR) und Post-Industrial-Recycled (PIR) Materialien unterschieden. Hierbei gilt als einordnendes Kriterium der zugrundeliegende Materialstrom. Während bei PIR Material Industrieabfälle wiederverwendet werden, die überwiegend sortenrein und ohne Verunreinigungen vorliegen, wird PCR Material aus (Haushalts-)Abfällen aufbereitet, die verschiedene Kunststofftypen sowie Verunreinigungen, Fremdstoffe und Inhaltsrückstände erhalten können [BHB+22]. PCR Material kann abhängig von der Art und Herkunft weiter spezifiziert werden. Dazu definiert die EU sieben Kategorien, die im Folgenden zu drei übergeordneten Kategorien zusammengefasst werden [GCB20]. Abbildung 3.1 fasst die Merkmale der PIR sowie PCR Kategorien zusammen. Nach Absprache mit dem Angebotsnehmer wurde der Fokus der folgenden Recherche auf PIR Material und Material der PCR Kategorie 2 gelegt.

PIR	PCR Kat. 1	PCR Kat. 2	PCR Kat. 3
- Industrieabfall - Abfälle aus der Herstellung von Kunststoffprodukten oder Kunststoffen selbst - Kann als sortenrein betrachtet werden - Zu Neumaterial annähernd unveränderte Eigenschaften	- Produktrein - Gesondert gesammelt, produktspezifisch - Wenige Verunreinigungen - An Neumaterial orientierte Eigenschaften	- Sortenrein - Sammlung und darauffolgende Sortierung möglich - Verunreinigungen vorhanden - Definierte Eigenschaften vorhanden	- Sammlung mit geringer/ohne Sortierung - Material Mischungen und Verunreinigungen - Eigenschaften sind batchabhängig

Abbildung 3.1: Zusammengefasste Rezyklatkategorien in Anlehnung an [GCB20]

Ergänzend zu rezyklierten Kunststoffen werden im Rahmen der Studie Biokunststoffe als Ersatzstoffe betrachtet. Diese lassen sich in drei Kategorien unterteilen:

- Nicht abbaubare Kunststoffe aus nachwachsenden Rohstoffen,
- Abbaubare Kunststoffe aus nachwachsenden Rohstoffen,
- Abbaubare Kunststoffe auf Basis petrochemischer Rohstoffe (siehe Abbildung 3.2).

Biobasierte Kunststoffe sind Kunststoffe, deren Rohstoffe ganz oder teilweise aus nachwachsenden Quellen, wie Mais, Zuckerrohr, Holz oder anderen biogenen Materialien, stammen. Innerhalb dieser Gruppe lassen sich zwei Hauptkategorien unterscheiden: **Drop-in-Biokunststoffe** und **Novel Plastics**. Drop-in-Biokunststoffe, beispielsweise Bio-PE oder Bio-PET, besitzen dieselbe chemische Struktur wie ihre petrochemischen Äquivalente und können daher in bestehenden Produktions- und Recyclingsystemen ohne Anpassungen eingesetzt werden. Im Gegensatz dazu weisen Novel Plastics, wie Polylactid (PLA) oder Polyhydroxyalkanoate (PHA), neuartige chemische Strukturen auf, die häufig biologisch abbaubar sind und spezifische Verwertungswege erfordern. [NN22a , NN22b, NN25a]

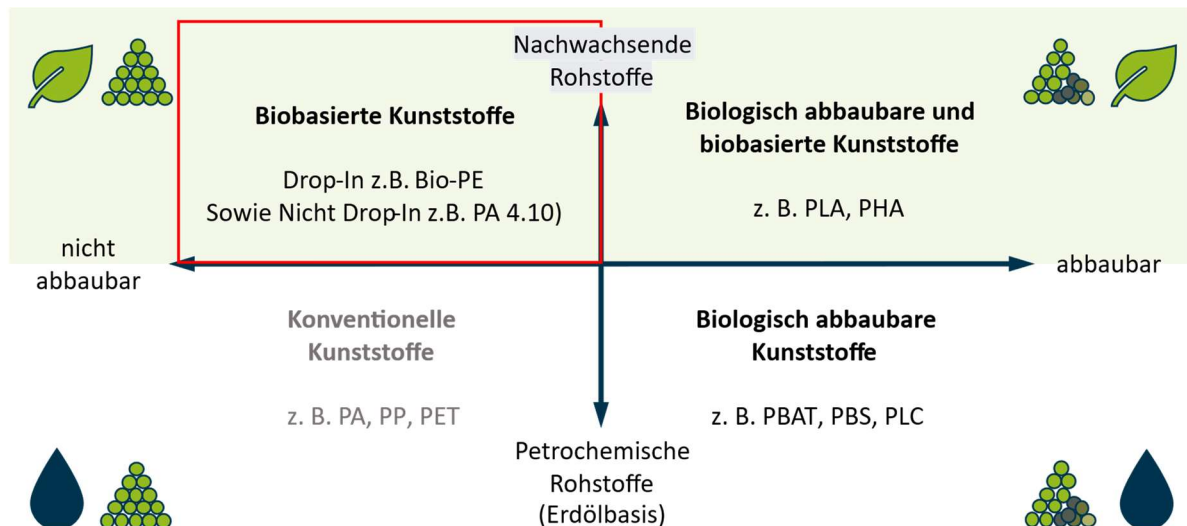


Abbildung 3.2: (Bio-) Kunststoff Kategorien nach [\[Thi20\]](#)

Da das Ziel dieser Studie darin bestand, nachhaltige Alternativen zu den relevanten Kunststoffen im Automotive-Leitungssatz zu identifizieren, sind abbaubare Varianten für diesen Anwendungsbereich nicht relevant. Diese sind in der Regel für kurzlebige Produkte mit einmaliger Nutzung konzipiert und erfüllen daher nicht die Anforderungen an technische Anwendungen mit langer Lebensdauer. Aus diesem Grund werden in dieser Studie ausschließlich biobasierte, aber nicht abbaubare Biokunststoffe betrachtet.

Im Kontext der Biokunststoffe ist es zudem notwendig, zwischen **biobasierten Kunststoffen** und **biomassenbilanzierten (auch bioattribuierten) Kunststoffen** zu unterscheiden, da sich beide Ansätze hinsichtlich Rohstoffbasis, Herstellungsweg und Nachweisführung unterscheiden. Bei biomassenbilanzierten Kunststoffen werden biogene und fossile Rohstoffe gemeinsam in einem Produktionsprozess verarbeitet. Der biobasierte Anteil wird anschließend rechnerisch, ähnlich zum Prinzip von Ökostrom, über die Gesamtproduktion bilanziert. So kann einem bestimmten Anteil der Produktionsmenge rechnerisch biogener Ursprung zugeschrieben werden, obwohl in der Realität fossile und biogene Rohstoffe in denselben Prozessströmen verarbeitet werden. [\[NN25b\]](#) Das Prinzip ist in Abbildung 3.3 schematisch dargestellt.

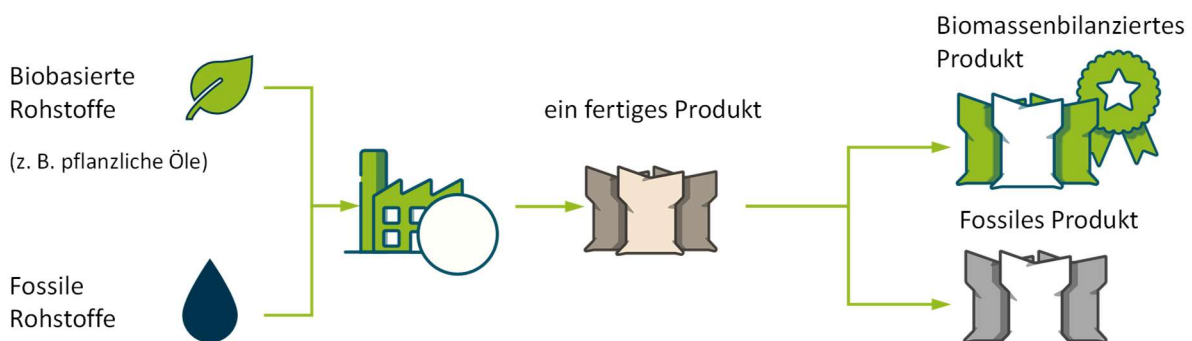


Abbildung 3.3: Schematische Darstellung der Biomassenbilanzierung [\[NN25b\]](#)

Gemäß der CEN-Norm EN 16640:2017 dürfen nur solche Kunststoffe als *biobasiert* gekennzeichnet werden, bei denen der biogene Kohlenstoffanteil mithilfe einer Radiokohlenstoffanalyse (^{14}C -Analyse) eindeutig nachgewiesen werden kann [NN17a, Sch17]. Biomassenbilanzierte Produkte erfüllen diese Bedingung derzeit nicht, da der biogene Anteil lediglich bilanziell und nicht stofflich im Endprodukt vorhanden ist. Daher dürfen sie nicht als „100 % biobasiert“ beworben werden, sondern lediglich als Produkte mit anteilig biogenem Input auf Basis eines zertifizierten Massenbilanzsystems, etwa ISCC PLUS oder REDcert² [NN25c, NN25d].

Insgesamt stellen beide Ansätze (biobasiert und biomassenbilanziert) komplementäre Strategien zur Verringerung des fossilen Kohlenstoffanteils in der Kunststoffproduktion dar. Während biobasierte Kunststoffe eine direkte stoffliche Substitution fossiler Ressourcen anstreben, ermöglichen biomassen-bilanzierte Systeme eine schrittweise Integration biogener Rohstoffe in bestehende petrochemische Infrastrukturen. Im Folgenden werden die Ansätze, soweit möglich, getrennt betrachtet.

3.2 Bewertungsmethodik

Die verschiedenen biobasierten bzw. rezyklierten Ersatzwerkstoffe werden anhand der in Kapitel 3 genannten Vergleichsebenen bewertet. Dazu wird für die folgenden Kategorien eine einheitlich Bewertungsskala von 1 bis 10 eingesetzt:

- Verfügbarkeit,
- Material- und Produkteigenschaften (inkl. Toleranzen),
- Besondere Eigenschaften bei der Verarbeitung.

Die drei Kategorien werden anschließend in einer Gesamtbewertung des technologischen Reifegrads zusammengefasst. Auf der Bewertungsskala entspricht „1“ einer schlechten Bewertung, während „10“ die beste Bewertung ist. Für jede Kategorie wird gut bzw. schlecht spezifisch definiert. Ergänzend kann eine „0“ vergeben werden, falls für die Kategorie keine Angaben vorliegen oder das Ersatzmaterial bspw. nicht existiert. Jedes Ersatzmaterial erhält damit eine Bewertung in Anlehnung an den technologischen Reifegrad zwischen 1 und 10. Eine „10“ würde bspw. bedeuten, dass ein Ersatzprodukt in ausreichenden Mengen lokal verfügbar ist, alle notwendigen Eigenschaften erfüllt oder übertrifft und keine zusätzlichen Herausforderungen bei der Verarbeitbarkeit mit sich bringt. Die Definitionen der einzelnen Skalen werden im Bewertungsteil der jeweiligen Kategorien dargestellt.

Für die weiteren zu bewertenden Kategorien wird ein allgemeinerer Ansatz verfolgt. Dabei liegt der Fokus auf Rechercheergebnissen, die dazu befähigen für ein spezifisches Material eine genaue Bewertung durchzuführen.

4 Verfügbarkeit der Ersatzmaterialien

Die Verfügbarkeit der Ersatzmaterialien ist eine grundlegende Voraussetzung dieser Studie. Im Fokus der Studie stehen folgende Kunststoffe: PVC, PP, PA 6.6, PA 6, PBT, PUR, (V)MQ, EPDM, XLPE, PET und TPE. Unter diesen befinden sich nicht nur Thermoplaste, sondern auch Duroplaste, Elastomere und thermoplastische Elastomere. Je nach Kunststofftyp variiert deren Marktdurchdringung erheblich.

Plastics Europe veröffentlichte im Jahr 2024 einen Bericht zur Weltkunststoffproduktion des Jahres 2023 [NN24a], aus dem hervorgeht, welche Kunststofftypen in welchen Mengen pro Jahr hergestellt wurden (Abbildung 4.1).

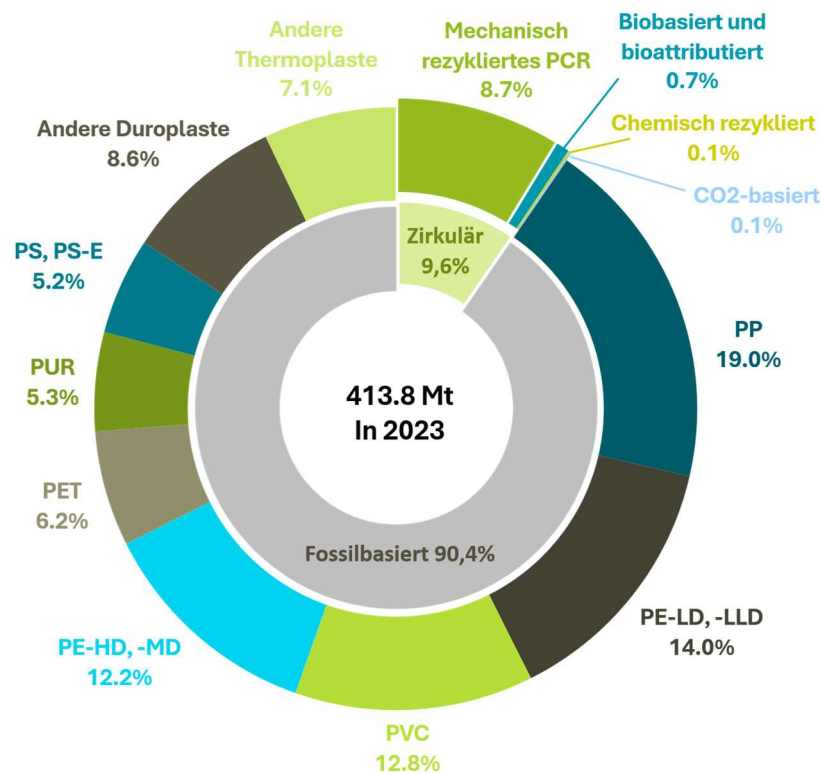


Abbildung 4.1: Welt Kunststoffproduktion im Jahr 2023, nach [NN24a]

PUR, PE, PP und PVC zählen zu den am häufigsten produzierten Kunststoffen. Sie sind auch Bestandteil dieser Studie. Die übrigen betrachteten Materialien dieser Studie, die im Bericht von Plastics Europe nicht genannt werden, beanspruchen nur einen kleinen Anteil der Gesamtproduktion. Daraus lässt sich ableiten, je geringer der Anteil eines Kunststoffes an der Gesamtproduktion ist, desto eingeschränkter bzw. schwieriger nachweisbar ist die Verfügbarkeit nachhaltiger Varianten. In manchen Fällen sind diese bislang möglicherweise noch gar nicht vorhanden.

Im Jahr 2023 stammten 9,6 % der gesamten Kunststoffproduktion aus nachhaltigen Ressourcen. Innerhalb der zirkulären Kunststoffe entfällt der weitaus größte Anteil, über 90 %, auf mechanisch

recyceltes PCR Material. Biobasierte Kunststoffe machten etwa 7 % aus, während chemisches Recycling und auf Kohlenstoffabscheidung basierende Kunststoffe jeweils nur rund 0,1 % ausmachten. Diese Verteilung spiegelt in gewissem Maße den technologischen Reifegrad, die Stabilität sowie die Verbreitung der jeweiligen Ansätze wider: Mechanisches Recycling von PCR ist derzeit am weitesten verbreitet und vergleichsweise einfach umzusetzen. Entsprechend nehmen die technische Komplexität und Marktdurchdringung bei den anderen Verfahren ab.

Um die Verfügbarkeit der Ersatzmaterialien systematisch zu untersuchen, wird die Recherche von Rezyklaten und Biokunststoffen auf folgende Aspekte fokussiert:

- das Vorhandensein des jeweiligen Ersatzmaterials,
- das Ausmaß seiner Verfügbarkeit,
- die bestehenden Anwendungsbereiche.

Da der Anwendungsbereich automotiver Leitungssätze eine hohe Spezifität aufweist, ist die Datenlage hierzu vergleichsweise begrenzt. Daher werden in dieser Untersuchung auch Substitutionsmaterialien einbezogen, die primär im Bereich der elektrischen und elektronischen (E&E) Anwendungen eingesetzt werden. Automotive-Leitungssätze stellen einen spezifischen Anwendungsfall innerhalb des E&E-Bereichs dar, sodass die Wahrscheinlichkeit besonders hoch ist, dass Materialien, die bereits im E&E-Bereich verwendet werden, auch für den Einsatz in Leitungssätzen geeignet sind. Sofern darüber hinaus keine Anwendungsmöglichkeiten im E&E-Bereich dokumentiert sind, werden stattdessen typische Einsatzfelder der jeweiligen Materialien aufgeführt.

4.1 Verfügbarkeit von Rezyklaten

Im Rahmen der Recherche wurde zudem ein globales Verzeichnis von Recyclinganlagen identifiziert [NN25e]. Tabelle 4.1 gibt einen Überblick über die drei Länder mit der höchsten Anzahl an Recyclinganlagen sowie über die dort verarbeiteten Kunststofftypen.

	Land/ Region	Anzahl Recycling- anlagen	PVC	PP	PE	PA	PBT	TPU	(V) MQ	EPDM	PET	TPE
Europa	Deutschland	206	37	112	55	69	35	19		9	53	27
	Polen	193	30	116	60	37	9	1		3	37	7
	Russland	172	11	108	17	15	3	1			33	1
Asien Pazifik	Japan	328	35	161	108	60	41	5		2	151	6
	Indien	261	37	145	19	46	19	4		3	64	9
	China	65	6	34	19	12	7	5		1	22	2
	Malaysia	65	7	37	13	8	2	1			15	1
Amerika	USA	248	56	148	41	73	20	10		3	92	32
	Brasilien	153	19	99	32	30	1	3			26	
	Mexiko	86	21	59	10	19	6	2		1	33	4
Afrika	Südafrika	27	2	15	1	3	1				4	
	Nigeria	25	1	6	3						19	
	Ghana	10									6	
Mittlerer Osten	Türkei	273	25	136	71	36	9	4			51	4
	VAE	15	8	11	2						11	
	Iran	11	1	7	5	1					4	
Summe	-	2.138	296	1.194	456	409	153	55	0	22	621	93

Tabelle 4.1: Verfügbarkeit der Recyclinganlagen [NN25e]

Hierbei ist zu beachten, dass die Anzahl der Recyclinganlagen nicht direkt der Zahl der in dieser Branche tätigen Unternehmen entspricht. Während größere Konzerne oftmals mehrere Anlagen weltweit betreiben, sind kleinere Unternehmen unter Umständen in den Statistiken gar nicht erfasst. Daher lässt sich die tatsächliche Unternehmenszahl nicht exakt bestimmen. Dennoch kann die Anzahl der erfassten Anlagen als ein Indikator dienen, der den Entwicklungsstand des Recyclings einer bestimmten Materialart widerspiegelt.

Allgemein lässt sich feststellen, dass das Recycling von Thermoplasten weiter als das von Elastomeren verbreitet ist. Ausgehend von diesem Überblick werden im Folgenden die einzelnen Materialien gezielt hinsichtlich ihres Recyclingstatus sowie der möglichen Verwendung der entsprechenden Rezyklate im E&E-Bereich oder in Automotive-Leitungssätzen untersucht.

Am 21. Juli 2025 veröffentlichte die europäische Brancheninitiative der **PVC**-Industrie Recovinyll den Progress Report 2025 [NN25f]. Laut diesem Bericht wurden im Jahr 2024 insgesamt 724.638 t PVC werkstofflich recycelt, wovon 92.478 t auf Kabelabfälle entfielen. Die im Monitoring-Tool RecoTrace erfasste Menge an registriertem rPVC belief sich im selben Zeitraum auf 490.278 t. Als zentrale

Anwendungsfelder von rPVC werden in der Literatur vor allem Fenster- und Bauprofile, Bodenbeläge, Produkte des Verkehrsmanagements sowie Rohre genannt [NN25g, RS25]. Ein expliziter Hinweis auf den Einsatz von rPVC in Automotive-Leitungssätzen konnte in den ausgewerteten Quellen nicht gefunden werden. Allerdings bieten verschiedene Unternehmen rPVC-haltige Compounds für Anwendungen im Bereich Elektro und Elektronik (E&E) an. Hierzu zählen beispielsweise von Westlake hergestellte PVC-Compounds mit rezykliertem Anteil sowie die von *Teknor Apex Company (Pawtucket, USA)* entwickelten Cycle-Tek®-Compounds, die je nach Typ einen Rezyklatanteil von bis zu 50 % enthalten, wobei in den verfügbaren Quellen nicht näher spezifiziert wird, ob sich dieser Anteil ausschließlich auf den Polymeranteil oder auf das gesamte Compound einschließlich Füllstoffe bezieht [NN25h, NN25i].

PP-Rezyklate sind am Markt etabliert. Verfügbar sind sowohl rPP-Compounds für E&E-Anwendungen als auch einsatzfertige Komponenten für den Automotive-Leitungssatz. Dazu zählen insbesondere Wellrohre bzw. Kabelschutzhschläuche zur Führung und zum Schutz von Kabelbäumen [NN25j]. Es konnte jedoch kein rPP-Anbieter identifiziert werden, der den Einsatz seiner Materialien für automobilen Leitungssätze explizit ausweist.

Im in Tabelle 4.1 aufgeführten Verzeichnis der Recyclinganlagen sind auch Anlagen gelistet, die **Polyamide** mit Glasfaseranteil recyceln. Deren Zahl ist jedoch deutlich geringer als bei ungefüllten Polyamiden. Für das Recycling glasfaserverstärkter PA 6- und PA 6.6-Compounds weist ein im Jahr 2025 veröffentlichter wissenschaftlicher Artikel [CK25] darauf hin, dass es beim mechanischen Recycling zu Faserbrüchen und damit zu einer Verkürzung der Faserlänge kommt, was die mechanischen Kennwerte der Rezyklate gegenüber dem Primärmaterial erheblich mindert. Gleichwohl birgt das Recycling glasfaserverstärkter Polyamide beträchtliches Potenzial. PA-Rezyklate mit Faseranteil können weiterhin in zahlreichen automobilspezifischen Anwendungen eingesetzt werden, sofern Bauteilauslegung und Qualitätsanforderungen entsprechend berücksichtigt werden. Am Markt sind zudem mehrere Anbieter vertreten, die glasfasergefüllte PA 6/PA 6.6-Rezyklate liefern, u. a. *ENNEATECH AG (Großefehn, Deutschland)*, *Envalor GmbH (Düsseldorf, Deutschland)* und *Ravago Manufacturing (Belgien)* mit Qualitäten, die je nach Spezifikation auch für den Einsatz im Automotive-Leitungssatz adressiert werden (siehe Kapitel 7).

PBT-Rezyklate sind am Markt zu finden und werden sowohl im automotive Leitungssatz (z. B. Steckgehäuse) als auch in allgemeinen Automotive- und E&E-Anwendungen eingesetzt. 2024 präsentierten *Yazaki Corporation (Japan)* und *Toray Industries, Inc. (Japan)* rPBT-basierte Steckverbinder für automotive-Leitungssätze [NN24b]. Darüber hinaus bieten verschiedene Hersteller verfügbare rPBT-Compounds sowie Produkte an, die rPBT-Anteile enthalten.

Die von ungarischen Experten gegründete Firma *Purman Recycling and Processing Ltd. (Ungarn)* beschäftigt sich mit der Verarbeitung und dem Recycling von **Polyurethan (PUR)**. Im Rahmen eines Projekts zur Rückgewinnung von rigidem PUR-Schaum wird ein natürliches Bindemittel eingesetzt, um

ein hochwertiges PUR-Rezyklat herzustellen[[NN25k](#)]. Eine 2024 veröffentlichte wissenschaftliche Arbeit zeigt zudem, dass PUR mittels Glykolyse depolymerisiert und in ein flüssiges Rezyklat überführt werden kann, das anschließend erneut in neue Produkte eingearbeitet wird. Die Rückgewinnungsrate dieser PUR-Depolymerisation erreichte bis zu 87,2 % [[RML24](#)]. Bislang sind jedoch keine Anwendungen von rPUR im Bereich der Automotive-Leitungssätze dokumentiert. Unabhängig davon, ob mechanische oder chemische Recyclingverfahren eingesetzt werden, finden die meisten Anwendungen von rPUR derzeit in den Bereichen Bauwesen, Möbelindustrie und Logistik statt [[NN24c](#), [NN25l](#), [NN25m](#)].

Elastomere sind aufgrund ihrer chemischen Struktur nach der Vernetzung nicht mehr thermoplastisch verarbeitbar, was ihr Recycling erheblich erschwert [[Her25](#)]. Ein mögliches Verfahren ist die mechanische Zerkleinerung, die jedoch in erster Linie zu einer niederwertigen stofflichen Verwertung führt. Unternehmen, wie *Bosscover (Belgien)*, bieten derartige mechanische Recyclingprozesse für EPDM an [[NN25n](#)]. Darüber hinaus beschäftigen sich derzeit auch verschiedene Firmen mit dem Recycling von EPDM durch Devulkanisation. Dabei handelt es sich in den meisten Fällen um PIR-Material, das nach der Aufbereitung als rEPDM in Neucompounds eingesetzt werden kann. Der Anteil an rEPDM liegt in der Regel bei maximal 50 %. Eine im Jahr 2023 veröffentlichte wissenschaftliche Arbeit untersuchte die elektrischen Eigenschaften von SBR/EPDM-Compounds mit einem Anteil von 20 % und 40 % devulkanisiertem EPDM. Die Ergebnisse zeigen, dass die elektrische Isolationsfähigkeit zwar im Vergleich zu reinem SBR reduziert ist, die hergestellten Compounds dennoch als elektrische Isolatoren einsetzbar sind [[MGM+23](#)].

Für **(V)MQ**, ein silikonbasiertes Elastomer, liegen bislang nur begrenzte Daten vor, da das Recycling von Silikonen derzeit noch nicht so weit ausgereift ist, dass kommerzielle Großanlagen existieren. Ein wissenschaftlicher Artikel aus dem Jahr 2024 zeigt, dass das mechanische Recycling die Materialstruktur von Silikon beeinträchtigt und damit in der Regel nur ein Downcycling ermöglicht, bei dem die ursprünglichen Materialeigenschaften nicht vollständig erhalten bleiben. Im Gegensatz dazu erlaubt das chemische Recycling durch Depolymerisation grundsätzlich ein echtes Closed-Loop-Recycling des Materials. Der aktuelle Forschungsschwerpunkt liegt vor allem auf der Entwicklung neuer Katalysatorsysteme, um die Effizienz der Depolymerisation zu steigern. Für den Zeitraum 2024 bis 2026 wurden erste Pilot- bzw. industrielle Anlagenversuche, unter anderem durch etablierte Silikonhersteller wie *Wacker Chemie AG (München, Deutschland)*, *Elkem Silicones (Frankreich)* und *Dow Inc. (USA)* angekündigt [[WS24](#)].

