TEXTE
132/2026

Kurzfassung

AutoRess - Ressourcenschonende und kreislaufwirtschaftsfähige Kraftfahrzeuge

Instrumente und Maßnahmen zur Reduktion des Rohstoffbedarfs im Verkehrssektor durch zirkuläre Ökonomie parallel zu einer Energiewende im Verkehr

von:

Jürgen Sutter, Stefanie Degreif, Katharina Göckeler, Johannes Klinge, Sarah Hurst, Izabela Kosińska-Terrade, Nino Schön-Blume, Edda Winter
Öko-Institut e. V., Darmstadt

Kirsten Biemann, Frank Dünnebeil, Birte Ewers, Claudia Kämper, Sonja Limberger, Florian Petri, Monika Dittrich
ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg gGmbH, Heidelberg

Georg Mehlhart
Mehlhart Consulting, Darmstadt

Herausgeber:
Umweltbundesamt

Für Mensch & Umwelt

Umwelt Bundesamt

TEXTE 132/2026

REFOPLAN des Bundesministeriums Umwelt,
Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz

Forschungskennzahl 3722 57 101 0

Kurzfassung

AutoRess - Ressourcenschonende und kreislaufwirtschaftsfähige Kraftfahrzeuge

Instrumente und Maßnahmen zur Reduktion des Rohstoffbedarfs im Verkehrssektor durch zirkuläre Ökonomie parallel zu einer Energiewende im Verkehr

von

Jürgen Sutter, Stefanie Degreif, Katharina Göckeler, Johannes Klinge, Sarah Hurst, Izabela Kosińska-Terrade, Nino Schön-Blume, Edda Winter
Öko-Institut e. V., Darmstadt

Kirsten Biemann, Frank Dünnebeil, Birte Ewers, Claudia Kämper, Sonja Limberger, Florian Petri, Monika Dittrich
ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg gGmbH, Heidelberg

Georg Mehlhart
Mehlhart Consulting, Darmstadt

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Impressum

Herausgeber
Umweltbundesamt
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau
Tel: +49 340-2103-0
Fax: +49 340-2103-2285
buergerservice@uba.de
Internet: www.umweltbundesamt.de

Durchführung der Studie:
Öko-Institut
Rheinstraße 95
64295 Darmstadt

Abschlussdatum:
Dezember 2025

Redaktion:
Fachgebiet I 2.2 Schadstoffminderung und Energieeinsparung im Verkehr und
Fachgebiet III 1.2 Produktverantwortung – Elektrogeräte, Fahrzeuge und Batterien
Martin Kortschack und Regina Kohlmeyer

DOI:
https://doi.org/10.60810/openumwelt-8350

ISSN 1862-4804

Dessau-Roßlau, September 2026

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen*Autoren.

Kurzbeschreibung: AutoRess - Ressourcenschonende und kreislaufwirtschaftsfähige Kraftfahrzeuge

Im Projekt AutoRess wurden Optionen zur Verringerung der Auswirkungen des Pkw-Verkehrs in Deutschland auf das Klima und den Ressourcenverbrauch analysiert. Es wurden 10 technische und nicht-technische Themen für zusätzliche Treibhausgas- und Materialeinsparungen definiert und anschließend eingehend analysiert. Sie wurden auf der Grundlage einer systematischen Analyse der wichtigsten Hebel entlang aller Lebenszyklusphasen von Pkw ausgewählt. Jedes ausgewählte Thema befasst sich mit einem bestimmten Aspekt des Verkehrssystems, der durch technologische, soziale oder politische Maßnahmen beeinflusst werden kann. Es wurden drei Hebel identifiziert, die einen besonders starken Einfluss auf die Ziele haben: Reduzierung der Fahrzeug- und Batterieabmessungen, längere Lebensdauer von Fahrzeugen und Batterien sowie höhere Mengen an recycelten Materialien. Es wurde eine Vision für ein ressourceneffizientes Fahrzeug entwickelt und Kriterien zur Erfüllung dieser Vision analysiert. Diese Vision basiert auf rein batteriebetriebenen Elektroautos. Sie gelten als ressourceneffizient, wenn sie über ihren gesamten Lebenszyklus hinweg so wenig Primärrohstoffe wie möglich benötigen, so wenig Energie wie möglich verbrauchen, so wenig Treibhausgase wie möglich ausstoßen, so langlebig wie möglich sind und ihre Komponenten am Ende ihrer Lebensdauer so vollständig wie möglich und ohne Downcycling in den Materialkreislauf zurückgeführt werden können. Auf Grundlage der Modellergebnisse und der entwickelten Kriterien wurden Maßnahmen und Instrumente identifiziert, beschrieben und bewertet. Ausgewählte Maßnahmen sind ein Bonus-Malus-System auf der Grundlage der Fahrzeugabmessungen, eine gesetzliche lebenslange Garantie für das gesamte Fahrzeug, die Besteuerung von Firmenwagen auf der Grundlage von Höchstwerten für CO_2-Emissionen (PCF) oder maximalen Rohstoffverbrauch, Mindestanforderungen an die Energiedichte von Batterien, Ziele für den Recyclinganteil von Kunststoffen und Stahl sowie die Einführung eines EPR-Systems zur Finanzierung einer ordnungsgemäßen Behandlung von Altfahrzeugen. All diese Maßnahmen wurden zu einer Roadmap für die Kreislaufwirtschaft für Fahrzeuge zusammengefasst.

Abstract: AutoRess - Resource efficient and circular electric cars

In the project AutoRess, options for reducing the impact of passenger car transport in Germany on climate and resource use were analysed. 10 technical and non-technical topics for additional GHG and material savings were defined and then analysed in depth. They were selected based on a systematic analysis of key levers along all life cycle phases of passenger cars. Each selected topic addresses a specific aspect of the transport system that can be influenced by technological, social or political measures. Three levers were identified that have a particularly strong impact on the goals: reduction of vehicle and battery dimensions, longer vehicle and battery lifetime, and higher quantities of recycled materials. A vision for a resource-efficient vehicle was developed and criteria were analysed to fullfill this vision. This vision is based on purely battery-powered electric cars. They are considered resource-efficient if, over their entire life cycle, they require as few primary raw materials as possible, consume as little energy as possible, emit as few greenhouse gases as possible, are as durable as possible, and their components can be returned to the material cycle as completely as possible and without downcycling at the end of their life. Based on the model results and developed criteria measures and instruments were identified, described and evaluated. Selected measures are Bonus-malus system based on vehicle dimensions, a statutory lifetime guarantee for the entire vehicle, company car taxation based on maximum values for CO_2 emissions (PCF) or maximum raw material consumption, minimum requirements for the energy density of batteries, recycled content targets for plastics and steel and the introduction of EPR scheme to finance proper ELV treatment operations. All together were combined to form a Circular Economy Roadmap for vehicles.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis ... 8

Tabellenverzeichnis ... 10

Zusammenfassung ... 11

Summary ... 21

1 Das AutoRess-Modell für die Auswirkungen technischer und nichttechnischer Themen auf Treibhausgase und Materialien ... 30

1.1 Entwicklung eines Modells für Treibhausgas- und Materialauswirkungen ... 30

1.2 Methodik und Annahmen für die Entwicklung der Baseline ... 31

1.2.1 Neuwagenproduktion ... 32

1.2.2 Ende der Lebensdauer: Wiederverwendung und Recycling ... 37

1.3 Basisentwicklungen der Treibhausgasemissionen und des Materialbedarfs des Autotransports in Deutschland mit aktuellen Treibern ... 38

1.3.1 Treibhausgasemissionen ... 38

1.3.2 Materialbedarf für Neuwagen und Recyclinganteil ... 39

1.4 Treibhausgas- und Materialauswirkungen ausgewählter zusätzlicher Faktoren ... 42

1.4.1 Vertiefte Analyse von 10 technischen und nicht-technischen Themen ... 42

1.4.2 Treibhausgasauswirkungen ... 43

1.5 Materialauswirkungen für die Neuwagenproduktion ... 47

2 Factsheets ... 54

2.1 Factsheet 1: Projektübersicht ... 54

2.2 Factsheet 2: Handlungsfelder für ein treibhausgas- und ressourcenschonendes Auto ... 59

2.3 Factsheet 3: Vision eines ressourcenschonenden Fahrzeugs ... 67

2.4 Factsheet 4: Ökonomische Maßnahmen zur Reduktion des Rohstoffbedarfs im PKW-Verkehr ... 68

2.5 Factsheet 5: Downsizing ... 70

2.6 Factsheet 6: Reparatur und Wiederaufbereitung: Herausforderungen beim Übergang zur Elektromobilität und empfohlene Maßnahmen ... 74

2.7 Factsheet 7: Ökodesign: Wie E-Fahrzeuge länger nutzbar und reparierbar werden, ohne zu veralten ... 77

2.8 Factsheet 8: Rezyklatanteil von Batteriematerialien im Zusammenhang mit der EU-Batterieverordnung und der Umstellung auf Elektromobilität ... 79

2.9 AutoRess Factsheet 9: Verbesserung der Kreislaufwirtschaft für Kunststoffe in Kraftfahrzeugen – Technische und rechtliche Prioritäten ... 83

2.10 Factsheet 10: Einsatz von Recyclingstahl in der Automobilherstellung ... 88

2.11 Factsheet 11: Öffentliche Beschaffung 90
3 Kriterien für ressourcenschonende, kreislaufwirtschaftsfähige Fahrzeuge 93
3.1 Vorschlag: Definition eines ressourcenschonenden Fahrzeugs 93
3.2 Größte Hebel auf die Ressourcennutzung für Fahrzeuge 94
3.3 Kriterien 94
3.3.1 Zukünftige Kriterien 96
3.4 Nutzungsprofile 96
3.5 Anwendungsmöglichkeiten für Kriterien 97
4 Maßnahmen und Instrumente 100
4.1 Bonus-Malus-System: Fahrzeugabmessungen 100
4.2 Verpflichtung der Mitgliedstaaten zur Einrichtung kollektiver oder individueller EPR-Systeme 102
4.3 Gesetzliche lebenslange Garantie für das gesamte Fahrzeug 105
4.4 Besteuerung von Firmenwagen 107
4.5 Maßnahmen im Bereich Batterien: Energiedichte/Kapazität 109
4.6 Verpflichtung zur Bereitstellung detaillierter Anweisungen zum Austausch und zur Entfernung von Teilen und Komponenten 111
4.7 Festlegung von Zielvorgaben für den Rezyklatanteil bei Stahl 114
5 Die Rolle der öffentlichen Beschaffung 116
5.1 Handlungsansätze für Ressourcenschonung in der Fahrzeugbeschaffung: Was können Beschaffende heute konkret tun? 116
5.2 Welche weiteren Hilfestellungen benötigen Beschaffende? 119
6 Quellenverzeichnis 121

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Einfluss verschiedener Faktoren auf den Materialbedarf von Autos in verschiedenen Lebenszyklusphasen 32
Abbildung 2: Treibhausgasemissionen (GWP 100a) der Produktion eines durchschnittlichen Neuwagens im Jahr 2021/2030....34
Abbildung 3: Materialgruppen in einem durchschnittlichen Auto (Neuzulassung 2021) 35
Abbildung 4: Jährliche Fahrleistung (links) und Neuzulassungen (rechts) von Autos in Deutschland nach Antriebskonzept 36
Abbildung 5: Treibhausgasemissionen des Pkw-Verkehrs in Deutschland einschließlich aller Phasen des Lebenszyklus....39
Abbildung 6: Jährlicher Materialbedarf für neue Pkw in Deutschland....40
Abbildung 7: Materialbedarf für neue Personenkraftwagen und recycelte Inhaltsstoffe – Stahl und Eisen 41
Abbildung 8: Materialbedarf für neue Personenkraftwagen und Recyclinganteil – Kunststoffe 41
Abbildung 9: Materialbedarf für neue Personenkraftwagen und Recyclinganteil – Lithium....42
Abbildung 10: Treibhausgasemissionen des Pkw-Verkehrs in Deutschland 2035 und 2045 (alle Fahrzeuglebensphasen) mit einzelnen Optionen im Vergleich zum Basisjahr 2025....44
Abbildung 11: Veränderungen der Treibhausgasemissionen des Pkw-Verkehrs in Deutschland 2035 und 2045 (alle Lebensphasen) im Vergleich zur Basislinie des jeweiligen Szenariojahres....46
Abbildung 12: Jährlicher Gesamtmaterialbedarf an Stahl und Eisen im Jahr 2045....48
Abbildung 13: Jährlicher Gesamtmaterialbedarf an Lithium im Jahr 2045 49
Abbildung 14: Jährlicher Gesamtmaterialbedarf an Stahl und Eisen im Jahr 2045....50
Abbildung 15: Jährlicher Primärmaterialbedarf – Stahl und Eisen....51
Abbildung 16: Jährlicher Gesamtbedarf – Kobalt 52
Abbildung 17: Jährlicher Primärmaterialbedarf – Kobalt 53
Abbildung 18: Die 11 Factsheets in AutoRess....54
Abbildung 19: Die analysierten 10 Themenbereiche in AutoRess....55
Abbildung 20: Aspekte der vorgeschlagenen Definition für ein ressourcenschonendes und kreislaufwirtschaftsfähiges Fahrzeug 56
Abbildung 21: Die Roadmap für die Kreislaufwirtschaft....58
Abbildung 22: Die AutoRess-Publikationen 59
Abbildung 23: Ausgewählte Handlungsfelder in AutoRess....60
Abbildung 24: Änderung der Treibhausgasemissionen des Pkw-Verkehrs in Deutschland 2035 (alle Lebensphasen) im Vergleich zur Referenz des jeweiligen Szenariojahres 66

Abbildung 25: Änderung der Treibhausgasemissionen des Pkw-Verkehrs in Deutschland 2045 (alle Lebensphasen) im Vergleich zur Referenz des jeweiligen Szenariojahres 66
Abbildung 26: Renault Twizy aus der Fahrzeugklasse L7e 68
Abbildung 27: Mittlere Leergewichte neuer Pkw und prozentuale Aufschlüsselung der Neuzulassungen nach Kaufsegmenten in Deutschland 2003–2022 71
Abbildung 28: Konfiguration von Downsizing-Pkw im Vergleich zum mittleren Pkw im Jahr 2030 im AutoRess-Modell 73
Abbildung 29: Mitsubishi i-MiEV als Beispiel für einen vollelektrischen Kei Car 74
Abbildung 30: Übersicht der Maßnahmen in verschiedenen Lebensphasen 75
Abbildung 31: Materialersparnis durch wiederverwertete Ersatzteile und Komponenten am Ende ihrer Lebensdauer im Vergleich zu 2025. 76
Abbildung 32: Änderungen des Gesamtrohstoffbedarfs im Vergleich zu 2025 78
Abbildung 33: Flussdiagramm der Batterie-Recyclingrouten 82
Abbildung 34: Veränderung des Primärmaterialbedarfs für Fahrzeuge im Jahr 2045 im Vergleich zu 2025 83
Abbildung 35: Kunststoffverbrauch pro Sektor in der EU27+3 in % 85
Abbildung 36: Abfallhierarchie mit dem Fokus Kunststoff im AutoRess-Projekt 86
Abbildung 37: Mengen an Stahl und Eisen in Neuwagen in der EU 89
Abbildung 38: Aspekte der vorgeschlagenen Definition für ein ressourcenschonendes und kreislaufwirtschaftsfähiges Fahrzeug 93

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Faktoren, die die Treibhausgasemissionen und Materialauswirkungen im Fahrzeuglebenszyklus beeinflussen 31
Tabelle 2: Recyclinganteil in ausgewählten Materialien des Fahrzeugunterbaus und Antriebsstrangs in der AutoRess-Basisentwicklung (alle Jahre).....35
Tabelle 3: Recyclinganteil in den Batteriezellen in der AutoRess-Baseline-Entwicklung 36
Tabelle 4: Modellbasierte Annahmen für das Recycling von Materialien aus Glider und Antriebssträngen.....38
Tabelle 5: Modellbaseline-Annahmen für das Recycling von Batteriezellmaterialien 38
Tabelle 6: Übersicht über die analysierten technischen und sozialen Optionen.....42
Tabelle 7: Kriterien, die die Aspekte der Definition eines ressourceneffizienten Fahrzeugs abdecken 57
Tabelle 8: Rezyklatanteil in Batteriematerialien für den deutschen Pkw-Markt mit Herkunft aus einem geschlossenen Recyclingprozess (closed-loop).....82
Tabelle 9: THG- und Ressourcenschonende Pkw-Konfigurationen im AutoRess-Anspruchsniveau „Öffentliche Beschaffung“.....91
Tabelle 10: Kriterien, die die Aspekte der Definition für ein ressourcenschonendes Fahrzeug abdecken.....94
Tabelle 11: Festgelegte Nutzungsprofile und ihre Anforderungen.....97
Tabelle 12: Vorgeschlagene Maximalwerte für die Kriterien Größe, Batteriekapazität und Energieverbrauch für die verschiedenen Nutzungsprofile und Ambitionsniveaus eines ressourcenschonenden Fahrzeugs 98
Tabelle 13: Erreichbare Rezyklatanteile für Stahl und Eisen in Neufahrzeugen 115
Tabelle 14: Fahrzeugpooling 117
Tabelle 15: Dimensionierung des Fahrzeugs (Downsizing).....117
Tabelle 16: Dimensionierung der Batteriekapazitäten 117
Tabelle 17: Mindestanforderungen und Zuschlagskriterien.....118
Tabelle 18: Ausstattungsverzicht 118
Tabelle 19: THG- und Ressourcenschonende Pkw-Konfigurationen im AutoRess-Anspruchsniveau „Öffentliche Beschaffung“.....118

Zusammenfassung

Die Pariser Vereinbarungen und der Klimaschutzplan 2050 setzen auch im Verkehrssektor klare CO_2-Reduktionsziele. Diese können nur mit einer ambitionierten Umstellung auf Elektrofahrzeuge erreicht werden. Elektrofahrzeuge zeichnen sich durch spezielle Komponenten wie den elektrischen Antriebsmotor, die Batterie, die Brennstoffzelle oder die Leistungselektronik aus. Im Projekt AutoRess wurden technische und nicht-technische Optionen zur Verringerung der Auswirkungen des Verkehrs auf das Klima und den Ressourcenverbrauch über alle Phasen des Fahrzeuglebenszyklus hinweg analysiert. Auf dieser Grundlage wurden geeignete Instrumente und Maßnahmen entwickelt und bewertet sowie eine Definition und Kriterien für ein ressourceneffizientes Fahrzeug erarbeitet. All dies wurde zu einer Roadmap für die Kreislaufwirtschaft für Fahrzeuge zusammengefasst.

Die Ergebnisse wurden in verschiedenen Workshops an den Projektbeirat sowie an externe Experten und interne UBA-Experten zurückgemeldet. Das Projekt wurde vom Öko-Institut zusammen mit der ifeu gGmbH, Mehlhart Consulting und team ewen von November 2022 bis August 2025 durchgeführt.

Eingehende Analyse technischer und sozialer Optionen

In AutoRess wurden die Treibhausgasemissionen und Primärmaterial-Einsparpotenziale im deutschen Pkw-Verkehrssektor für verschiedene, vorwiegend technische Optionen unter Berücksichtigung aller Lebenszyklusphasen der Fahrzeuge analysiert.

Als Ausgangspunkt für die Bewertung des zukünftigen Treibhausgas- und Materialeinsparpotenzials im Fahrzeuglebenszyklus muss zunächst bewertet werden, wie sich die verschiedenen Einflussfaktoren und die daraus resultierenden Treibhausgasemissionen und Materialbedarfe ohne zusätzliche Eingriffe entwickeln werden („aktuelle Treiber“). Als Ergebnis der systemischen Analyse direkter und indirekter Faktoren, die die Treibhausgasemissionen und den Rohstoffverbrauch beeinflussen, wurden 10 technische und gesellschaftliche Optionen (siehe folgende Tabelle) ausgewählt. Diese wurden anschließend eingehend analysiert, um zusätzliches Potenzial („zusätzliche Treiber“) zu bewerten. Der aktuelle Status quo, Entwicklungstrends mit aktuellen Treibern und Handlungsfelder für zusätzliche Treiber zur Reduzierung von Treibhausgasemissionen und Materialbedarf wurden in Expertenworkshops diskutiert.