Selbst wenn in Tabelle 4.1 zahlreiche PE-Recyclinganlagen aufgeführt sind, spiegelt dies leider nicht den recyclingtechnischen Stand von **XLPE** wider. Da XLPE chemisch vernetzt ist und nach der Herstellung nicht mehr aufgeschmolzen werden kann, ist das Recycling deutlich anspruchsvoller [[SSM24](#)]. In den vergangenen Jahren hat die Firma *NKT (Dänemark)* gemeinsam mit dem schwedischen Forschungsinstitut *RISE IVF* sowie dem Unternehmen *Axjo Group AB (Gislaved, Schweden)* und *Borealis GmbH (Wien, Österreich)* ein Projekt zum mechanischen Recycling von XLPE durchgeführt. In einer Pressemitteilung erklärte *NKT*, dass durch die Zusammenarbeit mit *Axjo Group*

AB in einem Pilotprojekt in Dänemark das XLPE-Recycling erfolgreich durchgeführt wurde und industrialisiert werden konnte. Die XLPE-Abfälle wurden aus Produktionsstätten in Schweden, Dänemark und Deutschland verwendet [NN20a]. Eine im Jahr 2023 veröffentlichte Pressemitteilung der Borealis GmbH thematisiert, dass die XLPE-Abfälle durch ein Pyrolyseverfahren chemisch recycelt werden können [NN25o].

Obwohl das Recycling von PET bereits weitverbreitet ist, wird rPET bislang überwiegend in der Textilindustrie, in Verpackungen sowie als Füllstoff im Bausektor und verwandten Anwendungen eingesetzt [BXX+23]. Hinsichtlich eines Einsatzes in Automotive-Leitungssätzen oder in elektrischen Isolationsanwendungen sind bisher nur wenige Anwendungsbeispiele dokumentiert. Ein Beispiel stellt das von tesa SE (Norderstedt, Deutschland) entwickelte, lösungsmittelfreie PET-Klebeband dar, das zu 80 % – 100 % aus PCR-PET besteht und für den Einsatz in Fahrzeugkabelbäumen geeignet ist [OP25].

Auch für TPE sind inzwischen Rezyklat-Varianten verfügbar, die teilweise einen sehr hohen Rezyklatanteil (> 70 %) aufweisen. Marktakteure wie HEXPOL TPE (Schweden) mit der Produktlinie Dryflex Circular, die Kraiburg TPE GmbH & Co. KG (Waldkraiburg, Deutschland) mit Recycling Content TPE, die Avient Corporation (USA) mit reSound™ REC sowie Teknor Apex mit Monprene® R6 bieten entsprechende Produkte an, die auf PIR- und PCR-Materialien basieren. In der Praxis werden rTPE vor allem in Automotive-Interieur-Anwendungen (z. B. weiche Oberflächen, Dichtungen, Bedienungselemente) eingesetzt [BF25, NN25p, NN25g, NN25r]. Für den spezifischen Einsatz im Bereich der Automotive-Leitungssätze liegen bislang keine nachweisbaren Beispiele vor. Auch im Bereich der elektrischen und elektronischen Isolationsanwendungen (E&E) sind bisher keine Referenzen dokumentiert. Der Einsatz von rTPE in diesen Anwendungen erscheint zwar grundsätzlich technisch möglich (als Kabelummantelung oder als flexible Isolationsschicht), doch fehlen derzeit belastbare industrielle Beispiele oder standardisierte Materialfreigaben. Die Verfügbarkeit von rTPE im Markt konzentriert sich folglich aktuell auf weniger sicherheitskritische Anwendungen mit geringeren elektrischen Anforderungen.

4.2 Bewertung der Verfügbarkeit von Rezyklaten

Aus der dargestellten Datengrundlage wurde in Die Einstufungen der Recyclinganlagen in „Weltweit etabliert“, „Mäßig verbreitet“ und „Gering verbreitet“ basieren auf der in Tabelle 4.1 dargestellten Ergebnisse, welche die Gesamtzahl der Recyclinganlagen in den weltweit führenden Ländern im Bereich Kunststoffrecycling berücksichtigt. Insgesamt wurden 2.138 Anlagen erfasst. Dabei entfällt auf PP mit über 50 % der größte Anteil aller Recyclinganlagen, womit PP das im Rahmen dieser Erhebung am stärksten vertretene Material darstellt. Ein Material wird als „Weltweit etabliert“ eingestuft, wenn seine Recyclinganlagenzahl über 400 liegt (ca. 20 % Anteil). Liegt die Anlagenzahl zwischen 100 und 400 (ca. 5 - 20 %), erfolgt die Einstufung als „Mäßig verbreitet“; bei weniger als 100 Anlagen (< 5 %) als „Gering verbreitet“. In den vorliegenden Daten wurde keine Differenzierung zwischen PA-Typen (PA 6 oder PA 6.6) vorgenommen, sodass eine materialspezifische Bewertung nicht möglich ist. Unter

Berücksichtigung dieser Einschränkung wurden PA 6 und PA 6.6 jeweils der Kategorie „mittelmäßig“ zugeordnet. eine Übersicht der Verfügbarkeit von Rezyklaten zusammengefasst, wobei der potentielle Einsatz in E&E bzw. spezifisch in automotiven Leitungssätzen bewertet wurde.

Die Einstufungen der Recyclinganlagen in „Weltweit etabliert“, „Mäßig verbreitet“ und „Gering verbreitet“ basieren auf der in Tabelle 4.1 dargestellten Ergebnisse, welche die Gesamtzahl der Recyclinganlagen in den weltweit führenden Ländern im Bereich Kunststoffrecycling berücksichtigt. Insgesamt wurden 2.138 Anlagen erfasst. Dabei entfällt auf PP mit über 50 % der größte Anteil aller Recyclinganlagen, womit PP das im Rahmen dieser Erhebung am stärksten vertretene Material darstellt. Ein Material wird als „Weltweit etabliert“ eingestuft, wenn seine Recyclinganlagenzahl über 400 liegt (ca. 20 % Anteil). Liegt die Anlagenzahl zwischen 100 und 400 (ca. 5 - 20 %), erfolgt die Einstufung als „Mäßig verbreitet“; bei weniger als 100 Anlagen (< 5 %) als „Gering verbreitet“. In den vorliegenden Daten wurde keine Differenzierung zwischen PA-Typen (PA 6 oder PA 6.6) vorgenommen, sodass eine materialspezifische Bewertung nicht möglich ist. Unter Berücksichtigung dieser Einschränkung wurden PA 6 und PA 6.6 jeweils der Kategorie „mittelmäßig“ zugeordnet.

Material	Verfügbarkeit von Recyclinganlagen	Einsatz in E&E-Anwendung	Einsatz im Automotive-Leitungssatz
PVC	Mäßig verbreitet	Ja	Keine Nachweise
PP	Weltweit etabliert	Ja	Ja
PA 6	Mäßig verbreitet	Ja	Ja
PA 6 GF 30	Gering verbreitet	Ja	Ja
PA 6.6	Mäßig verbreitet	Ja	Ja
PA 6.6 GF 30	Gering verbreitet	Ja	Ja
PBT	Mäßig verbreitet	Ja	Ja
PUR	Gering verbreitet	Ja	Keine Nachweise
(V)MQ	Keine belastbaren Daten	Keine Nachweise	Keine Nachweise
EPDM	Gering verbreitet	Ja	Keine Nachweise
XLPE	Forschungsphase	Keine Nachweise	Keine Nachweise
PET	Weltweit etabliert	Ja	Ja
TPE	Gering verbreitet	Ja	Keine Nachweise

Tabelle 4.2: Verfügbarkeit von Rezyklaten im Überblick

Für die Bewertung der Verfügbarkeit der Ersatzmaterialien sind verschiedene Aspekte zu berücksichtigen. Die bloße Existenz zahlreicher Recyclinganlagen weltweit erlaubt noch keinen Rückschluss auf eine tatsächliche Nutzung im E&E-Bereich oder im Bereich von automobilen Leitungssätzen. Ebenso weist das Fehlen dokumentierter Anwendungen in Automotive-Leitungssätzen nicht zwingend auf eine geringe Verfügbarkeit hin. Vielmehr kann dies darauf zurückzuführen sein, dass entsprechende Anwendungen bislang nicht entwickelt wurden, während die Materialien bereits im

E&E-Bereich eingesetzt werden und ihre Eigenschaften grundsätzlich auch für den Einsatz in Automotive-Leitungssätzen geeignet sein könnten. Darüber hinaus ist zu beachten, dass ein wissenschaftlicher Nachweis zur prinzipiellen Rezyklierbarkeit eines Materials nicht automatisch bedeutet, dass bereits entsprechende Anbieter existieren, die dieses Recycling auch kommerziell umsetzen. Unter Berücksichtigung dieser verschiedenen Faktoren werden in Tabelle 4.3 zunächst die konkreten Bewertungskriterien für die Verfügbarkeit der Materialien dargestellt. Diese erfolgt auf einer Skala von 0 bis 10.

Kriterium	Ausprägung	Punkte / Zuschlag
Recyclingbezogene Verfügbarkeit	Forschungsphase	1
	Auf Forschungsebene etabliert	2
	Gering verbreitete Recyclinganlagen	3
	Mäßig verbreitete Recyclinganlagen	4
	Weltweit etablierte Recyclingaktivität	5
Anwendungsbezogene Verfügbarkeit	Nachgewiesene Anwendung im E&E-Bereich	+2
	Nachgewiesene Anwendung in Automotive-Leitungssätze	+3

Tabelle 4.3: Kriterien zur Bewertung der Verfügbarkeit von Rezyklaten

Davon entfallen bis zu 5 Punkte auf die grundsätzliche recyclingbezogene Verfügbarkeit, das heißt auf die Frage, ob das Material grundsätzlich rezyklierbar ist, ob entsprechende Anbieter existieren und in welchem Maß Recyclingaktivitäten weltweit verbreitet sind. Die weiteren bis zu 5 Punkte basieren auf dokumentierten Hinweisen aus Pressemitteilungen oder Produktinformationen. Bewertet wird hierbei der Einsatz von Rezyklaten im E&E-Bereich sowie deren potenzielle oder nachgewiesene Eignung für Automotive-Leitungssätze.

In Tabelle 4.4 sind anschließend die Bewertungen der einzelnen Materialien zusammengefasst.

Material	Verfügbarkeit von Recyclinganlagen	Einsatz in E&E-Anwendung	Einsatz im Automotive-Leitungssatz	Punkte
PVC	Mäßig verbreitet	Ja	Keine Nachweise	4+2+0= 6
PP	Welt verbreitet	Ja	Ja	5+2+3= 10
PA 6	Mäßig verbreitet	Ja	Ja	4+2+3= 9
PA 6 GF 30	Gering verbreitet	Ja	Ja	3+2+3= 8
PA 6.6	Mäßig verbreitet	Ja	Ja	4+2+3= 9
PA 6.6 GF 30	Gering verbreitet	Ja	Ja	3+2+3= 8
PBT	Mäßig verbreitet	Ja	Ja	4+2+3= 9
PUR	Gering verbreitet	Ja	Keine Nachweise	3+2+0= 5
(V)MQ	Keine belastbaren Daten	Keine Nachweise	Keine Nachweise	0+0+0= 0
EPDM	Gering verbreitet	Ja	Keine Nachweise	3+2+0= 5
XLPE	Forschungsphase	Keine Nachweise	Keine Nachweise	1+0+0= 1
PET	Welt verbreitet	Ja	Ja	5+2+3= 10
TPE	Gering verbreitet	Ja	Keine Nachweise	3+2+0= 5

Tabelle 4.4: Bewertung der Verfügbarkeit von Rezyklaten

4.3 Verfügbarkeit von Biokunststoffen

Zur Prüfung der Verfügbarkeit biobasierter Varianten könnte während der Recherche keine mit der oben genannten Übersicht zu Recyclinganlagen vergleichbare Statistik für Biokunststoffe gefunden werden. Darüber hinaus ist die Einordnung als Drop-In-Biokunststoff von zentraler Bedeutung. Ist die Verfügbarkeit eines Drop-In-Biokunststoffs nachgewiesen, so kann daraus abgeleitet werden, dass dieser grundsätzlich für alle Anwendungsbereiche geeignet ist, in denen der konventionelle Kunststoff eingesetzt wird [\[NN25s\]](#).

European Bioplastics hat im Rahmen des Berichts „Bioplastics Market Development Update 2024“ eine Statistik zur globalen Produktionskapazität von Biokunststoffen veröffentlicht. Im Jahr 2024 wurden insgesamt 1,08 Mio. t nicht abbaubarer Biokunststoffe hergestellt. In der Abbildung 4.2 sind die prozentualen Anteile der verschiedenen nicht abbaubaren Biokunststoffe dargestellt [\[NN24d\]](#).

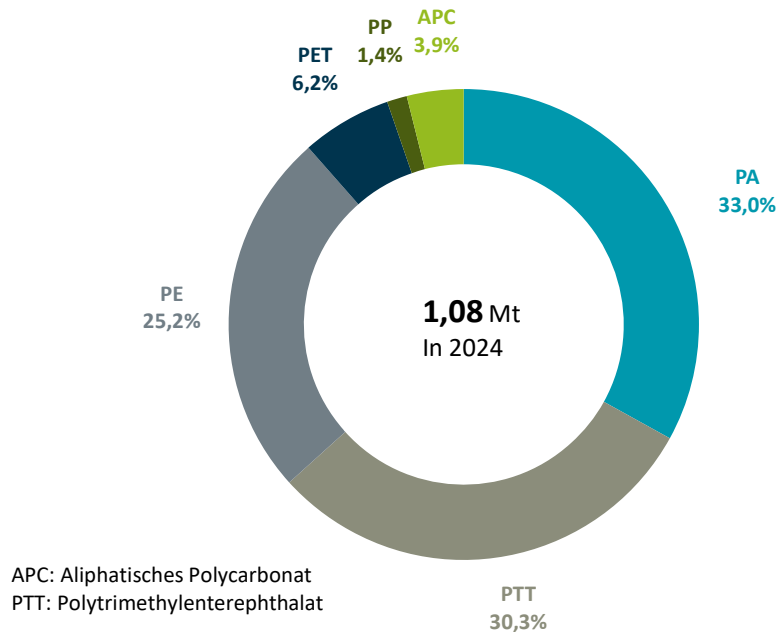


Abbildung 4.2: Produktion von nichtabbaubaren Biokunststoff im Jahr 2024 [NN24d]

Dabei ist hervorzuheben, dass unter den in dieser Studie als relevant betrachteten Materialien lediglich PA, PE, PET und PP in der Statistik aufgeführt werden. Darüber hinaus verweist der Bericht auch auf die Einsatzgebiete biobasierter Kunststoffe, wobei Verpackungen mit einem Anteil von rund 45 % den größten Anwendungsbereich darstellen. Bezogen auf die im Rahmen dieser Untersuchung berücksichtigten Materialien lässt sich feststellen, dass im Bereich der E&E-Anwendungen bislang ausschließlich PA zum Einsatz kommt. Für den spezifischen Einsatz von biobasiertem PA 6 oder PA 6.6 in Automotive-Leitungssätzen konnten keine Nachweise gefunden werden. Die Firma *ARKEMA S.A. (Frankreich)* produziert ein Polyamid, Rilsan® PA 11, das vollständig aus Rizinusöl und damit aus 100 % erneuerbaren Rohstoffen gewonnen wird. Nach Angaben des Unternehmens ist Rilsan® PA 11 weltweit verfügbar und eignet sich für Anwendungen in der Automobilindustrie, im Kabelbereich sowie in der Elektrotechnik [NN25t]. Darüber hinaus stellt *Envalior* mit EcoPaXX ein biobasiertes, „electro-friendly“ klassifiziertes Material bereit, das als Ersatz für PA 6.6 eingesetzt werden kann [NN25u]. In den technischen Datenblättern wird zudem hervorgehoben, dass die Verfügbarkeit dieses Materials nahezu weltweit gegeben ist. Ebenfalls von *Envalior* hergestelltes *Durethan® Blue* ist ein massenbilanziertes Polyamid mit einem Anteil von nahezu 90 % an biobasierten Rohstoffen [NN24e]. Es weist vergleichbare Eigenschaften wie fossilbasierte Polyamide auf.

Derzeit ist **Bio-PET** bereits am Markt verfügbar und wird überwiegend in der Verpackungsindustrie eingesetzt. Ein Beispiel ist die von *The Coca-Cola Company (USA)* entwickelte 100 % biobasierte PET-Flasche [NN22c]. Darüber hinaus wird das von *Toray* hergestellte BioView™-PET in Anwendungen, wie Sonnenschutzfolien für Fenster, eingesetzt [NN16a]. Hinsichtlich potenzieller Anwendungen im Bereich der Elektrotechnik sowie in Automotive-Leitungssätzen konnten im Rahmen dieser Recherche jedoch keine konkreten Hersteller identifiziert werden. Das von *FKuR Kunststoff GmbH* (Willich,

Deutschland) angebotene Eastlon® Bio-PET enthält einen biobasierten Anteil von etwa 30 % [NN25v]. Seine mechanischen und thermischen Eigenschaften entsprechen denen von konventionellem, fossilbasiertem PET. Zudem ist das Material zu 100 % recycelbar.

Derzeit wird **Bio-PP** weitestgehend im Verpackungssektor eingesetzt. Anbieter wie *LyondellBasell Industries N.V. (Niederland)*, *Braskem S.A. (Brasilien)* und *Borealis* stellen Bio-PP her, das bereits in Verpackungen eingesetzt wird, und betonen übereinstimmend, dass ihre Produkte konventionelles Polypropylen ersetzen können [NN19a, NN20b, NN24f]. Hinsichtlich eines möglichen Einsatzes in Automotive-Leitungssätzen oder im Bereich der E&E-Anwendungen liegen bislang keine konkreten Nachweise oder dokumentierte Anwendungsbeispiele vor. In der Automobilindustrie wird Bio-PP vor allem in Außenbauteilen, wie Stoßfängern oder Karosseriepaneelen, eingesetzt [NN25w].

Ergänzend zu dieser allgemeinen Marktübersicht wurde gezielt recherchiert, ob für die in der Statistik nicht aufgeführten relevanten Kunststoffe dennoch biobasierte Varianten existieren. Im Folgenden werden die identifizierten biobasierten Varianten bzw. einschlägigen Forschungsarbeiten zu den jeweiligen Materialien aufgeführt.

In diesem Zusammenhang veröffentlichte *Bioplastics Magazine* im Jahr 2019 einen Artikel über die Markteinführung des ersten kommerziellen **bio-attribuierten PVC**-Produkts durch *INOVYN Deutschland GmbH (Rheinberg, Deutschland)* [NN19b]. Hierbei handelt es sich um ein massenbilanziertes Material aus fossilen und biologischen Rohstoffen. Laut dem Artikel ist bio-attribuiertes PVC für verschiedene Industriesektoren geeignet, darunter auch hoch spezialisierte Anwendungen im Automobilbereich. Eine im Jahr 2024 veröffentlichte Broschüre von *Teknor Apex* stellt das von ihnen hergestellte Bio-PVC BioVinyl vor, dass zu 98 % aus biobasierten Kunststoffen besteht und zudem mit einem biobasierten Weichmacher formuliert ist [NN24g]. Das Material bietet vielfältige Einsatzmöglichkeiten in verschiedenen Bereichen, die auch für diese Studie von Interesse sind. Außerdem sind die von *Vynova N.V. (Belgien)* angebotenen Bio-PVC-Typen auch für Anwendungen im Bereich E&E geeignet [NN25x]. Nach Angaben von *Vynova* handelt es sich um Drop-in-Typen von herkömmlichem PVC. Aus diesem Grund entsprechen ihre Anwendungsbereiche denen von konventionellem PVC. Die Produktlinie LIMEVERSE der *LEONI AG (Nürnberg, Deutschland)* umfasst unter anderem Kabelprodukte auf Basis von bio-basiertem bzw. massenbilanziertem PVC, die vergleichbare Eigenschaften wie Neuware-PVC aufweisen und für den Einsatz in automobilen Leitungssätzen vorgesehen sind [NN24h].

Aktuell ist noch keine **Bio-XLPE** in der industriellen Produktion verfügbar. Ein wissenschaftlicher Artikel aus dem Jahr 2024 diskutiert das Konzept biobasierter XLPO, die sich in chemischer Struktur, Herstellbarkeit und Eigenschaften nicht von konventionellen XLPO unterscheiden [SBM+24].

Im Jahr 2013 wurde von den Unternehmen *LANXESS Deutschland GmbH (Köln, Deutschland)* und *Genomatica Inc. (USA)* erstmals **Bio-PBT** aus zucker-basiertem bio-Butandiol (BDO) hergestellt. Dieses Bio-PBT weist gleichwertige Eigenschaften wie konventionelles PBT auf. Zudem wurde darauf

hingewiesen, dass ein solches biobasiertes PBT in den Bereichen Automotive und Elektronik eingesetzt werden kann [NN13]. Im Jahr 2024 brachte *Envalior* die weiterentwickelte Bio-PBT-Serie Pocan® X-MB auf den Markt. Diese wird aus zuckerbasiertem bio-BDO hergestellt und findet in der Automobilindustrie sowie in der E&E-Industrie Anwendung [NN24i].

Bislang sind keine **biobasierten (V)MQ-Silikone** kommerziell auf dem Markt verfügbar. In einem im Februar 2025 veröffentlichten wissenschaftlichen Artikel wurde jedoch die Gewinnung von Siliciumdioxid aus Reisschalen als biogenem Rohstoff untersucht. Die Studie kam zu dem Ergebnis, dass dieses Verfahren grundsätzlich machbar ist. Zur Herstellung von Silikonen werden neben Silizium insbesondere chlororganische Verbindungen wie Chlormethan benötigt. Diese werden üblicherweise aus Methanol gewonnen, das wiederum häufig aus fossilen Quellen stammt. Da Silizium selbst als Bestandteil von Siliziumdioxid in großen Mengen verfügbar ist und nicht erdölbasiert ist, liegt der fossile Anteil der Silikone somit vor allem in der organischen Komponente [HAK+25]. Eine weiterführende Untersuchung der Eigenschaften des gewonnenen Materials sowie eine Bewertung seiner Eignung für Anwendungen im Bereich der Elektrotechnik oder in Automotive-Leitungssätzen liegen derzeit noch nicht vor.

Keltan® Eco von *ARLANXEO Holding B.V. (Niederland)* ist ein **biobasiertes EPDM**, dessen Ethylenanteil zu rund 70 % aus Zuckerrohr stammt, das von *Braskem* hergestellt wird. Die Materialeigenschaften entsprechen vollständig denen von konventionellem EPDM. Bereits heute findet Keltan® Eco in der Automobilindustrie Anwendungen, insbesondere für Dichtungen [NN25y]. Darüber hinaus hat *Dow* auf der Deutschen Kautschuk-Tagung 2024 in Nürnberg die biobasierte EPDM-Variante NORDEL™ REN in den Markt eingeführt, die ebenfalls im Automobilbereich Anwendung findet [NN24j].

Im Jahr 2022 führte *Huntsman International LLC (Belgien)* ein **Bio-PUR** ein, das speziell für akustische Anwendungen im Automotivbereich entwickelt wurde. Dieses Material enthält 20 % biobasierte Bestandteile auf Basis von Pflanzenölen [NN22d]. Im Rahmen des BIOMAT-Forschungsprojekts wurden zudem in mehreren Pilotanlagen Bio-PUR entwickelt, die aus Reisschalen und Lignin hergestellt werden [NN25z]. *Lanxess* stellt mit Adiprene Green ein biobasiertes PU-Prepolymer her, dass je nach Typ einen biobasierten Anteil von 30 % - 90 % aufweist und den fossilen Referenz-Prepolymeren in seinen Eigenschaften sehr nahekommt [NN20c].

Biobasierte TPE sind bereits kommerziell erhältlich. Mehrere Hersteller bieten entsprechende Produktlinien mit einem biobasierten Anteil von etwa 30 % bis über 90 % an. Zu den Anbietern zählen beispielsweise *Kraiburg TPE*, *Avient*, *FKuR* sowie *Hexpol*. Darunter befinden sich auch Drop-in-Varianten, die in bestehenden Anwendungen fossile TPE direkt ersetzen können [NN25aa, NN25ab, NN25ac, NN25ad].

4.4 Bewertung der Verfügbarkeit von biobasierten Kunststoffen

Basierend auf Kapitel 4.2 ist in Tabelle 4.5 eine Übersicht zur Verfügbarkeit biobasierter Kunststoffe dargestellt.

Material	Verfügbarkeit	Einsatz in E&E - Anwendung	Einsatz im automobilem Leitungssatz	Drop-In-Variante verfügbar
PVC	Ja	Ja	Ja (massenbilanziert)	Ja
PP	Ja	Ja (massenbilanziert)	Ja (massenbilanziert)	Ja
PA 6/66	Ja	Ja	Keine Nachweise	Ja
PBT	Ja	Ja	Ja	Ja
PUR	Ja	Keine Nachweise	Keine Nachweise	Ja
(V)MQ	Keine Nachweise	Keine Nachweise	Keine Nachweise	Nein
EPDM	Ja	Keine Nachweise	Keine Nachweise	Ja
XLPE	Forschungsphase	Keine Nachweise	Keine Nachweise	Nein
PET	Ja	Keine Nachweise	Keine Nachweise	Ja
TPE	Ja	Ja (massenbilanziert)	Ja (massenbilanziert)	Ja

Tabelle 4.5: Übersicht über die Verfügbarkeit biobasierter Kunststoffe

Die Einstufung als Drop-in-Variante bezieht sich auf die prinzipielle Austauschbarkeit des Materials mit petrochemisch basierten Typen. Sie ist unabhängig davon, ob ein tatsächlicher Einsatz im automobilem Leitungssatz bereits nachgewiesen ist. Darüber hinaus wurden auch solche Materialien als Drop-in-Variante eingestuft, bei denen Hersteller zwar nicht explizit den Begriff „Drop-in“ verwenden, jedoch die Gleichwertigkeit der Eigenschaften oder der chemischen Struktur mit konventionellen, petrochemisch basierten Materialien betonen.

Das *nova-Institut* listet in seinem aktuellen Marktbericht [SCT+24] über 200 Unternehmensprofile im Bereich biobasierter Polymere. Auch wenn diese Zahl nicht die Gesamtheit aller weltweit tätigen Unternehmen erfasst, spiegelt sie doch die relevanten und überwiegend zertifizierten Markttakteure wider. Kleinere, regional tätige Betriebe sind darin in der Regel nicht berücksichtigt und tragen meist nur in begrenztem Umfang zur globalen Produktionskapazität bei. Im Vergleich dazu ist die Zahl der Anbieter von Rezyklaten deutlich höher. Daher kann die Verfügbarkeit biobasierter Materialien nicht nach denselben Kriterien wie diejenige von Rezyklaten bewertet werden. Ein konkretes Bewertungsschema ist in Tabelle 4.6 dargestellt.