Übersicht über die analysierten Handlungsfelder

Handlungsfeld	Untersuchte Ansätze
1. Antriebswechsel	Verschiedene Batterietechnologien und Zellmaterialien (LFP, Festkörper-NMC, Na-Ion); Variation der Batteriekapazitäten
2. Verkleinerung der Fahrzeuge	Verlagerung der Neuzulassungen hin zu kleineren Fahrzeugen
3. Leichtbau	Verwendung von Leichtbaumaterialien, insbesondere Aluminium, in verschiedenen Fahrzeugkomponenten; Leichtbauweise von Batteriegehäusen
4. Kreislauforientiertes Design	Autodesigns, die die Langlebigkeit oder die Menge der wiederverwendbaren/wiederverwertbaren Komponenten erhöhen
5. Reparatur und Wiederaufbereitung von E-Fahrzeug-Batterien	Höherer Anteil wiederverwendeter und wiederaufbereiteter Ersatzteile

Handlungsfeld	Untersuchte Ansätze
6. Reparatur und Wiederaufbereitung der Fahrzeugkarosserie	Höherer Anteil an „hoher Reparaturfähigkeit und Wiederverwendungspotenzial“
7. Rezyklateinsatz von Batterierohstoffen	Veränderungen der Rücklaufquoten von Batteriematerialien aus dem Batterierecycling; Auswirkungen des Graphitrecyclings
8. Rezyklateinsatz von Metallen (Fe, Cu, Al, antriebsunabhängig)	Unterschiedliche Anteile an recyceltem Metall in der Fahrzeugkarosserie (ohne Batterie)
9. Kreislaufführung von Kunststoffen	Kunststoffrecycling; Verwendung nicht-fossiler Kunststoffquellen
10. Altfahrzeugentsorgung	Höherer Anteil an vor dem Schreddern demontierten Materialien, höherer Anteil an Materialrückgewinnung aus Glas und höherer Anteil an hochwertigem Recycling von Stahl, Aluminium und Kupfer

Quelle: eigene Darstellung, ifeu / Öko-Institut

Modellierung

Für AutoRess wurde ein detailliertes Modell des Autoverkehrs in Deutschland erstellt, das alle Phasen des Fahrzeuglebenszyklus umfasst. Anhand dieses Modells wurden für alle 10 Optionen vergleichbare Treibhausgas- und Materialeinsparpotenziale bis 2045 abgeleitet. Für jede Option wurden bis zu 5 Varianten modelliert und die Bandbreite der Treibhausgas- und Materialeffekte abgeschätzt. Im Berechnungsmodell wird das System des Autoverkehrs in Deutschland im Zeitraum 2020/21 bis 2045 in 5-Jahres-Schritten über alle Lebenszyklusphasen hinweg abgebildet, wobei alle relevanten Einflussfaktoren berücksichtigt und miteinander verknüpft werden. Status quo und Trendentwicklungen für alle Einflussfaktoren, die für Treibhausgasemissionen und Materialbedarf relevant sind, wurden aus bestehenden Analysen übernommen oder zusätzlich abgeleitet. Die Auswirkungen der analysierten Optionen auf die verschiedenen Einflussfaktoren wurden erfasst und die sich daraus ergebenden Veränderungen im Vergleich zur Trendentwicklung direkt im Modell ermittelt.

Die Zahl der Neuzulassungen wurde dem Projektionsbericht 2024 entnommen. In den Jahren 2025 und 2030 werden jährlich 3,1 bis 3,2 Millionen neue Personenkraftwagen zugelassen, wobei der Anteil batterieelektrischer Fahrzeuge kontinuierlich steigen wird. Nach 2030 werden die jährlichen Neuzulassungen auf 2,8 Millionen Fahrzeuge (2035) und 2,6 Millionen Fahrzeuge (ab 2040) zurückgehen. Ab 2035 werden nur noch BEV neu zugelassen (siehe folgende Abbildung, rechts).

Die Fahrzeugabmessungen, Gewichte und Motorleistungen sind in den letzten Jahrzehnten stetig gestiegen. Dieses Wachstum wird sich voraussichtlich auch in den kommenden Jahren fortsetzen. Das AutoRess-Modell basiert auf den durchschnittlichen Leergewichten der Neuzulassungen im Jahr 2021, mit einer weiteren Gewichtszunahme von 1,2 % pro Jahr bis 2030.

Die Batteriekapazitäten von Elektroautos werden mit durchschnittlich 61 kWh (Bruttokapazität) angenommen, die bis 2030 auf 88 kWh steigen sollen. Die Zellchemie verlagert sich von NMC622-Batterien im Jahr 2021 zu NMC811-Batterien ab 2030, wobei auch eine teilweise Umstellung auf Lithium-Eisenphosphat-Batterien (LFP) berücksichtigt wird.

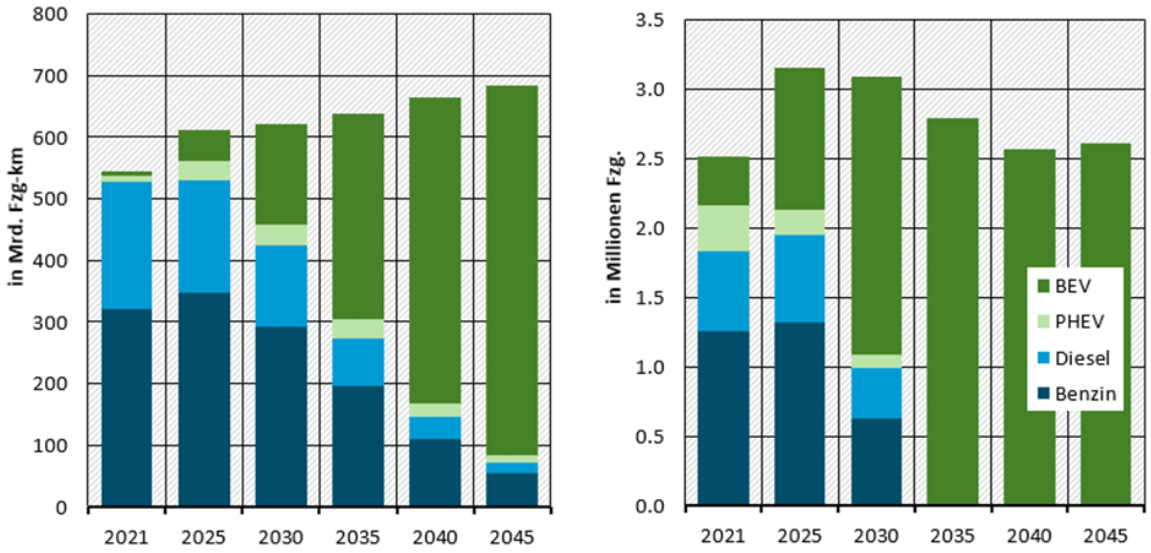
Bei der Berechnung der spezifischen Treibhausgasemissionen aus der Automobilproduktion wurde die zunehmende Umstellung auf erneuerbare Energien in Europa bei der Stromversorgung berücksichtigt, nicht jedoch die langfristige Entfossilisierung der globalen Materialversorgung.

Die durchschnittlichen prozentualen Materialzusammensetzungen des Fahrgestells und des Antriebsstrangs bleiben in allen Jahren konstant.

Die Nutzungsphase umfasst einerseits den Energieverbrauch und die daraus resultierenden Treibhausgasemissionen während des Betriebs von Kraftfahrzeugen und andererseits die Emissionen und den Materialbedarf bei der Wartung und Reparatur von Kraftfahrzeugen.

Von 2021 bis 2030 wird die Fahrleistung von Personenkraftwagen (siehe folgende Abbildung, linke Seite) um 14 % steigen, wobei der Anteil, der mit batterieelektrischen Pkws zurückgelegten Kilometer auf 26 % steigen wird. Auch nach 2030 wird die Kilometerleistung von Personenkraftwagen weiter stetig steigen und bis 2045 ein Niveau erreichen, das 10 % über dem von 2030 liegt. Batterieelektrische Autos werden 2045 88 % der Kilometerleistung ausmachen.

Jährliche Fahrleistung (links) und Neuregistrierungen (rechts) von PKWs in Deutschland



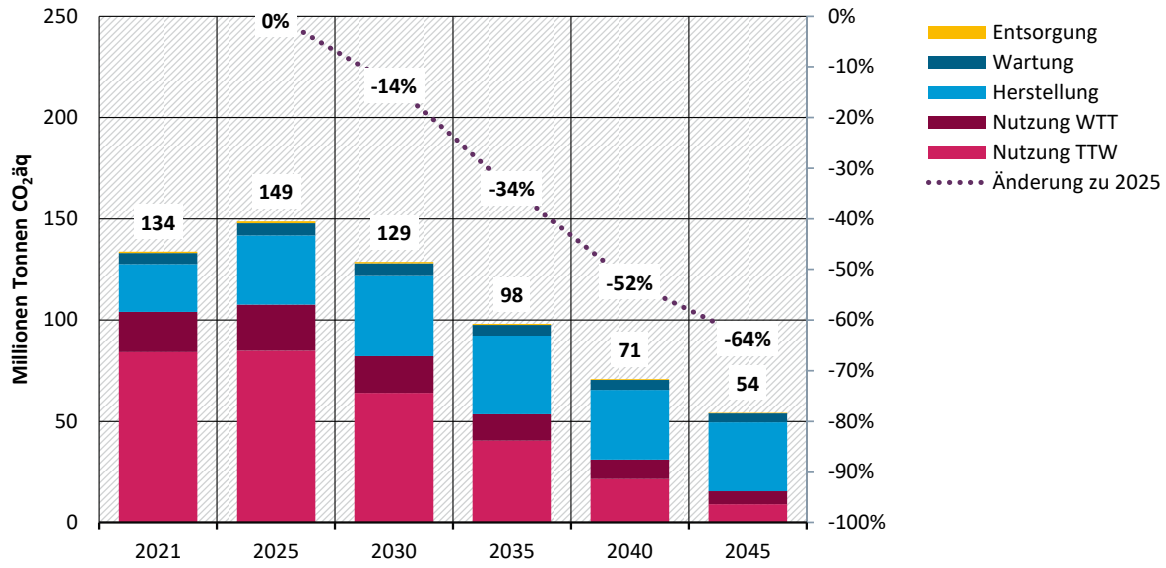
Quelle: auf Grundlage des "with existing measures scenario" (MMS) des 2024 Projektions-Berichts (Harthan et. al. 2024)

Treibhausgasemissionen und Materialbedarf im Pkw-Verkehr in Deutschland

Im Referenzszenario sinken die Treibhausgasemissionen aus dem Pkw-Verkehr in Deutschland bis 2030 um 4 % von 134 Millionen Tonnen auf 129 Millionen Tonnen, bis 2045 jedoch aufgrund der zunehmenden Elektromobilität und der Dekarbonisierung der Stromversorgung um fast 60 % auf 54 Millionen Tonnen (siehe folgende Abbildung).

Im Gegensatz dazu werden die Emissionen aus der Automobilproduktion zwischen 2021 und 2030 zunächst von 24 Millionen Tonnen CO_2e auf 40 Millionen Tonnen CO_2e steigen, bevor sie bis 2045 wieder auf 34 Millionen Tonnen CO_2e sinken. Der Anstieg der Emissionen bis 2030 ist gleichermaßen auf die höhere jährliche Zahl der Neuzulassungen und den steigenden Anteil der Neuzulassungen von Elektroautos zurückzuführen. Von 2030 bis 2035 wird die Zahl der jährlichen Neuzulassungen von Elektroautos zunächst weiter steigen, nach 2035 jedoch zurückgehen. Gleichzeitig werden die spezifischen Emissionen aus der Automobilproduktion nach 2030 sinken, da in den Produktionsprozessen zunehmend erneuerbare Energien zum Einsatz kommen.

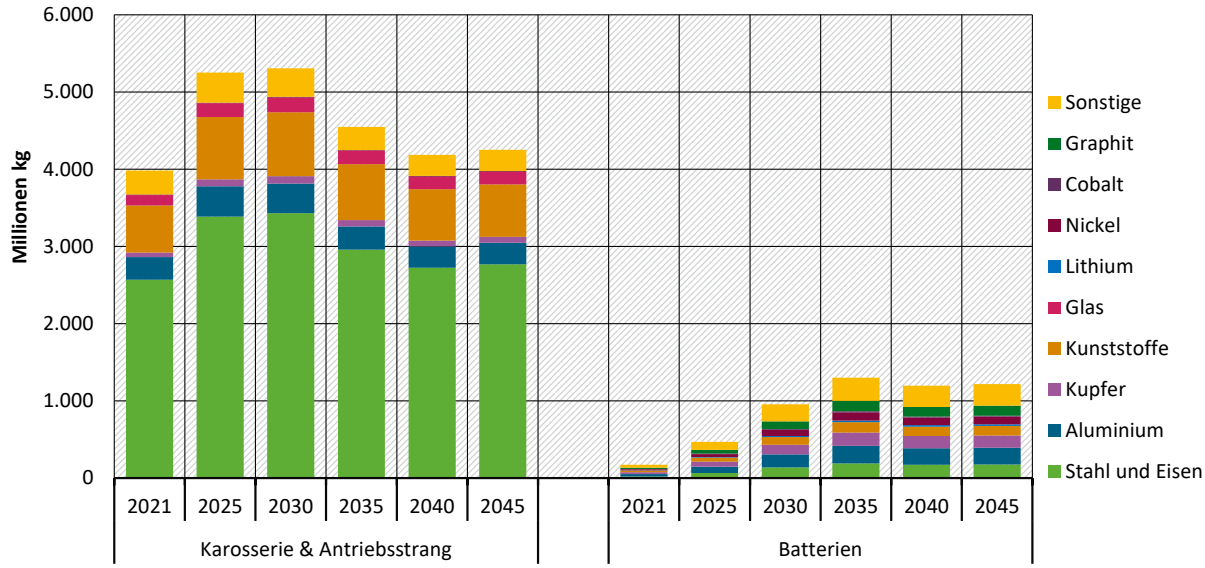
Treibhausgasemissionen des PKW-Verkehrs in Deutschland einschl. aller Lebenszyklus-Phasen



Quelle: Eigene Berechnungen, ifeu

Der jährliche Gesamtmaterialbedarf in der Automobilproduktion (siehe folgende Abbildung) wurde nach Materialgruppen berechnet, differenziert nach Fahrgestellen und Antriebssträngen sowie Batterien. Der Materialbedarf für Fahrgestelle und Antriebsstränge wird hauptsächlich durch die Gesamtzahl der Neuzulassungen und die Zunahme des Fahrzeuggewichts bestimmt. Die Verlagerung der Neuzulassungen hin zu Elektroautos spiegelt sich vor allem in dem starken Anstieg des Materialbedarfs für Batterien wider. Der Materialbedarf für Fahrgestelle und Antriebe wird von Stahl und Eisen sowie Aluminium und Kunststoffen dominiert. Zusammen machen diese etwa 88 % des Gewichts aus. Weitere gewichtsrelevante Materialgruppen sind Kupfer und Glas. Stahl, Aluminium und Kunststoffe machen zusammen auch 42 % des Materialbedarfs in Batterien aus. Kupfer, Nickel und Graphit haben ebenfalls bedeutende Anteile von jeweils 8 bis 14 %. Im Gegensatz dazu sind die Zellmaterialien Lithium und Kobalt in der Gesamtmaterialbilanz mit jeweils 1 bis 3 % des Gesamtgewichts nur gering vertreten.

Jährlicher Rohstoffbedarf des PKW-Verkehrs in Deutschland (Neuwagen)



Quelle: auf Grundlage des jährlichen Neuregistrierungen und des “with existing measures scenario” (MMS) des 2024 Projektions-Berichts (Harthan et. al. 2024)

Materialauswirkungen bei der Neuwagenproduktion

Der Vergleich der Auswirkungen der zehn technischen und sozialen Optionen konzentriert sich auf den Materialbedarf bei der Neuwagenproduktion. Veränderungen beim Materialbedarf für die Wartung und Reparatur von Fahrzeugen wurden in einzelnen Optionen behandelt.

Der Materialbedarf aller Antriebsarten wird bis 2035 und 2045 trotz der Zunahme der Fahrzeuggrößen gegenüber 2025 leicht zurückgehen. Grund dafür ist der in der Trendentwicklung angenommene Rückgang der jährlichen Neuzulassungen.

Demgegenüber wird der Bedarf an Batteriematerialien aufgrund des Ausbaus der Elektromobilität und des zusätzlichen Trends zu größeren Batterien stark ansteigen.

Ansätze mit Fokus auf das gesamte Fahrzeug (z. B. „Downsizing“, „Design for Circularity: Langlebigkeit“) wirken sich aufgrund reduzierter Neuzulassungen oder aufgrund reduzierter Fahrzeuggrößen und damit einhergehender reduzierter Batteriegrößen proportional auf alle Materialgruppen aus.

Optionen mit Schwerpunkt auf Elektromobilität („alternative Antriebe“, „Wiederverwendung / Umnutzung von Batterien“, „Batterien mit recycelten Inhaltsstoffen“) wirken sich nur auf die Nachfrage nach Batteriematerialien aus. Je nach untersuchter Vorgehensweise können alle Batteriematerialien proportional betroffen sein (z. B. Änderung der Batteriekapazitäten, Umnutzung von Batterien), es kann jedoch auch zu erheblichen Unterschieden zwischen einzelnen Batteriematerialien kommen. Eine Änderung der Batterietechnologie (Festkörper, Natrium-Ionen) reduziert die Nachfrage nach ausgewählten Materialien, erhöht aber gleichzeitig die Nachfrage nach anderen.

Einige Optionen wirken sich nur auf ausgewählte Materialgruppen aus, insbesondere auf Leichtbau (Stahl, Aluminium) und Kunststoffrecycling/erneuerbare Kunststoffe.

Optionen, die sich mit der Stilllegung von Autos befassen (Kunststoffrecycling, Ende der Lebensdauer), haben keinen Einfluss auf den Gesamtmaterialbedarf in der Automobilproduktion.

In den meisten Fällen führen die untersuchten Optionen zu einer Verringerung des jährlichen Materialbedarfs. Bei den Optionen „Antriebswechsel “ und „Leichtbau“ kommt es jedoch auch zu einem teilweisen Anstieg des Bedarfs an einzelnen Materialien, wenn die Reduzierung eines Materials mit einer Verlagerung auf andere Materialien einhergeht. Unter „Leichtbau“ wurde in einer Variante auch eine mögliche Verkürzung der Fahrzeuglebensdauer berücksichtigt. Im Modell führt dies zu einem Anstieg der jährlichen Neuzulassungen und damit des Gesamtmaterialbedarfs.

Der Primärmaterialbedarf hängt vom Gesamtmaterialbedarf und vom Recyclinganteil im verwendeten Material ab. Dies spiegelt sich auch in den Veränderungen des Primärmaterialbedarfs aufgrund der verschiedenen technischen und sozialen Optionen wider.

Der Gesamtmaterialbedarf für Neufahrzeuge ändert sich aufgrund von

- Anzahl und Größe der Neufahrzeuge (z. B. Downsizing, Wiederaufarbeitung) oder Fahrzeugkomponenten (z. B. Batteriegröße)
- Materialzusammensetzung der Fahrzeuge (Batteriezellenmaterialien, Aluminium-Leichtbauweise)

Der Rezyklat-Anteil am gesamten Materialverbrauch hängt ab von:

- Geschlossener Recyclingkreislauf: Menge an zurückgewonnenem Material beim Fahrzeugrecycling in Abhängigkeit von
  - Anzahl, Größe und Materialzusammensetzung der ausgemusterten Fahrzeuge,
  - Anteil der ausgemusterten Fahrzeuge und Komponenten, die dem Recycling zugeführt werden, und
  - materialspezifischer Recyclingeffizienz.
- Auswirkungen von geschlossenen Kreisläufen für zurückgewonnene Materialien auf den Gesamtanteil an recycelten Materialien:
  - Erhöhung des Gesamtanteils an recycelten Materialien oder
  - höherer Anteil geschlossener Kreisläufe bei insgesamt unverändertem Anteil an recycelten Materialien.

Vision eines ressourceneffizienten Fahrzeugs

Das AutoRess-Projekt hat eine Vision für ein ressourceneffizientes Fahrzeug entwickelt. Diese Vision basiert auf rein batteriebetriebenen Elektroautos. Diese gelten als ressourceneffizient und für die Kreislaufwirtschaft geeignet, wenn sie die folgenden Bedingungen erfüllen

- Über den gesamten Lebenszyklus wird so wenig Primärrohstoffe wie möglich verbraucht.
- Über den gesamten Lebenszyklus werden so wenig Treibhausgase wie möglich ausgestoßen.
- Über den gesamten Lebenszyklus wird so wenig Energie wie möglich verbraucht.
- Die Lebensdauer des Fahrzeugs ist so lang wie möglich.
- Die Komponenten der Fahrzeuge können auf möglichst effiziente Weise recycelt werden, ohne dass ein Downcycling erforderlich ist.
- Zusätzliche negative ökologische und soziale Auswirkungen werden minimiert.

Die im Rahmen des Projekts „AutoRess“ durchgeführte Modellierung des Ressourcenverbrauchs und der Treibhausgasemissionen in der Automobilindustrie in 10 ausgewählten Themenbereichen hat drei Hebel identifiziert, die einen besonders starken Einfluss auf die Ziele haben:

- Reduzierung der Fahrzeug- und Batteriegrößen
- Längere Lebensdauer
- Höhere Mengen an recycelten Materialien

Kriterien für ein ressourceneffizientes Fahrzeug

Anhand der Ergebnisse des Modells in Kombination mit Expertenwissen und weiteren Forschungsergebnissen wurden Kriterien formuliert, um die Anforderungen an ein ressourceneffizientes Fahrzeug zu erfüllen.

Um die Anforderungen zu erfüllen, sollte ein ideales batterieelektrisches Fahrzeug für den Stadtverkehr weniger als 2,39 m lang und 1,32 m breit sein, für den Überlandverkehr für eine Familie mit Gepäck weniger als 4,5 m lang und weniger als 1,85 m breit. Es sollte vollständig aus Sekundärmaterialien hergestellt werden, eine Lebensdauer von 20 Jahren haben und auch hinsichtlich der Reparaturfähigkeit optimiert sein. Dies erfordert, dass alle Fahrzeugteile (insbesondere solche, die schnell kaputt gehen oder verschleißen können) leicht zugänglich und austauschbar sind. Diese vollständige Modularität fördert auch die Recyclingfähigkeit der im Fahrzeug verwendeten Komponenten und Materialien, da sie die Demontage von Teilen vor der Verschrottung der Karosserie am Ende ihrer Lebensdauer erleichtert. Software- und Hardware-Upgrades sind für die gesamte Lebensdauer des Fahrzeugs garantiert.

Maßnahmen

Auf Grundlage der Ergebnisse der Modellierung und der entwickelten Kriterien für ressourceneffiziente Fahrzeuge werden Maßnahmen und Instrumente abgeleitet und entwickelt, die zur Umsetzung dieser Ziele erforderlich sind. Die Maßnahmen wurden nach bestimmten Kriterien (z. B. aktueller Stand der Umsetzung der Maßnahme, Lebenszyklusphase, betroffene Interessengruppen, Wirkungsmechanismus, Zeithorizont, geografische Ebene der Maßnahme, Verbindlichkeit) klassifiziert, bewertet und priorisiert. Die folgenden Maßnahmen wurden als vorrangig eingestuft.

- Bonus-Malus-System basierend auf der Fahrzeuggröße: In einem Bonus-Malus-System erhalten Käufer kleinerer Autos einen Bonus, während diejenigen, die größere Autos kaufen, eine Strafe zahlen müssen, die ebenfalls mit der Größe steigt. Einmalzahlungen beim Kauf eines Autos haben eine größere Wirkung als jährliche Kfz-Steuern. Die vorgeschlagenen Werte für den Bonus liegen bei weniger als 2,39 m Länge und 1,32 m Breite für ein batterieelektrisches Fahrzeug für den Stadtverkehr und bei weniger als 4,5 m Länge und weniger als 1,85 m Breite für eine Familie mit Gepäck für den Überlandverkehr.

- Besteuerung von Firmenwagen: Schätzungsweise 20 bis 25 % der Neuzulassungen in Deutschland sind Firmenwagen, die auch privat genutzt werden (Blanck & Zimmer 2021). Der Grund für die Attraktivität des Autos als Gehaltsbestandteil ist die geringe Besteuerung: Für Arbeitnehmer ist der steuerpflichtige geldwerte Vorteil deutlich günstiger als die Kosten für ein privat gekauftes Auto. Unternehmen können den Kauf von Autos für geschäftliche Zwecke ohne Höchstpreis als Betriebsausgaben absetzen.

- Umweltbonus in der Kfz-Versicherung: Im Hinblick auf die CO2-Emissionen eines Autos bieten viele Kfz-Versicherungen mittlerweile Umweltrabatte an, wenn ein umweltfreundliches Fahrzeug versichert wird. Ein Beispiel aus Deutschland ist die R+V: Umweltbonus: 10 % Rabatt auf die Versicherungsprämie für Elektro- und Hybridautos und 5 % für Autos mit geringen CO2-Emissionen (bis zu 95 g/km). Weitere Umweltrabatte dieser Art könnten in naher Zukunft eingeführt werden.

- Förderung nachhaltiger Fahrzeuge in den Richtlinien für die öffentliche Beschaffung. Der „Leitfaden zur umweltorientierten Beschaffung" des Umweltbundesamtes wird durch Empfehlungen für Fahrzeuge ergänzt. Diese umfassen nachhaltige Aspekte über den gesamten Lebenszyklus von Fahrzeugen, einschließlich der Einhaltung der Sorgfaltspflichten in den Rohstoffwertschöpfungsketten, der Verwendung von recycelten Materialien in der Produktion, der Reparierbarkeit während der Nutzung und der Recyclingfähigkeit bei der Entsorgung.

- Mindestlebensdauergarantie für Fahrzeuge: Einführung einer gesetzlichen Lebensdauergarantie für das gesamte Fahrzeug auf der Grundlage realistisch erreichbarer

Lebensdauern; vorgeschlagen wird eine Garantie von 20 Jahren. Verschleißteile sind davon ausgenommen.

- Mindestwerte für die Energiedichte von Batterien: Diese Maßnahme legt Mindestanforderungen für die Energiedichte von Antriebsbatterien fest. Die Batterieverordnung definiert die Energieumwandlung als Funktionseinheit, was bereits einen Anreiz in diese Richtung darstellt – mit festen Grenzwerten könnte dies noch bedeutender werden. Grenzwerte für das Batteriegewicht pro Fahrzeug könnten durch eine Begrenzung der Batteriekapazität und eine Erhöhung der Energiedichte erreicht werden.

- Mindestlebensdauergarantie für Batterien: Es wird eine obligatorische Mindestgarantie für Batterien von 300.000 km oder 20 Jahren festgelegt. Derzeit gibt es keine gesetzlichen Verpflichtungen für weitere Anreize für lange Garantiezeiten für Batterien, mit Ausnahme der allgemeinen 2-jährigen Produktgarantie und der Anforderungen für Traktionsbatterien für M1- und N1-Fahrzeuge in der Euro-7-Verordnung (Anhang II: 5 Jahre und 100.000 km) sowie freiwilliger Herstellergarantien.

- Austausch und Ausbau von Teilen und Komponenten: Fahrzeughersteller müssen detaillierte Anweisungen zum Austausch und Ausbau von Fahrzeugteilen und -komponenten bereitstellen. Fahrzeuge müssen so konstruiert sein, dass Komponenten mit Wiederverwendungspotenzial bei der Entsorgung der Fahrzeuge ausgebaut werden können. Dies gilt auch für Antriebsbatterien und Elektromotoren. Diese Maßnahme ist Teil des Vorschlags für eine neue Altfahrzeugverordnung, den die EU-Kommission am 13. Juli 2023 vorgelegt hat.

- Mindestlebensdauergarantie für Ersatzteile: Es wird eine verbindliche Mindestgarantie von zwei Jahren für Ersatzteile eingeführt. Diese Maßnahme ist Teil des Regelungsvorschlags der EU-Kommission. Teil des Vorschlags für eine neue Altfahrzeugverordnung, den die EU-Kommission am 13. Juli 2023 vorgelegt hat.

- Garantie für Software-Updates: Fahrzeughersteller werden verpflichtet, über einen längeren Zeitraum Software-Updates bereitzustellen. Diese müssen für die gesamte Lebensdauer des Fahrzeugs, d. h. beispielsweise für 20 Jahre, garantiert werden.

- Zugang zu Informationen über die Reparatur und Wartung von EV-Batterien: Fahrzeughersteller werden verpflichtet sein, 20 Jahre lang einen erschwinglichen Zugang zu Software-Updates und Ersatzteilen bereitzustellen, um die Aufarbeitung von EV-Batterien zu unterstützen. Ein Recht auf Reparatur gewährleistet, dass unabhängige Werkstätten ohne rechtliche oder technische Einschränkungen Zugang zu den Informationen, Werkzeugen und Teilen haben, die für die Reparatur und Wartung von EV-Batterien erforderlich sind.

- EPR-System zur Finanzierung der ordnungsgemäßen Behandlung von Altfahrzeugen: Um eine angemessene Finanzierung für die vorgeschriebene Behandlung von Altfahrzeugen sicherzustellen und Recyclingunternehmen Anreize zur Qualitätsverbesserung zu bieten, wird ein EPR-System eingeführt, bei dem die Fahrzeughersteller gemäß der erweiterten Herstellerverantwortung (Extended Producer Responsibility, EPR) für die Finanzierung der Behandlung von Altfahrzeugen verantwortlich gemacht werden.

- Festlegung einer Recyclingquote für Stahl: Einführung eines Ziels für die Verwendung von recyceltem Stahl in der Fahrzeugproduktion. Eine Herausforderung dabei ist die Qualität des Stahlschrotts aus Fahrzeugverschrottungsanlagen. Verunreinigungen wie Kupfer mindern die Qualität von Recyclingstahl und verhindern derzeit eine höhere Recyclingquote bei der Herstellung hochwertiger Flachstahlprodukte. Eine gesetzliche Mindestquote für den

Recyclingstahlanteil in Fahrzeugen würde den Markt für Recyclingstahl in Richtung höherer Qualität verschieben. Berechnungen zufolge wäre ein Recyclinganteil von 25 % bis 2030 und 30 % bis 2035 mit einem geschlossenen Recyclingkreislauf erreichbar.

- Anforderungen an Schredder- und Nachschredderanlagen: Insbesondere Kupfer ist ein Verunreinigungsstoff im Stahlrecycling, der die Qualität von recyceltem Stahl mindert. Um eine hohe Qualität des zurückgewonnenen Stahls zu gewährleisten, wird für Fahrzeugschredderanlagen ein Höchstwert von 0,1 % Kupfer in der Stahlfraktion festgelegt. Das Hauptziel besteht dabei darin, Kupferpartikel abzutrennen, die während des Schredderprozesses in die Stahlfraktion gelangen. Das in der Stahllegierung enthaltene intrinsische Kupfer kann jedoch nicht zu wirtschaftlich vertretbaren Kosten abgetrennt werden.
- Festlegung von Recyclingzielen für Glas und Kunststoffe: Autos enthalten viele verschiedene Materialien, die jedoch am Ende ihrer Lebensdauer unterschiedlich behandelt werden. Stahl, Aluminium und Kupfer werden weitgehend zurückgewonnen, andere Materialien hingegen nicht. Da bestimmte Materialien wie Kunststoffe und Glas nur einen geringen Anteil am Fahrzeuggewicht ausmachen, werden sie oft entsorgt und erst nach der Zerkleinerung zurückgewonnen, was zu einer Verringerung der Qualität des zurückgewonnenen Materials führt. Mit dieser Maßnahme werden Recyclingziele für Glas und Kunststoffe festgelegt.

Roadmap für die Kreislaufwirtschaft im Fahrzeugbereich

Im letzten Kapitel wird eine strategische Roadmap für die Kreislaufwirtschaft im Fahrzeugbereich als Teil der Verkehrs- und Energiewende im Verkehrssektor entwickelt. Diese Roadmap soll aufzeigen, welche Maßnahmen und Instrumente einen wesentlichen Beitrag zur Reduzierung der Treibhausgasemissionen und des Ressourcenverbrauchs leisten können und in welchem Zeithorizont und durch welche Akteure diese erreicht werden können. Die folgende Tabelle zeigt diese priorisierten Maßnahmen und Instrumente.

Strategische Roadmap für die Kreislaufwirtschaft im Fahrzeugbereich

Option	Ebene	Zeitrahmen	Adressat	Wirksamkeit	Umsetzbarkeit
Bonus-Malus-System basierend auf der Fahrzeuggröße	Deutschland	kurzfristig (bis 5 Jahre)	Käufer*innen	medium	hoch
Besteuerung von Firmenwagen	Deutschland	kurzfristig (bis 5 Jahre)	Käufer*innen	medium	hoch
Umweltbonus in der Kfz-Versicherung	Deutschland	kurzfristig (bis 5 Jahre)	Versicherungen	medium	hoch
Förderung nachhaltiger Fahrzeuge in Richtlinien für die öffentliche Beschaffung	Deutschland	kurzfristig (bis 5 Jahre)	Öffentliche Beschaffung	low	hoch
Mindestlebensdauergarantie für Fahrzeuge	Europäische Union	mittelfristig (5 bis 10 Jahre)	Auto-Hersteller	hoch	niedrig

Option	Ebene	Zeitrahmen	Adressat	Wirksamkeit	Umsetzbarkeit
Mindestwerte für die Energiedichte von Batterien	Europäische Union	mittelfristig (5 bis 10 Jahre)	Batterie-Hersteller, Auto-Hersteller	hoch	niedrig
Mindestlebensdauergarantie für Batterien	Europäische Union	mittelfristig (5 bis 10 Jahre)	Batterie-Hersteller, Auto-Hersteller	hoch	niedrig
Austausch und Entfernung von Bauteilen und Komponenten	Europäische Union	mittelfristig (5 bis 10 Jahre)	Auto-Hersteller	hoch	niedrig
Mindestlebensdauergarantie für Ersatzteile	Europäische Union	mittelfristig (5 bis 10 Jahre)	Werkstätten, Remanufacturer	mittel	hoch
Garantie für Software-Updates	Europäische Union	mittelfristig (5 bis 10 Jahre)	Auto-Hersteller	mittel	hoch
Zugang zu Informationen über die Reparatur und Wartung von EV-Batterien	Europäische Union	mittelfristig (5 bis 10 Jahre)	Auto-Hersteller	mittel	hoch
EPR-System zur Finanzierung der ordnungsgemäßen Behandlung von Altfahrzeugen	Europäische Union	mittelfristig (5 bis 10 Jahre)	Auto-Hersteller	hoch	hoch
Festlegung eines Ziels für den Rezyklatanteil von Stahl	Europäische Union	mittelfristig (5 bis 10 Jahre)	Auto-Hersteller	mittel	mittel
Anforderungen an Schredder- und Nachschredderanlagen	Europäische Union	mittelfristig (5 bis 10 Jahre)	Schredder; Post Schredder	hoch	hoch
Festlegung von Recyclingzielen für Glas und Kunststoffe	Europäische Union	mittelfristig (5 bis 10 Jahre)	ATFs; Schredder; Post Schredder; Recycler	mittel	hoch

Quelle: eigene Darstellung, Öko-Institut

Summary

The Paris Agreements and the Climate Protection Plan 2050 set clear CO_2 reduction targets in the transport sector. Yet these targets can only be met with an ambitious mobility transition to electric vehicles. Electric vehicles are characterised by special components such as the electric drive motors, batteries, fuel cells and power electronics. The **AutoRess** project analysed technical and non-technical options for reducing the impact of transport on climate and resource use across all vehicle life-cycle phases. Based on these analyses, suitable instruments and measures were developed and evaluated, and a definition of and criteria for a resource-efficient vehicle were developed. These were combined to form a Circular Economy Roadmap for vehicles. In different workshops, the results were then fed back to the project advisory board, external experts and internal UBA experts. The research project was conducted by Oeko-Institut e.V. together with partners ifeu gGmbH, Mehlhart Consulting and team ewen from November 2022 to August 2025.

In-depth analysis of technical and social options

In the AutoRess project, we analysed greenhouse gas (GHG) emissions and primary material savings potentials for different mainly technical options in Germany's car transport sector, taking into account all life-cycle phases of the vehicles.

As a starting point for assessing future GHG and material savings potentials in the vehicle life cycle, it was first necessary to evaluate how the various influencing factors and the resulting GHG emissions and material requirements will develop without additional interventions ("current drivers"). The systemic analysis of direct and indirect factors influencing GHG emissions and raw material consumption identified 10 technical and social options (see table). These were analysed in-depth to assess additional potential ("additional drivers"). The current status quo, development trends with current drivers and fields of action for additional drivers to reduce GHG emissions and material requirements were researched and discussed in expert workshops.

Overview of analysed technical and social options

Option	Analysed approaches
1. Alternative powertrains	Different battery technologies and cell materials (LFP, solid-state NMC, Na-Ion); variation in battery capacities
2. Vehicle downsizing	Shift in new car registrations towards smaller vehicles
3. Lightweight construction	Use of lightweight materials, in particular aluminium, in various vehicle components; lightweight construction of battery housings
4. Design for circularity	Car designs that increase longevity or the amount of components that can be reused/ repurposed
5. Reuse and repurpose of EV batteries	Higher shares of re-used and re-manufactured spare parts
6. Repair and remanufacturing of car body	Higher shares of "high repairability and reuse potential"
7. Recycled content of battery materials	Changes in return rates of battery materials from battery recycling; effect of graphite recycling

Option	Analysed approaches
8. Recycled content of metals (Fe, Cu, Al, regardless of battery system)	Different rates for recycled metal content in the vehicle body (battery excluded)
9. Recycling of Plastics	Plastic recycling; use of non-fossil plastic sources
10. End of Life	Higher shares of dismantled materials prior to shredding, higher share of material recovery of glass and higher share of high-quality recycling of steel, aluminium, and copper

Modelling

A detailed model of car transport in Germany was developed for AutoRess, which incorporated all stages of the vehicle life cycle. This model was used to derive comparable GHG and material savings potentials for all 10 options up to year 2045. For each option, up to five variants were modelled and the bandwidth of GHG and material effects was estimated. tThe calculation model mapped the car transport system in Germany in five-year steps in from 2020/21 to 2045 across all life cycle phases, taking into account and linking all relevant influencing factors. Status quo and trend developments of all influencing factors relevant to GHG emissions and material requirements awere adopted from existing analyses or additionally derived. The effects of the analysed options on the various influencing factors are recorded, and the resulting changes can be compared directly in the model with the trend development.

The number of new registrations was taken from the 2024 projection report. It is projected that, between 2025 and 2030, 3.1 to 3.2 million new passenger cars will be registered in Germany annually, with the proportion of battery electric vehicles increasing continuously. After 2030, it is foreseen that the number of annual new registrations will decrease to 2.8 million vehicles in 2035 and 2.6 million vehicles after 2040. From 2035 onwards, it is expected that only BEVs will be newly registered (see following figure, right side).

Vehicle dimensions, weights, and engine power have risen steadily over the past few decades. This growth is expected to continue in the coming years. The AutoRess model is based on the average unladen weights of new vehicle registrations in 2021, with a further weight increase of 1.2% per year until 2030.

The battery capacities of electric cars are assumed to average 61 kWh (gross capacity), increasing to 88 kWh by 2030. Cell chemistry is expected to shift from NMC622 batteries in 2021 to NMC811 batteries from 2030 onwards, and a partial switch to lithium iron phosphate (LFP) batteries is also taken into account.

In the calculation of the specific GHG emissions from automotive production, the increasing shift to renewable energies in the EU was considered in the electricity supply. However, the long-term defossilization of global material supply was not taken into account.