Kriterium	Ausprägung	Punkt / Zuschlag
Existenz des Biomaterials	Forschungsphase	1
	Bereits am Markt etabliert	4

Anwendungsbezogene Verfügbarkeit	Drop-In-Material verfügbar	+2
	Nachgewiesene Anwendung im Bereich Elektronik und Elektrik	+2
	Nachgewiesene Anwendung in Automotive-Leitungssätzen	+2
	Anwendung mit massenbilanziertem Material	-1

Tabelle 4.6: Bewertungskriterien für die Verfügbarkeit biobasierter Kunststoffe

Wie in Kapitel 4.2 bereits erwähnt, ist ein Drop-in-Material chemisch mit seinem fossilbasierten Pendant identisch. Das Vorhandensein von Drop-in-Materialien weist somit auf die Möglichkeit hin, diese in denselben Anwendungsfeldern wie Neuware-Materialien einzusetzen. Daher wird bei der Bewertung der Verfügbarkeit biobasierter Kunststoffe sowohl das Vorhandensein des biobasierten Materials als auch das Vorliegen einer Drop-in-Variante berücksichtigt. Beide Kriterien erhalten die gleiche Gewichtung. Im Rahmen der Recherche wurde festgestellt, dass für manche Materialien ausschließlich Anwendungen im Bereich der Elektrotechnik oder in Automotive-Leitungssätzen mit massenbilanzierten Materialien vorliegen. In solchen Fällen wird anstelle von zwei Punkten lediglich ein Punkt vergeben. Die Bewertung ist in Tabelle 4.7 dargestellt.

Material	Verfügbarkeit	Einsatz in E&E - Anwendung	Einsatz im automobilem Leitungssatz	Drop-In-Variante verfügbar	Punkte
PVC	Ja	Ja	Ja (massenbilanziert)	Ja	4+2+1+2= 9
PP	Ja	Ja (massenbilanziert)	Ja (massenbilanziert)	Ja	4+1+1+2= 8
PA 6/66	Ja	Ja	Keine Nachweise	Ja	4+2+0+2= 8
PBT	Ja	Ja	Ja	Ja	4+2+2+2= 10
PUR	Ja	Keine Nachweise	Keine Nachweise	Ja	4+0+0+2= 6
(V)MQ	Keine Nachweise	Keine Nachweise	Keine Nachweise	Nein	0+0+0+0= 0
EPDM	Ja	Keine Nachweise	Keine Nachweise	Ja	4+0+0+2= 6
XLPE	Forschungsphase	Keine Nachweise	Keine Nachweise	Nein	1+0+0+0= 1
PET	Ja	Keine Nachweise	Keine Nachweise	Ja	4+0+0+2= 6
TPE	Ja	Ja (massenbilanziert)	Ja (massenbilanziert)	Ja	4+1+1+2= 8

Tabelle 4.7: Bewertung der Verfügbarkeit biobasierter Kunststoffe

Mit Ausnahme von (V)MQ und XLPE konnten für alle untersuchten Materialien biobasierte Varianten identifiziert werden, und in nahezu allen Fällen existieren auch entsprechende Drop-in-Typen, die chemisch mit den fossilen Referenzmaterialien identisch sind. Die Unterschiede in der Bewertung ergeben sich hauptsächlich daraus, ob bereits Anwendungen im Elektronikbereich oder im Automotive-Leitungssatz nachgewiesen werden können. Aufgrund der hohen Anforderungen an die

Lebensdauer, elektrische und thermische Isolationsfähigkeit sowie die mechanische Beanspruchbarkeit der eingesetzten Materialien werden ein paar biobasierte Kunststoffe bislang jedoch nur selten in diesem Anwendungsfeld eingesetzt.

5 Material- und Produkteigenschaften

Kunststoffe werden im Automotive-Leitungssatz häufig als Isolierung, Ummantelung, Klipse, Steckergehäuse oder Dichtungsmaterial eingesetzt. Um die Anforderungen bei diesen Anwendungen zu erfüllen, müssen die eingesetzten Kunststoffe bestimmte Eigenschaften aufweisen.

Ziel dieser Studie ist es, konventionelle Kunststoffe durch biobasierte oder rezyklierte Varianten im Automotive-Leitungssatz zu ersetzen. Damit dies realistisch umgesetzt werden kann, müssen die Anforderungen an das ursprüngliche Neumaterial auch von den nachhaltigen Alternativen erfüllt werden. Die Anwendungen von Rezyklaten bzw. biobasierten Materialien im Bereich des Automotive-Leitungssatzes sind sehr spezifisch. Auch wenn die Ersatzmaterialien grundsätzlich verfügbar sind, ist nicht zwangsläufig gewährleistet, dass sie tatsächlich im Automotive-Leitungssatz eingesetzt werden können. Aufgrund der unzureichenden Datentiefe, insbesondere im Hinblick auf die Verarbeitungseigenschaften von Leitungssatz-Bauteilen aus Rezyklaten und biobasierten Materialien, konzentriert sich die Untersuchung daher im Wesentlichen auf die Materialeigenschaften.

Für die Bewertung der Eignung sind insbesondere folgende Materialeigenschaften relevant:

- Mechanische Eigenschaften: Zugfestigkeit, E-Modul
- Thermische Eigenschaften: Schmelztemperatur, Schmelzflussrate (MFR)
- Elektrische Eigenschaften: Dielektrizitätszahl, Verlustfaktor, Durchschlagfestigkeit
- Chemische Eigenschaften: Korrosionsbeständigkeit, Chemikalienresistenz

Die oben aufgeführten Eigenschaften können im Rahmen der Recherche nicht in jedem Fall vollständig ermittelt werden. Daher werden darüber hinaus weitere, für die Beurteilung der Eignung im Automotive-Leitungssatz relevante Eigenschaften gefunden, die auch berücksichtigt und dargestellt werden.

Zur Bewertung der Materialeigenschaften werden technische Datenblätter (TDS), anerkannte Fachquellen, Pressemitteilungen sowie Produktbeschreibungen herangezogen. Die Eigenschaften der Ursprungsmaterialien dienen als Referenz und werden mit den biobasierten sowie rezyklierten Materialien verglichen, um festzustellen, ob die erforderlichen Anforderungen erfüllt werden. Die vom Studienauftraggeber OHLF zur Verfügung gestellten TDS, die Materialien für den Einsatz im Automotive-Leitungssatz enthalten, werden als Benchmark-Materialien verwendet.

Theoretisch ist die oben beschriebene Methodik zur Bewertung der Eigenschaften von Ersatzmaterialien wissenschaftlich fundiert und stringent. In der praktischen Umsetzung zeigte sich bereits

in der ersten Recherche, dass die Bewertung der Eigenschaften mit zahlreichen Schwierigkeiten verbunden ist. Zu den Herausforderungen zählen unter anderem:

- fehlende Detailinformationen zu den Materialeigenschaften: Zwar können Materialanbieter identifiziert werden, jedoch stehen häufig keine weiterführenden Daten zur Verfügung.
- Grobe Materialbeschreibungen: Beispielsweise wird angegeben, dass ein Rezyklat „gute mechanische Eigenschaften und Isolationseigenschaften“ aufweise, ohne dass daraus abgeleitet werden kann, ob die Anforderungen im Automotive-Leitungssatz erfüllt werden.
- Generische Angaben in der Fachliteratur: Die in der Literatur dokumentierten Eigenschaften der Ursprungsmaterialien beziehen sich oftmals auf allgemeinen Anwendungen und sind nicht direkt auf die spezifischen Anforderungen im Automotive-Leitungssatz übertragbar.
- Fehlende klare Eigenschaftsbereiche: Da es keine exakten Angaben von Eigenschaftsintervallen gibt, kann nicht eindeutig beurteilt werden, ob ein Ersatzmaterial die Anforderungen erfüllt.
- Nicht spezifizierte oder unvollständige Angaben in TDS: Bestimmte geforderte Eigenschaften sind in TDS typischerweise nicht enthalten, sodass eine Beurteilung auf Basis quantitativer Werte nicht möglich ist.
- Unklare oder variierende Zusammensetzungen: Der Anteil an Rezyklat- oder biobasierten Komponenten sowie der Einsatz von Additiven unterscheiden sich stark zwischen den Anbietern und werden häufig nicht spezifiziert. So kann ein Material mit lediglich 10 % Rezyklatanteil durchaus den Anforderungen im Automotive-Leitungssatz entsprechen, ohne dass dies auf alle Rezyklate dieser Kategorie verallgemeinert werden kann.
- Unterschiedliche Prüfnormen: Die Eigenschaften werden teilweise nach verschiedenen Normen (z. B. ISO, EN) bestimmt, was die Vergleichbarkeit zusätzlich erschwert.

Aufgrund der oben genannten Problematiken ist es nicht möglich, eine allgemeingültige und einheitliche Angabe und Bewertung der Eigenschaften der Ersatzmaterialien vorzunehmen. Daher wird die Bewertung der Materialeigenschaften auf Grundlage der jeweils verfügbaren Informationen zu den einzelnen Materialien vorgenommen. Dabei werden Materialien identifiziert, die als potenzielle Ersatzmaterialien für den Einsatz in Automotive-Leitungssätzen betrachtet werden können. Je nach Informationslage lassen sich folgende Fälle unterscheiden:

- 1. Fall: In der Produktbeschreibung wird der Einsatz im automobilen Leitungssatz ausdrücklich angegeben. In diesem Fall kann das Material, unabhängig davon, ob ein TDS verfügbar ist oder nicht, als geeignet betrachtet werden.
- 2. Fall: In der Produktbeschreibung wird kein Einsatz im automobilen Leitungssatz erwähnt, jedoch ein Einsatz im Automobil- bzw. Elektronikbereich. In diesem Fall kann die Eignung für

automobilen Leitungssätze durch einen Vergleich der Eigenschaften mit dem Benchmark-Material (anhand des TDS) nachgewiesen werden.

- **3. Fall:** In der Produktbeschreibung wird ebenfalls nur ein Einsatz im Automobil- bzw. Elektronikbereich angegeben, jedoch liegt kein TDS vor bzw. ist dieses nicht quantitativ mit dem Benchmark vergleichbar.
- **4. Fall:** Grundsätzlich ist ein Ersatzmaterial vorhanden, jedoch liegen keine ausreichenden Informationen zur Beurteilung seiner Eignung vor.

Durch die oben beschriebenen vier Informationslagen lassen sich dementsprechend vier Klassen potenzieller Materialien unterscheiden. Die potenzielle Eignung für den Einsatz im Automotive-Leitungssatz nimmt in dieser Reihenfolge ab. Somit können potentielle Materialien und Materialhersteller aufgelistet werden. In Tabelle 5.1 und Tabelle 5.2 werden Rezyklate bzw. Biokunststoffe mit Potenzial für den Einsatz als Ersatzmaterialien im Automotive-Leitungssatz dargestellt.

Rezyklat	Klasse	Hersteller	Produkt	Rezyklatgehalt
PVC	2	Teknor Apex	Cycle-Tek®	- 50 %
PP	1	Murrplastik	EW-R-PP	Nicht angegeben
PA 6	1	Envalior	Akulon® RePurposed	Nicht angegeben
PA 6.6	1	Envalior	Durethan® ECO	Nicht angegeben
PBT	1	Envalior	Pocan® ECOB	Nicht angegeben
TPU	3	novoloop	Recycled+ TPU	77 % +
(V)MQ	-	-	-	-
EPDM	4	Gradient compounds	-	-
XLPE	-	-	-	-
PET	1	Tesa	tesa® 61XXX	80 % +
TPE	3	hexpol	Dryflex Circular	25 %

Tabelle 5.1: Rezyklate mit Potenzial als Ersatzmaterialien im Automotive-Leitungssatz

Tabelle 5.1 verdeutlicht, dass für viele der untersuchten Rezyklate bereits Hersteller identifiziert werden konnten, die Materialien anbieten, welche im Automotive-Leitungssatz eingesetzt werden könnten. Eine Besonderheit stellt PP dar. Das gefundene Beispiel bezieht sich auf ein Wellrohr, das aus rPP hergestellt wurde, und nicht auf das Rezyklat selbst [NN25j]. Dieses Beispiel belegt jedoch, dass rPP die für den Automotive-Leitungssatz relevanten Anforderungen an PP grundsätzlich erfüllen kann. Gleichzeitig konnte jedoch kein konkreter Anbieter identifiziert werden, der Rezyklate anbietet, welche gezielt für die Herstellung von Leitungssatz-Komponenten geeignet sind. Ein weiteres Beispiel ist das Produkt tesa® 61XXX der Firma *Tesa*, das auf rPET basiert. Diese Klebeband-Serie kann in Fahrzeug-Kabelbäumen eingesetzt werden. Die Anbieter *Gradient Compounds Netherlands B.V.*

(*Hilversum, Niederlande*) und *Bosscor* bieten Recycling-Dienstleistungen für EPDM an. Die Qualität des daraus hergestellten rEPDM hängt jedoch stark von der Qualität des Ausgangsmaterials ab, sodass keine einheitlichen oder verlässlichen Leistungsangaben gemacht werden können. Im Vergleich zu Rezyklaten, die für Verpackungsanwendungen mit kurzer Nutzungsdauer und geringeren Leistungsanforderungen geeignet sind, ist es deutlich schwieriger, den spezifischen Rezyklatanteil in Materialien zu ermitteln, die für den Elektronik- oder Automotiv-Leitungssatz vorgesehen sind. Tendenziell ist daher davon auszugehen, dass der Rezyklatanteil bei Materialien, die spezifisch für den Automotive-Leitungssatz eingesetzt werden, eher gering ist.

Biomaterial	Klasse	Hersteller	Produkt	Biogehalt
PVC	1	LEONI	LIMEVERSE	Nicht angegeben
PP	1	LEONI	LIMEVERSE	Nicht angegeben
PA 6	2	Envalior	Akulon® Ultraflow K-FG3/C B-MB	Nicht angegeben
PA 66	1	Envalior	Durethan® ECO	Nicht angegeben
PBT	1	Envalior	Pocan® X-MB	Nicht angegeben
TPU	2	Lubrizol	ESTANE® ECO	- 46 %
MQ	-	-	-	-
EPDM	2	Arlanxeo	Keltan® Eco 5470	- 70 %
XLPE	-	-	-	-
PET	1	Envalior	Pocan® ECOT	Nicht angegeben
TPE	3	hexpol	Dryflex® Green	90 % +

Tabelle 5.2: Biomaterialien mit Potenzial als Ersatzmaterialien im Automotive-Leitungssatz

Die Produktserie LIMEVERSE von *LEONI* entspricht vollständig den Anforderungen an die Bauteile dieser Serie. Sie wurde speziell für den Einsatz in Automotive-Leitungssätzen entwickelt, jedoch liegen keine öffentlich zugänglichen Eigenschaftendaten zu dieser Serie vor. Bei den von *Envalior* hergestellten Biomaterialien handelt es sich überwiegend um biobilanzierte Werkstoffe, teilweise auch um Materialien mit biobasiertem und rezykliertem Anteil. Ihre Eigenschaften erfüllen jedoch vollständig die Anforderungen für den Einsatz in Automotive-Leitungssätzen. Sowohl für Rezyklate als auch für Biomaterialien wurde bei PET die von *Envalior* hergestellte Produktserie Pocan® ECOT aufgenommen. Dabei handelt es sich um ein Blend aus PBT und PET mit massenbilanziertem sowie rezyklatbasiertem Anteil.

Bewertung der Eigenschaften

Im idealen Fall stehen vollständige Informationen über die Eigenschaften sämtlicher identifizierter Ersatzmaterialien sowie geeignete Benchmark-Daten für alle Materialtypen zur Verfügung. Dadurch wäre ein direkter Vergleich und eine darauf basierende Bewertung möglich. Die Bewertungsmethodik

basiert darauf, inwieweit ein Material die Anforderungen des Automotive-Leitungssatzes vollständig erfüllt. Materialien, die diese Anforderungen erfüllen und gleichzeitig einen hohen Anteil an Rezyklat oder biobasierten Anteile aufweisen, erhalten eine höhere Punktzahl (vgl. Abbildung 5.1).



Abbildung 5.1: Bewertung der Rezyklateigenschaften

Erreicht ein Material vergleichbare oder bessere Eigenschaften als das entsprechende Neuware-Material, werden acht Punkte vergeben. Auf dieser Basis kann bei einem Rezyklatanteil von über 50 % ein zusätzlicher Punkt vergeben werden. Bei 100 % Rezyklatanteil wird die Höchstpunktzahl von zehn Punkten erreicht, sofern ausreichende und verlässliche Informationen vorliegen. In der Praxis lässt sich dieses Bewertungsschema jedoch häufig nicht konsequent anwenden, da für viele Materialien keine ausreichenden Daten verfügbar sind. Zudem hat sich in späteren Untersuchungen gezeigt, dass die ursprünglich definierte Grenze für einen hohen Rezyklatanteil im Kontext des Automotive-Leitungssatzes nicht angemessen ist. Da in diesem Anwendungsbereich bereits ein Rezyklatanteil von über 50 % als sehr hoch einzustufen ist, wurde das Bewertungssystem entsprechend angepasst, um eine vergleichbare Bewertung aller Materialien zu gewährleisten.

Wie zuvor beschrieben, kann die Datenlage der verschiedenen Materialien in vier Klassen eingeteilt werden. Diese vier Klassen werden zugleich für die Bewertung der Materialeigenschaften angewendet. Materialien der Klasse 1 sind diejenigen, deren Eigenschaften den Einsatz im Automotive-Leitungssatz eindeutig gewährleisten. Mit zunehmender Klassennummer nimmt die Wahrscheinlichkeit ab, dass ein Material im Automotive-Leitungssatz eingesetzt werden kann. Materialien der Klasse 4 sind solche, deren Eigenschaften und Anwendungsbereiche stark von den Anforderungen des Automotive-Leitungssatzes abweichen. Die Punktebewertung der Materialeigenschaften erfolgt, wie bereits bei der Verfügbarkeit, auf einer Skala von 0 Punkten bis 10 Punkten. Die vier Klassen dienen als Basisbewertung:

- Klasse 1 = 8 Punkte
- Klasse 2 = 6 Punkte
- Klasse 3 = 4 Punkte

- Klasse 4 = 2 Punkte

Da sich die Datenlage und die Art der verfügbaren Informationen zwischen den einzelnen Materialien unterscheiden, kann die Bewertung im Einzelfall um bis zu ± 2 Punkte angepasst werden. Das bedeutet, dass Materialien der Klasse 1 beispielsweise eine Punktzahl zwischen 6 und 10 erreichen können und entsprechend auch die anderen Klassen innerhalb ihres jeweiligen Bereichs bewertet werden. Im idealen Fall liegen vollständige Informationen vor. Der nachhaltige Anteil des Materials ist bekannt und sehr hoch, die technischen Daten sind umfassend dokumentiert, ein Benchmark-Vergleich ist möglich und die Eignung für den Einsatz im Automotive-Leitungssatz ist nachgewiesen. Daher bilden insbesondere der Rezyklatgehalt und die Übereinstimmung der Materialeigenschaften mit den Anforderungen wesentliche Bewertungskriterien. Ein zu hoher Anteil an Rezyklat zu einer Verschlechterung der Materialeigenschaften [DHS26]. Durch eine umfassende Recherche konnte festgestellt werden, dass der Rezyklatgehalt bei Materialien, die im Bereich des Automotive-Leitungssatzes eingesetzt werden, in der Regel bereits ab etwa 20 % als hoch einzustufen ist. Wie die zusätzlichen Punkte im Einzelfall konkret vergeben oder abgezogen werden, hängt von der jeweiligen Datenlage und Argumentation ab und wird entsprechend begründet. Die Übersicht der Bewertung der identifizierten Rezyklateigenschaften ist in Tabelle 5.3 dargestellt.

Rezyklat	Hersteller	Produkt	Basispunkte	Endpunkte
PVC	Teknor Apex	Cycle-Tek®	6	7
PP	Murrplastik	EW-R-PP	8	8
PA 6	Envalior	Akulon® RePurposed	8	8
PA 6.6	Envalior	Durethan ECOA	8	8
PBT	Envalior	Pocan® ECOB	8	8
TPU	novoloop	Recycled+ TPU	6	7
(V)MQ	-	-	0	0
EPDM	Gradient compounds	-	2	2
XLPE	-	-	0	0
PET	Tesa	tesa® 61XXX	8	10
TPE	hexpol	Dryflex Circular	4	5

Tabelle 5.3: Bewertung der Eigenschaften von Rezyklaten

Das von Teknor Apex hergestellte rPVC Cycle-Tek® wird aufgrund der Angabe, dass das Material die Anforderungen von UL62 für Flexible Cords erfüllt, als grundsätzlich für den Einsatz in elektrischen Leitungen geeignet eingestuft. Da jedoch keine spezifischen Informationen zur Eignung im Automotive-Leitungssatz vorliegen und zudem unklar ist, welche genauen Materialeigenschaften von PVC für diese Anwendung erforderlich sind, wird das Material der Klasse 2 zugeordnet. Die Basispunktzahl beträgt daher 6 Punkte. Aufgrund des hohen Recyclinganteils von bis zu 50 %, der als

besonders positiv zu bewerten ist, wird ein zusätzlicher Punkt vergeben. Somit ergibt sich eine Gesamtbewertung von 7 Punkten.

Das von *Murrplastik Systemtechnik GmbH* hergestellte Wellrohr/Kabelschutzhaut aus rPP erfüllt die für den Einsatz im Automotive-Leitungssatz relevanten Anforderungen und wird daher der Klasse 1 zugeordnet, was 8 Basispunkte ergibt. Da der genaue Rezyklatgehalt des Materials nicht angegeben ist, wird ein Punkt abgezogen. Aufgrund der nachgewiesenen Eignung und der erfüllten Leistungsanforderungen wird jedoch ein Zusatzpunkt vergeben, sodass die Gesamtbewertung 8 Punkte beträgt.

In der von *Envalior* hergestellten PA 6-Produktreihe Akulon® RePurposed wurden drei Materialien mit dem Suffix BK identifiziert, die alle für den Einsatz im Automotive-Leitungssatz geeignet sind. Dabei handelt es sich um Varianten ohne Glasfaserverstärkung sowie mit 15 % bzw. 30 % Glasfaseranteil. Die Leistungsdaten dieser Materialien erfüllen die relevanten Anforderungen, jedoch wird kein konkreter Rezyklatanteil angegeben. Aus diesem Grund verbleibt die Bewertung bei den 8 Basispunkten.

Die von *Envalior* hergestellte Produktreihe Durethan® ECOA umfasst PA 6.6-Typen sowohl mit Rezyklatanteil als auch mit massenbilanziertem Anteil. Diese Materialien sind für den Einsatz in automotiven Hochtemperaturbereichen, unter der Motorhaube, in Kühlsystemen sowie in flamm-schutzmodifizierten E&E-Anwendungen geeignet. Die Produktreihe enthält Varianten mit einem Glasfaseranteil von bis zu 60 %. Ähnlich wie bei der oben genannten PA 6-Reihe von *Envalior* ist der genaue Rezyklatgehalt nicht angegeben, weshalb die Bewertung ebenfalls bei 8 Basispunkten bleibt.

Die von *Envalior* hergestellte PBT-Produktreihe Pocan® ECOB mit Glasfaser erfüllt die Anforderungen für den Einsatz im Automotive-Leitungssatzbereich. Sie enthält sowohl einen Rezyklatanteil als auch einen massenbilanzierten Anteil. Da jedoch auch hier kein konkreter Rezyklatgehalt angegeben ist, wird die Bewertung ebenfalls mit 8 Basispunkten vorgenommen.

Novoloop produziert ein rTPU mit einem Rezyklatanteil von mindestens 77 % (PIR), wofür in der Bewertung ein Zusatzpunkt für den hohen Recyclinganteil vergeben wird. Das Material wird derzeit überwiegend im Verpackungsbereich eingesetzt. Auf der Homepage veröffentlicht *Novoloop* zwar technische Daten zu verschiedenen Materialtypen, es fehlt jedoch ein Benchmark gegenüber Referenzwerkstoffen, anhand dessen überprüft werden kann, ob das Material die Anforderungen für den Einsatz in Automotive-Leitungssätzen erfüllt [NN25ae]. Nach Rücksprache mit *Novoloop* wurde bestätigt, dass das Material aus chemisch recycelten Rohstoffen hergestellt wird und seine Eigenschaften nahezu identisch mit denen von Neuware sind. Eine abschließende Bewertung der Eignung für den Einsatz in Automotive-Leitungssätzen erfordert jedoch eine weiterführende Abstimmung mit dem Hersteller.

Das von *Gradient Compounds* recycelte EPDM wird zu rEPDM weiterverarbeitet. Die Qualität des resultierenden Materials hängt vollständig vom EPDM-Ausgangsmaterial ab. Da nicht bekannt ist, in welchem Umfang die ursprünglichen Materialeigenschaften nach dem Recyclingprozess erhalten

bleiben, wird weder ein Auf- noch ein Abschlag vorgenommen. Somit verbleibt die Bewertung bei den 2 Basispunkten.

Das von *Tesa* hergestellte Klebeband Tesa® 61XXX wurde speziell für das Umwickeln und den Schutz von Automotive-Leitungssätzen entwickelt. Es enthält einen PCR-Anteil von mindestens 80 % und erfüllt die Anforderungen für den Einsatz im Automotive-Leitungssatzbereich vollständig, weshalb es mit 10 Basispunkten bewertet wird.

Die von *HEXPOL* hergestellte Produktreihe Dryflex® Circular umfasst TPE-Materialien mit Rezyklatanteil, die für Automobilanwendungen entwickelt wurden. Ein Typ dieser Reihe, der für Technical Parts vorgesehen ist, enthält 25 % PIR-Rezyklat. Es ist jedoch derzeit nicht eindeutig nachgewiesen, ob die Materialeigenschaften die Anforderungen für den Einsatz im Automotive-Leitungssatzbereich vollständig erfüllen, weshalb die Bewertung vorläufig zurückhaltend erfolgt.

Eine vergleichbare Bewertung wurde zudem für die biobasierten Ersatzmaterialien durchgeführt und ist in Tabelle 5.4 zusammengefasst.

Biomaterial	Hersteller	Produkt	Basispunkte	Endpunkte
PVC	LEONI	LIMEVERSE	8	7
PP	LEONI	LIMEVERSE	8	7
PA 6	Envalior	Akulon® Ultraflow K-FG3/C B-MB	6	7
PA 6.6	Envalior	Durethan® ECO	8	8
PBT	Envalior	Pocan® X-MB	8	8
TPU	Lubrizol	ESTANE® ECO	6	6
(V)MQ	-	-	-	-
EPDM	Arlanxeo	Keltan® Eco 5470	6	8
XLPE	-	-	-	-
PET	Envalior	Pocan® ECOT	8	6
TPE	hexpol	Dryflex® Green	4	5

Tabelle 5.4: Bewertung der Eigenschaften von Biomaterial

Die Produktserie LIMEVERSE (PVC, PP) von LEONI wurde speziell für den Einsatz in Automotive-Leitungssätzen konzipiert und basiert auf einer Kombination aus biobasierten und massenbilanzierten Kunststoffen. Die Materialeigenschaften erfüllen somit grundsätzlich die Anforderungen für den Einsatz im Leitungssatzbereich. Da jedoch der genaue Anteil der nachhaltigen Komponenten nicht angegeben ist und keine detaillierten Produktinformationen vorliegen, wird von der Basispunkte ein Punkt abgezogen.

Das von *Envalior* hergestellte PA 6-Material Akulon® Ultraflow K-FG3/C B-MB ist für Anwendungen im Automobil- und Elektronikbereich vorgesehen und enthält sowohl einen biobasierten Anteil als auch massenbilanzierte Komponenten. Um die Eignung für den Einsatz im Automotive-Leitungssatz zu

beurteilen, wurde ein Leistungsvergleich mit dem Benchmark-Material durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen, dass die mechanischen Eigenschaften des Materials dem Benchmark ebenbürtig oder teilweise sogar überlegen sind.

Bei den weiteren von *Envalior* hergestellten Biomaterialien (PA 6.6 und PBT) ist der biobasierte Anteil ebenfalls nicht eindeutig angegeben, weshalb keine Zusatzpunkte vergeben werden. Besonders zu beachten ist das Material Pocan® EDCOT, das neben PET auch PBT enthält. Obwohl seine technischen Eigenschaften grundsätzlich für den Einsatz in Automotive- und elektronischen Anwendungen geeignet sind, entspricht es nicht der Zielsetzung dieser Untersuchung. Diese konzentriert sich auf den Einsatz von PET als Wickelbandmaterial im Automotive-Leitungssatz. Dabei ist zu berücksichtigen, dass PET in diesem Anwendungsbereich keine Standardlösung darstellt, da üblicherweise PVC oder Baumwollvlies eingesetzt werden. Die Betrachtung von PET erfolgt daher im Rahmen dieser Untersuchung als alternative Materialoption. Aus diesem Grund werden zwei Punkte abgezogen.

Das von der Firma *Lubrizol* hergestellte TPU-Material ESTANE® ECO enthält einen Anteil von 28 % an erneuerbaren Rohstoffen, wobei der genaue Anteil biobasierter Komponenten nicht spezifiziert ist. Im Vergleich zum entsprechenden Benchmark-Material zeigen sich keine signifikanten Unterschiede in den mechanischen Eigenschaften.

Das biobasierte EPDM Keltan® Eco 5470 von *Arlanxeo* weist einen hohen Bioanteil von bis zu 70 % auf. Ob das Material die spezifischen Anforderungen für den Einsatz in Automotive-Dichtungen erfüllt, bedarf einer Abstimmung mit dem Hersteller. Nach den verfügbaren technischen Daten erscheinen die Eigenschaften mit dem Benchmark vergleichbar.

Das von *Hexpol* hergestellte biobasierte TPE Dryflex® Green weist einen sehr hohen Bioanteil von über 90 % auf. Ob die technischen Eigenschaften den Anforderungen für den Einsatz im Automotive-Leitungssatz entsprechen, muss in Abstimmung mit dem Hersteller weiter überprüft werden. Aufgrund des besonders hohen Bioanteils wird in der Bewertung ein zusätzlicher Punkt vergeben.

6 Besonderheiten bei der Produktion und Verarbeitung

In diesem Kapitel werden aus verschiedenen Perspektiven, Materialverhalten und verarbeitungs-, anlagen- sowie sicherheitstechnische Aspekte, zunächst die allgemeinen Herausforderungen bei der Produktion und Verarbeitung von Rezyklaten und biobasierten Materialien diskutiert. Anschließend wird auf die im Rahmen dieser Studie identifizierten, für den Einsatz im Automotive-Leitungssatz potenziell geeigneten Rezyklate und Biowerkstoffe eingegangen, um deren verarbeitungsspezifische Besonderheiten zu analysieren. Abschließend erfolgt eine Bewertung dieser Verarbeitungseigenschaften.

6.1 Besonderheit der Rezyklatproduktion und -verarbeitung

Bis heute liegen zahlreiche Studien zu Rezyklaten vor, die die Unterschiede zwischen der Verarbeitung von Rezyklaten und der Verarbeitung von Neuware belegen. Das Materialverhalten beeinflusst das Verarbeitungsverhalten unmittelbar, sodass vor der Rezyklatverarbeitung gegebenenfalls anlagen- und verarbeitungstechnische Anpassungen erforderlich sind [DHS26].

Nach [SS20] besteht eines der größten Probleme bei der Verarbeitung von Rezyklaten in der durch Kettenabbau verursachten Verringerung der Prozessstabilität sowie der mechanischen Eigenschaften. Der Einbau von Filtrationselementen kann die Prozessstabilität in gewissem Maße verbessern. Darüber hinaus lässt sich das Verarbeitungsverhalten durch die Anpassung von Prozessparametern und die Zugabe von Additiven, wie Stabilisatoren und Kettenverlängerern, optimieren. Da Rezyklate häufig noch Additivreste enthalten, entstehen bei der erneuten Verarbeitung zusätzliche flüchtige organische Verbindungen (VOC) die teilweise gesundheitsschädlich sein können und unangenehme Gerüche verursachen.

Untersuchungen an kleinen Kunststoffrecyclingbetrieben zeigen, dass die Konzentration von VOC dort im Vergleich zu herkömmlichen Kunststoffverarbeitungsbetrieben, insbesondere in den Trocknungs- und Schmelzzonen, deutlich erhöht ist. Daher sind aus anlagentechnischer Sicht Maßnahmen wie die Verbesserung der Belüftung sowie zusätzliche Entgasungsstufen erforderlich. Ergänzend können persönliche Schutzmaßnahmen, wie das Tragen von Atemschutzmasken, sinnvoll sein. Eine langfristige Exposition gegenüber hohen VOC-Konzentrationen kann das Risiko gesundheitlicher Beeinträchtigungen erhöhen [AAT+21].

6.2 Bewertung der Besonderheiten der Rezyklatproduktion und -verarbeitung

Die oben beschriebenen Besonderheiten der Rezyklatverarbeitung beziehen sich nicht auf eine spezifische Rezyklatart oder einen bestimmten Anwendungsbereich, sondern umfassen Rezyklate unterschiedlicher Qualität aus verschiedenen Quellen, einschließlich solcher aus Verpackungsabfällen des „Gelben Sack“. In der vorliegenden durchgeführten Studie werden hingegen Rezyklate betrachtet, die für Anwendungen mit höheren Anforderungen an die Eigenschaften und Prozessstabilität vorgesehen sind. Diese Materialien können bereits Additive oder Blends enthalten, die ihre Eigenschaften und die Verarbeitungsstabilität gezielt verbessern. Beispielsweise zeigen mehrere der in dieser Studie identifizierten, für den Einsatz im Automotive-Leitungssatz geeigneten Materialien, dass ihre Leistungsfähigkeit häufig auf Blends mit Neuware oder auf Verstärkung durch Glasfasern beruht. Um zu überprüfen, ob sich deren Verarbeitungseigenschaften von denen der jeweiligen Neuware unterscheiden, wurden in dieser Studie die in den TDS angegebenen Prozessparameter, die Schmelztemperatur sowie der MFR-Wert (Melt Flow Rate) analysiert. Zusätzlich wurden die in den Sicherheitsdatenblättern (SDS) aufgeführten Verarbeitungshinweise berücksichtigt und mit den Daten der entsprechenden Neuware verglichen.

Weisen die technischen Daten und Prozessbedingungen keine Abweichungen zur Neuware auf, erhält das Material 10 Punkte. Treten jedoch Unterschiede auf, erfolgt eine Abwertung entsprechend des durch die Verwendung von Rezyklat verursachten zusätzlichen Aufwands. Die jeweilige Begründung wird im Bewertungsabschnitt erläutert. Da sich der Produktionsprozess von Rezyklaten grundsätzlich vom Herstellungsprozess der Neuware unterscheidet, ist ein quantitativer Vergleich in diesem Bereich nur bedingt möglich. Es wird davon ausgegangen, dass im Rahmen der Rezyklatproduktion üblicherweise die Schritte Zerkleinern, Spülen und Trocknen durchgeführt werden. Für diese allgemein gültigen Arbeitsschritte wurde kein Punktabzug vorgenommen. Falls im Produktionsprozess darüber hinaus zusätzliche oder besonders aufwändige Verfahrensschritte erforderlich sind, wird dies im Einzelnen begründet und führt entsprechend zu einer Abwertung. Bei fehlenden Vergleichsdaten wird eine Bewertung mit 5 Punkten vorgenommen.

Die resultierende Bewertung ist in Tabelle 6.1 zusammengefasst.

Rezyklat	Hersteller	Produkt	Punkte	Begründung
PVC	Teknor Apex	Cycle-Tek®	5	Keine ausreichenden Informationen
PP	Murrplastik	EW-R-PP	5	Keine ausreichenden Informationen
PA 6	Envalior	Akulon® RePurposed	10	Keine Abweichung zu Neuware-Material
PA 6.6	Envalior	Durethan ECOA	10	Keine Abweichung zu Neuware-Material
PBT	Envalior	Pocan® ECOB	10	Keine Abweichung zu Neuware-Material
TPU	novoloop	Recycled+ TPU	7	rTPU Herstellung aufwendig keine Abweichung bei der Verarbeitung
(V)MQ	-	-	0	Kein geeignetes Rezyklat vorhanden
EPDM	Gradient compounds	-	7	rEPDM Herstellung aufwendig keine Abweichung bei der Verarbeitung
XLPE	-	-	0	Kein geeignetes Rezyklat vorhanden
PET	Tesa	tesa® 61XXX	5	Keine ausreichenden Informationen
TPE	hexpol	Dryflex Circular	5	Keine ausreichenden Informationen

Tabelle 6.1: Bewertung der Besonderheiten der Rezyklatproduktion und -verarbeitung

Da die oben genannten Bewertungskriterien ausschließlich auf den von den Herstellern bereitgestellten Informationen basieren, müssen die tatsächlichen Produktions- und Verarbeitungseigenschaften der Materialien entweder durch direkte Rücksprache mit den Herstellern oder in der praktischen Anwendung noch verifiziert werden. Insgesamt zeigt sich, dass die Bewertung aufgrund der Datenlage sehr unterschiedlich ausfällt: Entweder weisen die Materialien laut Herstellerangaben keine Abweichungen zur Neuware auf, oder es liegen nicht genügend Informationen für eine detaillierte Beurteilung vor. Eine Ausnahme bildet das von *Gradient Compounds* hergestellte rEPDM. Zwar gibt das Unternehmen an, dass das Material hinsichtlich seines Verarbeitungsverhaltens keine

Unterschiede zur Neuware zeigt, jedoch ist der Produktionsprozess des rEPDM aufgrund des erforderlichen Devulkanisationsschritts deutlich komplexer. Aus diesem Grund wurde hierfür eine Abwertung um drei Punkte vorgenommen.

6.3 Besonderheiten der biobasierten Polymerproduktion und -verarbeitung

Biobasierte, aber nicht abbaubare Materialien unterscheiden sich in ihrer Herkunft grundsätzlich von erdölbasierten Polymeren. Insbesondere die Drop-In-Typen weisen jedoch identische chemische Strukturen wie ihre petrochemischen Gegenstücke auf. Daher zeigen sie im Materialverhalten nur geringe Abweichungen gegenüber ihren petrochemisch hergestellten Pendants.

Nach Literaturrecherche und Gesprächen mit mehreren Herstellern biobasierter Materialien lässt sich feststellen, dass auch die Verarbeitungsprozesse weitgehend identisch und keine zusätzlichen Prozessschritte erforderlich sind. Abhängig von der spezifischen biobasierten Rohstoffquelle können jedoch Unterschiede in der Empfindlichkeit gegenüber Feuchtigkeit, UV-Strahlung und Temperatur auftreten, wodurch eine Anpassung einzelner Prozessparameter notwendig sein kann [NN25af]. Die genauen Unterschiede sollten in enger Abstimmung mit den jeweiligen Materialherstellern weiter untersucht werden.

6.4 Bewertung der Besonderheiten bei der Produktion und Verarbeitung von Biomaterialien

Zur Bewertung der Besonderheiten biobasierter Materialien wurde prinzipiell die gleiche Methode wie bei den Rezyklaten (s. Kapitel 6.2) angewendet. Wenn keine ausreichenden Informationen vorliegen, erhält das Material 5 Punkte. Kann das Material hingegen in der Verarbeitung mit petrochemisch basierten Materialien gleichgesetzt werden, werden 10 Punkte vergeben. In Tabelle 6.2 sind die Ergebnisse der Bewertung dargestellt.

Biomaterial	Hersteller	Produkt	Punkte	Begründung
PVC	LEONI	LIMEVERSE	5	Keine ausreichenden Informationen
PP	LEONI	LIMEVERSE	5	Keine ausreichenden Informationen
PA 6	Envalior	Akulon® Ultraflow K-FG3/C B-MB	10	Keine Abweichung zum Referenzmaterial aus petrochemischer Neuware
PA 6.6	Envalior	Durethan® ECO	10	Keine Abweichung zum Referenzmaterial aus petrochemischer Neuware
PBT	Envalior	Pocan® X-MB	10	Keine Abweichung zum Referenzmaterial aus petrochemischer Neuware
TPU	Lubrizol	ESTANE® ECO	10	Keine Abweichung zum Referenzmaterial aus petrochemischer Neuware
(V)MQ	-	-	-	-
EPDM	Arlanxeo	Keltan® Eco 5470	10	Keine Abweichung zum Referenzmaterial aus petrochemischer Neuware
XLPE	-	-	-	-
PET	Envalior	Pocan® ECOT	10	Keine Abweichung zum Referenzmaterial aus petrochemischer Neuware
TPE	hexpol	Dryflex® Green	10	Keine Abweichung zum Referenzmaterial aus petrochemischer Neuware

Tabelle 6.2: Bewertung der Besonderheiten bei der Produktion und Verarbeitung von Biomaterialien

Bei der Untersuchung der Besonderheiten biobasierter Materialien während der Verarbeitung zeigte sich, dass die übrigen Materialien mit Ausnahme der Produktreihe LIMEVERSE von *LEONI*, zu der bislang keine verarbeitungs-spezifischen Informationen verfügbar sind, keine signifikanten Unterschiede im Vergleich zu ihren konventionellen Referenzmaterialien desselben Herstellers bzw. derselben Produktlinie aufweisen. Lediglich bei einigen Materialien ist eine Anpassung der Prozesstemperatur um etwa 10 bis 20 °C erforderlich. Insgesamt kann die Verarbeitung jedoch als weitgehend identisch mit der von konventionellen Materialien bewertet werden.

7 Gesamtbewertung

Der technologische Reifegrad (Technology Readiness Level, TRL) wurde ursprünglich in den 1970er-Jahren von der NASA entwickelt, um den Entwicklungsstand von Raumfahrttechnologien systematisch zu bewerten. Das Bewertungssystem umfasst neun Stufen (TRL 1 – 9), wobei ein höherer Wert einen weiter fortgeschrittenen Entwicklungsstand kennzeichnet [OEJ15]. Da die Bewertung aus externer Perspektive erfolgt, sind die verfügbaren Informationen zum Material selbst sowie zu dessen Forschungs- und Marktreife häufig begrenzt. Eine direkte Anwendung des TRL-Systems ist daher nicht möglich. Stattdessen dient das TRL-Konzept als Orientierung, auf deren Grundlage ein eigenes Gesamtbewertungssystem entwickelt wurde, das eine grobe Abschätzung des Reifegrads ermöglicht.

Da die in dieser Studie betrachteten Materialeigenschaften sowie die Besonderheiten bei Produktion und Verarbeitung eng an die für die Reifegradbewertung relevanten Kriterien angelehnt sind, werden diese Aspekte zusammen mit der Verfügbarkeit als zentrale Bewertungskriterien herangezogen. Die Gesamtbewertung für Ersatzmaterialien im Automotive-Leitungssatz wird daher auf Basis der drei Aspekte Eigenschaften, Verarbeitbarkeit und Verfügbarkeit definiert. Diese drei Aspekte wurden bereits separat bewertet. Zur Bestimmung der Gesamtbewertung werden sie nun miteinander kombiniert, wobei jedem Aspekt ein individueller Gewichtungsfaktor zugeordnet wird. Auf diese Weise lässt sich eine gewichtete Gesamtbewertung der drei Teilaspekte ermitteln, die eine vergleichende Abschätzung des Reifegrads ermöglicht.

Bei der Gesamtbewertung für den Einsatz von Ersatzmaterialien im Automotive-Leitungssatzbereich gilt das Vorhandensein eines nachhaltigen Ersatzmaterials als Voraussetzung. In dem Bewertungssystem zur Verfügbarkeit wird zudem die weltweite Verfügbarkeit eines Ersatzmaterials berücksichtigt, wodurch sich der Reifegrad nachhaltiger Ersatzmaterialien auf makroskopischer Ebene in gewissem Maße widerspiegelt. Auch wenn es bislang keine konkreten Anwendungsbeispiele eines bestimmten Ersatzmaterials im Leitungssatzbereich gibt, kann die Existenz mehrerer Anbieter desselben Materials auf dem Weltmarkt als positiver Indikator gewertet werden. Je mehr globale Lieferanten vorhanden sind, desto größer sind die Möglichkeiten, potenzielle Anwendungen im Automotive-Leitungssatzbereich mit verschiedenen Herstellern zu diskutieren und weiterzuentwickeln. Daher wird der Verfügbarkeit mit 60 % die höchste Gewichtung im Bewertungssystem zugewiesen. An zweiter Stelle folgt die Erfüllung der anwendungsspezifischen Leistungsanforderungen gemäß den Standards des Automotive-Leitungssatzes mit einer Gewichtung von 30 %. Zu vielen Materialien liegen bislang nur begrenzte Informationen über deren Verarbeitbarkeit vor. Da jedoch Gespräche mit verschiedenen Herstellern eine grundsätzliche Vergleichbarkeit zur herkömmlichen Neuware bestätigten, wurde dieses Kriterium mit lediglich 10 % gewichtet. So wird dessen Einfluss auf die Gesamtbewertung reduziert. Je umfassender und konkreter die verfügbaren Informationen sind, desto höher ist die Aussagekraft und Zuverlässigkeit dieses Bewertungssystems. In Tabelle 7.1 und

Tabelle 7.2 sind die zusammenfassende Gesamtbewertung von Rezyklaten und Biomaterialien nach absteigender Punktzahl geordnet.

Rezyklat	Verfügbarkeit	Eigenschaften	Verarbeitbarkeit	Gesamtbewertung
PET	10	10	5	9,5
PP	10	8	5	8,9
PBT	9	8	10	8,8
PA	8,5	8	10	8,5
PVC	6	7	5	6,2
TPU	5	7	7	5,8
TPE	5	5	5	5,0
EPDM	5	2	7	4,3
XLPE	1	0	0	0,6
(V)MQ	0	0	0	0,0

Tabelle 7.1: Gesamtbewertung von Rezyklaten

Biomaterial	Verfügbarkeit	Eigenschaften	Verarbeitbarkeit	TRL
PBT	10	8	10	9,40
PA	8	7,5	10	8,05
PVC	9	7	5	8,00
PP	8	7	5	7,40
TPE	8	5	10	7,30
EPDM	6	8	10	7,00
PET	6	6	10	6,40
TPU	5	2	10	6,40
XLPE	1	0	0	0,60
(V)MQ	0	0	0	0,00

Tabelle 7.2: Gesamtbewertung von Biomaterialien

Im Rahmen dieser Studie konnten zahlreiche Ersatzmaterialien identifiziert werden, die sich potenziell für den Einsatz im Automotive-Leitungssatz eignen. Unter anderem verfügen *Toray*, *Teknor Apex*, *LEONI* und *Envalior* bereits über entsprechende Produkte oder führen anwendungsbezogene Entwicklungsarbeiten in diesem Bereich durch. Die Beschaffung detaillierter Informationen, insbesondere zu Verarbeitungsverhalten, TDS oder SDS, gestaltet sich für Dritte jedoch oft schwierig. Da die Studie ausschließlich zu Recherchezwecken durchgeführt wurde, konnten gegenüber den Herstellern keine konkreten Bedarfsangaben gemacht werden. Viele Unternehmen gaben an, technische Detailinformationen nur bei größeren Abnahmemengen oder spezifischen Projektanfragen bereitzustellen. Dies führte dazu, dass für bestimmte Materialien keine ausreichenden Informationen

vorlagen, was eine vollständige Bewertung erschwerte. Unter realen Anwendungsbedingungen mit einem klar definierten Materialbedarf und konkreten Abnahmemengen, wäre der Zugang zu relevanten Daten deutlich einfacher, wodurch das entwickelte Bewertungssystem eine noch höhere Aussagekraft erreichen könnte. Das in dieser Arbeit vorgestellte Bewertungsverfahren bietet dennoch einen strukturierten Ansatz zur systematischen Beurteilung potenzieller Ersatzmaterialien für den Automotive-Leitungssatz. Es kann bei zukünftigen Anwendungen flexibel erweitert und an neue Datenlagen angepasst werden. Beispielsweise könnte sich die Verfügbarkeit auch auf ein bestimmtes Material beziehen.

8 Kosten

Die Recherche aktueller Marktvergleichspreise bzw. Materialkosten und die daraus folgende Bewertung stellt eine Herausforderung im Rahmen der durchgeführten Studie dar, da Preise in Abhängigkeit der genauen Materialzusammensetzung (Additivierung, Füllstoffe etc.), der Abnahmemenge und der Gesamtsmarktsituation stark variieren können. Zudem gibt es insgesamt deutlich weniger Preisinformationen für Biokunststoffe als für Neuware oder Rezyklate. Ergänzend ist die Datenerhebung für Standardthermoplaste deutlich umfassender möglich als z. B. für Sondermaterialien wie (V)MQ oder XLPE.

Um eine möglichst vergleichbare Datengrundlage aufbauen zu können, wird als vorrangige Quelle die *Kunststoff Information* (KI) genutzt. Diese verfügt über ein branchenweites Netzwerk, das eine marktnahe Berichterstattung ermöglicht. Der durch die KI angegebene Preis entspricht einem westeuropäischen Durchschnittspreis, wobei es sich um Bruttopreise bei Lieferung handelt, ohne Berücksichtigung von Rabatten oder ähnlichen Abzügen. Für Rezyklate gilt, dass gängige Standardtypen in Westeuropa ab einer Abnahmemenge von 1 t betrachtet werden, bei denen es sich um anwendungsfertige Granulate handelt, die auf Basis von Haushaltabfallsammlungen oder gewerblichen Abfallsammlungen hergestellt werden [NN25ag]. Die Kostenentwicklung für Neuware und Rezyklate wird über die Zeit als gemittelter Wert dargestellt. Zudem wird der Vergleichspreis zum Stand August 2025 tabellarisch angegeben.

Da nicht alle Materialien in der KI-Datenbank geführt werden, werden teilweise zudem aktuelle Angebote des Plastickers herangezogen. Dieser erstellt Monatspreisübersichten aus Angeboten der *plasticter-Rohstoffbörse*. Auch hier ist zu beachten, dass die Preise nicht unbedingt den durchschnittlichen Marktpreisen entsprechen müssen [NN25ah]. Um eine bessere Einordnung der angegebenen Preise zu ermöglichen, wird die Anzahl der zugrunde liegenden Angebote ergänzend angegeben. Diese beziehen sich häufig auf Restbestände.

Da keine Preise für biobasierte Kunststoffe in öffentlich zugänglichen Portalen geführt sind, werden Einzelpreise bei spezifischen Herstellern recherchiert und angefragt. Viele Anbieter vermarkten jedoch nur, dass ein Ersatzmaterial mit einem Anteil nachwachsender Rohstoffe zwischen X und Y Prozent möglich ist. Die spezifische Preisauskunft ist allerdings von der entsprechenden Konfiguration des

Materials (Additive, Farbe, gewünschter biobasierter Anteil, Abnahmemengen etc.) abhängig und können daher abweichen. Die im Folgenden dargestellten Preisdaten biobasierter oder biomassenbilanzierter Materialien stammen aus Einzelanfragen an spezifische Hersteller. Da auch in diesem Kontext keine genaue Spezifikation der Anfrage möglich war, wurden durch die Hersteller meist nur Richtpreisbereiche angegeben.

Im Zeitraum seit 2019 zeigen sich gemäß den Daten der *Kunststoff Information* sinkende Kunststoffpreise, was vor allem auf die gesunkenen Energiekosten zurückzuführen ist [NN25aj]. Zudem zeigen viele „allgemeine Kostentrends“ aktuell niedrigere Preise für Rezyklate als für Neuware. Weiterführende Recherche, Analysen von Pressemitteilungen sowie Rücksprachen mit Recyclern und Materialherstellern zeigen jedoch, dass dieser Eindruck nicht die tatsächlichen Marktverhältnisse widerspiegelt, da die Nachfrage nach qualitativ hochwertigen Rezyklaten hoch ist (besonders PIR), aber die Kapazitäten bislang nicht ausreichend ausgebaut sind. Zusätzlich setzen sich die Kosten für Rezyklate anders zusammen als die für Neuware. Abbildung 8.1 zeigt dies vereinfacht auf.

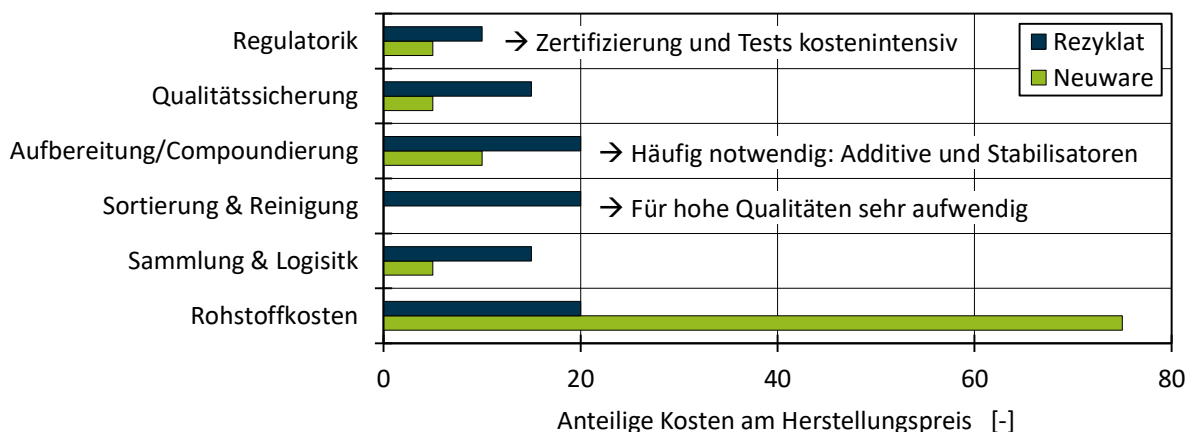


Abbildung 8.1: Vergleich der Kostenzusammensetzung bei Neuware und Rezyklaten [Amb19, Mel25, NN25aj, NN25ak]

Rezyklate sind unter anderem teurer, weil ihre Gewinnung technisch und logistisch aufwendiger ist als die Herstellung von Neuware aus fossilen Rohstoffen, die in hocheffizienten, global optimierten Prozessen abläuft. Dazu kommen ein begrenztes Angebot und zusätzliche Qualitätsanforderungen. Dadurch werden Preise für Neuware tendenziell stärker durch allgemeine Marktentwicklungen und Rohstoffpreise beeinflusst als Rezyklatpreise [Hug25; NN23a; NN24k; NN23b].