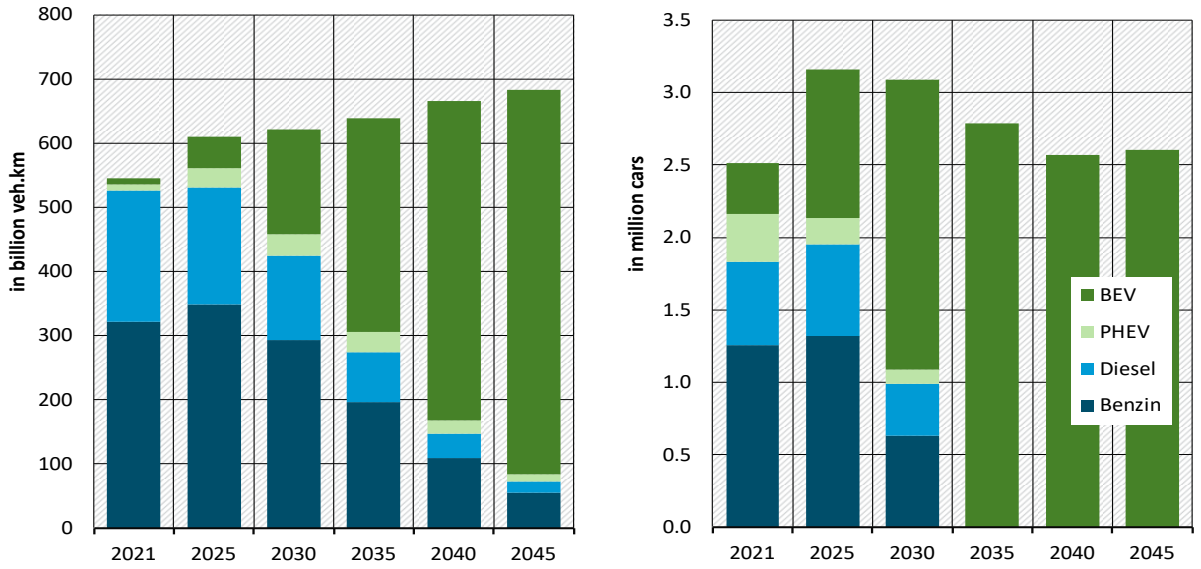
The average percentage material compositions of the vehicle glider and powertrain remain constant in all years.

The use phase includes energy consumption and the resulting greenhouse gas emissions from motor vehicle operation, as well as emissions and material requirements from motor vehicle maintenance and repair.

It is expected that, from 2021 to 2030, passenger car mileage (see following figure, left side) will increase by 14%, with the share of mileage covered by battery electric passenger cars rising to 26%. Even after 2030, passenger car mileage will likely continue to rise steadily, reaching a level in

2045 that is 10% higher than in 2030. Battery electric cars will account for 88% of mileage in 2045.

Annual mileage (left) and new registrations (right) of cars in Germany by drive concept



Source: based on the "with existing measures scenario" (MMS) of the 2024 Projection Report

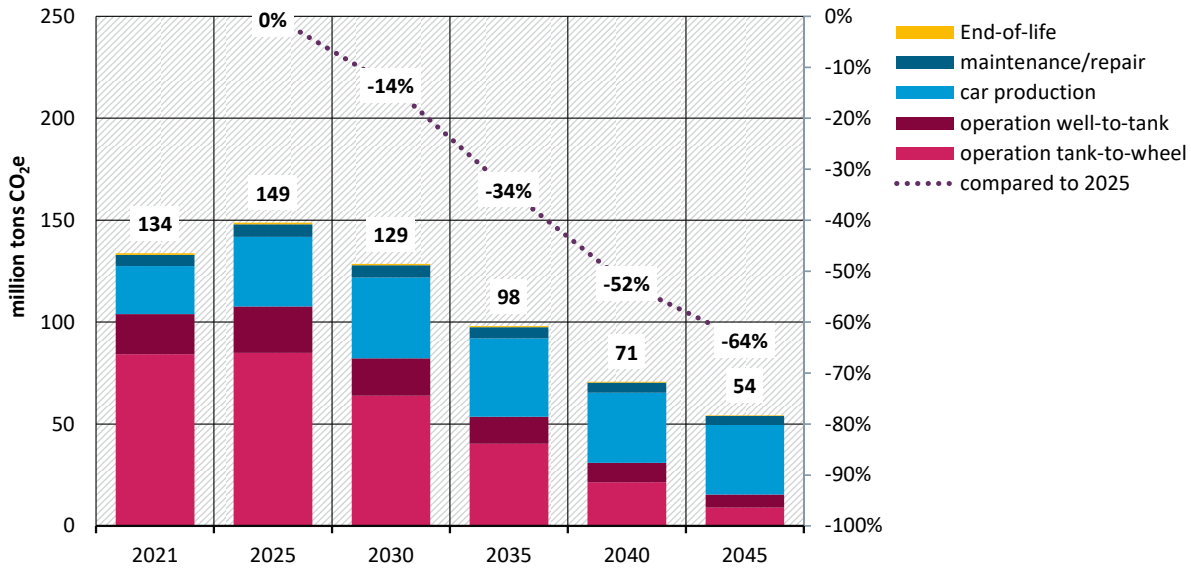
Greenhouse gas emissions and material demand in passenger car transport in Germany

In the reference scenario, it is foreseen that GHG emissions from passenger car traffic in Germany will fall by 4%, from 134 million tons to 129 million tons by 2030. This trend will likely continue, decreasing by almost 60% to 54 million tons by 2045. This drop is expected as a result of increasing electromobility and the decarbonization of the electricity supply.

In contrast, the model foresees that emissions from automobile production will initially rise from 24 million tons of CO_2e to 40 million tons of CO_2e between 2021 and 2030, before falling again to 34 million tons of CO_2e by 2045. The increase in production emissions until 2030 is due in equal measure to the higher annual number of new registrations and the rising share of new registrations of electric cars. From 2030 to 2035, the number of annual new registrations of electric cars are foreseen to continue to increase but will decline after 2035. At the same time, specific emissions from automobile production will likely decline after 2030 as renewable energies are increasingly used in production processes. At the same time, specific emissions from automotive production will decline after 2030 as renewable energies are increasingly used in production processes.

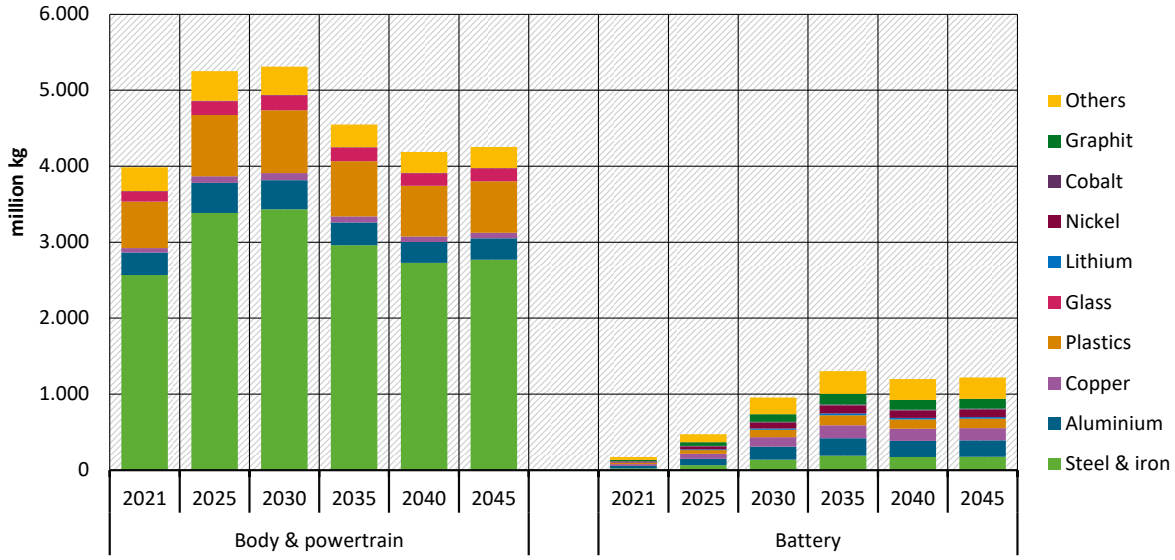
The total annual material requirements for automotive production (see below) were calculated per material group and categorised as either gliders & powertrains or batteries. The material requirements for gliders & powertrains were mainly determined using the total number of new registrations and the increase in vehicle weight. In the model, the shift in new registrations toward electric cars was reflected above all in the sharp increase in material requirements for batteries. The material requirements for gliders & powertrains are dominated by steel and iron as well as aluminium and plastics, which together account for approximately 88% of the weight. Other weight-relevant material groups include copper and glass. Together steel, aluminium and plastics account for 42% of the material requirements in batteries. Copper, nickel, and graphite represent a significant proportion, at 8%-14% each. In contrast, the cell materials lithium and cobalt have a low presence in the overall material balance, each accounting for 1%-3% of the total weight.

Model of GHG emissions of car transport in Germany including all phases of the life cycle



Source: own calculations, ifeu

Model of annual material demand for new passenger cars in Germany



Source: based on annual new registrations in the "with existing measures scenario" (MMS) of the 2024 Projection Report

Material impacts for new car production

The comparison of the impacts of the 10 technical and social options focuses on material requirements for producing new vehicles. Changes in material requirements for vehicle maintenance and repair were addressed in individual options.

The material demand in all powertrains is expected to fall slightly by 2035 and 2045 compared to 2025 despite the increase in vehicle sizes. The reason for this is the decrease in annual new registrations assumed in the trend development.

In contrast, the demand for battery materials will rise sharply, driven by the ramp-up of electromobility and the additional trend towards increasing battery sizes.

Approaches that focus on the entire vehicle (e.g. “downsizing”, “design for circularity: longevity”) have a proportional effect on all material groups, whether due to reduced new registrations or reduced vehicle sizes and accompanying reduced battery sizes.

Options that focus on electromobility, such as “alternative powertrains”, “reuse/repurpose batteries” and “recycled content battery”, only affect the demand for battery materials. Depending on the approach examined, all battery materials can be proportionally affected (e.g. change of battery capacities, repurpose of batteries), but significant differences can also arise between individual battery materials. Adopting different battery technologies (e.g. solid-state, sodium ion) reduces demand for certain materials while increasing demand for others.

Some options only affect selected material groups, in particular for “lightweighting” (steel, aluminium) and “plastics recycling/renewable” (plastics). Options that deal with the decommissioning of cars (plastics recycling, end of life) were seen to have no effect on the total material demands in car production.

In most cases, the options examined are expected to lead to a reduction in annual material requirements. However, in the “Alternative powertrains” and “Lightweighting” options, there is also a partial increase in individual material requirements if the reduction in one material is accompanied by a shift to other materials. In one variation of the “lightweighting” option, a possible reduction in vehicle lifetime was also included. In the model, this results in an increase in the annual number of new registrations and thus in total material requirements.

Primary material demands depend on the total material demand and on the recycled content in the material used. This was also reflected in the changes in primary material demands due to the different technical and social options. Total material demands for new cars change due to:

- Number and size of new cars (e.g. downsizing, remanufacturing) or vehicle components (e.g. battery size), and
- Material composition of vehicles (battery cell materials, aluminium lightweighting).

Recycled content in the total material used depends on:

- Closed-loop recycling: amount of recovered material in vehicle recycling depending on
  (1) number, size and material composition of decommissioned cars,
  (2) share of decommissioned cars and components, which are sent for recycling, and
  (3) material-specific recycling efficiency.
- Effects of closed-loop recovered materials on the overall recycled content:
  (a) increase of overall recycled content or
  (b) higher closed-loop share within an overall unchanged recycled content.

Vision of a resource-efficient vehicle

The AutoRess project developed a vision for a resource-efficient vehicle. The vision was based on purely battery-powered electric cars, which are considered resource-efficient and suitable for the circular economy if they meet the following conditions:

- The least amount possible of primary raw materials is consumed over the entire lifecycle.
- The least amount possible of greenhouse gases are emitted over the entire lifecycle.
- The least amount possible of energy is consumed over the entire lifecycle.
- The vehicle’s life span is as long as possible.

- The vehicles‘ components can be recycled in the most efficient way possible without the need for downcycling.
- Additional negative environmental as well as social impacts are minimized.

The modeling activities carried out in the AutoRess project on resource use and GHG emissions in the automotive industry in 10 selected subject areas identified three levers that have a particularly strong impact on the goals:

- **Reduction of vehicle and battery dimensions**
- **Longer vehicle and batteries lifetime**
- **Higher quantities of recycled materials**

Criteria for a resource-efficient vehicle

The results from the model were combined with expert knowledge and further research to formulate criteria that could fulfil the requirements of a resource-efficient vehicle.

To meet these requirements, the ideal battery-electric vehicle for urban transport would be less than 2.39 m long and 1.32 m wide. For interurban transport for a family with luggage, it would be less than 4.5 m long and less than 1.85 m wide. The ideal vehicle would be made entirely from secondary materials, have a service life of 20 years, and be optimized in terms of repairability. This requires would require all vehicle parts, especially those that can break or wear out quickly, to be easily accessible and replaceable. This total modularity would also promote the recyclability of the components and materials used in the vehicle by facilitating the dismantling of parts before the body is shredded at the end of its service life. Software and hardware upgrades are guaranteed for the vehicle’s entire service life.

Measures

Based on the results from the model and the developed criteria for a resource-efficient vehicle, the necessary measures and instruments to implement these targets were derived and developed. These measures were classified, evaluated and prioritised according to specific criteria, such as current status of implementation of the measure, life cycle phase, affected stakeholders, impact mechanism, time horizon, geographical level of action, and level of obligation. The following measures were considered a priority.

- **Bonus-malus system based on vehicle size:** In a bonus-malus system, buyers of smaller cars receive a bonus, while those who purchase larger cars must pay a penalty that also increases with size. One-time payments when purchasing a car have a greater impact than annual vehicle taxes. Proposed values for the bonus are less than 2.39 m in length and 1.32 m in width for a battery electric vehicle for city traffic, and less than 4.5 m in length and less than 1.85 m in width for a family with luggage for interurban traffic.
- **Taxation of company cars:** An estimated 20% to 25% of new registrations in Germany are company cars that are also used privately (UBA 2021). The reason for the attractiveness of the car as a salary component is low taxation: for employees, the taxable monetary benefit is significantly cheaper than the cost of a privately purchased car. Companies can deduct the purchase of cars for business purposes as operating expenses without a maximum price limit and regardless of the vehicles' CO_2 emissions. Under this measure, resource-efficient electric cars, e.g. those with small dimensions, are taxed less than other vehicles.

- **Environmental bonus in car insurance:** With regard to a car's CO_2 emissions, many car insurance companies now offer environmental discounts when insuring an environmentally friendly vehicle. One example from Germany is R+V, offering an Environmental bonus of 10% discount on the insurance premium for electric and hybrid cars and 5% for cars with low CO_2 emissions (up to 95 g/km). Further environmental discounts of this kind may be introduced in the near future.
- **Promotion of sustainable vehicles in public procurement guidelines.** The Federal Environment Agency's "Guide to Environmentally Oriented Procurement" is supplemented by recommendations for vehicles. These cover sustainable aspects throughout the entire life cycle of vehicles, including compliance with due diligence obligations in the raw material value chains, the use of recycled materials in production, reparability during use, and recyclability during disposal.
- **Minimum service life warranty for vehicles:** Introduction of a statutory lifetime warranty for the entire vehicle based on realistically achievable service lives; a warranty of 20 years is proposed. Wearing parts are excluded from this.
- **Minimum values for the energy density of batteries:** This measure sets minimum requirements for the energy density of traction batteries. The Battery Regulation defines energy conversion as a functional unit, which already provides an incentive in this direction – with fixed limits. These limits could become even more significant. Limits for battery weight per car could be achieved by limiting battery capacity and increasing energy densities.
- **Minimum service life warranty for batteries:** A mandatory minimum warranty for batteries of 300,000 km or 20 years is specified. Currently, there are no legal obligations for further incentives for long warranty periods for batteries, except for the general 2-year product warranty and the requirements for traction batteries for M1 and N1 vehicles in the Euro 7 Regulation (Annex II: 5 years and 100,000 km), as well as voluntary manufacturer guarantees.
- **Replacement and removal of parts and components:** Vehicle manufacturers will be required to provide detailed instructions on how to replace and remove vehicle parts and components. Vehicles must be designed in such a way that components with reuse potential can be removed when the vehicles are disposed of. This also applies to drive batteries and electric motors. This measure is part of the proposal for a new End-of-Life Vehicles Regulation presented by the EU Commission on 13 July 2023.
- **Minimum service life warranty for spare parts:** A mandatory minimum warranty of two years for spare parts will be established. This measure is part of the proposal for a new end-of-life vehicle regulation presented by the EU Commission on 13 July 2023.
- **Software update warranty:** Vehicle manufacturers will be required to provide software updates over a longer period of time. These must be guaranteed for the lifetime of the vehicle, i.e. for 20 years.
- **Access to information on EV battery repair and maintenance:** Vehicle manufacturers will be required to provide affordable access to software updates and spare parts for 20 years to support EV battery reconditioning activities. A right to repair ensures that independent repair shops have access to the information, tools, and parts necessary for the repair and maintenance of EV batteries without legal or technical restrictions.

- **EPR system for financing the proper treatment of end-of-life vehicles:** In order to ensure adequate financing for the prescribed treatment of end-of-life vehicles and to offer recycling companies incentives to improve quality, an EPR system is being introduced in which vehicle manufacturers are made responsible for financing the treatment of end-of-life vehicles in accordance with Extended Producer Responsibility (EPR).
- **Setting a recycled content target for steel:** Introduction of a target for the use of recycled steel in vehicle production. One challenge here is the quality of steel scrap from vehicle shredding plants. Contaminants such as copper reduce the quality of recycled steel and currently prevent a higher recycling rate in the production of high-quality flat steel products. A legal minimum target for the recycled steel content in vehicles would shift the market for recycled steel towards higher quality. According to calculations, a recycled content of 25% by 2030 and 30% by 2035 would be achievable with a closed recycling loop.
- **Requirements for shredder and post-shredder plants:** Copper in particular is a contaminant in steel recycling that reduces the quality of recycled steel. In order to ensure high quality of the recovered steel, a maximum value of 0.1% copper in the steel fraction is set for vehicle shredder plants. The main aim here is to separate copper particles that enter the steel fraction during the shredding process. However, the intrinsic copper contained in the steel alloy cannot be separated at an economically viable cost.
- **Setting recycling targets for glass and plastics:** Cars contain many different materials, but these are treated differently at the end of their service life. Steel, aluminum, and copper are largely recovered, but other materials are not. Since certain materials such as plastics and glass account for only a small proportion of the vehicle's weight, they are often disposed of and only recovered after shredding, which leads to a reduction in the quality of the recovered material. This measure sets recycling targets for glass and plastics.

Circular Economy Roadmap for vehicles

In the last project phase a strategic roadmap for the circular economy for vehicles as part of the transport and energy transition in the transport sector was developed. This roadmap aims to demonstrate which measures and instruments can make a significant contribution to reducing greenhouse gas emissions and resource consumption and in which timeframe by which stakeholders these can be achieved. The following table shows these prioritized measures and instruments.