8.1 Datenerhebung und Bewertung

Im Folgenden werden die Preisentwicklungen für die kommerziell erhältlichen und über die *Kunststoff Information* zugänglichen Neuware- und Rezyklatmaterialien seit 2020 grafisch dargestellt. Das Rezyklat ist jeweils mit „RE“ gekennzeichnet. Vergleichspreise können für PP, PET, PA 6 sowie PA 6.6 angegeben werden. Für PVC, PBT und PUR sind ausschließlich die Preisentwicklungen für Neuware verfügbar. Diese sind in Abbildung 13.1 im Anhang dargestellt. Soweit Informationen über

vergleichbare Biokunststoffpreise eingeholt werden konnten, werden diese im Text ergänzt. Die Preisinformationen entsprechen der Datenbasis August 2025.

Die Preisentwicklung für **PP** ist in Abbildung 8.2 dargestellt. Im Vergleich zeigen sich durchschnittlich niedrigere Preise für Rezyklat im Vergleich zu Neuware, wobei Copolymere sowohl bei Neuware als auch bei Rezyklaten teurer sind.

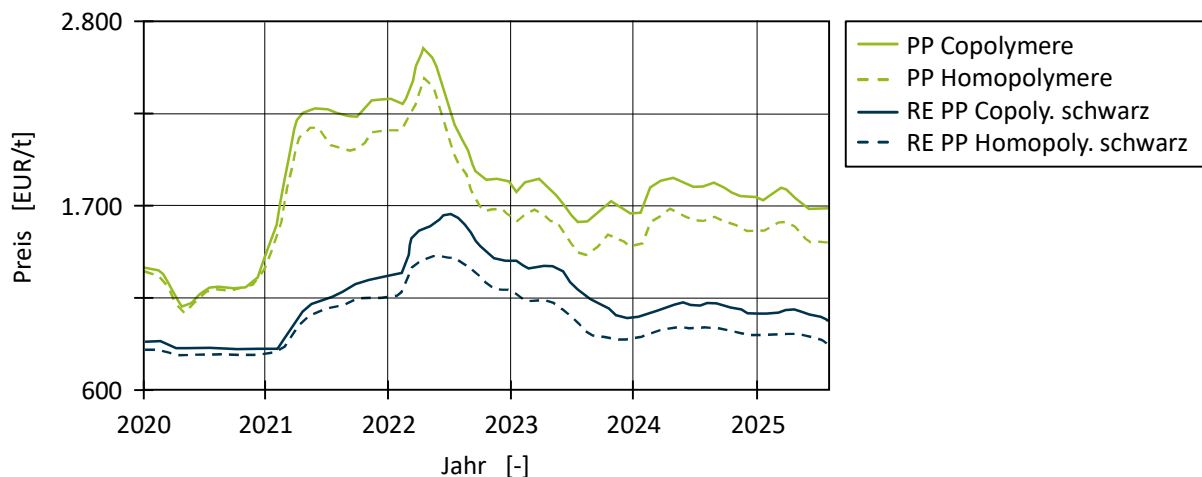


Abbildung 8.2: Preisentwicklung von PP Neuware sowie Rezyklat seit 2020 [KI]

Die durch den Auftraggeber zur Verfügung gestellten Datenblätter beziehen sich auf ein PP-Copolymer, welches im Folgenden als Anhaltspunkt gewählt wird, sodass sich der durchschnittliche Neuware-Kilopreis zu 1,60 € errechnet, während der Preis für Rezyklate bei 1,00 €/kg liegt. Für Bio-PP konnten keine Absolutpreise ermittelt werden. Eine Anfrage bei einem Hersteller von Neuware-PP sowie biomassenbilanziertem PP hat ergeben, dass bei biomassenbilanzierten Ersatzmaterialien mit einem Aufpreis von bis zu 20 % zu rechnen sein kann.

Für **PA 6** zeigen sich ähnliche Trends wie für PP, allerdings ein insgesamt deutlich höheres Preisniveau. Während sich für Neuware ein Durchschnittspreis von 2,90 €/kg – 3,50 €/kg (je nach Farbe) ergibt, liegen die Preise von PA 6-Rezyklat mit 2,50 €/kg – 2,8 €/kg aktuell darunter (vgl. Abbildung 8.3).

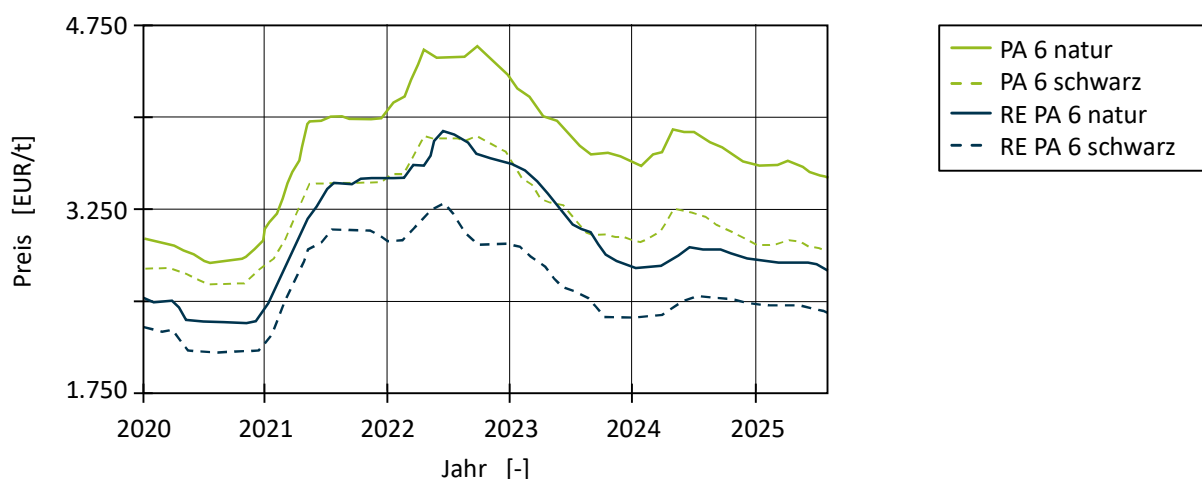


Abbildung 8.3: Preisentwicklung von PA 6 Neuware sowie Rezyklat seit 2020 [KI]

Für Neuware und Rezyklat zeigt sich gleichermaßen, dass der Preis von naturfarbenem Material höher als der von schwarz eingefärbtem ist. Dies lässt sich auf verschiedene Faktoren zurückführen, die in Abbildung 8.4 zusammengefasst sind.

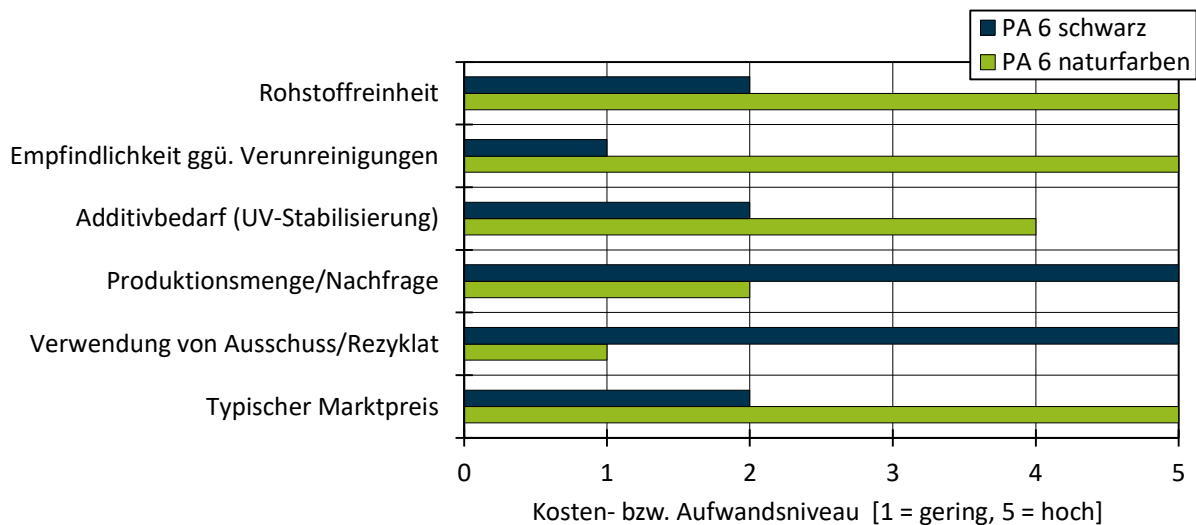


Abbildung 8.4: Kosten- bzw. Aufwandsniveau von schwarzem und naturfarbenem PA 6 im Vergleich [AGL24, NN25a], [NN25am, NN25an, Sha25]

Auch wenn schwarz eingefärbte Materialien kostengünstiger sind, bringen sie Nachteile im Hinblick auf das spätere Recycling mit sich. Dieser Aspekt wird in Kapitel 10 weiterführend diskutiert.

Die Entwicklung des Preises von **PA 6.6** in Abbildung 8.5 zeigt einen ähnlichen Verlauf, wobei PA 6.6 insgesamt teurer als PA 6 ist. Der Glasfaseranteil zeigt einen untergeordneten Einfluss auf den resultierenden Preis. Ähnlich wie bei PA 6 beeinflusst die Materialfarbe den Preis. Während der Durchschnittspreis für Neuware bei ca. 5,30 €/kg liegt, ergibt sich aktuell ein Rezyklatpreis von ca. 3,00 €/kg.

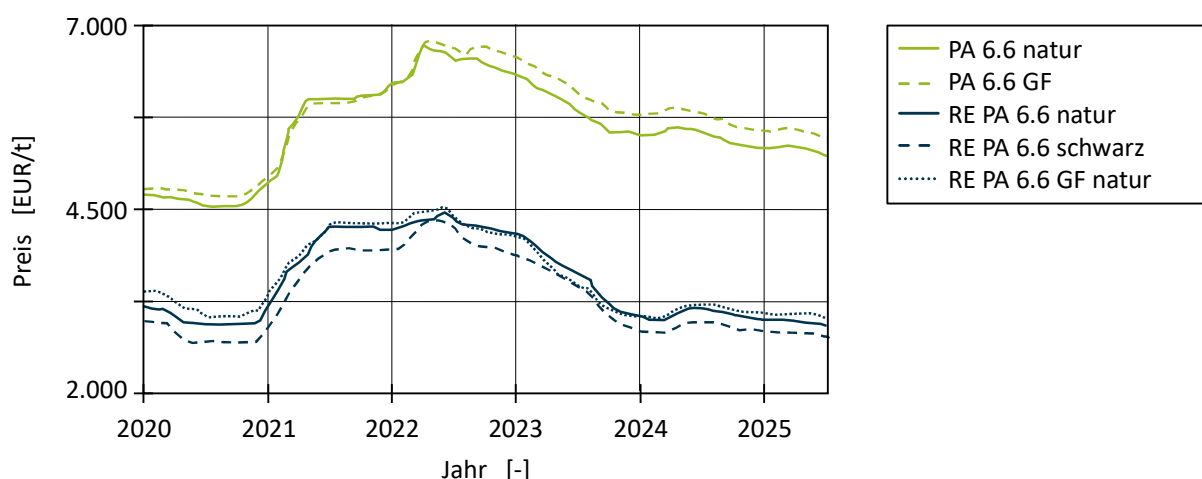


Abbildung 8.5: Preisentwicklung von PA 6.6 Neuware sowie Rezyklat seit 2020 [KI]

Im Gegensatz zu den gezeigten Preisverläufen ergab die direkte Preisanfrage bei einem Hersteller, der sowohl PA 6 als auch PA 6.6 Neuware und Rezyklat produziert und vertreibt, dass die Preise für

Rezyklate und Neuware sehr ähnlich sind. Für Großmengen sei Rezyklat $< 4\%$ teurer als eine vergleichbare Neuware. Biomassenbilanziertes PA 6 bzw. PA 6.6 seien im Vergleich etwa 30% teurer. Für Bio-PA 6/6.6 konnten keine direkten Vergleichspreise recherchiert werden. Allerdings wurde von der Firma *Natureplast* ein biobasiertes PA 11 als Ersatzmaterial vorgeschlagen. Dieses liegt bei einem Kilopreis von 1,99 € (Abnahmemenge > 1 t).

Die Datenbank der *Kunststoff Information* inkludiert weiterhin Preise für **PET** Neuware und Rezyklate. Hierbei liegt der Fokus allerdings auf PET für Verpackungsanwendungen und für die Rezyklate wird zusätzlich im Hinblick auf Transparenz und Form (Granulat vs. Flakes) unterschieden. In Abbildung 8.6 wird deutlich, dass PET-Rezyklat tendenziell teurer als Neuware ist. Zwar bieten Flakes eine teilweise günstigere Alternative. Diese sind in der Verarbeitung allerdings mit zusätzlichen Herausforderungen während der Materialförderung und dem Einzug verbunden [FHK+25].

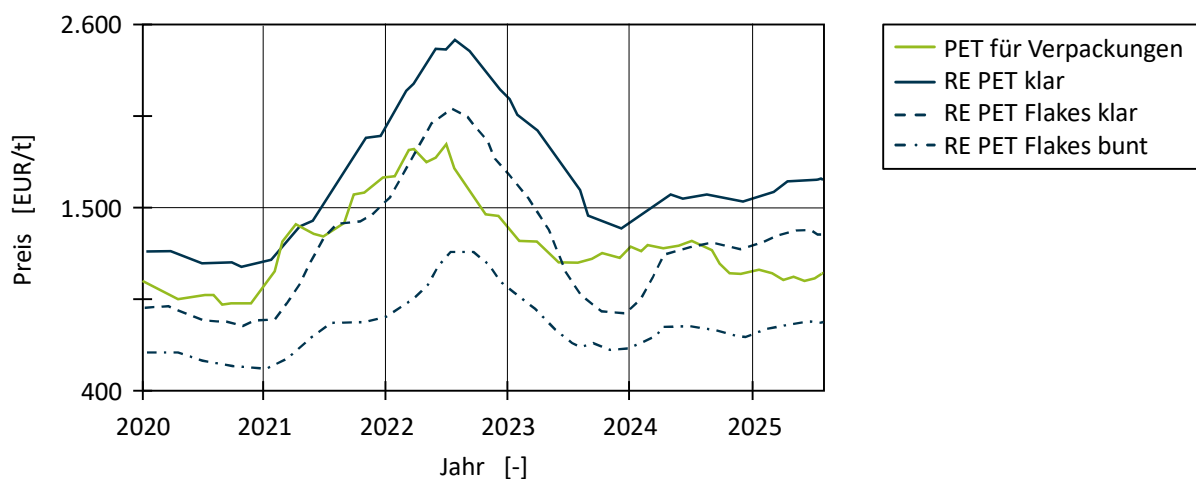


Abbildung 8.6: Preisentwicklung von PET Neuware sowie Rezyklat seit 2020 [KI]

Auch bei weiteren Herstelleranfragen zeigt sich ein geringfügig höherer Preis von RE PET gegenüber Neuware (ca. 2% – 3%). Häufig wird zudem ein PET/PBT-Rezyklat-Blend angeboten, welches $< 4\%$ teurer ist. Eine biobasierte Alternative bietet die Firma *Natureplast* mit 3,65 €/kg (bei Abnahme von 10 Big Bags).

8.2 Zwischenfazit

Die Kostenentwicklung von Rezyklaten und Biokunststoffen lässt sich für die meisten Materialklassen nur in durchschnittlicher Form darstellen. Eine präzise Vergleichskostenkalkulation ist nicht möglich, da zahlreiche Einflussfaktoren, wie Additivierung, der gewählte Rezyklat- bzw. Bioanteil sowie spezifische Materialanforderungen, eine entscheidende Rolle spielen. Tendenziell liegen die Preisunterschiede zwischen Neuware und Rezyklaten bei Angeboten desselben Herstellers meist im Bereich von etwa $+5\%$ – 10% , während biomassenbilanzierte Materialien häufig mit einem Preisaufschlag von rund 20% – 30% gegenüber erdölbasierten Virginmaterialien verbunden.

Im Rahmen der Untersuchung wurden direkte Anfragen an verschiedene Hersteller, unter anderem von TPE, PP, PET und PA, gestellt. Die dargestellten Daten sollten lediglich als Richtwerte verstanden werden. Alle befragten Hersteller betonten, dass eine individuelle Anpassung des Materials an die jeweilige Anwendung im direkten Austausch sinnvoll und notwendig ist. Gemeinsam mit der Abnahmemenge beeinflusst dies maßgeblich den endgültigen Preis.

9 Umwelteinflüsse

Im Folgenden werden unterschiedliche Umwelteinflüsse beleuchtet, die beim Ersatz von Neuware durch Biokunststoffe oder Rezyklate beachtet und analysiert werden müssen. Der Fokus wird im Anschluss auf die Ökobilanz bzw. vorrangig den CO₂-Fußabdruck als Kennzahl gelegt.

In zahlreichen Studien wird belegt, dass die Gewinnung von Rohöl bzw. fossilen Kunststoffrohstoffen erheblichen Energiebedarf und Treibhausgas-Emissionen verursacht. Der Einsatz von Rezyklat kann diese Emissionen deutlich senken, da weniger neue fossile Vorprodukte benötigt werden. Allerdings hängt der Umweltvorteil stark von der Art des Recyclings (mechanisch vs. chemisch), vom Reinheitsgrad des Inputs und vom Energieaufwand bei Aufbereitung und Sortierung ab [[GNB+25](#), [JAA+24](#), [Sch25](#), [VMC+22](#), [ZTF+24](#),]. Biokunststoffe, insbesondere Drop-In Kunststoffe, wiederum bieten das Potenzial, fossile Rohstoffe zu substituieren, da sie bestehende Produktions- und Recyclingstrukturen nutzen können. Dennoch ist die Herstellung von Biokunststoffen nicht automatisch ohne Beeinflussung der Umwelt: Der Anbau von Biomasse kann erhebliche Mengen an Wasser, Dünger und Fläche beanspruchen, was zu Umweltfolgen, wie Eutrophierung, Landnutzungskonflikten und Biodiversitätsverlust, führen kann. Zudem müssen der Wasserverbrauch und die damit verbundenen Belastungen, z. B. Süßwasserentnahme, Belastung durch Düngemittel, Pestizide, bei Biokunststoffen beachtet werden, da sie je nach landwirtschaftlichem System, Region und verwendeter Biomasse höher als bei fossilen Kunststoffen sein können [[NN25ao](#), [Wie25](#), [YN24](#)]. Zudem können Transportwege, sowohl für Biomasse, Vorprodukte als auch für Rezyklatlieferketten, die Umweltwirkungen hinsichtlich der Treibhausgase, des Energieverbrauchs, des zusätzlichen Verkehrslärms und der Infrastrukturbelastung beeinflussen. Lange Transportwege können die Vorteile von lokal erzeugtem Rezyklat oder Bio-Material somit deutlich schmälern [[BBP24](#), [Fra22](#), [YN24](#)].

Ein weiterer Einflussfaktor, der im Kontext von Umweltauswirkungen relevant ist, sind Additive, Farbstoffe, Flammschutzmittel und andere funktionelle Zusätze, die in (Neuware-)Kunststoffen verwendet werden. In Rezyklaten können (teils durch den Recyclingprozess veränderte) Rückstände solcher Substanzen vorhanden sein. Das kann sowohl die Materialeigenschaften als auch die Umweltrisiken beeinflussen, z. B. durch Emission flüchtiger organischer Verbindungen, Gerüche oder Toxizität. Die stofflichen Emissionen sind zusätzlich während der Produktion und Verarbeitung zu berücksichtigen, da sie lokale Luft- oder Gewässerbelastungen verursachen können und zudem Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit haben können [[CVF20](#), [Ste24](#), [YN24](#),].

9.1 Ökobilanzierung

Die Ökobilanzierung (Life Cycle Assessment, LCA) stellt ein zentrales Instrument dar, um die Umweltauswirkungen von Kunststoffen über ihren gesamten Lebenszyklus hinweg transparent und vergleichbar zu erfassen. Sie sollte nach den internationalen Standards der ISO 14040/14044 durchgeführt werden und umfasst je nach Systemgrenzen verschiedene Prozessstufen von der Rohstoffbereitstellung über die Produktion bis hin zur Entsorgung oder Wiederverwertung. Dabei zeigt sich, dass die Ergebnisse einer Ökobilanz durch eine Vielzahl von Einflussfaktoren bestimmt werden, die sowohl materialspezifischer als auch prozessspezifischer Natur sind [[NN25ap](#), [NN25aq](#)].

Einen wesentlichen Einfluss hat die Art des Rohstoffs bzw. Kunststoffs. Unterschiedliche Polymere sind mit variierenden Energie- und Prozessanforderungen verbunden, die sich unmittelbar im CO₂-Fußabdruck niederschlagen [[NN24](#), [Sie24](#)]. Hinzu kommt die Art der Polymerproduktion, die sich in Bezug auf eingesetzte Vorprodukte, Energieversorgung und Effizienz unterscheidet [[RDZ+22](#)]. Auch der Füllstoffgehalt hat einen relevanten Einfluss: Bei Polyamiden kann ein steigender Glasfaseranteil beispielsweise den spezifischen CO₂-Fußabdruck senken, da Glasfasern teilweise geringere Emissionsäquivalente aufweisen als die Polymermatrix selbst.

Die Ökobilanzierung von Kunststoffen ist damit ein hochkomplexes Feld, in dem materialspezifische Eigenschaften, prozessuale Unterschiede und systemische Rahmenbedingungen zusammenwirken. Eine differenzierte Analyse dieser Faktoren ist entscheidend, um belastbare Aussagen über die ökologischen Vorteile von Kunststoffanwendungen und insbesondere von Rezyklaten und Biokunststoffen zu treffen.

9.1.1 Ökobilanzierung von Rezyklaten

Die Ökobilanzierung von Kunststoffrezyklaten ist ein zentraler Baustein zur Bewertung ihrer ökologischen Vorteile gegenüber Neuware. Allerdings gestaltet sich die Erstellung belastbarer Ergebnisse komplex und methodisch anspruchsvoll, da sich im Vergleich zu Neuware zusätzliche Einflussgrößen ergeben. Besonders bedeutsam ist das gewählte Recyclingverfahren: Mechanisches Recycling weist in der Regel eine günstigere Umweltbilanz als chemisches Recycling auf, da es mit geringerem Energieeinsatz verbunden ist [[DFM21](#), [JKR+21](#), [NN25ar](#), [RDG17](#)]. Darüber hinaus bestimmen die Qualität und Reinheit der Abfallströme sowie die Effizienz von Sammlung, Sortierung und den zugehörigen Transportwegen die erzielbaren ökologischen Vorteile. Abschließend muss bei der Bewertung zudem der Substitutionseffekt betrachtet werden: Die potenzielle CO₂-Reduktion hängt maßgeblich davon ab, welches Primärmaterial durch das Rezyklat ersetzt wird [[Ker24](#), [NN18](#), [Zam19](#)].

Eine wesentliche Schwierigkeit liegt in der fehlenden Allgemeingültigkeit von Ökobilanzdaten. Für eine Materialart, wie etwa PP oder PET, sind keine universell gültigen Kennzahlen verfügbar. Die Ergebnisse einer LCA hängen maßgeblich von der gewählten Systemgrenze sowie den verwendeten Hintergrunddaten ab. Während ein *cradle-to-gate*-Ansatz nur Prozesse von der Rohstoffgewinnung bis zum

Werkstor berücksichtigt, werden in einem *cradle-to-cradle*-Ansatz auch die Nutzungs- und End-of-Life-Phase inklusive des Recyclings einbezogen. Unterschiedliche Allokationsmethoden, beispielsweise Substitutionsansätze oder Gutschriften für vermiedene Primärproduktion, führen ebenfalls zu erheblichen Abweichungen [NN25ap, NN25as].

Eine weitere Herausforderung ist die mangelnde Transparenz seitens der Industrie. Viele Hersteller veröffentlichen lediglich relative Verbesserungen, etwa eine „Reduktion des CO₂-Fußabdrucks um bis zu X % im Vergleich zu Neuware“. Solche relativen Angaben sind ohne detaillierte Referenzsysteme kaum belastbar. Sie lassen weder Rückschlüsse auf absolute Emissionen noch auf die methodischen Annahmen zu. In der wissenschaftlichen Praxis wird jedoch gefordert, dass Ökobilanzen auf überprüfbaren und transparenten Datensätzen beruhen [NN25at, NN25r, Zam19].

Hinzu kommt, dass Datenquellen stark variieren. Während internationale Datenbanken wie *Ecoinvent* oder branchenspezifische Studien von *PlasticsEurope* vergleichsweise robuste Hintergrunddaten bereitstellen, greifen Unternehmen in der Praxis oft auf interne, nicht öffentlich zugängliche Erhebungen zurück. Diese Diskrepanz erschwert nicht nur die Vergleichbarkeit, sondern birgt auch die Gefahr selektiver Kommunikation, sodass die Ökobilanzierung von Kunststoffrezyklaten durch eine hohe Abhängigkeit von methodischen Annahmen, die geringe Transparenz industrieller Daten sowie die fehlende Homogenität der Bewertungsansätze gekennzeichnet ist. Für eine belastbare und nachvollziehbare ökologische Bewertung sind standardisierte Methoden, transparente Berichterstattung und einheitliche Datenquellen unerlässlich.

9.1.2 Bewertung der Rezyklate

Für die zu analysierenden Materialien wurden umfangreiche Recherchen bei Herstellern sowie in wissenschaftlicher Literatur durchgeführt, um eine quantitative Bewertung der Reduktion des CO₂-Fußabdrucks zu ermöglichen. Aufgrund der zuvor beschriebenen Herausforderungen bei der Ökobilanzierung von Rezyklaten konnten allerdings keine einheitlichen Ergebnisse generiert werden. Um die Problematik zu verdeutlichen, sind in Tabelle 9.1 für alle Materialien (bei denen ein passendes Ersatzmaterial und zugehörige Daten vorliegen) Angaben zur CO₂-Reduktion seitens verschiedener Hersteller oder unabhängiger Forschungseinrichtungen dargestellt.