Strategic roadmap for the circular economy for vehicles

Option	Level of action	Timeframe	Addressed stakeholders	Effectiveness	Feasibility
Bonus-malus system based on vehicle size	Germany	short (up to 5 years)	car buyers	medium	high
Taxation of company cars	Germany	short (up to 5 years)	car buyers	medium	high
Environmental bonus in car insurance	Germany	short (up to 5 years)	car insurances	medium	high
Promotion of sustainable vehicles in public procurement guidelines	Germany	short (up to 5 years)	public procurement	low	high

Option	Level of action	Timeframe	Addressed stakeholders	Effectiveness	Feasibility
Minimum service life guarantee for vehicles	European Union	medium (5 to 10 years)	car manufacturers	high	low
Minimum values for the energy density of batteries	European Union	medium (5 to 10 years)	battery manufacturers: car manufacturers	high	low
Minimum service life guarantee for batteries	European Union	medium (5 to 10 years)	battery manufacturers: car manufacturers	high	low
Replacement and removal of parts and components	European Union	medium (5 to 10 years)	car manufacturers	high	low
Minimum service life guarantee for spare parts	European Union	medium (5 to 10 years)	Repair workshops; remanufacturers	medium	high
Software update guarantee	European Union	medium (5 to 10 years)	car manufacturers	medium	high
Access to information on EV battery repair and maintenance	European Union	medium (5 to 10 years)	car manufacturers	medium	high
EPR system for financing the proper treatment of end-of-life vehicles	European Union	medium (5 to 10 years)	car manufacturers	high	high
Setting a recycled content target for steel	European Union	medium (5 to 10 years)	car manufacturers	medium	medium
Requirements for shredder and post-shredder plants	European Union	medium (5 to 10 years)	schredders; Post Shredders	high	high
Setting recycling targets for glass and plastics	European Union	medium (5 to 10 years)	ATFs; shredders; post shredders; recyclers	medium	High

Source: own representation, Öko-Institut

1 Das AutoRess-Modell für die Auswirkungen technischer und nichttechnischer Themen auf Treibhausgase und Materialien

Das AutoRess-Projekt hat Empfehlungen zur Reduzierung der Treibhausgasemissionen und des Ressourcenverbrauchs zukünftiger Fahrzeuge über den gesamten Lebenszyklus abgeleitet. Als wichtiger Schritt in dieser Analyse wurden die Auswirkungen einer Vielzahl technischer und nichttechnischer Optionen auf die Treibhausgasemissionen über alle Lebenszyklusphasen von Fahrzeugen und auf den Materialbedarf für den Pkw-Verkehr in Deutschland untersucht. Diese Optionen reichen von der Größe neuer Autos und Batterien über Langlebigkeit und bessere Reparaturfähigkeit bis hin zu Leichtbau, der Verwendung von recycelten Materialien in der Automobilproduktion und einer erhöhten Materialrückgewinnung am Ende der Lebensdauer. Zu diesem Zweck wurde ein Modell des deutschen Pkw-Verkehrs entwickelt, das alle Phasen des Fahrzeuglebenszyklus abbildet. Mit diesem Modell wurden die potenziellen Einsparungen für alle analysierten Optionen in Bezug auf Treibhausgasemissionen und Primärmaterialien bis 2045 quantifiziert.

Dieser Kurzbericht gibt einen prägnanten Überblick über das in AutoRess entwickelte und angewandte Modell. Zusammen mit der Modellmethodik skizziert er plausible Basisentwicklungstrends der Treibhausgasemissionen sowie des Gesamt- und Primärmaterialbedarfs in der jährlichen Fahrzeugproduktion, die aufgrund der allgemeinen aktuellen Entwicklungen und bestehenden politischen Maßnahmen im Verkehrssektor zu erwarten sind. Die Modellergebnisse zu den potenziellen Treibhausgas- und Materialeinsparungen im Pkw-Verkehr in Deutschland durch zusätzliche Maßnahmen in 10 technischen und nicht-technischen Themen, die in AutoRess untersucht wurden, werden beschrieben. Eine detaillierte Erläuterung des Modells und der untersuchten Themen findet sich im wissenschaftlichen Abschlussbericht des Gesamtprojekts.

1.1 Entwicklung eines Modells für Treibhausgas- und Materialauswirkungen

In AutoRess haben wir die Treibhausgasemissionen und Primärmaterial-Einsparpotenziale im deutschen Pkw-Verkehr für verschiedene, überwiegend technische Optionen unter Berücksichtigung aller Lebenszyklusphasen der Fahrzeuge analysiert. Als Ausgangspunkt für die Bewertung des zukünftigen Einsparpotenzials im Fahrzeuglebenszyklus muss zunächst bewertet werden, wie sich die verschiedenen Einflussfaktoren und die daraus resultierenden Treibhausgasemissionen und Materialbedarfe ohne zusätzliche Eingriffe entwickeln würden („aktuelle Treiber“). Auf dieser Grundlage werden ausgewählte technische und nicht-technische Themen eingehend analysiert, um zusätzliches Potenzial zu bewerten („zusätzliche Treiber“). Je nach Ansatz greifen diese Themen an unterschiedlichen Stellen in die Treibhausgasemissionen und den Materialbedarf im Fahrzeuglebenszyklus ein. Dementsprechend ist ein direkter Vergleich der Auswirkungen zwischen den Themenbereichen nicht ohne Weiteres möglich. Aus diesem Grund haben wir ein detailliertes Modell entwickelt, in dem die Treibhausgas- und Materialeffekte verschiedener Optionen im Vergleich zur Basisentwicklung analysiert werden können. Wir betrachten nicht den gesamten motorisierten Verkehr in Deutschland, sondern konzentrieren uns auf den Pkw-Verkehr, der hinsichtlich Treibhausgasemissionen und Ressourcen besonders relevant ist.

Im AutoRess-Modell wird das Pkw-Verkehrssystem in Deutschland im Zeitraum 2020/21 bis 2045 in 5-Jahres-Schritten über alle Lebenszyklusphasen hinweg abgebildet, wobei alle relevanten Einflussfaktoren berücksichtigt und miteinander verknüpft werden. Status quo und

Trendentwicklungen aller für Treibhausgasemissionen und Materialbedarf relevanten Einflussfaktoren werden aus bestehenden Analysen übernommen oder zusätzlich abgeleitet. Die Auswirkungen der analysierten Optionen auf die verschiedenen Einflussfaktoren können erfasst und die sich daraus ergebenden Veränderungen im Vergleich zur Trendentwicklung direkt im Modell ermittelt werden. Sobald die Modellergebnisse mehrerer Themenfelder vorliegen, kann ein Vergleich des zusätzlichen Treibhausgas- und Materialeinsparpotenzials zwischen den Themenfeldern vorgenommen werden.

1.2 Methodik und Annahmen für die Entwicklung der Baseline

Tabelle 1 gibt einen Überblick über wichtige Faktoren, die die Treibhausgasemissionen und den Materialbedarf entlang des Fahrzeuglebenszyklus beeinflussen. Abbildung 1 veranschaulicht auch, wie verschiedene Faktoren über die Lebensdauer des Fahrzeugs in Bezug auf den Materialbedarf zusammenwirken. Die zeitliche Wechselwirkung zwischen Neuzulassungen, Fahrzeugbetrieb und Entsorgung von Altfahrzeugen (ELVs) muss ebenfalls berücksichtigt werden: Fahrzeuge, die in einem bestimmten Jahr neu zugelassen werden, werden erst in späteren Jahren nacheinander stillgelegt. Gebrauchte Teile und recycelte Materialien, die aus der Fahrzeugverwertung stammen, entsprechen daher anderen Fahrzeuggenerationen und damit anderen Materialzusammensetzungen als die im selben Jahr neu produzierten Fahrzeuge. Die Grafik veranschaulicht auch ausgewählte Wechselwirkungen mit anderen Bereichen. Nur ein begrenzter Anteil der stillgelegten Fahrzeuge wird im selben Jahr recycelt. Viele stillgelegte Autos werden in andere Länder exportiert und dort weiter genutzt, wo sie zu einem späteren Zeitpunkt entsorgt werden. Die Verwendung von Sekundärrohstoffen bei der Herstellung neuer Fahrzeuge sollte auch für den Verkehrssektor nicht isoliert betrachtet werden, sondern im Zusammenspiel zwischen der sektorübergreifenden Rückgewinnung von Materialien und dem Materialbedarf anderer Sektoren.

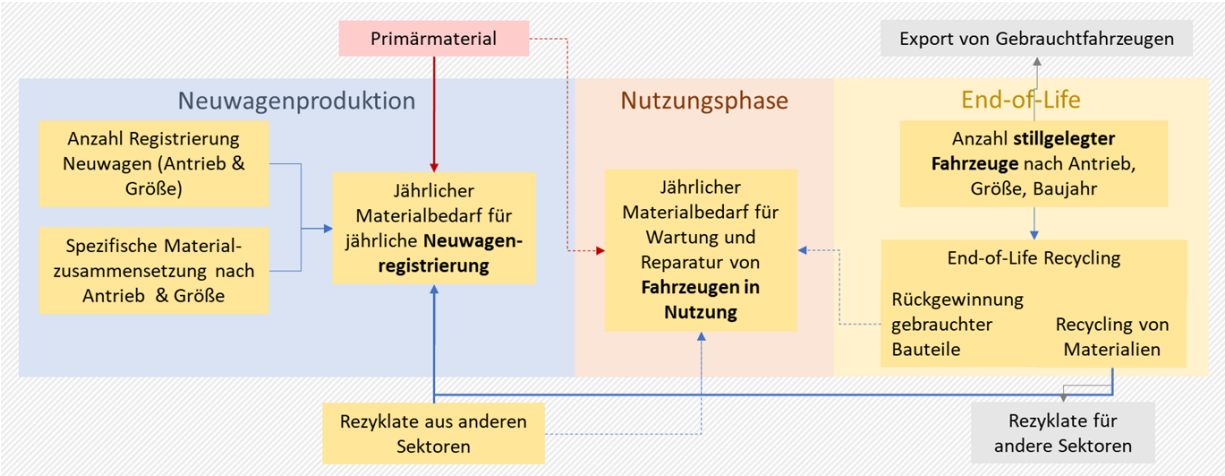
Die wichtigsten Annahmen für die Basisentwicklung mit aktuellen Treibern werden im Folgenden entlang der einzelnen Lebenszyklusphasen der Neuwagenproduktion, der Fahrzeugbetriebsphase und der Fahrzeugentsorgung beschrieben.

Tabelle 1: Faktoren, die die Treibhausgasemissionen und Materialauswirkungen im Fahrzeuglebenszyklus beeinflussen

Automobilproduktion	Betriebsphase von Fahrzeugen	Ende der Lebensdauer
• **Anzahl** der jährlich neu zugelassenen Fahrzeuge • **Größe/Gewicht** von Neufahrzeugen und eingebauten Komponenten • **Materialzusammensetzung** neu zugelassener Fahrzeuge und ihrer Komponenten • **Herkunft** der Materialien (Primärmaterial, Recyclinganteil)	• Energieverbrauch nach Energiequelle im **Betrieb** • Materialbedarf und Energieverbrauch für **Wartung/Reparatur**	• **Anzahl** der stillgelegten Fahrzeuge • **Recyclingquote**: Wie viel Prozent der stillgelegten Fahrzeuge werden recycelt? • **Rückgewinnungsraten** von Materialien (unterschiedlicher **Qualität**)

Quelle: eigene Darstellung, ifeu / Öko-Institut

Abbildung 1: Einfluss verschiedener Faktoren auf den Materialbedarf von Autos in verschiedenen Lebenszyklusphasen



Quelle: eigene Abbildung, ifeu

Auswahl der Materialien

In AutoRess sollen Maßnahmen identifiziert werden, mit denen sowohl Treibhausgase eingespart als auch der Gesamtressourcenverbrauch und die damit verbundenen ökologischen Folgen reduziert werden können. Ein Fahrzeug besteht jedoch aus einer Vielzahl von Materialien, die nicht einzeln analysiert werden können. Indikatoren wie die kumulativen Rohstoffkosten (KRA) und der Rohstoffverbrauch (RMC) von extrapolieren den Verbrauch einzelner Materialien auf einen Rohstoffverbrauch. Die Höhe der KRA oder des RMC an sich enthält jedoch keine Informationen zur ökologischen Bewertung der Rohstoffnutzung. Aus diesem Grund wurde in AutoRess eine Auswahl von Materialien getroffen und einzeln analysiert. Einerseits wurden Materialien mit einem hohen Massenanteil in Personenkraftwagen und gleichzeitig einem hohen Anteil der Automobilproduktion am branchenübergreifenden Materialbedarf berücksichtigt. Andererseits wurden ausgewählte kritische Batteriematerialien mit hoher Relevanz für die Antriebswende im Verkehrswesen berücksichtigt. Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über die Auswahl der relevanten Materialien in AutoRess. Eine detailliertere Erläuterung der Materialauswahl findet sich im Hauptbericht.

Antriebsunabhängige Fahrzeugmaterialien	Stahl & Eisen, Aluminium, Kunststoffe, Glas
Fahrzeugmaterialien sowohl im Glider als auch in Batterien	Kupfer, Nickel
Batteriematerialien	Lithium, Kobalt, Graphit*

* Mangan ist ein weiterer wichtiger Batteriewerkstoff. Seine Relevanz und sein Einsparpotenzial sind jedoch im Allgemeinen mit denen von Kobalt vergleichbar. Daher wurde es in AutoRess nicht separat modelliert.

1.2.1 Neuwagenproduktion

Die Entwicklung der Treibhausgasemissionen und des Materialbedarfs in der Pkw-Produktion hängt gleichermaßen von der Anzahl der jährlich produzierten Fahrzeuge mit unterschiedlichen Antriebskonzepten und von der Entwicklung der technischen Eigenschaften neuer Fahrzeuge, insbesondere der Fahrzeuggrößen und der Materialzusammensetzung, ab. Darüber hinaus bestimmen auch die jahresspezifischen Produktionsbedingungen (Einsatz erneuerbarer Energien) und die Herkunft der Materialien (Recyclinganteil) die Höhe der jährlichen Treibhausgasemissionen.

Für den Pkw-Verkehr in Deutschland ist die relevante Zahl der jährlich produzierten Fahrzeuge die Zahl der Neuzulassungen. Diese Annahmen, differenziert nach Antriebskonzept, übernehmen wir aus dem Szenario „Mit Maßnahmen“ des im Laufe des Projekts veröffentlichten Projektionsberichts 2024 „ . In den Jahren 2025 und 2030 werden jeweils 3,1 bis 3,2 Millionen neue Pkw zugelassen, wobei der Anteil batterieelektrischer Fahrzeuge kontinuierlich steigt. Nach 2030 werden die jährlichen Neuzulassungen auf 2,8 Millionen Fahrzeuge (2035) und 2,6 Millionen Fahrzeuge (ab 2040) zurückgehen. Ab 2035 werden nur noch BEV neu zugelassen (Abbildung 4, rechts).

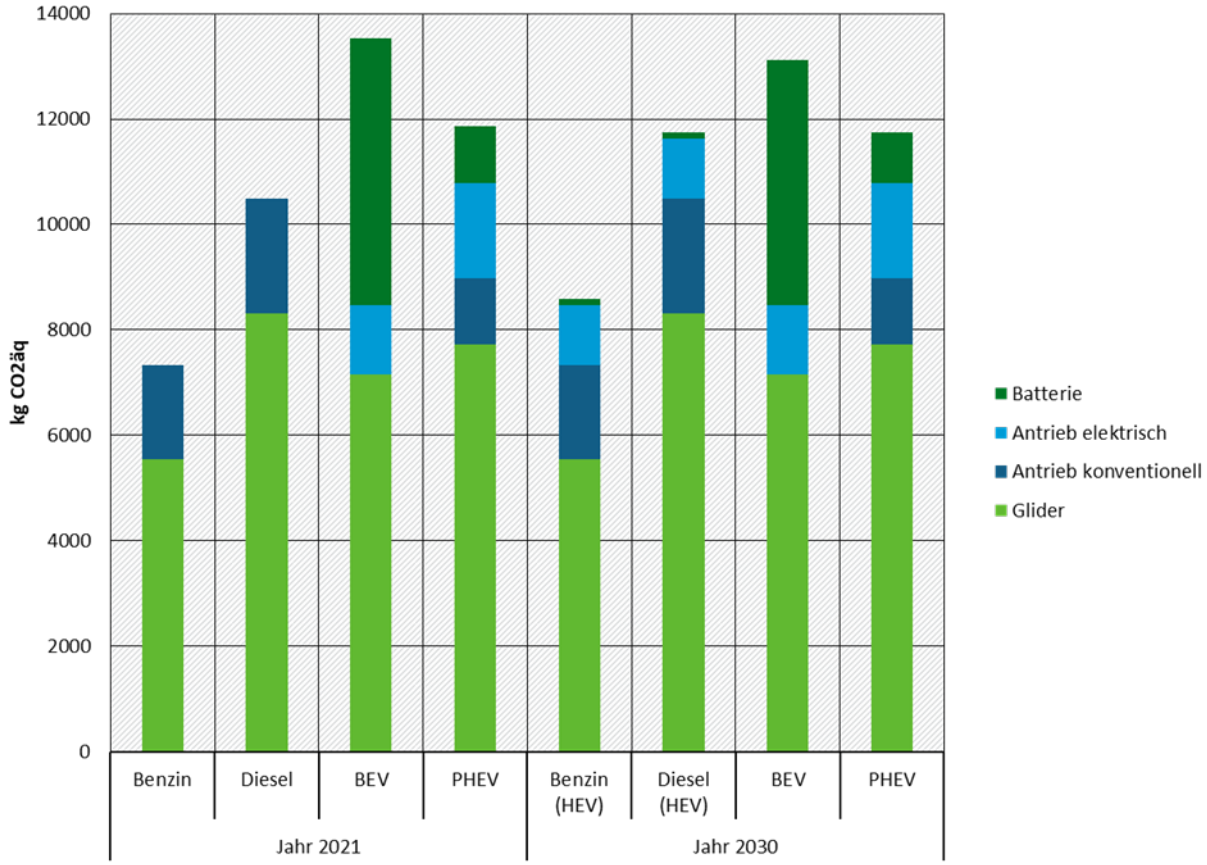
Die Fahrzeugabmessungen und -gewichte sowie die Motorleistung sind in den letzten Jahrzehnten kontinuierlich gestiegen. Es ist davon auszugehen, dass sich dieses Wachstum in den kommenden Jahren fortsetzen wird. Für die Ausgangssituation basiert das AutoRess-Modell auf den durchschnittlichen Leergewichten der Neuzulassungen im Jahr 2021 pro Antriebskonzept. Dabei werden auch die Absatzanteile der verschiedenen Marktsegmente berücksichtigt, z. B. sind Dieselautos im Durchschnitt deutlich größer als Benziner. Basierend auf früheren Entwicklungen geht das Modell von einer weiteren Gewichtszunahme von 1,2 % pro Jahr bis 2030 aus. Nach 2030 bleiben die Gewichte im Basisszenario konstant.

Die Batteriekapazitäten von Elektroautos stammen aus einer aktuellen Ökobilanzstudie „ für das Basisjahr und werden mit durchschnittlich 61 kWh (Bruttokapazität) angenommen. Aufgrund des aktuellen Trends zu größeren Fahrzeugreichweiten wird die durchschnittliche Batteriekapazität bis 2030 überproportional zum Gewichtszuwachs auf 88 kWh (Bruttokapazität) steigen. Gleichzeitig werden vorhersehbare Änderungen der Batteriekonfigurationen im Basisszenario berücksichtigt. Für 2021 gehen wir von NMC622-Batterien mit einer Energiedichte von 150 Wh/kg auf Systemebene aus, analog zu (Biemann et al. 2024). Ab 2030 gehen wir von NMC811-Batterien mit einer Energiedichte von 200 Wh/kg aus. Diese konservativen Annahmen werden auch im Basisszenario für die Jahre nach 2030 beibehalten. Darüber hinaus berücksichtigen wir Veränderungen in der Zellchemie mit einer teilweisen Umstellung auf Lithium-Eisenphosphat-Batterien (LFP). LFP-Batterien benötigen kein Nickel, Kobalt oder Mangan. Sie können billiger, sicherer und langlebiger sein als NMC-Batterien (ENBW 2023), abhängig von den anderen Komponenten und der Zellproduktion. Die derzeitige Energiedichte von LFP-Batterien ist geringer als die von NMC-Batterien. Dies erhöht die Treibhausgasemissionen pro kWh installierter Batteriekapazität und das höhere Batteriegewicht macht das Fahrzeug schwerer. Es werden jedoch Anstrengungen unternommen, um die Energiedichte von LFP-Batterien weiter zu erhöhen. In der Regel werden LFP-Batterien am häufigsten in kleineren Fahrzeuggrößen eingesetzt, bei denen die Kosten am relevantesten sind. Daher gehen wir bei AutoRess davon aus, dass ab 2030 18 % aller Elektroautos mit einer LFP-Batterie ausgestattet sein werden – der Rest wird eine NMC811-Batterie verwenden.

Die spezifischen Treibhausgasemissionen der Automobilproduktion pro Fahrzeugkomponente für heute werden ebenfalls aus der LCA-Studie „ übernommen. Diese Faktoren berücksichtigen sowohl den Energiemix in den Produktionsprozessen und der Materialversorgung als auch den aktuellen Anteil an recycelten Inhaltsstoffen auf Basis aktueller LCA-Datenbanken. In Zukunft wird sich der Energiemix in Europa zunehmend auf erneuerbare Energien umstellen, insbesondere für die Stromversorgung in Fahrzeugproduktionsprozessen. Dementsprechend werden die damit verbundenen Treibhausgasemissionen in der Baseline in den kommenden Jahren sinken. Über alle Antriebsarten hinweg hat der Fahrzeugglider den höchsten Anteil an den Treibhausgasemissionen aus der Herstellung heutiger Personenkraftwagen, gefolgt vom Antriebsstrang. Bei Elektroautos sind auch die Treibhausgasemissionen aus der Batterieproduktion für die Gesamtemissionen sehr relevant. Sie hängen von der Batteriegröße und den Treibhausgasemissionen pro kWh Batteriekapazität ab. Wie in Abbildung 2 dargestellt,

verhalten sich die gesamten Treibhausgasemissionen der Herstellung im Wesentlichen ähnlich wie die Fahrzeuggrößen und -gewichte (Dieselfahrzeuge sind im Durchschnitt deutlich größer als Benziner). Bei Elektroautos führen die Batterien ebenfalls zu deutlich höheren Emissionen.

Abbildung 2: Treibhausgasemissionen (GWP 100a) der Produktion eines durchschnittlichen Neuwagens im Jahr 2021/2030



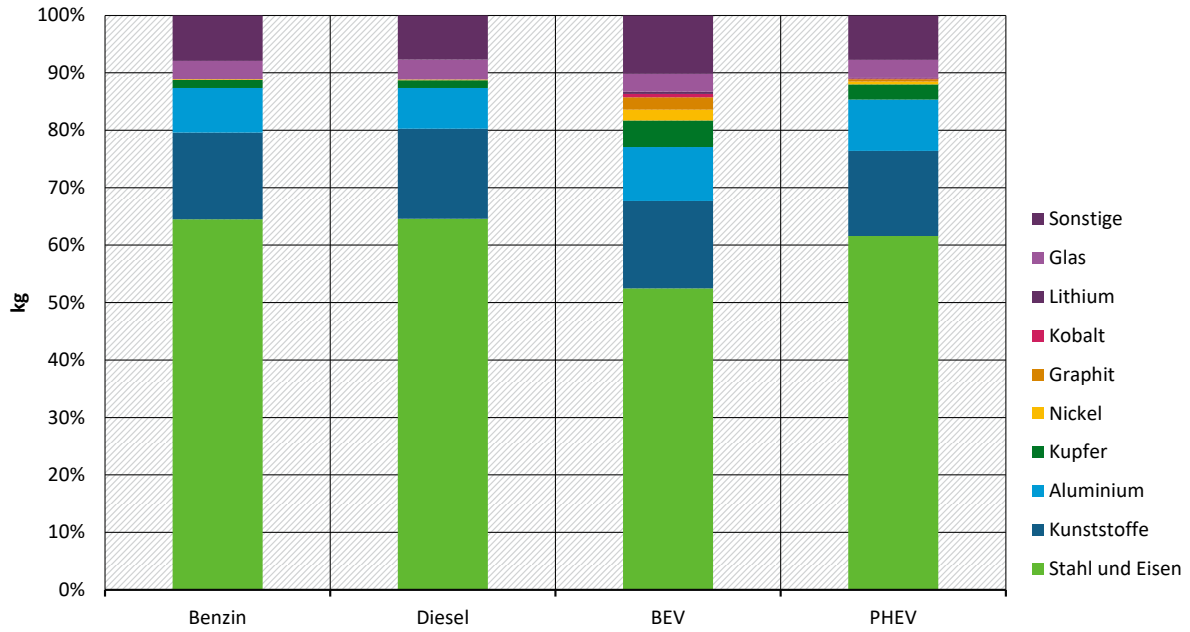
Quelle: eigene Berechnungen, ifeu basierend auf (Biemann et al. 2024)

In einer zunehmend defossilisierten Welt wird auch die Materialversorgung langfristig zunehmend treibhausgasarm werden. Die spezifischen Treibhausgasemissionen aus der Automobilproduktion in einer vollständig defossilisierten Welt wurden in (Biemann et al. 2024) untersucht. In Bezug auf die Treibhausgasemissionen nimmt die Bedeutung einer ressourcenschonenden Automobilproduktion in diesem Fall ab. Es ist jedoch nicht möglich, die Emissionsminderungen vorherzusagen, die in den nächsten 20 Jahren für die globale Materialversorgung der Automobilproduktion tatsächlich erreicht werden können. Im AutoRess-Modell werden daher die spezifischen Treibhausgasemissionen aus der Materialversorgung in allen Jahren konstant gehalten. Dies führt tendenziell zu einer Überschätzung der zukünftigen Emissionsbeiträge aus der Materialversorgung. Gleichzeitig werden die Auswirkungen von Materialeinsparungen in den analysierten Themenbereichen bei einer nur langsam voranschreitenden globalen Defossilisierung hervorgehoben.

Die durchschnittlichen prozentualen Materialzusammensetzungen des Fahrzeug-Gliders und des Antriebsstrangs basieren auf LCA-Datensätzen in „ und bleiben in allen Jahren konstant. Über alle Antriebssysteme und Größenklassen hinweg besteht ein Auto in erster Linie aus Stahl und Gusseisen, gefolgt von Kunststoffen, verschiedenen anderen Metallen wie Aluminium und

Kupfer, Glas und Gummi (siehe Abbildung 3). Besonders relevant sind hier auch kritische Rohstoffe, die in Batterien benötigt werden, z. B. Lithium, Kobalt und Graphit.

Abbildung 3: Materialgruppen in einem durchschnittlichen Auto (Neuzulassung 2021)



Quelle: eigene Berechnungen, ifeu

Die Verwendung von recycelten Materialien wirkt sich nicht nur auf die Treibhausgasemissionen in der Automobilproduktion aus. Je höher der Recyclinganteil, desto weniger Rohstoffe müssen aus der Natur gewonnen werden. Die heutigen Recyclinganteile stammen hauptsächlich aus der Ökobilanzdatenbank ecoinvent 3.8 (ecoinvent 2021) . In den Basisentwicklungen gehen wir von keiner wesentlichen Veränderung der Recyclinganteile aus. Eine Ausnahme bilden Zellmaterialien für Batterien. Derzeit werden fast keine recycelten Materialien verwendet. Die neue europäische Batterieverordnung (European Parliament / Council of the European Union 2023) legt jedoch Anforderungen für das Recycling alter Batterien und für den künftig in neuen Batterien zu erreichenden Recyclinganteil fest. Die Basisentwicklung basiert daher auch auf diesen gesetzlichen Anforderungen. Tabelle 2 und Tabelle 3 geben einen Überblick über die in der Basisentwicklung angenommenen Recyclinganteile für die in AutoRess untersuchten Materialgruppen.

Tabelle 2: Recyclinganteil in ausgewählten Materialien des Fahrzeugunterbaus und Antriebsstrangs in der AutoRess-Basisentwicklung (alle Jahre)

Stahl und Eisen	Aluminium	Kupfer	Kunststoffe	Glas
Flachstahl: 10 % Langgut: 26 % Gusseisen: 35 %	Aluminium: 30 % Aluminiumguss: 74 %	19	2,5	0

Quelle: basierend auf mehreren Prozessen (ecoinvent 2021)

Tabelle 3: Recyclinganteil in den Batteriezellen in der AutoRess-Baseline-Entwicklung

	Lithium	Nickel	Kobalt
2021	0	0	0
2030	6	6	16
2035	12	15	26

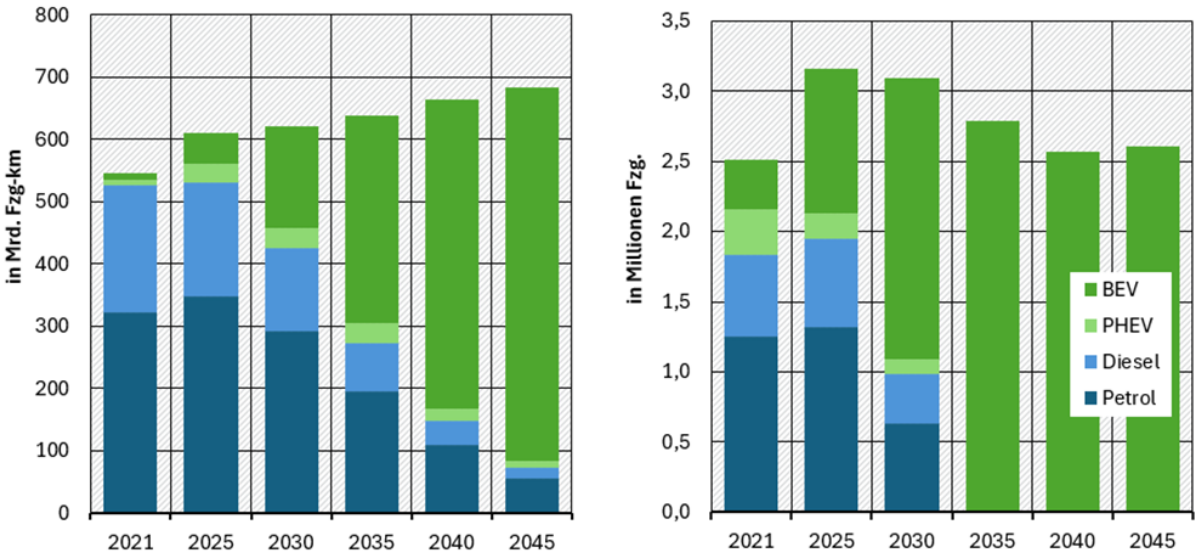
Quelle: (European Parliement / Council of the European Union 2023)

Die Nutzungsphase umfasst einerseits den Energieverbrauch und die daraus resultierenden Treibhausgasemissionen während des Betriebs von Kraftfahrzeugen und andererseits die Emissionen und den Materialbedarf während der Wartung und Reparatur von Kraftfahrzeugen.

Modelleingangsdaten für den **Betrieb von Kraftfahrzeugen** sind die Gesamtfahrleistung des Pkw-Verkehrs, die Fahrleistungsanteile der einzelnen Antriebskonzepte (Flottenzusammensetzung), der durchschnittliche spezifische Energieverbrauch in der Flotte und die Treibhausgasfaktoren der verwendeten Energiequellen (Kraftstoffe, Strom). In der Basisentwicklung in AutoRess werden alle verbrauchrelevanten Modell-Eingangsdaten und die direkten Emissionsfaktoren der Kraftstoffe (Tank-to-Wheel) unter Berücksichtigung der Anteile erneuerbarer Energiequellen aus dem Szenario mit Maßnahmen des Prognoseberichts 2024 (Harthan et al. 2024) übernommen. Ergänzende Faktoren für die vorgelagerten Emissionen von Kraftstoffen (well-to-tank) werden aus dem TREMOD-Modell „ übernommen.

Abbildung 4 (links) zeigt die Basisentwicklung der Pkw-Fahrleistung in Deutschland nach Antriebskonzepten. Von 2021 bis 2030 steigt die Pkw-Fahrleistung um 14 %, der Fahrleistungsanteil von batterieelektrischen Pkw steigt auf 26 %. Auch nach 2030 steigt die Pkw-Fahrleistung stetig weiter an und liegt 2045 um 10 % höher als 2030. Batterieelektroautos haben 2045 einen Fahrleistungsanteil von 88 %.

Abbildung 4: Jährliche Fahrleistung (links) und Neuzulassungen (rechts) von Autos in Deutschland nach Antriebskonzept



Quelle: basierend auf dem „Szenario mit bestehenden Maßnahmen“ (MMS) des Prognoseberichts 2024 (Harthan et al. 2024)

Emissionen und Materialbedarf für die **Wartung und Reparatur von Pkw** sind ebenfalls Teil der Modellierung im Pkw-Betrieb. Insgesamt zeigen die verfügbaren Erkenntnisse, dass die

Relevanz im Vergleich zu anderen Lebenszyklusphasen sehr gering ist, was sich auch in der sehr begrenzten Datenverfügbarkeit widerspiegelt. Aktuelle kilometerabhängige Treibhausgasfaktoren werden aus ecoinvent(ecoinvent 2021) übernommen. Analog zur Automobilproduktion geht die Basisentwicklung von sinkenden Emissionsbeiträgen durch die zunehmend dekarbonisierte Energieversorgung aus. Die spezifischen Emissionsbeiträge der Materialversorgung für Ersatzteile bleiben unverändert oder steigen aufgrund zunehmender Fahrzeuggrößen leicht an. Kilometerabhängiger Materialbedarf für die Autoreparatur liegt nur für Stahl und Kupfer vor. Für andere Materialien konnten keine verlässlichen Informationen gefunden werden. Mit den verfügbaren Informationen trägt die Autoreparatur jedoch nur 2 % zum jährlichen Stahlverbrauch und 1–2 % zum jährlichen Kupferverbrauch im deutschen Autotransportsektor bei. Insgesamt kann daher davon ausgegangen werden, dass die Reparaturphase für den Gesamtmaterialbedarf von sehr geringer Relevanz ist.

1.2.2 Ende der Lebensdauer: Wiederverwendung und Recycling

Zu den Eingabeparametern, die für die Modellierung der Treibhausgasemissionen aus der Fahrzeugentsorgung und der Rückgewinnung von recycelten Materialien für die Produktion neuer Personenkraftwagen erforderlich sind, gehören:

- Die Anzahl der Altfahrzeuge und deren Materialzusammensetzung.
- Die Rückgewinnung funktionsfähiger Gebrauchtteile (Wiederverwendung in der Fahrzeugreparatur, stationäre Energiespeicherung).
- Die Rückgewinnung von Materialien in den nachfolgenden Recyclingprozessen sowie der Anteil davon, der für die Herstellung neuer Fahrzeuge geeignet ist (z. B. geringer Verunreinigungsgrad).

Die Anzahl der in Deutschland stillgelegten Fahrzeuge kann nicht als Eingangsgröße für Altfahrzeuge herangezogen werden, da ein erheblicher Teil davon weiterhin als Gebrauchtwagen in anderen Ländern genutzt wird. Darüber hinaus können in einem europäischen Recyclingmarkt auch in anderen EU-Ländern zurückgewonnene Materialien für die Herstellung neuer Fahrzeuge für den deutschen Markt verwendet werden. Im AutoRess-Modell wird die jährliche Anzahl der Altfahrzeuge anhand von Überlebensfunktionen abgeleitet, die aus dem Impact Assessment zur europäischen ELV-Richtlinie (Europäische Kommission (2023b) übernommen wurden. Auf dieser Grundlage werden die Anzahl und die Materialzusammensetzung der in einem bestimmten Szenariojahr stillgelegten Personenkraftwagen im Modell automatisch auf der Grundlage der Neuzulassungen der Vorjahre abgeleitet.

Die meisten Altfahrzeuge in der EU landen in einer regulären Recyclinganlage. Gleichzeitig gibt es aber auch einen erheblichen Anteil an Altfahrzeugen, die aus der EU exportiert werden oder deren Verbleib unbekannt ist. Basierend auf der Folgenabschätzung der ELV-Richtlinie geht das Modell davon aus, dass in allen Jahren 65 % der stillgelegten Benzin- und Dieselautos, aber 90 % der stillgelegten Elektroautos in den Recyclinganlagen recycelt werden. Weitere für das Fahrzeugrecycling relevante Modellinputparameter werden ebenfalls aus dem Impact Assessment zur europäischen ELV-Richtlinie (Europäische Kommission (2023b) übernommen. Tabelle 4 bietet einen Überblick über die materialspezifischen Wiederverwendungsquoten und Recyclingeffizienzen.

Tabelle 4: Modellbasierte Annahmen für das Recycling von Materialien aus Glider und Antriebssträngen

	Stahl und Eisen	Aluminium	Kupfer	Kunststoffe	Glas
Wiederverwendungsquote	7	7	1	4	5
Recycling-Effizienz	87	80	65	17	99
Anteil hochwertigen Recyclings	2	1	5	20	0

Quelle: (Europäische Kommission 2023b)

Wir haben unsere eigenen Annahmen für Batterien abgeleitet. Derzeit werden fast keine Elektroautos recycelt. Das Modell geht davon aus, dass 10 % der installierten Batteriekapazität aller entsorgten Elektroautos im Jahr 2030 und 30 % ab 2035 wiederverwendet werden – etwa zwei Drittel in stationären Anwendungen und ein Drittel bei der Reparatur oder Aufarbeitung von Gebrauchtwagen. Das Recycling von Batteriematerialien ist noch nicht etabliert. Die EU-Batterieverordnung (Europäisches Parlament, Europäischer Rat 2023) legt Zielwerte für die Rückgewinnung von Zellmaterialien fest, die wir auch in der AutoRess-Basisentwicklung Tabelle 5 annehmen. Wir gehen davon aus, dass die zurückgewonnenen Zellmaterialien durch die gezielte Entwicklung von Recyclingverfahren vollständig für die Neuproduktion von Fahrzeugbatterien verwendet werden können.

Tabelle 5: Modellbaseline-Annahmen für das Recycling von Batteriezellmaterialien

	Lithium	Nickel	Kobalt
Recycling-Effizienz	2025: 50 %; 2030+: 80 %	2025: 90 % 2030+: 95 %	2025: 90 % 2030+: 95 %

Quelle: (Europäisches Parlament, Europäischer Rat 2023), eigene Annahmen

Die Fahrzeugentsorgung macht weniger als 1 % der gesamten Treibhausgasemissionen über alle Phasen des Lebenszyklus eines Autos aus. Die spezifischen Treibhausgasemissionsfaktoren für die Fahrzeugentsorgung stammen aus (Biemann et al. 2024) .

1.3 Basisentwicklungen der Treibhausgasemissionen und des Materialbedarfs des Autotransports in Deutschland mit aktuellen Treibern

1.3.1 Treibhausgasemissionen

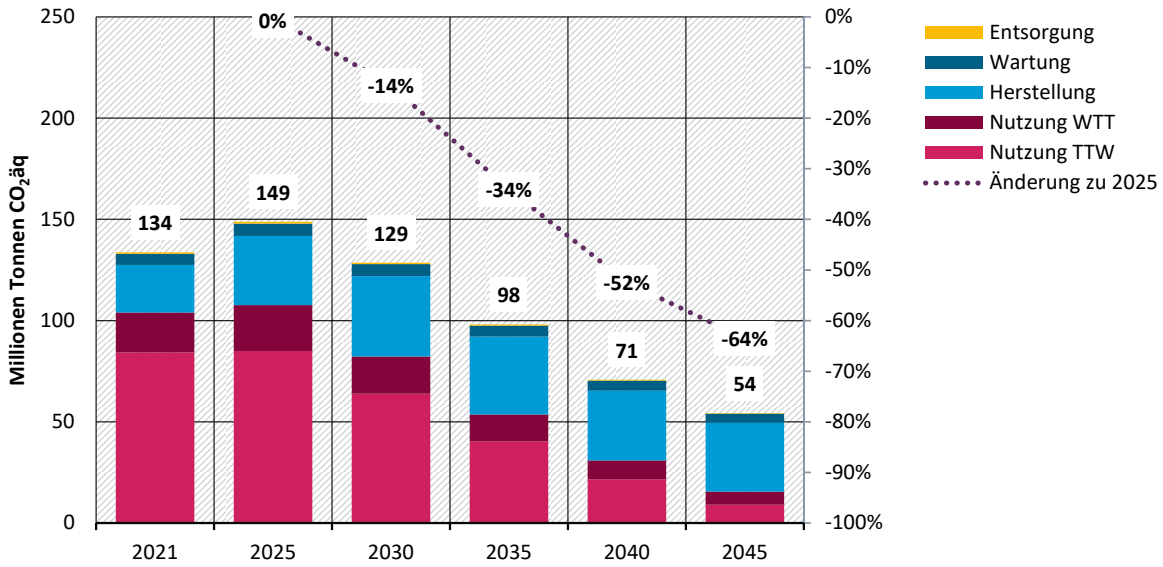
In der Basisentwicklung ohne zusätzliche Treiber werden die Treibhausgasemissionen aus dem Pkw-Verkehr in Deutschland bis 2030 nur um 4 % von 134 Millionen Tonnen auf 129 Millionen Tonnen sinken, bis 2045 jedoch um fast 60 % auf 54 Millionen Tonnen (Abbildung 5). Ausschlaggebend sind dabei die Emissionsersparnisse im Fahrzeugbetrieb: Die Summe aus direkten Treibhausgasemissionen (Tank-to-Wheel) und vorgelagerten Emissionen aus Kraftstoffen und Strom (Well-to-Tank) wird durch die zunehmende Elektromobilität und die Dekarbonisierung der Stromversorgung um rund 85 % stark sinken.