Material	Potential zur Reduktion des CO ₂ -Fußabdrucks/Treibhauspotentials/GWP
PVC	-10 bis -36 %; bis -39 %
PP	0,51 kg CO ₂ e/kg; 30-80 %; -35 %; -50 %; bis -42 %; bis -42 %; -71 %; -72 %
PA6	bis -30 %; bis -40 %; mehr als -60 %; bis -90 %
PA6.6	bis -30 %; „niedriger CO ₂ -Fußabdruck“
PBT	mehr als 30 %; -35 % (rPET+rPBT); -49 %; bis -53 % (rPC+rPBT)
PUR	→ Kein richtiges Recycling möglich → Ansatz: z. B. <u>RePolioI</u> als rezyklierter Bestandteil
(V)MQ	→ Kein richtiges Recycling möglich
EPDM	→ Kein richtiges Recycling möglich → Ansatz: Material durch TPE oder TPV (Celanese, MOCOM) ersetzen
XLPE	„better CO ₂ impact“; 1,4 bis 1,6 kg CO ₂ Reduktion pro kg Rezyklat
PET	-35 % (rPET+rPBT); -59 %
TPE	-16 bis 37 %; bis -36 %; fast 40 % (TPV); -54 %

Tabelle 9.1: Materialspezifisches Potential zur Reduktion des CO₂-Fußabdrucks

Die Zahlenwerte zeigen, dass eine gemittelte Bewertung der Umwelteinflüsse nicht zielführend ist. Beispielhaft schwanken die Werte für den Einsatz eines rezyklierten PP-Materials gegenüber Neuware von 30 % bis 72 % in Abhängigkeit des Herstellers, Materialtyps, Rezyklatanteils oder der Herkunft.

Ein paar allgemeine Trends lassen sich aus den unterschiedlichen Angaben ableiten. Mechanisches Recycling ist in der Regel mit deutlich geringeren Energieaufwendungen als chemische Verfahren verbunden und ermöglicht daher meist größere Einsparungen bei den Treibhausgasemissionen. Das ökologische Potential hängt maßgeblich von der Qualität und Implementierung der Recyclingströme ab: Je etablierter und effizienter die Sammel-, Sortier- und Aufbereitungsprozesse gestaltet sind, desto größer sind die erreichbaren Umweltvorteile. Besonders bei häufig genutzten Standardpolymeren, wie PE, PP und PET, bestehen durch langjährige Erfahrung und breite Anwendungsfelder vergleichsweise robuste Datenlagen und vielfältige Quellen. Für technisch spezialisierte Polymere, etwa aus der Automobilindustrie, sind entsprechende Recyclingströme bislang weniger diversifiziert. Dennoch zeigen erste Ansätze, dass auch im Kontext der Altauto-Verwertung signifikante CO₂-Reduktionen realisierbar sind. Während aktuell vielfach chemische Recyclingrouten untersucht werden, existieren auch bereits erfolgreiche Beispiele für mechanische Verfahren, bei denen etwa Stoßfänger aufbereitet und wieder in Automotive-Anwendungen eingesetzt werden [NN25au].

9.2 Bewertung der Umwelteinflüsse bei biobasierten Ersatzstoffen

Im Kontext der Analyse von Umwelteinflüssen, die mit einem Materialwechsel von Neuware zu Biokunststoffen einhergehen, ist die Ökobilanzierung nur ein Teilaspekt. Die ganzheitliche Bewertung

von Biokunststoffen erfordert die Berücksichtigung einer Vielzahl ökologischer und sozialer Kriterien, die über eine reine Betrachtung der Treibhausgasemissionen hinausgehen. Im Folgenden werden die ermittelten Kriterien vertiefend dargestellt. Dabei wird sich an dem Biokunststofftool orientiert, welches spezifisch auf die Bewertung von Biokunststoffen ausgerichtet ist [\[NN25av\]](#). Ähnlich zur quantitativen Bewertung der Rezyklate ist eine Anwendung des Tools ohne genaue Definition des Materials nicht zielführend, weswegen das methodische Vorgehen erläutert wird, dass herstellerbezogen angewendet werden sollte.

- Ein zentrales Kriterium ist die **Landnutzung** und **potentielle Nahrungsmittelkonkurrenz**. Der Anbau von Rohstoffen, wie Mais, Zuckerrohr oder Stärke, kann in Konkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion treten und Landnutzungsänderungen mit negativen ökologischen Folgen, etwa Biodiversitätsverlust oder Entwaldung, nach sich ziehen. Informationen hierzu lassen sich nur anhandspezifischer Angaben des Herstellers zu den eingesetzten Rohstoffen und deren Herkunftsregionen sowie mithilfe von Zertifikaten zur nachhaltigen Landnutzung ermitteln.
- Die **Anbauzertifizierung** und **Nachweise zur Sozialverträglichkeit** stellen ein weiteres wesentliches Bewertungskriterium dar. Systeme, wie *REDcert2* oder *ISCC PLUS*, bieten anerkannte Standards für die Nachhaltigkeit in der Rohstoffproduktion – sowohl in ökologischer als auch in sozialer Hinsicht [\[NN25aw, NN25ax\]](#). Bei einer Materialanfrage sollten entsprechende Zertifikate oder Auditberichte stets mit angefordert werden, um Transparenz zu gewährleisten.
- Ein dritter relevanter Aspekt betrifft den **Einsatz gentechnisch veränderter Organismen (GVO)** beim Anbau der Biomasse. Dies hat sowohl ökologische als auch gesellschaftliche Implikationen. Hersteller können hierzu Stellung nehmen, indem sie die Nutzung oder den Ausschluss von GVO im Rohstoffanbau explizit deklarieren.
- Auch der **biobasierte Anteil** des Produkts ist von Bedeutung, da er Rückschlüsse auf die fossile Substitution zulässt. Dieser kann durch standardisierte Testmethoden, wie ASTM D6866 oder DIN EN 16785, bestimmt und durch Zertifikate belegt werden [\[NN16b, NN22e\]](#).
- Schließlich ist die **Sozialverträglichkeit in den Verarbeitungsschritten** entlang der Lieferkette ein zentrales Kriterium. Aspekte, wie Arbeitsrechte, faire Löhne und Arbeitssicherheit, können durch die Einhaltung internationaler Standards (z. B. ILO-Kernarbeitsnormen) oder durch Mitgliedschaften in freiwilligen Initiativen wie dem *UN Global Compact* dokumentiert werden [\[NN25ay, NN25az\]](#).

Insgesamt zeigt sich, dass eine umfassende Bewertung von Biokunststoffen nur auf Basis transparenter Herstellerinformationen möglich ist. Neben unabhängigen Zertifizierungen sind vor allem detaillierte Ökobilanzdaten und freiwillige Nachhaltigkeitsberichte entscheidend, um ökologische und soziale Aspekte gleichermaßen zu berücksichtigen.

9.3 Ökobilanzierung von Biokunststoffen

Die Ökobilanzierung von Biokunststoffen ist ein ergänzender Aspekt in der Bewertung von Umweltauswirkungen dar. Sie umfasst wie auch bei der Bewertung der Rezyklate, Aspekte, wie der Energieaufwand, Treibhausgasemissionen, Ressourcenverbrauch sowie End-of-Life-Szenarien. Hersteller können und sollten diese Informationen in Form von LCA-Studien oder Umweltproduktdeklarationen (EPD) offenlegen.

Die Bewertung des CO₂-Fußabdrucks von Biokunststoffen ist mit einer Reihe methodischer und datenbezogener Herausforderungen verbunden, die bei der Bewertung von Rezyklat nicht auftreten. Ein zentraler Konflikt besteht darin, dass Biokunststoffe zwar aus nachwachsenden Rohstoffen hergestellt werden können, deren Anbau jedoch häufig mit Landnutzungsänderungen, Düngemittel- und Pestizideinsatz sowie erheblichen Wasserverbräuchen einhergeht. Diese Faktoren erschweren die Bilanzierung und können die positiven Klimaeffekte durch biogene Kohlenstoffspeicherung teilweise relativieren [BBP24, GP11, SWP09].

Hinzu kommt die hohe Variabilität der End-of-Life-Szenarien: Während einige Biokunststoffe industriell kompostierbar (abbaubar) sind, werden andere thermisch verwertet oder im konventionellen Recyclingstrom zurückgeführt [NN17b]. Darüber hinaus fehlen oft standardisierte Datensätze und Methoden für die Allokation biogener Kohlenstoffflüsse, sodass die Vergleichbarkeit zwischen Studien eingeschränkt bleibt [NN25ap, PCH+13].

Insgesamt zeigt sich, dass die Ökobilanzierung von Biokunststoffen eine besonders komplexe Aufgabe darstellt, bei der Rohstoffherkunft, Produktionsprozesse und End-of-Life-Szenarien eng miteinander verknüpft betrachtet werden müssen, um belastbare und vergleichbare Ergebnisse zu erzielen. Bei der Durchführung einer Ökobilanzierung kann als weiterführende Hilfestellung die Übersicht *Handlungsempfehlungen für die Ökobilanzierung von biobasierten Kunststoffen* genutzt werden [NN25ba].

9.3.1 Beispielhaftes Vorgehen zur gezielten Bewertung spezifischer Materialien

Um bei der Bewertung von Biokunststoffen gezielte Ansätze zu haben, wurden auf Basis des Biokunststofftools mögliche Nachweise oder notwendige Angaben des Herstellers abgeleitet, auf die bei der Beschaffung geachtet werden sollte. Tabelle 9.2 fasst dazu die bereits genannten, zentralen Bewertungskriterien für die Umwelt- und Sozialverträglichkeit von Biokunststoffen zusammen. In der ersten Spalte ist jeweils das relevante Kriterium aufgeführt, das einen spezifischen Einfluss auf die ökologische und soziale Gesamtbewertung des Materials hat. In der zweiten Spalte wird die jeweilige Relevanz für die Bewertung beschrieben, also in welcher Weise das Kriterium die ökologische Performance oder gesellschaftliche Akzeptanz von Biokunststoffen beeinflusst. In der dritten Spalte werden mögliche Nachweise oder Angaben aufgeführt, die seitens des Materialherstellers erforderlich und sinnvoll sind, um die Einhaltung nachhaltiger Standards nachvollziehbar zu belegen.

Kriterium	Relevanz für die Bewertung (ausgewählte Wirkungskategorien)	Mögliche Nachweise/Angaben durch Hersteller (u. a.)
Landnutzung und Nahrungsmittelkonkurrenz	Risiko der Flächenkonkurrenz mit Nahrungsmitteln; potenzielle Auswirkungen auf Biodiversität und Entwaldung	• Herkunftsregion und Art des eingesetzten Rohstoffs (z. B. Mais, Zuckerrohr, Zellulose) anfragen. • Informationen zu genutzten Anbauflächen (Ackerland vs. Reststoffnutzung) erfragen. • Nachhaltigkeitszertifikate oder Flächennachweise (z. B. aus REDcert- oder ISCC-Systemen) anfordern. • Bei Importware: Angaben zu Landnutzungsänderungen (LUC-Faktoren) gemäß EU Renewable Energy Directive (RED II).
Anbauzertifizierung und Sozialverträglichkeit	Sicherstellung ökologischer und sozialer Mindeststandards im Anbau (z. B. Schutz vor Ausbeutung, nachhaltige Landwirtschaft)	• Kopien aktueller Zertifikate (z. B. REDcert², ISCC PLUS) oder deren Gültigkeitsnummern anfordern. • Prüfen, ob die Zertifizierung den spezifischen Rohstoff abdeckt. • Bei fehlender Zertifizierung: Nachweise über Lieferantenaudits oder Nachhaltigkeitsrichtlinien erbitten.
Gentechnik	Einfluss auf Umwelt und gesellschaftliche Akzeptanz durch Nutzung gentechnisch veränderter Pflanzen	• Schriftliche Erklärung, ob und in welchem Umfang GVO im Anbau verwendet werden. • Wenn möglich, Herkunftsbestätigung aus gentechnikfreiem Anbau (z. B. nach EU-Verordnung 1829/2003/EG). • Optional: Laboranalyse oder Zertifikat zur GVO-Freiheit.
Ökobilanz und Umweltverträglichkeit	Ganzheitliche Betrachtung des Lebenszyklus (Emissionen, Energiebedarf, End-of-Life-Szenarien)	• Vorlage einer LCA-Studie nach ISO 14040/14044 oder einer Environmental Product Declaration (EPD). • Bei fehlender LCA: Hersteller nach Daten zu Energieverbrauch, Transportdistanzen, Emissionen und Entsorgungsoptionen fragen. • Angaben zu End-of-Life-Szenarien (kompostierbar, recycelbar, energetische Verwertung).
Biobasierter Anteil	Gibt an, welcher Anteil des Materials aus nachwachsenden statt fossilen Rohstoffen stammt; beeinflusst CO ₂ -Bilanz.	• Zertifikat über den biobasierten Kohlenstoffanteil nach ASTM D6866 oder DIN EN 16785. • Laborberichte mit prozentualem biobasiertem Anteil (z. B. „70 % biobasiert“).

		• Materialdatenblatt prüfen, ob biobasierte und fossile Komponenten aufgeschlüsselt sind.
Sozialverträglichkeit bei Verarbeitung	Arbeitsbedingungen und Menschenrechte entlang der Lieferkette	• Nachweis über Einhaltung von ILO-Kernarbeitsnormen oder Mitgliedschaft im UN Global Compact. • CSR- oder Nachhaltigkeitsbericht des Unternehmens prüfen. • Wenn möglich: Auditberichte oder Lieferantenerklärungen zu Arbeitsbedingungen anfordern. • Gezielt nach Produktionsstandorten und dort geltenden Sozialstandards fragen.

Tabelle 9.2: Abgeleitete Nachweise und Angaben des Materialherstellers zur Bewertung von Biokunststoffen

9.4 Zwischenfazit

Die Bewertung der Umweltwirkungen von biobasierten und rezyklierten Kunststoffen verdeutlicht die Vielschichtigkeit ökologischer und sozialer Einflussfaktoren entlang der gesamten Wertschöpfungskette. Während Biokunststoffe vorrangig durch die Herkunft ihrer Rohstoffe, die Landnutzung sowie die sozialen und ökologischen Bedingungen des Anbaus geprägt werden, hängt die Umweltbilanz von Kunststoffrezyklaten in erster Linie von der Effizienz der Recyclingprozesse und der Qualität der Materialströme ab.

Die in Tabelle 9.2 dargestellten Kriterien zeigen, dass Biokunststoffe nur dann als ökologisch vorteilhaft gelten können, wenn Aspekte, wie nachhaltige Landnutzung, Zertifizierungssysteme (z. B. REDcert, ISCC PLUS), der Ausschluss von Gentechnik und transparente Angaben zum biobasierten Anteil, berücksichtigt werden. Ebenso ist die Einhaltung sozialer Mindeststandards entlang der Lieferkette ein zentrales Element, um ökologische Vorteile nicht durch soziale Risiken zu relativieren.

Bei Kunststoffrezyklaten liegt der Schwerpunkt der ökologischen Bewertung hingegen auf der Prozess- und Systemebene: Mechanisches Recycling bietet in der Regel deutlich höhere Einsparpotenziale hinsichtlich Energieverbrauch und Treibhausgasemissionen als chemische Verfahren. Zudem zeigen sich mit zunehmender Etablierung geschlossener Materialkreisläufe, wie im Automobil- oder Verpackungsbereich, signifikante Verbesserungen der Umweltperformance. Die erzielbare CO₂-Reduktion ist stark von der Qualität der Rezyklate, der Sortierreinheit sowie dem substituierten Primärmaterial abhängig.

10 Wiederverwertbarkeit und Wirkungsgrad beim Recycling

Die Bewertung der Wiederverwertbarkeit von Kunststoffen im Automotive-Leitungssatzbereich stellt eine zentrale Herausforderung im Kontext nachhaltiger Materialstrategien dar. Während für Neuware-Materialien vergleichsweise belastbare Daten aus realen Untersuchungen zur Verfügung stehen, ist

die Einschätzung der Wiederverwertbarkeit bereits rezyklierter Materialien deutlich schwieriger. Hier beruhen Bewertungen oftmals nicht nur auf empirischen Ergebnissen, sondern auch auf logischen Schlussfolgerungen, die sich aus bekannten Materialeigenschaften ableiten lassen. Die tatsächliche Rezyklierbarkeit solcher Ersatzstoffe kann somit nur eingeschränkt und unter gewissen Annahmen bewertet werden.

Als ein möglicher Ansatz werden im Rahmen der Studie Analysen zum sogenannten „simulierten wiederholten Recycling“ herangezogen, in denen der Einfluss mehrfacher Recycling-/ Spritzgieß-/ Extrusionszyklen auf die Materialeigenschaften untersucht wird. Allerdings liegen solche Untersuchungen bislang nicht für alle betrachteten Materialien vor, sodass die Aussagekraft hinsichtlich der Langzeit-Wiederverwertbarkeit eingeschränkt bleibt.

10.1 Wiederverwertbarkeit von Rezyklaten

Die Wiederverwertbarkeit bereits rezyklierter Kunststoffe, insbesondere solcher aus PCR Materialien, ist grundsätzlich gegeben. Jedoch ist sie mit deutlichen Einschränkungen hinsichtlich der Materialqualität verbunden. Untersuchungen zeigen, dass sich die Eigenschaften mechanisch rezyklierter Materialien mit zunehmender Anzahl an Recyclingzyklen verändern. Bereits nach wenigen Durchläufen ist in der Regel eine signifikante Erhöhung des Schmelzflussindexes (MFR) zu beobachten, was auf eine fortschreitende Polymerkettenverkürzung und damit auf eine reduzierte Viskosität zurückzuführen ist. Parallel dazu sinken wichtige mechanische Kennwerte, wie Zugfestigkeit, Schlagzähigkeit und Dehnung, wodurch die Werkstoffe an Leistungsfähigkeit verlieren [DJK+24, KOY+14, LSF+22].

Diese Eigenschaftsänderungen resultieren aus thermisch-oxidativen Abbauprozessen während des mechanischen Recyclings, die zu einer zunehmenden Degradation der Polymerstruktur führen. Damit bleibt die prinzipielle Recyclingfähigkeit zwar bestehen, jedoch verschlechtert sich die Materialqualität des Rezyklats mit jedem weiteren Zyklus. Infolgedessen kann das Material oft nicht mehr für anspruchsvolle Anwendungen, wie im Automotive-Leitungssatzbereich, eingesetzt werden, sondern muss in weniger belastete Anwendungsfelder „downgecycelt“ werden [HR19, LKF06, San07, SB11].

Ein möglicher Ansatz zur Stabilisierung der Materialeigenschaften besteht in der gezielten Beimischung von Neuware oder Additiven, die die Molekularstruktur regenerieren oder stabilisieren können. Durch solche Maßnahmen lässt sich die Nutzungsdauer des Materialstroms verlängern und ein gewisser Qualitätsausgleich erzielen. Dennoch bleibt festzuhalten, dass sich die Wiederverwertbarkeit mechanisch rezyklierter Kunststoffe über mehrere Recyclingzyklen hinweg nur eingeschränkt aufrechterhalten lässt und stets mit einem Kompromiss zwischen ökologischer Nachhaltigkeit und technischer Leistungsfähigkeit verbunden ist [DCR18, WKH25, WM96].

10.2 Wiederverwertbarkeit von Biokunststoffen

Im Bereich der Biokunststoffe ist eine differenzierte Betrachtung ihrer Wiederverwertbarkeit notwendig, da sich die Materialgruppen sowohl in ihrer chemischen Struktur als auch in ihrer Einbindung in bestehende Recyclingprozesse deutlich unterscheiden. Für die Bewertung der Recyclingfähigkeit ist jedoch vor allem die bereits eingeführte Einteilung in „Drop-in“- und „Novel“-Biokunststoffe relevant. Da Drop-in-Kunststoffe, wie Bio-PP, chemisch identisch zu ihren fossilen Neuware-Vergleichsmaterialien sind, können sie in denselben Materialkreislauf zurückgeführt werden. Damit besteht die Möglichkeit, Bio-PP zusammen mit konventionellem PP im bestehenden Recyclingstrom mechanisch zu verwerten. Eine zentrale Herausforderung ergibt sich jedoch daraus, dass biobasierte Kunststoffe im derzeitigen Abfallmanagement nicht separat erfasst oder beim Sortieren zuverlässig identifiziert werden können. Dadurch verlieren sie nach dem Recycling ihren ökologischen Vorteil als Biokunststoff, da das recycelte Material nicht mehr als „biobasiert“ deklariert werden kann. Dies schränkt den tatsächlichen Umweltvorteil dieser Materialien ein und erschwert ihre Akzeptanz in geschlossenen Stoffkreisläufen. Zudem besteht die Gefahr, dass bestimmte Biokunststoffe im Sortierprozess als Fremdstoffe erkannt und aussortiert werden, was die Effizienz der Wiederverwertung weiter mindert [GMH+21, TMB+22].

Beim Einsatz biomassenbilanzierter Kunststoffe ist die Rezyklierbarkeit der erdölbasierten Produkte direkt übertragbar, da durch die Kombination aus Drop-In-Lösung und Massenbilanzierung kein Unterschied zwischen den eingesetzten Materialien besteht. Ein mechanisches Recycling der hergestellten Produkte und ein Rückführen in den „normalen“ Recyclingstrom ist damit möglich, auch wenn die Massenbilanzierung für die resultierenden Rezyklate nicht mehr nachweisbar ist.

Im Gegensatz dazu stehen sogenannte Novel-Biokunststoffe, die in der Regel auf neuen Polymerstrukturen basieren und häufig biologisch abbaubar sind. Obwohl dieser Aspekt aus ökologischer Sicht zunächst vorteilhaft erscheint, erschwert die Abbaubarkeit eine Rückführung in konventionelle mechanische Recyclingprozesse. Novel-Biokunststoffe können in bestehenden Recyclingströmen nicht ohne weiteres mitgeführt werden, da sie die Materialqualität fossiler oder Drop-in-basierter Rezyklate negativ beeinflussen können [NN25bb, ZB22].

Zusammenfassend bieten Drop-in-Biokunststoffe prinzipiell gute Voraussetzungen für eine Integration in etablierte Recyclingprozesse, während Novel-Biokunststoffe derzeit nur begrenzt wiederverwertbar sind. Die größten Herausforderungen liegen weniger in den chemischen Eigenschaften der Materialien selbst, sondern vielmehr in der fehlenden infrastrukturellen Trennung und Kennzeichnung biobasierter Kunststoffe. Erst durch die Entwicklung geeigneter Sammel- und Sortierkonzepte kann das Potenzial der Biokunststoffe für geschlossene Materialkreisläufe im Automotive-Kontext voll ausgeschöpft werden.

10.3 Wirkungsgrad beim Recycling

Der Wirkungsgrad beim Recycling der verschiedenen Ersatzmaterialien zeigt ähnliche Tendenzen wie die Wiederverwertbarkeit. Er variiert in Abhängigkeit der chemischen Struktur, dem Recyclingverfahren sowie der Materialhistorie. Für biobasierte oder biomassenbilanzierte Drop-in-Lösungen bleibt der Recyclingwirkungsgrad identisch mit der Neuware. Sowohl beim mechanischen als auch beim chemischen Recycling können ähnliche Rückgewinnungsraten und Materialeigenschaften erzielt werden. Die Effizienz des Prozesses wird weniger durch das Material selbst, sondern vielmehr durch die Qualität der Sammlung, Sortierung und Aufbereitung bestimmt. Eine saubere Trennung und gezielte Erfassung dieser Stoffströme sind somit entscheidende Faktoren für einen hohen Gesamtwirkungsgrad.

Rezyklaten zeigen dagegen ein stärkeres materialabhängiges Verhalten. Der Wirkungsgrad des Recyclingprozesses variiert in Abhängigkeit vom Ursprung und der Zusammensetzung des jeweiligen Recyclingstroms deutlich. Mechanisch rezyklierte Materialien weisen aufgrund der wiederholten thermomechanischen Belastung meist eine geringere Materialeffizienz auf, da Polymerkettenabbau und Additivverluste zu einer schrittweisen Reduktion der resultierenden Rezyklatqualität führen. Dies äußert sich in abnehmenden mechanischen Eigenschaften und einem tendenziell niedrigeren Wirkungsgrad über mehrere Recyclingzyklen hinweg. Demgegenüber können chemisch rezyklierte Kunststoffe, insbesondere bei Monomer-Recyclingverfahren, nahezu die Eigenschaften von Neuware erreichen. In solchen Fällen ist der Wirkungsgrad des ersten Recyclingzyklus weitgehend vergleichbar mit dem von Neuware, da das Material auf molekularer Ebene regeneriert wird. Eine Sonderstellung nehmen im Rahmen der bewerteten Materialien vernetzte Kunststoffe, wie PUR oder EPDM, ein. Aufgrund ihrer stabilen dreidimensionalen Vernetzungsstruktur lassen sich diese Materialien weder als Neuware noch als Rezyklat effizient recyceln. Sie können lediglich als Füllstoffe oder in minderwertigen Anwendungen wiederverwendet werden, wodurch der Recyclingwirkungsgrad entsprechend gering bleibt. [MMR24, VSK21, VSS+21].

Mit Fokus auf Closed-Loop Recycling aus dem Automobil-Sektor zeigen erste Studien, bspw. aus Großbritannien, dass aktuell noch Herausforderungen bestehen, die die Zirkularität verhindern. Dazu gehören die wie folgt zusammengefassten Aspekte:

- Der Mangel an dynamischen Materialflussanalysemodellen (MFA), die speziell den Kunststofffluss in der Automobilindustrie verfolgen,
- Der Mangel an Materialaufschlüsselungen in Recyclingberichten und Lebenszyklusanalysen („Kunststoff“ wird nicht weiter differenziert),
- Die unzureichende Abdeckung und Inkludierung der nachgelagerten Produktnutzung in laufenden Studien [DTM+23].

Potentiale zur Erhöhung des Wirkungsgrades

Da die differenzierte Bewertung des Wirkungsgrades materialabhängig ohne spezifische Kenntnis der Anwendung, Bauteileigenschaften, Materialzusammensetzung und bisheriger Recyclingstrategien nur bedingt möglich ist, werden im Folgenden auf Basis von [Alt24, CFW+22, DBQ25, DTM+23, HPL+22, Liu10, MMR24, NN23c, NN24m, OIV+24, SON14] verschiedene Ansätze und daraus ableitbare Potentiale beschrieben, die den Wirkungsgrad beim Recycling im Kontext Automotiver-Leitungssätze erhöhen können.

Eine signifikante Erhöhung des Wirkungsgrades beim Recycling von Kunststoffbauteilen aus Automotive-Anwendungen kann vor allem durch ein ganzheitlich optimiertes Produktdesign und die Reduktion der Materialdiversität erreicht werden. Dabei steht die Entwicklung recyclinggerechter Bauteile im Vordergrund, die den Sortier-, Aufbereitungs- und Wiederverwertungsprozess technologisch unterstützen. Durch den Verzicht auf Mehrschichtverbunde und den verstärkten Einsatz von Mono-Materialien lässt sich die Trennbarkeit der Werkstoffe deutlich verbessern. Ist der Einsatz unterschiedlicher Materialien unvermeidbar, sollten diese gezielt anhand unterschiedlicher Dichten oder anderer physikalischer Eigenschaften (z. B. triboelektrische Aufladung, optische Erkennungsmerkmale) ausgewählt werden, um eine effiziente Separation im Sortierprozess, beispielsweise durch Dichtentrennung, Nahinfrarot-(NIR)- oder elektro-statische Sortierung, zu ermöglichen. Zudem trägt die Minimierung von Farbstoffen und Füllstoffen zur Erhöhung der Materialreinheit und somit zur Verbesserung der mechanischen und thermischen Eigenschaften des Rezyklats bei. Ebenso sollten Kontaminationen durch Etiketten, Aufkleber, Klebstoffe oder dekorative Elemente vermieden werden, um die Qualität des Rezyklats nicht zu beeinträchtigen. Der vermehrte Einsatz thermoplastischer, wiederaufschmelzbarer Materialien, wie etwa TPE anstelle von EPDM oder (V)MQ, erleichtert die Wiederverwertung und reduziert die Entsorgungsverluste. Im Sinne des *Design for Recycling* und *Design for Disassembly* sollten Bauteile so konstruiert werden, dass sie mit minimalem Aufwand demontiert und sortenrein getrennt werden können. Eine standardisierte Verbindungstechnik (z. B. lösbare Stecksysteme statt Verklebungen oder Umspritzungen) kann entscheidend sein. Ergänzend kann die Rückverfolgbarkeit von Komponenten, etwa durch lasergravierte Markierungen, digitale Produktpässe oder RFID-Labels, die automatisierte Sortierung und Rücknahmeprozesse unterstützen. Darüber hinaus ist eine enge Verknüpfung mit digitalen Technologien und Kreislaufwirtschaftskonzepten von Bedeutung: Der Einsatz von Digital Product Twins und Materialdatenbanken ermöglicht eine genaue Identifikation der enthaltenen Kunststoffe und ihrer Zusammensetzung. Auch eine frühzeitige Integration von Recyclingaspekten in die Produktentwicklung (z. B. über Ökobilanzierung, Rezyklierbarkeitsbewertungen oder Simulationen des Materialkreislaufs) kann den Gesamtwirkungsgrad des Systems erhöhen.

Langfristig lassen sich zusätzliche Potentiale durch die Entwicklung sortenreiner Werkstofffamilien, die Förderung geschlossener Stoffkreisläufe innerhalb der Automobilindustrie sowie durch verbesserte Rezyklatkompatibilität zwischen Herstellern ausschöpfen. Diese technischen und systemischen

Maßnahmen bilden zusammen die Grundlage für eine nachhaltige Steigerung der Recyclingeffizienz und Ressourcenschonung im Leitungssatzbereich.

11 Fazit

Insgesamt zeigt die Untersuchung, dass sowohl biobasierte als auch biomassenbilanzierte Kunststoffe sowie Kunststoffrezyklate grundsätzlich geeignet sind, um in Automotive-Leitungssätzen eingesetzt zu werden. Im Rahmen dieses Projekts wurde die Anwendung von PVC, PP, PA 6.6/6, PBT, PUR, (V)MQ, EPDM, XLPE, PET und TPE spezifisch untersucht. Dabei wurde zunächst die Existenz entsprechender Materialien verifiziert und anschließend deren Einsatzfähigkeit im Bereich der Automotive-Leitungssätze bewertet. Auf Grundlage der Kriterien Verfügbarkeit, Materialeigenschaften sowie Verarbeitbarkeit erfolgte eine gewichtete Bewertung, aus der eine Gesamtpunktzahl für jedes Material resultierte. Da diese Bewertung ausschließlich auf den im Projektverlauf durch die Projektnehmer gesammelten Daten basiert, unterscheidet sich die Methodik von einem klassischen TRL, bietet jedoch eine fundierte Orientierung zum aktuellen Entwicklungsstand im Bereich der Automotive-Leitungssätze. Aus den Ergebnissen geht hervor, dass Massenkunststoffe wie PP, PE, PET und PVC, die bereits in der Verpackungs- und Bauindustrie in großen Mengen eingesetzt werden, auch bei den Rezyklaten und biobasierten Alternativen die weiteste Entwicklung und somit hohe Gesamtpunktzahlen aufweisen. Zudem konnte für das im E&E-Bereich wichtige PBT festgestellt werden, dass trotz geringerer Gesamtmengen bereits geeignete biobasierte und recycelte Varianten für den automotiven-Leitungssatz existieren. Demgegenüber stehen Materialien wie TPR, TPU, EPDM sowie XLPE und (V)MQ, die aufgrund der während der Herstellung entstehenden vernetzten bzw. vulkanisierten dreidimensionalen Polymernetzwerke nicht schmelzverarbeitbar sind, was ihre Rezyklierbarkeit deutlich einschränkt. Zudem sind die Entwicklungen biobasierter Ersatzstoffe aufgrund der komplexen Strukturen und fehlender biogener Rohstoffpfade bislang nur in geringem Maße fortgeschritten.

Ökologisch gesehen, stellen biomassenbilanzierte Kunststoffe eine vielversprechende Option dar, da sie die Qualität konventionellen fossilbasierten Material weitgehend beibehalten und gleichzeitig eine signifikante Reduktion des CO₂-Fußabdrucks ermöglichen. Auch der Einsatz von Rezyklaten kann zu einer deutlichen Verbesserung der Umweltbilanz führen, sofern die Materialqualität den technischen Anforderungen entspricht. Allerdings können biobasierte sowie hochwertige recycelte Materialien häufig mit höheren Materialkosten oder einem erhöhten Entwicklungsaufwand einhergehen. Ein vollständiger Ersatz von konventionellem fossilbasiertem Material durch 100 % Rezyklat ist in den meisten Fällen weder technisch noch wirtschaftlich sinnvoll, da dies negative Auswirkungen auf die Verarbeitbarkeit oder die Bauteileigenschaften haben kann.

Daher bietet sich ein abgestufter Ansatz an, bei dem unterschiedliche Rezyklatanteile gezielt bewertet und eingesetzt werden, um ein optimales Verhältnis zwischen Ökobilanz, Funktionalität und Kosten zu erzielen. Die Massenbilanzierung stellt einen pragmatischen Weg dar, hochwertige Anwendungen mit

reduziertem fossilem Anteil zu realisieren, ohne die etablierten Prozesse grundlegend verändern zu müssen. Für eine fundierte Auswahl ist die genaue Definition der technischen, thermischen und mechanischen Anforderungen unerlässlich. Durch einen kooperativen Entwicklungsansatz kann langfristig eine schrittweise Substitution fossiler Kunststoffe in Automotive-Leitungssätzen erfolgen, ohne Kompromisse bei Qualität, Sicherheit oder Funktionalität einzugehen. Dies stellt einen zukunftsfähigen Weg zur Reduktion von Treibhausgasemissionen und zur Stärkung der Kreislaufwirtschaft dar, solange die Materialauswahl gezielt und datenbasiert erfolgt.

12 Quellenverzeichnis

- [Alt24] ALTER, L.: Cars need design for disassembly and repairability. Carbon Upfront. 17.06.2024
- [AAT+21] ANSAR, M.A.; ASSAWADITHALERD, M.; TIPMANEE, D.; LAOKIAT, L.; KHAMDAHSA, P.; KITTIPOONGVISES, S.: Occupational exposure to hazards and volatile organic compounds in small-scale plastic recycling plants in Thailand by integrating risk and life cycle assessment concepts. Journal of Cleaner Production 2021 329
- [AGL24] ARUMUGAM, V.; GÓRA, A.; LIPIK, V.: Influence of Graphene, Carbon Nanotubes, and Carbon Black Incorporated into Polyamide Yarn on Fabric Properties. School of Material Science and Engineering, Nanyang Technological University, 04.10.2024
- [Amb19] Ambrose, Jillian: War on plastic waste faces setback as cost of recycled material soars. URL: <https://www.theguardian.com/environment/2019/oct/13/war-on-plastic-waste-faces-setback-as-cost-of-recycled-material-soars>, The Guardian, 13.10.2019
- [BBP24] BROEREN, M.; BERGSMA, G.; VAN DE POL, J.: CE Delft-Biobased plastics in vehicles. Report for the Ministry of Infrastructure and Water Management. 06/2024
- [BF25] Bradbury, M.; Fischer, M.: TPEs With Recycled Content. URL: <https://www.hexpol.com/tpe/product-brands/dryflex-circular/>, hexpolTPE, 30.10.2025
- [BHB+22] BETZ, J.; HERMANN, A.; BULACH, W.; HERMANN, C.; DIEROFF, G.M.; MÜLLER, R.; WIESEMANN, E.: Prüfung konkreter Maßnahmen zur Steigerung der Nachfrage nach Kunststoffrezyklaten und rezyklathaltigen Kunststoffprodukten. Bericht 128/2022, Forschungskennzahl: 3719 34 306 0
- [BXX+23] BIAN, X.; XIA, G.; XIN, J.H.; JIANG, S.; MA, K.: Applications of waste polyethylene terephthalate (PET) based nanostructured materials: A review. Chemosphere 2024 350. ID: 141076
- [CFW+22] CABA, S., VON FREEDEN, J., DE WIT, J., HUXDORF, O.: Use Case 3: Modular Car Parts Disassembly and Remanufacturing. In: Colledani, M., Turri, S. (eds) Systemic Circular Economy Solutions for Fiber Reinforced Composites. Digital Innovations in Architecture, Engineering and Construction. 2022 Springer, Cham.
- [CK25] CSAPÓ, M.; KOVÁCS, J.G.: Impact of fiber fragmentation on mechanical performance and environmental footprint of recycled glass fiber-reinforced polyamide composites. Department of Polymer Engineering, Faculty of Mechanical Engineering, Budapest University of Technology and Economics, Budapest, 2025
- [CVF20] A. CABANES, F.J. VALDÉS, A. FULLANA: A review on VOCs from recycled plastics. ScienceDirect, 09.2020
- [DBQ25] DU, B.; BRYSON, J.R.; QAMAR, A.: Aspiring towards automotive circularity: A critical review and research agenda. Journal of Environmental management 2025 380. ID: 125150

- [DCR18] DELVA, L.; CARDON, L.; RAGAERT, K.: Evaluation of Post-Consumer mixed Polyolefins and their Injection Moulded Blends with Virgin Polyethylene. *Environmental Engineering and Management Journal* 2018 17(2). S. 427-434
- [DFM21] DAVIDSON, M.G.; FURLONG, R.A.; MCMANUS, M.C.: Developments in the life cycle assessment of chemical recycling of plastic waste – A review. *Journal of Cleaner Production* 2021 293
- [DHS26] DAHLMANN, R.; HOPMANN, C.; SCHÖN, M.: *Recycling von Kunststoffen*, Carl Hanser Verlag, 2026
- [DJK+24] DOURI, L.; HAYTHEM, J.; KORDOGHLI, S.; EL HAJJ SLEIMAN, G.; BÉREAUX, Y.: Degradation indicators in multiple recycling processing loops of impact polypropylene and high density polyethylene. *Polymer Degradation and Stability* 219 (2024) ID: 110617
- [DTM+23] DU PLESSIS, L.; THOMAS, H.; MENG, F.; CULLEN, J.M.: A critical review of plastics and circularity in automotive supply chains. 2023
- [FHK+25] FISCHER, P.; HOPMANN, C.; KAMPMANN, B.; KLOKE, P.: Einsatz von Rezyklat als Rohstoff im Spritzgießprozess. *Springer Nature Link*, 01.08.2025
- [Fra22] FRANZISKA, L.: Reichweite von Lieferketten-Pflichten: Was gilt für Rezyklate und (perspektivisch) in Bezug auf den Klimaschutz?. *Ritter Gent Kollegen*, 03.01.2022
- [GCB20] GRANT, A.; CORDLE, M.; BRIDGWATER, E.: European Commission - Quality of recycling: Towards an operational definition. 2020
- [GMH+21] GURSEL, I.V.; MORETTI, C.; HAMELIN, L.; JAKOBSEN, L.G.; STEINIGRIMSDOTTIR, M.M.; JUNGINGER, M.; HOIBYE, L.; SHEN, L.: Comparative cradle-to-grave life cycle assessment of bio-based and petrochemical PET bottles. *Science of The Total Environment* 2021 793. ID: 148642
- [GNB+25] GRÜNERT, G.; NIEMIETZ, P.; BERGS, T.; KALOUSDIAN, A.A.; SCALOGNA, F.: Ökobilanzierung der Mono-PE-Pouch in: Nachhaltige Kunststoffverpackungen aus Post Consumer-Rezyklaten. *Springer Nature* 2025
- [GP11] GIRONI, F.; PIEMONTE, V.: Life cycle assessment of polylactic acid and polyethylene terephthalate bottles for drinking water. *Environmental Progress & Sustainable Energy* 2011 30(3), S. 459-468
- [HAK+25] HAMIDU, I.; AFOTEY, B.; KWAKYE-AWUAH, B.; ANANG, D.A: Synthesis of silica and silicon from rice husk feedstock: A review. *Heliyon* 2025 11
- [Her25] HERMANN, V.: Forschungsaktivitäten auf dem Gebiet „Recycling von Elastomeren“. *thws Kunststoff- und Elastomertechnik, Kunststofftechnik und Vermessung, Würzburg*, 30.10.2025
- [HPL+22] HALLACK, E.; PERIS, N.M.; LINDAHL, M.; SUNDIN, E.: Systematic Design for Recycling Approach – Automotive Exterior Plastics. *Procedia CIRP* 2022 105. S. 204-209

- [Hug25] HUGO, P.: Die Lücke im Rezyklatmarkt. URL: <https://www.umweltwirtschaft.com/politik-maerkte/news/Kunststoffrecycling-Die-Luecke-im-Rezyklatmarkt-32205>, Circular Economy, 27.05.2025
- [HR19] HUUVA, R.; RIBARITS, E.: Recycling XLPE from cable waste. 10th International Conference on Insulated Power Cables. Paris, 2019
- [JAA+24] JIAO, H., ALI, S.S.; HUSSEIN M.; ALSHARBATY, M.; ELSAMAHY, T.; ABDELKARIM, E.; SCHAGERL, M.; AL-TOHAMY, R.; SUN, J.: A critical review on plastic waste life cycle assessment and management: Challenges, research gaps, and future perspectives. ScienceDirekt, 02.2024
- [JKR+21] JESWANI, H.; KRÜGER, C.; RUSS, M.; HORLACHER, M.; ANTONY, F.; HANN, S.; AZAPAGIC, A.: Life cycle environmental impacts of chemical recycling via pyrolysis of mixed plastic waste in comparison with mechanical recycling and energy recovery. Science of the Total Environment 2021 769
- [Ker24] KERPS, A.: Recycelte Kunststoffe bewerten – ein Dilemma der Ökobilanz. URL: <https://transforming-economies.de/recycelte-kunststoffe-bewerten-ein-dilemma-der-oekobilanz/>, transforming econimcs, 30.10.2025
- [KOY+14] KURAM, E.; OZCELIK, B.; YILMAZ, F.; TIMUR, G.; SAHIN, Z.M.: The effect of recycling number on the mechanical, chemical, thermal, and rheological properties of PBT/PC/ABS ternary blends: With and without glass-fiber. Polymer Composites 2014 35(10). S. 2074-2084
- [Liu10] LIU, Y.: Research on the Disassembly Design of the Used Cars. Key Engineering Materials 2010 426-427. S. 303-307
- [LKF06] LUZURIAGA, S.; KOVÁŘOVÁ, J.; FORTELNÝ, I.: Degradation of pre-aged polymers exposed to simulated recycling: Properties and thermal stability. Polymer Degradation and Stability 2006 91(6). S. 1226-1232
- [LSF+22] LANGWIESER, J.; SCHWEIGHUBER, A.; FELGEL-FARNHOLZ, A.; MARSCHIK, C.; BUCHBERGER, W.; FISCHER, J.: Determination of the Influence of Multiple Closed Recycling Loops on the Property Profile of Different Polyolefins. Polymers 2022 14(12) ID: 2429
- [Mel25] MELODIE, M.: Recycled plastics 30 years and €400bn away from cost parity with virgin plastics. CSOFutures Ltd: 23 Grand Parade, Brighton, 27.05.2025
- [MGM+23] MARÍN-GENESCÀ, M.; GARCÍA-AMORÓS, J.; MUDARRA, M.; VIDAL, L.M.; CAÑAVATE, J.; COLOM, X.: Insights into the Structural and Dielectric Behavior of Composites Produced from EPDM Waste Processed through a Devulcanization Method and SBR. ACS Publications, 30.03.2023
- [MMR24] MUZATA, T.S.; MATUANA, L.M.; RABNAWAZ, M.: Challenges in the mechanical recycling and upcycling of mixed postconsumer recovered plastics (PCR): A review. Current Research in Green and Sustainable Chemistry 2024 8. ID: 100407
- [NN13] N.N.: Lanxess converts Genomatica's BDO into biobased PBT. URL: <https://biomassmagazine.com/articles/lanxess-converts-genomaticas-bdo-into-biobased-pbt-9117>, Lanxess Ag, Genomatica Inc., 25.06.2013

- [NN16a] N.N.: Toray Plastics (America) Announces A Breakthrough In Bio-Based Film For Solar Control Window Film Applications. Toray Plastics, Inc., 17.02.2016
- [NN16b] N.N.: DIN EN 16785-1: Biobasierte Produkte - Biobasierter Gehalt - Teil 1: Bestimmung des biobasierten Gehalts unter Verwendung der Radiokarbon- und Elementaranalyse. Berlin: Beuth-Verlag, 2016
- [NN17a] N.N.: Merkblatt Biobasierte Produkte und die 14C-Methode. Merkblatt, TÜV Rheinland, 2017, 30.10.2025
- [NN17b] N.N.: European Bioplastics e.V. - ACCOUNTABILITY IS KEY Environmental Communication Guide for Bioplastics. 2017
- [NN18] N.N.: Product Environmental Footprint Category 1 Rules Guidance. European Commission, PEFCR Guidance document, 05.2018
- [NN19a] N.N.: Neste and LyondellBasell announce commercial-scale production of bio-based polypropylene and bio-based low-density polyethylene. URL: <https://www.european-bioplastics.org/neste-and-lyondellbasell-announce-commercial-scale-production-of-bio-based-polypropylene-and-bio-based-low-density-polyethylene/>, European Bioplastics, Berlin, 27.06.2019
- [NN19b] N.N.: Inovyn launches first commercially available grade of bio-attributed PVC. URL: <https://www.bioplasticsmagazine.com/en/news/meldungen/20191017Inovyn-launches-first-commercially-available-grade-of-bio-attributed-PVC-.php>, bioplastics MAGAZINE, Polymedia Publisher GmbH, 17.10.2019
- [NN20a] N.N.: NKT reduces environmental footprint by mechanical recycling of XLPE material. NKT, 05.02.2020
- [NN20b] N.N.: Borealis producing certified renewable polypropylene at own facilities in Belgium. URL: <https://www.borealisgroup.com/news/borealis-producing-certified-renewable-polypropylene-at-own-facilities-in-belgium>, Borealis, 10.03.2020
- [NN20c] N.N.: LANXESS launches bio-based prepolymer line Adiprene Green. URL: <https://www.plasticportal.eu/articles/lanxess-launches-bio-based-prepolymer-line-adiprene-green>, LANXESS Central Eastern Europe s.r.o., 31.08.2020
- [NN22a] N.N.: BIOPLASTICS facts and figures. Datenblatt, Plastics Europe, Berlin, 2022, 30.10.2025
- [NN22b] N.N.: "Bio"-Kunststoffe. Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland e. V.. Mai 2022
URL: https://www.bund.net/fileadmin/user_upload_bund/publikationen/chemie/chemie_biokunststoffe_hintergrund.pdf, 30.12.2025
- [NN22c] N.N.: Coca-Cola, Suntory Cross the 100% Plant-Based Bottle Finish Line. Packworld, 25.04.2022

- [NN22d] N.N.: Huntsman Develops Breakthrough Bio-Based Polyurethane System For Lower Carbon Automotive Acoustic Applications. URL: <https://www.huntsman.com/about/polyurethanes/news/detail/15761/huntsman-develops-breakthrough-bio-based-polyurethane>, Huntsman, 02.11.2022
- [NN22e] N.N.: ASTM D6866 - 22: Standard Test Methods for Determining the Biobased Content of Solid, Liquid, and Gaseous Samples Using Radiocarbon Analysis. West Conshohocken, USA: ASTM International, 2022
- [NN23a] N.N.: "Rezyklate aus chemischem Recycling werden teurer als Neuware sein". URL: https://www.k-online.de/de/media_news/k-mag/nachhaltigkeit/recycling/erema-manfred-hackl-klaus-lederer, Messe Düsseldorf GmbH, 14.07.2023
- [NN23b] N.N.: bvse fordert CO₂-Bepreisung für Neukunststoffe. URL: <https://www.bvse.de/gut-informiert-kunststoffrecycling/pressemitteilungen-kunststoffrecycling/10349-bvse-fordert-co2-bepreisung-fuer-neukunststoffe.html>, bvse-Fachverband Kunststoffrecycling, 15.12.2023
- [NN23c] N.N.: Kreislaufwirtschaft: Verbesserung der Konstruktion und des End-of-Life-Managements von Kraftfahrzeugen für eine ressourceneffizientere Automobilindustrie. Pressemitteilung EU. 13.07.2023
- [NN24a] N.N.: Plastics - the fast Facts 2024. Datenblatt, Plastics Europe AISBL, 30.10.2025
- [NN24b] N.N.: Yazaki and Toray Jointly Develops Recycled PBT Grade for Automotive Wiring Harness Connectors Contributing to Carbon Neutrality. Yazaki Corporation; Toray Industries, Inc., Tokio 2024
- [NN24c] N.N.: Polyurethan fuers Recycling. KZeitung, Schlütersche Fachmedien GmbH. 15.04.2024
- [NN24d] N.N.: BIOPLASTICS MARKET DEVELOPMENT UPDATE 2024. European Bioplastics e.V., nova-Institute, Hürth, 2024
- [NN24e] N.N.: Union partners with Envalior to deliver sustainable snowboard binding made of Durethan® Blue. Envalior, 02.12.2024
- [NN24f] N.N.: Braskem and Neste announce agreement on supply of circular and bio-circular feedstocks for polymers and chemicals production. URL: <https://www.braskem.com/europe/news-detail/braskem-and-neste-announce-agreement-on-supply-of-circular-and-bio-circular-feedstocks-for-polymers-and-chemicals-production>, Braskem Europe GmbH, 23.10.2024
- [NN24g] N.N.: BioVinyl. URL: https://www.teknorapex.com/content/dam/teknorapex/teknor-pardot-assets/BioVinyl_Brochure_042224_Web.pdf, Teknor Apex Company, 2024
- [NN24h] N.N. LEONI LIMEVERSE - Fahrzeugleitungen für eine neue Zeit. URL: https://d3ga0yfowtcfnef.cloudfront.net/fileadmin/group/press/releases/2024/files/PM_Leoni_Limeverse_fin.pdf, Leoni Limeverse, 11.07.2024

- [NN24i] N.N.: Envalior launches a new range of sustainable Pocan® PBT compounds based on bio-circular BDO. URL: <https://www.envalior.com/en-us/insights/press-release/envalior-launches-a-new-range-of-sustainable-pocan-pbt-compounds-based-on-bio-circular-bdo> , Envalior, 15.10.2024
- [NN24j] N.N.: Dow announces bio-based NORDEL™ REN EPDM at DKT 2024. URL: <https://corporate.dow.com/en-us/news/press-releases/dow-announces-bio-based-nordel-ren-epdm.html>, Dow Chemical Company, 03.07.2024
- [NN24k] N.N.: Preisdruck: Recyclingbranche in der Krise. URL: <https://www.fachpack.de/de-de/fachpack-360/2024-1/article/markt-und-preisdruck-recyclingbranche-in-der-krise> , Nürnberg Messe GmbH, 20.01.2024
- [NN24l] N.N.: The Circular Economy for Plastics – A European Analysis 2024. URL: <https://plasticseurope.org/knowledge-hub/the-circular-economy-for-plastics-a-european-analysis-2024/>, Plastics Europe, 30.10.2025
- [NN24m] N.N.: CHINAPLAS 2024: Pressemitteilung BASF China and Autoliv China cooperate on 'Design-for-Recycling' polyurethanes (PU) foam technology. URL: <https://www.basf.com/tw/en/media/news-releases/asia-pacific/2024/04/chinaplas-2024--basf-china-and-autoliv-china-cooperate-on-design>, 14.04.2024
- [NN25a] N.N.: Biobasierte Kunststoffe, Möschl Innovation in Kunststoff, URL: <https://www.moeschl-kunststoffverarbeitung.de/material/biobasierte-kunststoffe/> , 30.10.2025
- [NN25b] N.N.: Massenbilanzierung. URL: <https://biowerkstoffe.fnr.de/biokunststoffe/massenbilanzierung>, 30.10.2025
- [NN25c] N.N.: REDcert Gesellschaft zur Zertifizierung nachhaltig erzeugter Biomasse mbH. URL: <https://www.redcert.org/>, REDcert, 30.10.2025
- [NN25d] N.N.: Sustainability Certification for the Circular Economy and Bioeconomy. URL: <https://www.iscc-system.org/certification/iscc-certification-schemes/iscc-plus/>, 03.11.2025
- [NN25e] N.N.: Kunststoff Recyclinganlagen Verzeichnis. URL: <https://de.enfplastic.com/directory/plant>, ENF Ltd., 30.10.2025
- [NN25f] N.N.: Progress Report 2025. Vinyl plus, Brüssel, 2025, 30.10.2025
- [NN25g] N.N.: Kreislauffenster: Neue Kunststofffenster mit hohem Anteil an Recycling-PVC (rPVC). RAL-Gütegemeinschaft Kunststoff-Fensterprofilesysteme e.V., Bonn, 30.10.2025
- [NN25h] N.N.: Pivotal 2651. Datenblatt, Westlake Corporation, 2025
- [NN25i] N.N.: Cycle-Tek® Wire & Cable Compounds With Up To 50% Recycled Content. Datenblatt, Teknor Apex Company, Januar 2025
- [NN25j] N.N.: Intelligentes Kabelmanagement und Kabelkennzeichnung für Industrie und Gewerbe. URL: <https://www.murrplastik.com/de/> , Murrplastik, 30.10.2025
- [NN25k] N.N.: Innovative PU recycling. URL: <https://purman.com/innovative-pu-recycling/>, Purman, 30.10.2025
- [NN25l] N.N.: PU-Recycling. URL: <https://www.purplan.com/anlagen/pu-recycling>, Purplan, Wallenhorst, 30.10.2025