Demgegenüber werden die Emissionen aus der Automobilproduktion zwischen 2021 und 2030 zunächst von 24 Millionen Tonnen CO_2 e auf 40 Millionen Tonnen CO_2 e steigen, bevor sie bis 2045 wieder auf 34 Millionen Tonnen CO_2 e sinken. Für diese Entwicklung sind verschiedene Faktoren verantwortlich. Der Anstieg der Emissionen bis 2030 resultiert gleichermaßen aus der höheren jährlichen Zahl der Neuzulassungen und dem steigenden Anteil der Neuzulassungen von

Elektroautos. Von 2030 bis 2035 wird die Zahl der Neuzulassungen von Elektroautos pro Jahr zunächst weiter steigen, nach 2035 wird die Zahl der Neuzulassungen jedoch sinken. Gleichzeitig werden die spezifischen Emissionen aus der Automobilproduktion nach 2030 sinken, da in den Produktionsprozessen zunehmend erneuerbare Energien zum Einsatz kommen. Reduktionen der Treibhausgase aus der Materialversorgung, die in einer zunehmend defossilisierten Welt zu erwarten sind, deren Tempo mit den aktuellen Treibern jedoch höchst ungewiss ist, konnten im Modell nicht berücksichtigt werden. In AutoRess werden daher die spezifischen Treibhausgasemissionen aus der Materialversorgung in allen Jahren konstant gehalten, was zu einer Überschätzung der zukünftigen Emissionsbeiträge aus der Materialversorgung führt. Infolge dieser Modellannahmen wird der Anteil der Fahrzeugproduktion an den jährlichen Gesamtemissionen des Pkw-Verkehrs von 18 % im Jahr 2021 auf 31 % im Jahr 2030 und auf 63 % im Jahr 2045 steigen.

Die jährlichen Treibhausgasemissionen aus der Fahrzeugreparatur und -entsorgung sinken bis 2045 ebenfalls, wobei der Anteil der Fahrzeugreparatur an den Gesamtemissionen des Pkw-Verkehrs von 4 % auf 8 % steigt. Wie bei der Fahrzeugproduktion bildet das Modell auch die Umstellung des Energieverbrauchs auf erneuerbare Energiequellen ab, nicht jedoch die mögliche langfristige Entfossilisierung der Materialbeschaffungsprozesse. Unter der Annahme einer vollständigen Defosilisierung der globalen Materialversorgung würden auch die Emissionen aus der Fertigung um mehr als 90 % unter dem heutigen Niveau liegen (siehe (Biemann et al. 2024)).

Abbildung 5: Treibhausgasemissionen des Pkw-Verkehrs in Deutschland einschließlich aller Phasen des Lebenszyklus



Quelle: eigene Berechnungen, ifeu

1.3.2 Materialbedarf für Neuwagen und Recyclinganteil

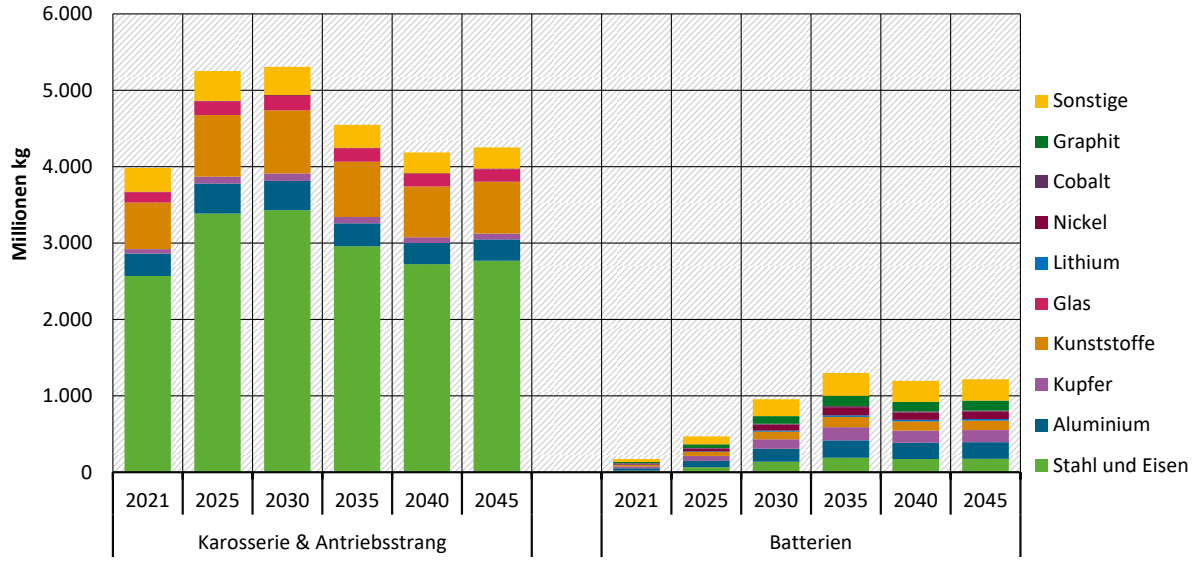
Für die in AutoRess ausgewählten Materialgruppen haben wir den jährlichen Gesamtmaterialbedarf, die benötigten Mengen an Primärmaterialien und den Recyclinganteil in der Fahrzeugproduktion modelliert.

Abbildung 6 zeigt den jährlichen Gesamtmaterialbedarf in der Automobilproduktion nach Materialgruppen, differenziert nach Glider & Powertrain und Batterien. Die Gesamtentwicklung des Materialbedarfs für Glider & Powertrain wird hauptsächlich durch die Gesamtzahl der Neuzulassungen bestimmt. Darüber hinaus tragen die Annahmen eines weiteren Anstiegs des

Fahrzeuggewichts zum steigenden Materialbedarf bis 2030 bei. Die Verlagerung der Neuzulassungen hin zu Elektroautos (100 % Anteil an Neuzulassungen ab 2035) spiegelt sich vor allem im starken Anstieg des Materialbedarfs für Batterien wider. Der Anteil der Batterien am gesamten jährlichen Materialbedarf von Neuwagen wird von 4 % im Jahr 2021 auf 22 % ab 2035 steigen.

Der Materialbedarf für Karosserien und Antriebe wird von Stahl und Eisen sowie Aluminium und Kunststoffen dominiert. Zusammen machen diese ca. 88 % des Gewichts aus. Weitere gewichtsrelevante Materialgruppen sind Kupfer und Glas. Stahl, Aluminium und Kunststoffe machen zusammen auch 42 % des Materialbedarfs in Batterien aus (hauptsächlich im Batteriegehäuse). Kupfer, Nickel und Graphit haben mit jeweils 8 bis 14 % ebenfalls einen bedeutenden Anteil. Die Zellmaterialien Lithium und Kobalt[1] sind dagegen mit jeweils 1 bis 3 Gewichtsprozent in der Gesamtmaterialbilanz kaum sichtbar.

Abbildung 6: Jährlicher Materialbedarf für neue Pkw in Deutschland



Quelle: eigene Berechnungen, ifeu

Abbildung 7 bis Abbildung 9 zeigen Beispiele für die Entwicklung des jährlichen Materialbedarfs ausgewählter Materialgruppen nach Fahrzeugkomponenten (links) und nach Materialherkunft (Mitte) sowie den Anteil an recycelten Materialien (rechts), der in der Basisentwicklung erreicht wurde. Zwischen den Materialgruppen bestehen große Unterschiede hinsichtlich des anteiligen Materialbedarfs für Karosserie und Antriebsstrang bzw. Batterie. Darüber hinaus unterscheiden sich der Recyclinganteil und der Anteil, der aus dem geschlossenen Recycling von Altfahrzeugen in der EU stammen kann, erheblich.

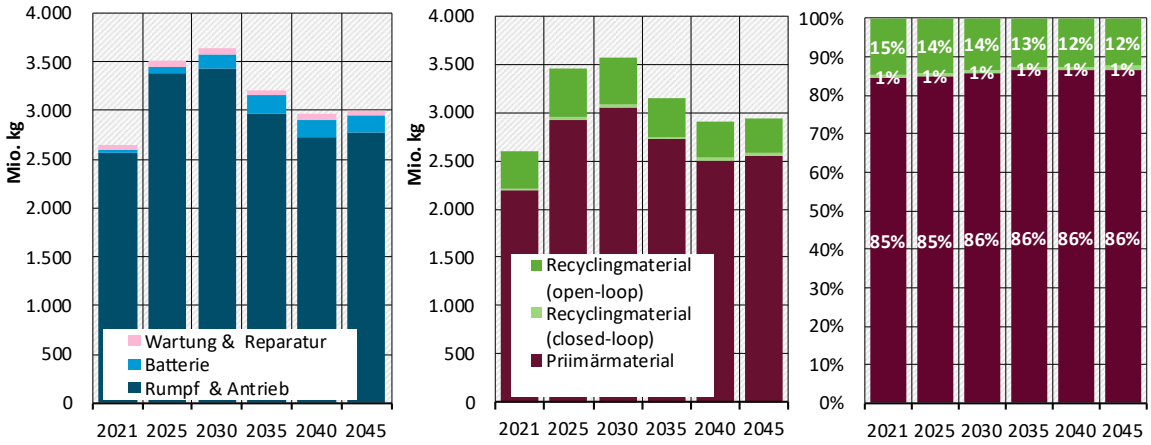
Bei den betrachteten unedlen Metallen werden bereits heute größere Anteile an Recyclinganteilen erreicht. Diese stammen fast ausschließlich aus Recyclingprozessen aus anderen Branchen oder Regionen und ändern sich in der Basisentwicklung mit den aktuellen Treibern kaum. Bei Kunststoffen und Glas werden heute fast keine recycelten Materialien verwendet und ohne zusätzliche Regulierung auch in Zukunft nicht verwendet werden.

Für Batteriezellmaterialien stehen derzeit keine recycelten Materialien zur Verfügung. In Zukunft wird die Verfügbarkeit von recycelten Materialien für Kathodenmaterialien wie Lithium oder Kobalt in der Basisentwicklung zunehmen. Gründe dafür sind zum einen die steigende Zahl

[1] Das Batteriezellenmaterial Mangan wird in AutoRess nicht separat berücksichtigt; sein Materialbedarf in der Automobilproduktion ist proportional zum Kobaltbedarf.

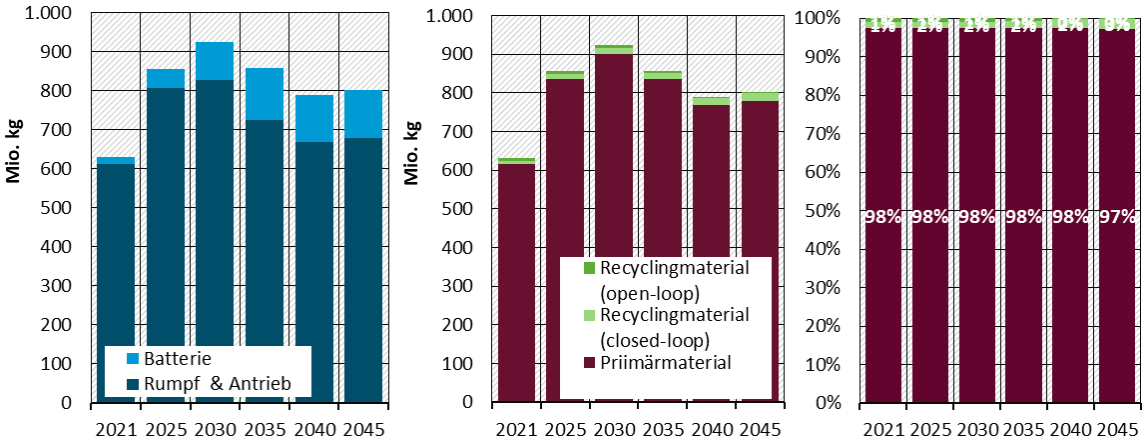
ausgemusterter Elektroautos und zum anderen die gesetzlichen Anforderungen der EU-Batterieverordnung „ zum Batterierecycling und zur Verwendung von recycelten Inhaltsstoffen in neuen Batterien. In der Basisentwicklung mit aktuellen Treibern können die Anforderungen an den Recyclinganteil in neuen Batterien erst ab 2040 aus dem geschlossenen Recycling von in der Europäischen Union zurückgewonnenen Elektroautos erfüllt werden. Bei Graphit wird in der Basisentwicklung bis 2045 kaum Recyclinganteil verwendet werden.

Abbildung 7: Materialbedarf für neue Personenkraftwagen und recycelte Inhaltsstoffe – Stahl und Eisen



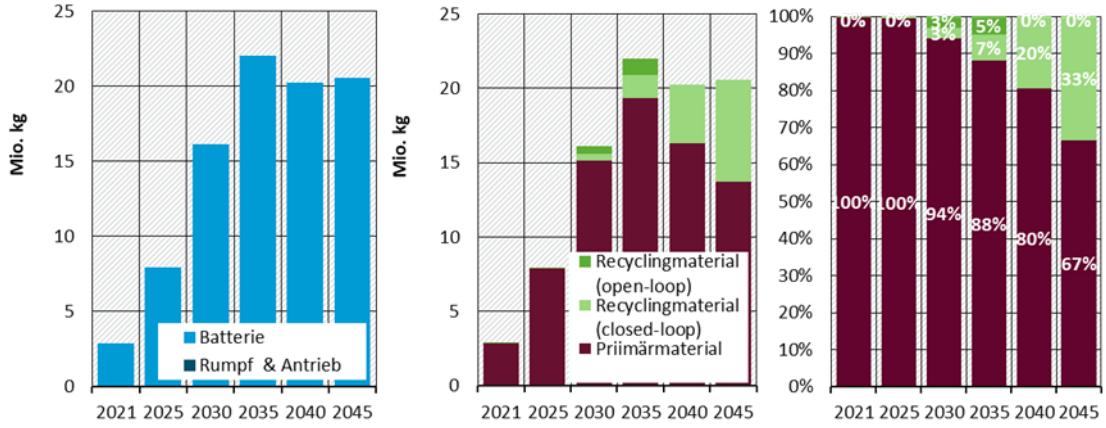
Quelle: eigene Berechnungen, ifeu

Abbildung 8: Materialbedarf für neue Personenkraftwagen und Recyclinganteil – Kunststoffe



Quelle: eigene Berechnungen, ifeu

Abbildung 9: Materialbedarf für neue Personenkraftwagen und Recyclinganteil – Lithium



Quelle: eigene Berechnungen, ifeu

1.4 Treibhausgas- und Materialauswirkungen ausgewählter zusätzlicher Faktoren

1.4.1 Vertiefte Analyse von 10 technischen und nicht-technischen Themen

Zehn spezifische technische und nicht-technische Themen für zusätzliche Treibhausgas- und Materialeinsparungen wurden definiert und anschließend in AutoRess eingehend analysiert. Sie wurden auf der Grundlage einer systematischen Analyse der wichtigsten Hebel entlang aller Lebenszyklusphasen von Kraftfahrzeugen ausgewählt. Dazu gehörten Faktoren, die sich direkt auf die Fahrzeugnutzung und -produktion selbst auswirken (Treibhausgase in allen Lebenszyklusphasen, Materialbedarf in der Fahrzeugproduktion), sowie indirekte Einflussfaktoren (insbesondere Materialversorgung in der Fahrzeugproduktion, Wartung und Fahrzeugentsorgung).

Jedes ausgewählte Thema befasst sich mit einem bestimmten Aspekt des Verkehrssystems, der durch technologische, soziale oder politische Maßnahmen beeinflusst werden kann. Der aktuelle Status quo, Entwicklungstrends mit aktuellen Treibern und Handlungsfelder für zusätzliche Treiber zur Reduzierung von Treibhausgasemissionen und Materialbedarf wurden in Expertenworkshops untersucht und diskutiert. Die einzelnen Themen bieten zudem sehr unterschiedliche technische Ansatzpunkte und vielfältige Gestaltungsmöglichkeiten. Darüber hinaus hat die Intensität der Umsetzung einen entscheidenden Einfluss auf die möglichen Effekte. Aus diesem Grund wurden für jedes Thema bis zu fünf Varianten modelliert und Bandbreiten der Treibhausgas- und Materialeffekte abgeschätzt. Tabelle 6 bietet einen kompakten Überblick über die 10 Optionen und die untersuchten Fragestellungen.

Tabelle 6: Übersicht über die analysierten technischen und sozialen Optionen

Option	Analysierte Ansätze
1. Alternative Antriebe	Verschiedene Batterietechnologien und Zellmaterialien (LFP, Festkörper-NMC, Na-Ion); Variation der Batteriekapazitäten
2. Verringerung der Fahrzeuggröße	Verlagerung der Neuzulassungen hin zu kleineren Fahrzeugen
3. Leichtbau	Verwendung von Leichtbaumaterialien, insbesondere Aluminium, in verschiedenen Fahrzeugkomponenten; Leichtbauweise von Batteriegehäusen

Option	Analysierte Ansätze
4. Kreislauforientiertes Design	Fahrzeugdesigns, die die Langlebigkeit (einschließlich Aufrüstbarkeit) erhöhen oder die Demontierbarkeit verbessern, um die Wiederverwendung von Altfahrzeugteilen zu erleichtern und die Materialrecyclingeffizienz zu steigern
5. Reparatur und Wiederaufbereitung E-Kfz-Batterien	Verbesserung der Reparaturfähigkeit von Batterien für eine längere Lebensdauer der Fahrzeuge. Wiederverwendung funktionsfähiger Batterien aus Altfahrzeugen (einschließlich Second Life)
6. Reparatur und Wiederaufbereitung Fahrzeugkarosserie	Verbesserung der Recyclingprozesse für eine bessere Rückgewinnung funktionsfähiger Ersatzteile aus Altfahrzeugen vor der Verschrottung zur Wiederverwendung und Wiederaufbereitung
7. Rezyklateinsatz von Batterierohstoffen	Veränderungen der Rücklaufquoten von Batteriematerialien aus dem Batterierecycling; Auswirkungen des Graphitrecyclings
8. Rezyklateinsatz von Metallen (ohne Batterie)	Unterschiedliche Anteile an recyceltem Metall in der Fahrzeugkarosserie (ohne Batterie)
9. Kreislaufführung von Kunststoffen	Kunststoffrecycling; Reduzierung des Treibhausgas-Fußabdrucks, einschließlich der Verwendung nicht-fossiler Kunststoffquellen
10. Altfahrzeuge	Höherer Anteil an demontierten Materialien vor dem Schreddern, höherer Anteil an der stofflichen Verwertung von Glas und höherer Anteil an hochwertigem Recycling von Stahl, Aluminium und Kupfer

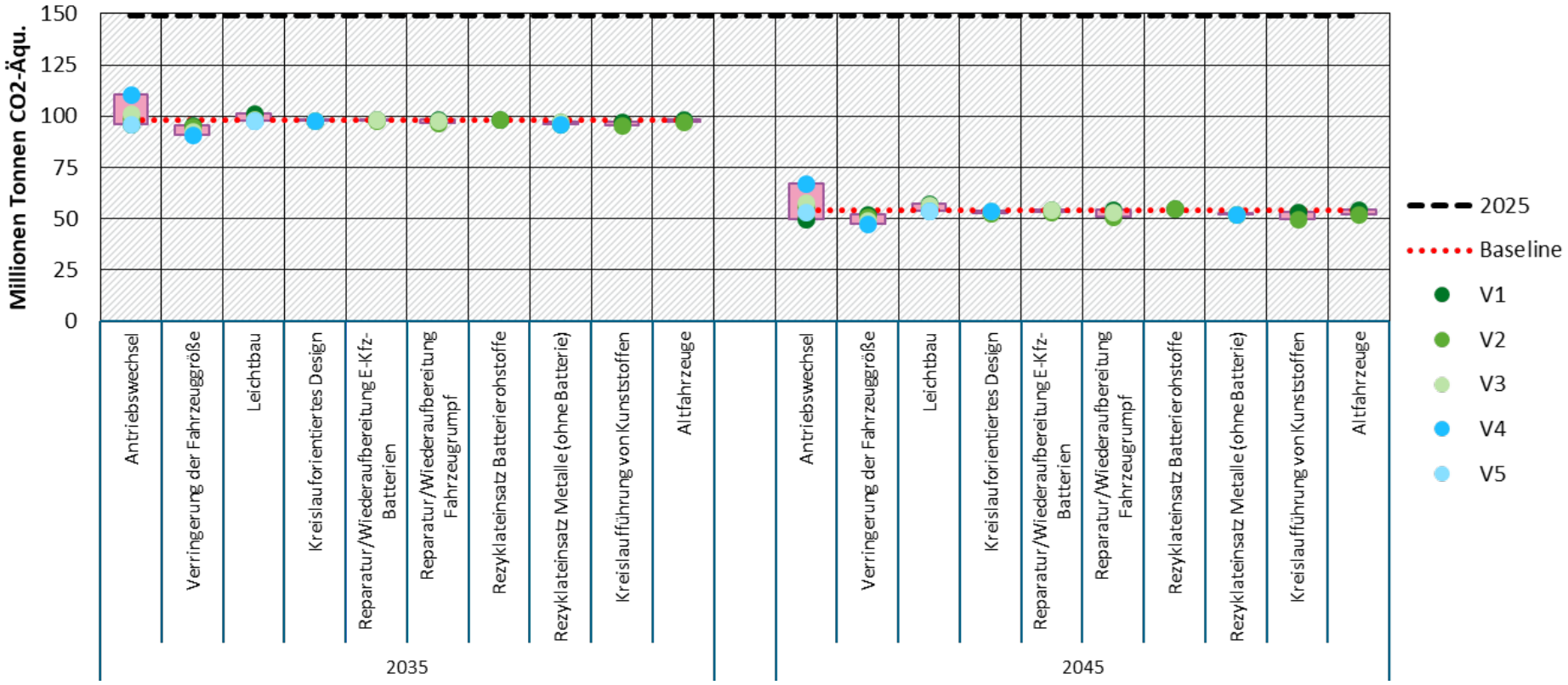
Quelle: eigene Darstellung, ifeu / Öko-Institut

1.4.2 Treibhausgasauswirkungen

Die folgende Abbildung 10 zeigt die modellierten Treibhausgasemissionen aus dem Pkw-Verkehr in Deutschland für das Basisjahr 2025 (schwarze gestrichelte Linie), für die Jahre 2035 und 2045 in der Trendentwicklung mit aktuellen Treibern (rote gestrichelte Linien) und für die 10 untersuchten Themen (Säulen und Punkte). Wie bereits für die Basisentwicklung gezeigt, werden die jährlichen Gesamtemissionen hauptsächlich durch den Energieverbrauch während der Nutzungsphase und die Fahrzeugproduktion bestimmt.