- [NN25m] N.N.: PUR-Recycling - So recyceln Sie Polyurethan smart. URL: <https://www.eps-verdichter-runi.de/recycling-leitfaeden/pur-recycling>, Runi Danish Engineering, Tarm, 30.10.2025
- [NN25n] N.N.: EPDMCycle. URL: <https://www.bosscover.com/en/epdmcycle>, BossCover, 2025
- [NN25o] N.N.: Chemisches Recyclingportfolio Borealis Borcycle™ C liefert kreislaforientierte Lösungen für vernetzte Polyethylene in der Draht- und Kabelindustrie sowie im Infrastruktursektor. Borealis, 30.10.2025
- [NN25p] N.N.: Recycling Content TPE. URL: <https://www.kraiburg-tpe.com/en/recycling-content-tpe>, Kraiburg-TPE, 30.10.2025
- [NN25q] N.N.: Recycled Content Tpes. URL: <https://www.avient.com/products/thermoplastic-elastomers/resound-recycled-content-thermoplastic-elastomers>, Avient, 30.10.2025
- [NN25r] N.N.: TPEs with 60% Post-Consumer Recycled Content, Reducing Carbon Footprint by up to 36%. URL: <https://www.teknorapex.com/en-us/resources/technical-literature/tpes-with-60-post-consumer-recycled-content-reducing-carbon-footprint-by-up-to-36>, 03.11.2025
- [NN25s] N.N.: Biobasierte „drop-in“ Kunststoffe. URL: <https://dom-pt.com/de/kompetenzen/kunststofflexikon/b/biobasierte-drop-in-kunststoffe>, dom Polymer-Technik GmbH, Schlüsselfeld, 30.10.2025
- [NN25t] N.N.: Rilsan® Polyamide 11 Resin. URL: <https://www.arkema.com/usa/en/product/technicalpolymers/rilsan-family-products/rilsan-pa11/>, Rilsan, USA, 30.10.2025
- [NN25u] N.N.: URL: <https://www.nexeoplastics.de/typen/kunststoff-produktfinder/?s=Ecopaxx>, Nexeo Plastics, 30.10.2025
- [NN25v] N.N.: Eastlon. URL: <https://fkur.com/en/bioplastics/eastlon/>, FKUR, 30.10.2025
- [NN25w] N.N.: Bio-PP's Impact on Automotive Sustainability. URL: <https://www.plasticsengineering.org/2024/06/bio-pps-impact-on-automotive-sustainability-005404/>, SPE Europe, 30.10.2025
- [NN25x] N.N.: Vynova. URL: <https://www.vynova-group.com/products/pvc/commercial-information>, Vynova Wilhelmshaven, 30.10.2025
- [NN25y] N.N.: Keltan® Eco. URL: <https://www.arlanxeo.com/en/brands/keltan-eco>, Arlanxeo, 30.10.2025
- [NN25z] N.N.: BIOMAT's Pilot Lines: Pioneering the Future of Bio-PUR Functional Foams. URL: <https://www.biomat-testbed.eu/news/biomats-pilot-lines-pioneering-the-future-of-bio-pur-functional-foams>, BIOMAT, 30.10.2025
- [NN25aa] N.N.: Bio-based TPE. URL: <https://www.kraiburg-tpe.com/de/bio-based-tpe>, Kraiburg-TPE, 30.10.2025
- [NN25ab] N.N.: Bio-Derived Thermoplastic Elastomers. URL: <https://www.avient.com/products/thermoplastic-elastomers/resound-bio-thermoplastic-elastomers>, Avient, 30.10.2025
- [NN25ac] N.N.: Terraprene® Biobased TPE compounds for extrusion and injection molding. URL: <https://fkur.com/en/bioplastics/terraprene/>, FKUR, 30.10.2025
- [NN25ad] N.N.: Dryflex Green TPE aus nachwachsenden Rohstoffen. URL: <https://www.hexpol.com/tpe/de/product-brands/dryflex-green/>, Hexpol TPE, 30.10.2025

- [NN25ae] N.N.: Novoloop. URL: <https://www.novoloop.com/recycled-plus-tpu>, 30.10.2025
- [NN25af] N.N.: Worauf es bei Biokunststoffen ankommt. URL: <https://www.kunststoffe.de/a/fachartikel/worauf-es-bei-biokunststoffen-ankommt-6839186>, Kunststoffe.de, 30.10.2025
- [NN25ag] N.N.: Methodik der Preiserhebung und Datenberechnung. URL: <https://www.kiweb.de/Default.aspx?pageid=221>, Kunststoff Information, 30.10.2025
- [NN25ah] N.N.: Rohstoffe & Preise. URL: https://plasticker.de/preise/preise_monat_single.php, plasticker, 30.10.2025
- [NN25ai] N.N.: Energiepreise. URL: <https://www.kiweb.de/default.aspx?pageid=251>, Kunststoff Information, 30.10.2025
- [NN25aj] N.N.: Competitiveness of secondary materials. URL: <https://www.eea.europa.eu/en/circularity/thematic-metrics/business/competitiveness-of-secondary-materials>, European Environment, 07.01.2025
- [NN25ak] N.N.: Why Recycled Plastic Is More Expensive Than Virgin Plastic? 3 Key Reasons Explained. URL: <https://www.haisiextrusion.com/Why-Recycled-Plastic-Is-More-Expensive-Than-Virgin-Plastic-3-Key-Reasons-Explained-id42936506.html>, Nanjing Haisi Extrusion Equipment Co., Ltd., 12.06.2025
- [NN25al] N.N.: At Fakuma: New Polyamide Compound Grades with Recycled Content Provide Good Balance of Cost and Performance. URL: <https://www.teknorapex.com/en-us/news/new-polyamide-compound-grades-with-recycled-content-provide-good-balance-of-cost-and-performance>, Teknor Apex, 30.10.2025
- [NN25am] N.N.: Recycled Polyamide Fiber Analysis Report 2025: Market to Grow by a CAGR of XX to 2033, Driven by Government Incentives, Popularity of Virtual Assistants, and Strategic Partnerships. URL: <https://www.archivemarketresearch.com/reports/recycled-polyamide-fiber-645424#>, Archivemarketresearch, 31.06.2025
- [NN25an] N.N.: Recycled Polyamide 6(PA6) Market Size and Forecast. URL: <https://www.verifiedmarketreports.com/product/recycled-polyamide-6-pa6-market/>, VerifiedMarketReports, 07.2025
- [NN25ao] N.N.: Eutrophierung. Umweltbundesamt, 30.10.2025
- [NN25ap] N.N.: VDI ZRE: Ökobilanz – DIN EN ISO 14040/44. URL: <https://www.ressource-deutschland.de/leitfaden-re/methoden/oekobilanz-din-en-iso-14040/44/>, 03.11.2025
- [NN25aq] N.N.: Ökobilanz von Kunststoffen. URL: <https://plasticseurope.org/de/nachhaltigkeit/kreislaufwirtschaft/life-cycle-thinking/oekobilanz/>, Plastics Europe, 30.10.2025

- [NN25ar] N.N.: Chemical Recycling From plastic waste to virgin-grade products. BASF, 30.10.2025
- [NN25as] N.N.: Cradle to Gate und Cradle to Grave: Unterschied beider Ansätze im Product Carbon Footprint (PCF). URL: <https://greenvisionsolutions.de/cradle-to-gate/>, Green Vision Solutions, 30.10.2025
- [NN25at] N.N.: PA6 GF30 BK — a sustainable recycled compound. URL: <https://enneatech.com/en/pa6-gf30-bk-a-sustainable-recycled-compound/>, Enneatech, 30.10.2025
- [NN25au] N.N.: MOCOM Alfater XL. URL: https://www.mocom.eu/dam/jcr:e6099633-61a8-4c53-b9a9-de1effcbe77c/MOCOM_Flyer_Alfater_XL_EPDM-Ersatz_0724_EN_web.pdf&ved=2ahUKEwj4meSmuuyPAxVy9QIHHeoTEKwQFnoECD4QAQ&usg=AOvVaw1iMFfcGqMNEz6EgV2WdzHz, 03.11.2025
- [NN25av] N.N.: Biokunststofftool. URL: <https://biokunststofftool.de/anleitung/>, 03.11.2025
- [NN25aw] N.N.: REDcert - Nachhaltigkeit zertifizieren. URL: <https://www.redcert.org/zertifizierungsstellen/#c772>, 03.11.2025
- [NN25ax] N.N.: ISCC International Sustainability & Carbon Certification. URL: <https://www.iscc-system.org/certification/iscc-certification-schemes/iscc-plus/>, ICSS System GmbH, 30.10.2025
- [NN25ay] N.N.: Kernarbeitsnormen der Internationalen Arbeitsorganisation (ILO). URL: <https://www.bmz.de/de/service/lexikon/kernarbeitsnormen-der-internationalen-arbeitsorganisation-60428>, 03.11.2025
- [NN25az] N.N.: United Nations Global Compact. URL: <https://www.globalcompact.de/ueber-uns/united-nations-global-compact>, 03.11.2025
- [NN25ba] N.N.: NaWiKo - Neue Wege, Strategien, Geschäfts- und Kommunikationsmodelle für Biokunststoffe als Baustein einer Nachhaltigen Wirtschaft. URL: <https://nachhaltigeswirtschaften-soef.de/handlungsempfehlungen-f%C3%BCr-die-%C3%B6kobilanzierung-von-biobasierten-kunststoffen.html>, 03.11.2025
- [NN25bb] N.N.: Bio-based and biodegradable plastics. URL: <https://www.umweltbundesamt.de/en/bio-based-biodegradable-plastics#25may-bio-based-plastic-bags-be-disposed-of-in-the-biowaste-bin>, 03.11.2025
- [OEJ15] OLECHOWSKI, A.; EPPINGER, S.D.; JOGLEKAR, N.: Technology Readiness Levels at 40: A Study of State-of-the-Art Use, Challenges, and Opportunities. Institute of Electrical and Electronics Engineers, Portland, 2015 International Conference on Management of Engineering and Technology (PICMET), 2015
- [OIV+24] ORTEGO, A.; IGLESIAS.ÉMBIL, M.; VALERO, A.; GIMENO-FABRA, M.; MONNÉ, C.; MORENO, F.: Disassemblability Assessment of Car Parts: Lessons Learned from an Ecodesign Perspective. Sustainability 2024 26(6)

- [OP25] OSWALD, C.; PIEPER, M.: New wire harness tapes with solvent-free adhesive and recycled backing material are used to bundle and protect thousands of cables. URL: <https://www.tesa.com/en-us/about-tesa/press-insights/stories/more-sustainable-tapes-for-automotive-electrical-systems.html> , 30.10.2025
- [PCH+13] PAWELZIK, P.; CARUS, M.; HOTCHKISS, J.; NARAYAN, R.; SELKE, S.; WELLISCH, M.; WEISS, M.; WICKLE, B.; PATEL, M.K.: Critical aspects in the life cycle assessment (LCA) of bio-based materials – Reviewing methodologies and deriving recommendations. Resources, Conservation and Recycling 73 (2013). S. 211-228
- [RDG17] RAGAERT, K.; DELVA, L.; VAN GEEM, K.: Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste. Waste Management 2017 69
- [RDZ+22] RIKHTER, P.; DINC, I.; ZHANG, Y.; JIANG, T.; MIYASHIRO, B.; WALSH, S.; WANG, R.; DINH, Y.; SUH, S.: Life Cycle Environmental Impacts of Plastics: A Review. Material Measurement Laboratory and Engineering Laboratory. National Institute of Standards and Technology. Gaithersburg, 03.2022
- [RML24] ROSSIGNOLO, G.; MALUCELLI, G.; LORENZETTI, A.: Recycling of polyurethanes: where we are and where we are going. Universita di Padova, Padova. 2024
- [RS25] REITER, A.; SIELER, F.: Recyceltes Polyvinylchlorid (rPVC) - Eigenschaften, Anwendungen und Vorteile. Ambio, Berlin, 30.10.2025
- [San07] SANCHEZ, E.M.S.: Ageing of PC/PBT blend: Mechanical properties and recycling possibility. Polymer Testing 2007 26(3). S. 378-387
- [SB11] SADAT-SHOJAI, M.; BAKHSHANDEH, G.-R.: Recycling of PVC wastes. Polymer Degradation and Stability 2011 96(4). S. 404-415
- [SBM+24] SHAPIRO, A.J.; BRIGANDI, P.J.; MOUBARAK, M.; SENGUPTA, S.S.; EPPS, T.H. III: Cross-Linked Polyolefins: Opportunities for Fostering Circularity Throughout the Materials Lifecycle. ACS Publications, 20.19.2024
- [Sch17] SCHUBERT, M.: Din EN 16640: 2017-08: Biobasierte Produkte – Gehalt an biobasiertem Kunststoff – Bestimmung des Gehalts an biobasiertem Kohlenstoff mittels Radiokarbonmethode. Berlin 2017, 30.10.2025
- [Sch25] SCHUETT, L.-R.: Driving the Uptake of Sustainable Plastics for Automotives. IDtechEx, 15.04.2025
- [SCT+24] SKOCZINSKI, P.; CARUS, M.; TWEDDLE, G.; RUIZ, P.; DAMMER, L.; ZHANG, A.; PORANKI, N.; BÖRGER, L.; DE GUZMAN, D.; PASSENIER, R.; ALI, T.; KÄB, H.; HARTLEY, M.; RASCHKA, A.: Bio-based Building Blocks and Polymers Global Capacities, Production and Trends 2024–2029 – Short Version (PDF). Nova-Institute GmbH, 03.2025
- [Sha25] SHARMA, RAKSHA: Polyamide 6 (PA6) Market. URL: <https://dataintelo.com/report/global-polyamide-6-pa6-market>, Dataintelo, 30.10.2025
- [Sie24] SIEBEL, T.: Ökobilanzen im Kunststoffrecycling sollen vergleichbar werden. Springer Professional, 28.02.2024

- [SON14] SOH, S.L.; ONG, S.K.; NEE, A.Y.C.: Design for Disassembly for Remanufacturing: Methodology and Technology. *Procedia CIRP* 2014 14. S. 407-412
- [SS20] SCHYNS, Z.O.G.; SHAVER, M.: Mechanical Recycling of Packaging Plastics: A Review., *Macromol Rapid Commun.* 2021 42(3)
- [SSM24] SELVIN, M.; SHAH, S.; MARIA, H.J.; THOMAS, S.; TULADHAR, R.; JACOB, M.: Review on Recycling of Cross-Linked Polyethylene. *ACS Publications*, 10.01.2024
- [Ste24] STEIN, A.: Mehr Giftstoffe als bislang bekannt: Recycler Kunststoff steckt zuweilen voller Chemikalien. URL: <https://www.geo.de/wissen/forschung-und-technik/recycler-kunststoff-steckt-zuweilen-voller-chemikalien-34432892.html>, *Geo*, 06.02.2024
- [SWP09] SHEN, L.; WORRELL, E.; PATEL, M.: Present and future development in plastics from biomass. *Biofuels Bioproducts & Biorefining* 2010 4(1). S. 25-40
- [Thi20] THIELEN, M.: Biokunststoffe. Datenblatt, Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V., Gülzow-Prüzen, 2020, URL: <https://www.fnr.de/fileadmin/Mediathek/224/224-biokunststoffe-2020.pdf>, 09.06.2026
- [TMB+22] TITONE, V.; MISTRETTA, M.C.; BOTTA, L.; LA MANTIA, F.P.: Toward the Decarbonization of Plastic: Monopolymer Blend of Virgin and Recycled Bio-Based, Biodegradable Polymer. *Polymers* 2022 14(24)
- [VMC+22] VIEYRA, H.; MOLINA-ROMERO, J.M.; CALDERÓN-NÁJERA, DE DIOS CALDERÓN-NÁJERA, J.; SANTANA-DÍAZ, A.: Engineering, Recyclable, and Biodegradable Plastics in the Automotive Industry: A Review. *Polymers* 2022 14(16)
- [VSK21] VOGT, B.D.; STOKES, K.K.; KUMAR, S.K.: Why is Recycling of Postconsumer Plastics so Challenging? *Applied Polymer Materials* 2021 3. S. 4325-4346
- [VSS+21] VOLK, R.; STALLKAMP, C.; STEINS, J.J.; YOGISH, S.P.; MÜLLER, R.C.; STAPF, D.; SCHULTMANN, F.: Techno-economic assessment and comparison of different plastic recycling pathways: A German case study. *Journal of Industrial Ecology* 2021 25(5). S. 1318-1337
- [Wie25] WIEBKE, P.: Warum Biokunststoffe nur eingeschränkt "bio" sind. *Plastik in der Umwelt*, 30.10.2025
- [WKH25] WAGNER, P.; KLEINSORGE, J.; HOPMANN, C.: Influence of the Recyclate Content on the Process Stability and Part Quality of Injection Moulded Post-Consumer Polyolefins. *Advances in Polymer Technology* 2025 1. ID: 7570978
- [WM96] WENGUANG, M.; LA MANTIA, F.P.: Processing and Mechanical Properties of Recycled PVC and of Homopolymer Blends with Virgin PVC. *Journal of Applied Polymer Science* 1996 59. S. 759-767
- [WS24] WOLF, A.T.; STAMMER, A.: Chemical Recycling of Silicones—Current State of Play (Building and Construction Focus). *Stammer Chemie GmbH*, 2024

- [YN24] YADAV, K.; NIKALJE, G.C.: Comprehensive analysis of bioplastics: life cycle assessment, waste management, biodiversity impact, and sustainable mitigation strategies. PeerJ, 11.09.2024
- [Zam19] ZAMPORI, L.: Suggestions for updating the Product Environmental Footprint (PEF) method. Publications Office of the European Union, 2019
- [ZB22] ZABOROWSKA, M.; BERNAT, K.: The development of recycling methods for bio-based materials – A challenge in the implementation of a circular economy: A review. Waste Management Res. 2022 41(1). S. 68-80

Übersicht zu Quellen Tabelle 9.1:

PVC: -10 bis -36 %	LEONI: LIMEVERSE: Weitere Innovationen zur CO ₂ -Reduzierung
PVC: bis -39 %	The VinyLoop [®] Eco-Footprint: Benchmarking of the environmental impact of PVC compound recycled in the VinyLoop [®] process with PVC compound produced in conventional route (virgin PVC compound and incineration).
PP: 0,51 kg CO ₂ e/kg	Carbon Cloud: Plastic, PP resin, mechanically recycled. URL: https://apps.carboncloud.com/climatehub/product-reports/id/129820111820 , 03.11.2025
PP: 30-80 %	NORDAHL, S.L.; BARAL, N.R. HELMS, B.A.; SCOWN, C.D.: Complementary roles for mechanical and solvent-based recycling in low-carbon, circular polypropylene. <i>Sustainability Science</i> 120 (2023) 46
PP: -35 %	STAUB, O.: Milliken liefert Additive - Recyceltes Polypropylen ist greifbar nahe. <i>Industrieanzeiger</i> . 20.12.2022
PP: -50 %	Greenleaf: Die vernünftige Perspektive? - CO ₂ -Fußabdruck von Polypropylen im Vergleich zu anderen Materialien. URL: https://greenleaf.de/blog/die-vernueftige-perspektive , 03.11.2025
PP: bis -42 %	GALVE, J.E.; ELDUQUE, D.; PINA, C.; JAVIERRE, C.: Life Cycle Assessment of a Plastic Part Injected with Recycled Polypropylene: A Comparison with Alternative Virgin Materials. <i>International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology</i> . 9 (2022). S. 919-932
PP: bis -42 %	SALEEM, J.; TAHIR, F.; BAIG, M.Z.K.; AL-ANSARI, T.; MCKAY, G.: Assessing the environmental footprint of recycled plastic pellets: A life-cycle assessment perspective. <i>Environmental Technology & Innovation</i> . 32 (2023). ID: 103289
PP: -71 %	The Association of Plastic Recyclers White Paper: <i>Virgin vs. Recycled Plastic Life Cycle Assessment Energy Profile and Life Cycle Assessment Environmental Burdens</i> . 05/2020
PP: -72%	Kunststoffexpress: EXA-rPP. URL: https://kunststoffexpress.de/en/wp-content/themes/kx_en/dist/pdf/Footprint-Flyer-rPP.pdf , 03.11.2025

PA6: bis -30 %	AKRO Compounds: AKROMID® ECO: Innovative und nachhaltige Alternativen zu herkömmlichen Polyamiden - Rezyklate (ECO). URL: https://akro-plastic.com/de/compounds/akromid-eco , 03.11.2025
PA6: bis -40 %	BASF: My Polyamides Portal. URL: https://mypolyamidesportal.basf.com/s/ , 03.11.2025
PA6: mehr als -60 %	ENVALIOR: PA 6 mit reduziertem CO ₂ -Fußabdruck. <i>K-Aktuell</i> . 05.02.2025
PA6: bis -90 %	ENNEATECH: PA6 GF30 BK - a sustainable recycled compound. URL: https://enneatech.com/en/pa6-gf30-bk-a-sustainable-recycled-compound/ , 03.11.2025
PA6.6: niedriger CO ₂ - Fußabdruck	MOCOM: Altech® ECO: Near-To-Prime Recycling compound solution. 2023
PBT: mehr als 30 %	ENVALIOR: Envalior bringt eine neue Reihe nachhaltiger Pocan® PBT-Compounds auf Basis von bio-zirkulärem BDO auf den Markt (Pressemitteilung). 15.10.2024
PBT: -35 % (rPET+rPBT)	AKRO Compounds: PRECITE® ECO: Post-Consumer-Compound. URL: https://akro-plastic.com/de/compounds/precite/precite-eco , 03.11.2025
PBT: -49 %	Plastoplan Kunststoffe: Sabic ELCRIN™ iQ – It's not recycled, it's upcycled!. URL: https://plastoplan.com/nachhaltigkeit-mit-kunststoff/ , 03.11.2025
PBT: bis -53 % (rPC+rPBT)	N.N.: PC/PBT-Rezyklat mit verbesserter Leistung. <i>KZeitung</i> . 27.11.2023
EPDM:	Celanese: Customer Presentation Santoprene® TPV. 12/2022
EPDM:	MOCOM: Alfater XL: Alternative to EPDM Quick Guide
XLPE: better CO ₂ impact	BOREALIS: Unlocking the value of recycled XLPE (Case Study). 09/2020
XLPE: 1,4 bis 1,6 kg CO ₂	BOREALIS: PP TPE vs XLPE cables. URL: https://campaigns.borealisgroup.com/cablesrecyclabilitystudy/#contact , 03.11.2025
PET: - 35 % (rPET+rPBT)	AKRO Compounds: PRECITE® ECO: Post-Consumer-Compound. URL: https://akro-plastic.com/de/compounds/precite/precite-eco , 03.11.2025
PET: -59 %	The Association of Plastic Recyclers White Paper: <i>Virgin vs. Recycled Plastic Life Cycle Assessment Energy Profile and Life Cycle Assessment Environmental Burdens</i> . 05/2020
TPE: 16 bis 37 %	KRAIBURG: FACT SHEET - TPE mit Recycling-Anteil >70% für technische Anwendungen
TPE: bis -36 %	TEKNOR APEX: TPEs with 60% Post-Consumer Recycled Content, Reducing Carbon Footprint by up to 36%. URL: https://www.teknorapex.com/en-us/resources/technical-literature/tpes-with-60-post-consumer-recycled-content-reducing-carbon-footprint-by-up-to-36 , 03.11.2025
TPE: fast 40 %	MOCOM: Alfater® Produktübersicht. URL: https://www.mocom.eu/de/products/products-overview/alfater , 03.11.2025
TPE: -54 %	KORRELS: Reducing the CO ₂ footprint with recycled and renewable TPE compounds. URL: https://www.korrels.nl/en/reducing-the-co2-footprint-with-recycled-and-renewable-tpe-compounds/ , 03.11.2025

13 Anhang

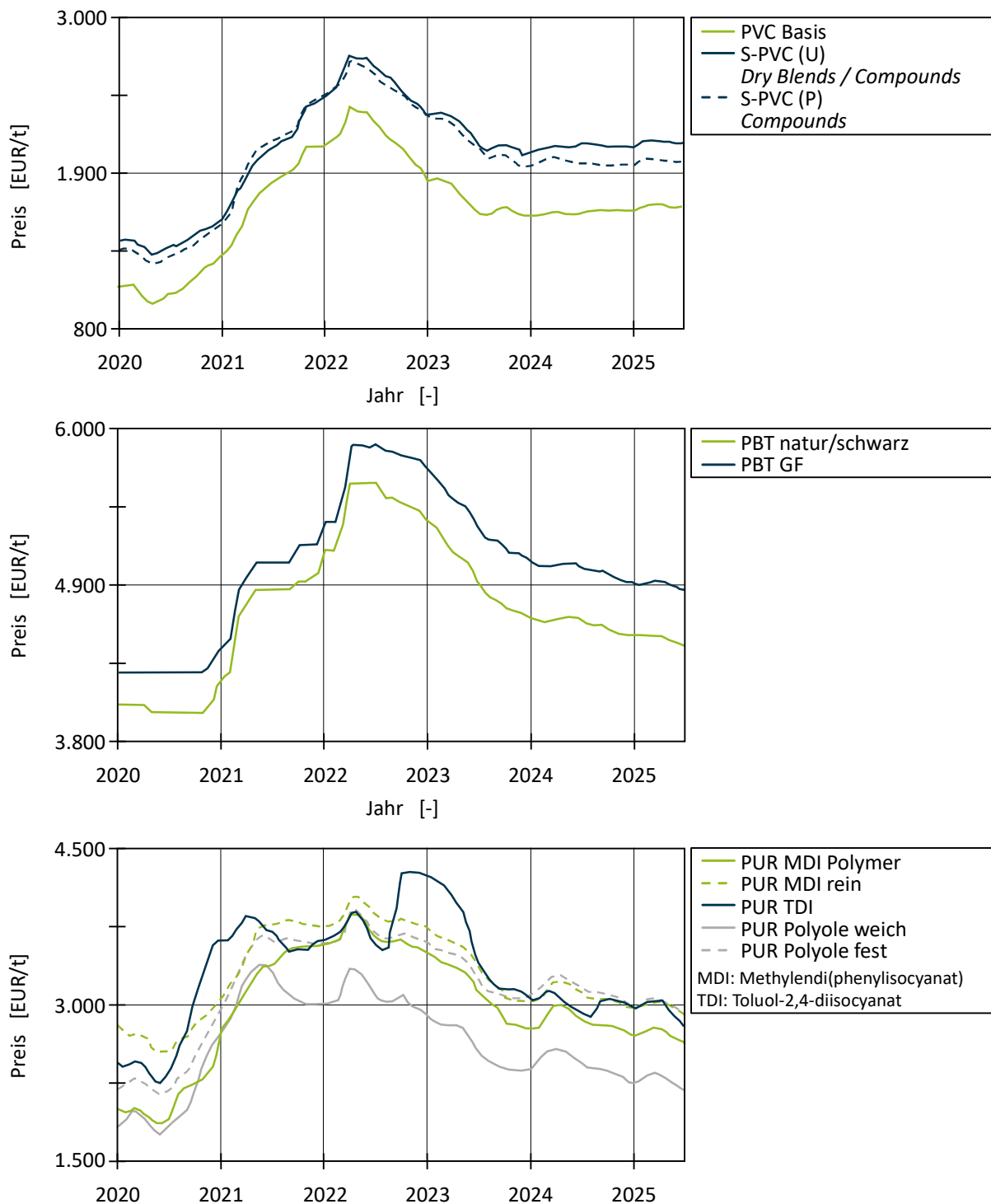


Abbildung 13.1: Preisentwicklungen für Neuware von PVC, PBT und PUR [KI]