Im Trend mit aktuellen Treibern sinken die Treibhausgasemissionen deutlich, wobei die Emissionen bis 2035 um etwa ein Drittel und bis 2045 um zwei Drittel gegenüber 2025 zurückgehen. Ausschlaggebend hierfür sind die Emissionsminderungen im Fahrzeugbetrieb, gefolgt vom zunehmenden Einsatz erneuerbarer Energien in den Automobilproduktionsprozessen in Europa. Die zusätzlichen Treibhausgasauswirkungen in den einzelnen Themenbereichen sind im Allgemeinen gering. Je nach den einzelnen Ansätzen können zusätzliche Treibhausgaseinsparungen erzielt werden, aber auch die trendmäßigen Emissionsminderungen können abgeschwächt werden. Zusätzliche Treibhausgasemissionen wurden hauptsächlich in der Option „alternative Antriebe" abgeleitet, wo die Einsparung kritischer Materialien zu erhöhten spezifischen Treibhausgasemissionen führen kann, sowie im Leichtbau, wo Treibhausgaseinsparungen in der Nutzungsphase durch erhöhte Emissionen in der Fahrzeugproduktion überkompensiert werden können.

Abbildung 10: Treibhausgasemissionen des Pkw-Verkehrs in Deutschland 2035 und 2045 (alle Fahrzeuglebensphasen) mit einzelnen Optionen im Vergleich zum Basisjahr 2025



Quelle: eigene Berechnungen, ifeu/ Öko-Institut

Zu den einzelnen Varianten innerhalb der 10 Optionen siehe Erläuterungen im Hauptbericht

Abbildung 11 zeigt die Bandbreite der Treibhausgasauswirkungen im Vergleich zu den Emissionen im Basisszenario in den Jahren 2035 und 2045. Der Vergleich zeigt deutlich, dass keine einfache Aussage darüber getroffen werden kann, welche der Themen höhere Treibhausgaseinsparungen erzielen können als andere. Die konkreten Ansätze und ihre Umsetzungsintensität müssen ebenfalls in die Bewertung einbezogen werden. Dies lässt sich anhand der folgenden Beispiele veranschaulichen:

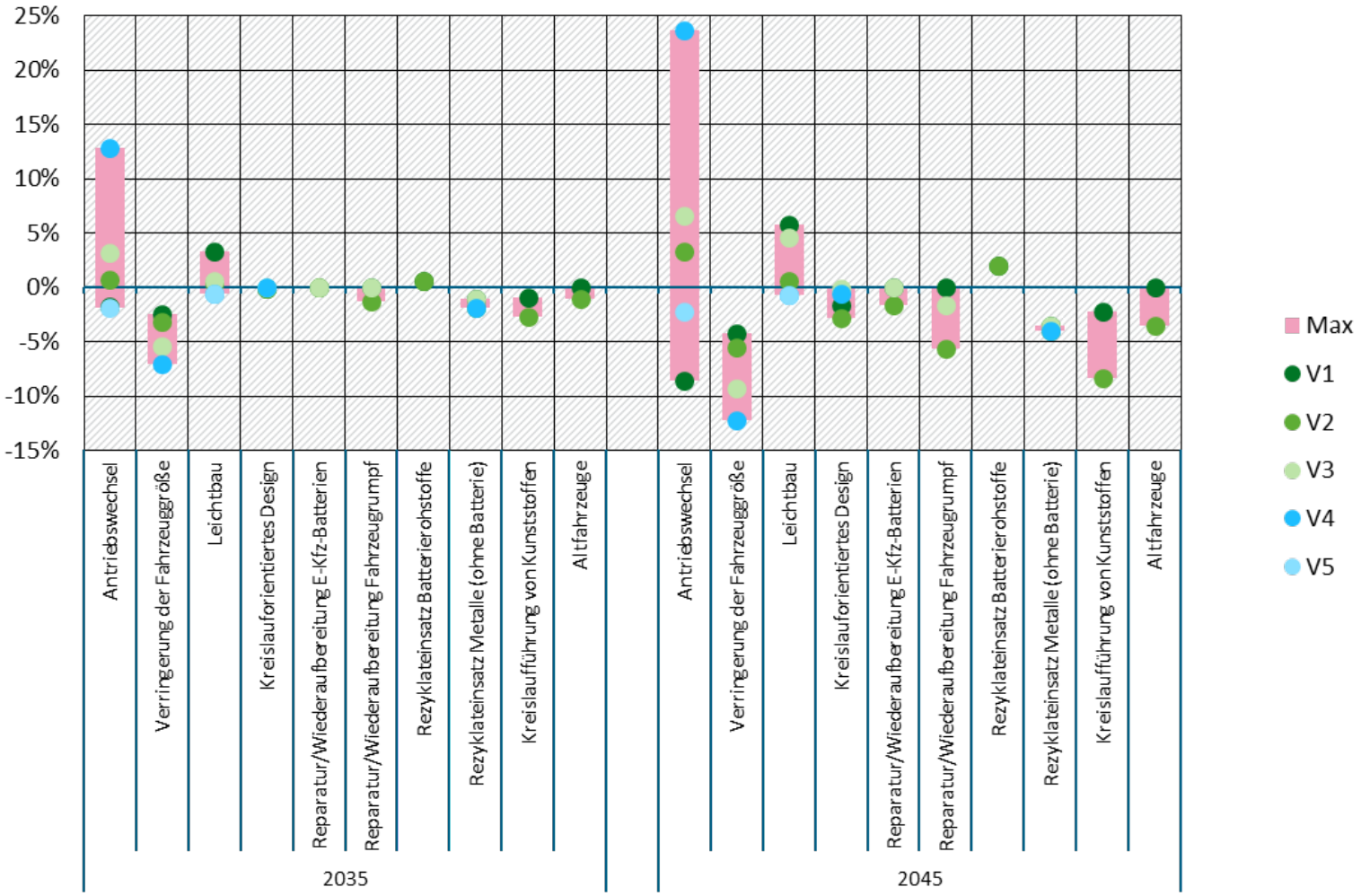
- Beim Thema „Kunststoffrecycling/erneuerbare Kunststoffe" werden zwei verschiedene Ansätze untersucht: a) verstärktes Recycling und b) reduzierter Treibhausgas-Fußabdruck, einschließlich der Verwendung nicht-fossiler Kunststoffe (Biomasse, abgeschiedener Kohlenstoff). Auch bei den Themen „alternative Antriebe" und „Leichtbau" werden unterschiedliche technische Auslegungen analysiert, was zu einer größeren Bandbreite der Treibhausgasergebnisse führt.
- Umsetzungsintensität: Das Thema „Downsizing" weist aufgrund a) unterschiedlicher Annahmen zur Fahrzeuggröße und b) unterschiedlicher Neuzulassungsanteile von Kleinwagenkonzepten eine große Bandbreite an Treibhausgasergebnissen auf.

Insgesamt werden die höchsten Treibhausgaseinsparungen in den untersuchten Themenbereichen durch eine erhebliche Reduzierung des Gesamtmaterialbedarfs (kleinere und weniger Neuwagen) und durch die Reduzierung fossiler Fahrzeugmaterialien erzielt.

Es gibt auch potenzielle Zielkonflikte zwischen der Reduzierung der Treibhausgasemissionen und der Reduzierung des Materialbedarfs. Die Option „Alternative Antriebe" verdeutlicht potenzielle Zielkonflikte zwischen einer gezielten Reduzierung ausgewählter kritischer Rohstoffe (z. B. Lithium, Kobalt) und der allgemeinen Reduzierung der Treibhausgasemissionen über alle Lebenszyklusphasen hinweg. Maßnahmen für ein treibhausgas- und ressourcenschonendes Auto müssen daher solche Wechselwirkungen berücksichtigen.

Ein Vergleich der einzelnen Themen zeigt nur, welche Optionen für sich genommen wie viel zusätzliche Treibhausgasauswirkungen haben können. Durch die Kombination mehrerer Themen lassen sich langfristig deutlich größere zusätzliche Treibhausgaseinsparungen erzielen, oder erhöhte Treibhausgasemissionen, die mit der Einsparung kritischer Rohstoffe verbunden sind, könnten durch Treibhausgaseinsparungen an anderer Stelle ausgeglichen werden.

Abbildung 11: Veränderungen der Treibhausgasemissionen des Pkw-Verkehrs in Deutschland 2035 und 2045 (alle Lebensphasen) im Vergleich zur Basislinie des jeweiligen Szenariojahres



Quelle: eigene Berechnungen, ifeu/ Öko-Institut

Zu den einzelnen Varianten innerhalb der 10 Optionen siehe Erläuterungen im Hauptbericht

1.5 Materialauswirkungen für die Neuwagenproduktion

Im Folgenden vergleichen wir die modellierten Auswirkungen der 10 untersuchten Themen auf den Gesamt- und Primärmaterialbedarf in der Neufahrzeugproduktion. Der Anwendungsbereich des AutoRess-Modells beschränkt sich auf die Bewertung der Materialauswirkungen innerhalb der Automobilbranche in Europa. Wechselwirkungen mit anderen Sektoren (z. B. Verwendung von Stahl aus dem Fahrzeugrecycling im Bausektor) oder mit anderen Regionen (z. B. Kauf von recycelten Batteriematerialien aus China zur Erfüllung der europäischen gesetzlichen Anforderungen an den Recyclinganteil) sind in der Modellierung nicht enthalten, werden jedoch im Hauptbericht in Bezug auf die Qualität diskutiert.

Jährlicher Gesamtmaterialbedarf in der Neuwagenproduktion

Abbildung 12 zeigt den jährlichen Materialbedarf für Stahl und Eisen in neu zugelassenen Fahrzeugen als Beispiel für die Fahrzeugmaterialien, die für alle Antriebsvarianten benötigt werden, und für Lithium Abbildung 13 als Beispiel für die Batteriematerialien, die mit dem Aufkommen der Elektromobilität zunehmend benötigt werden.

Bei den aktuellen Treibern wird der Materialbedarf in allen Antriebssträngen bis 2045 (rote gestrichelte Linien) trotz der Zunahme der Fahrzeuggrößen gegenüber 2025 (schwarz gestrichelte Linie) leicht zurückgehen. Grund dafür ist der in der Trendentwicklung angenommene Rückgang der jährlichen Neuzulassungen. Demgegenüber wird der Bedarf an Batteriematerialien aufgrund des Ausbaus der Elektromobilität und des zusätzlichen Trends zu größeren Batterien stark ansteigen.

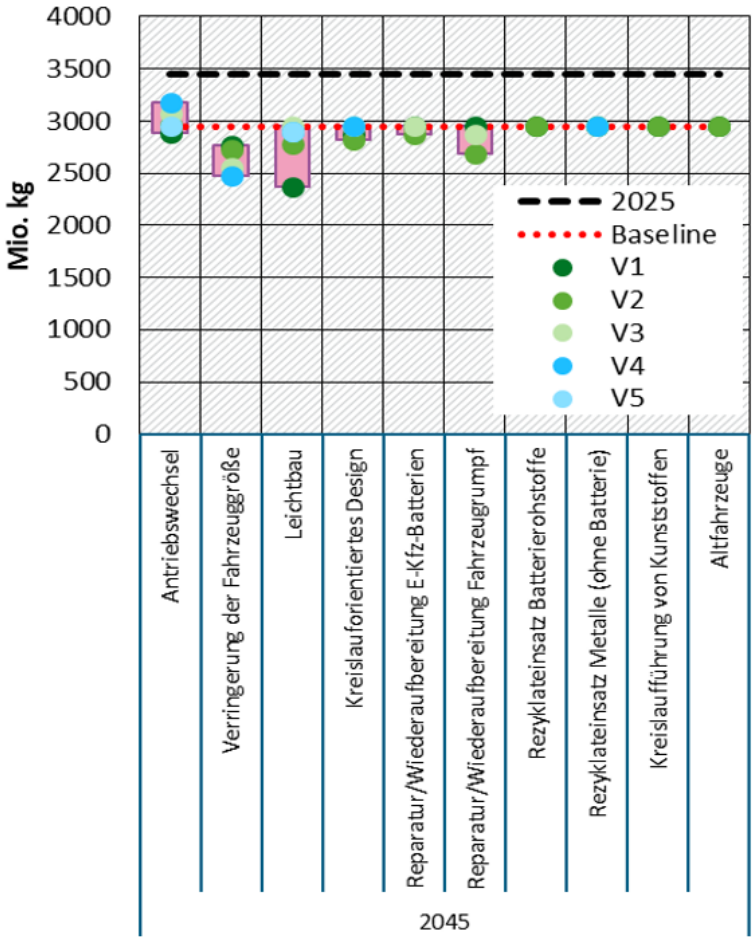
Die Säulen und Punkte in den Abbildungen zeigen die Auswirkungen der 10 untersuchten Themen auf den jährlichen Gesamtmaterialbedarf im Vergleich zur Basislinie. Je nach Schwerpunkt haben sie spezifische Auswirkungen auf die einzelnen Materialgruppen:

- Themen mit Fokus auf das gesamte Fahrzeug (z. B. „Downsizing“, „Design für Kreislaufwirtschaft: Langlebigkeit“) wirken sich aufgrund reduzierter Neuzulassungen oder aufgrund reduzierter Fahrzeuggrößen einschließlich Batteriegrößen proportional auf alle Materialgruppen aus.
- Themen mit Fokus auf Elektromobilität („alternative Antriebe“, „Wiederverwendung/Umnutzung von Batterien“, „Batterien mit recyceltem Anteil“) wirken sich nur auf die Nachfrage nach Batteriematerialien aus. Je nach konkretem Ansatz können alle Batteriematerialien proportional betroffen sein (z. B. Änderung der Batteriekapazitäten, Umnutzung von Batterien), es kann aber auch erhebliche Unterschiede zwischen einzelnen Batteriematerialien geben. Eine Veränderung der Batterietechnologie (Festkörper, Natrium-Ionen) reduziert die Nachfrage nach ausgewählten Materialien, erhöht aber gleichzeitig die Nachfrage nach anderen.
- Einige Optionen wirken sich nur auf ausgewählte Materialgruppen aus, insbesondere Leichtbau (Stahl, Aluminium) und Kunststoffrecycling/erneuerbare Kunststoffe (Kunststoffe).
- Optionen, die sich mit der Entsorgung von Autos befassen (Kunststoffrecycling, Ende der Lebensdauer), haben keinen Einfluss auf den Gesamtmaterialbedarf in der Automobilproduktion.

In den meisten Fällen führen die untersuchten Optionen zu einer Verringerung des jährlichen Materialbedarfs. Bei den Optionen „Alternative Antriebe“ und „Leichtbau“ kommt es jedoch auch zu einem teilweisen Anstieg des Bedarfs an einzelnen Materialien, wenn die Reduzierung eines

Materials mit einer Verlagerung auf andere Materialien einhergeht. Unter „Leichtbau“ wurde in einer Variante auch eine mögliche Verkürzung der Fahrzeuglebensdauer berücksichtigt. Im Modell führt dies zu einem Anstieg der jährlichen Neuzulassungen und damit des Gesamtmaterialbedarfs.

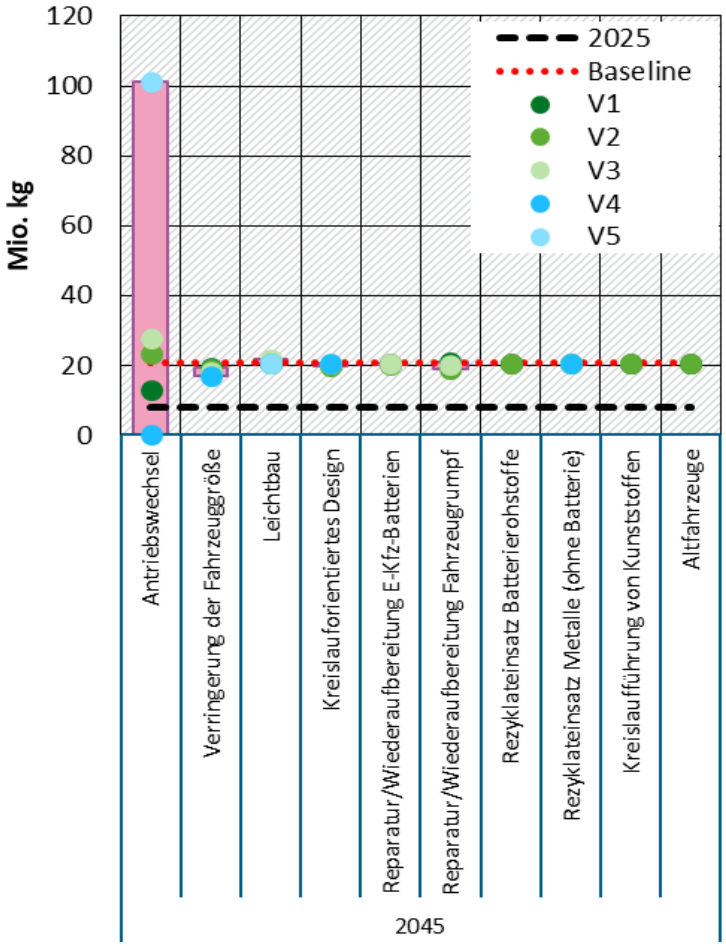
Abbildung 12: Jährlicher Gesamtmaterialbedarf an Stahl und Eisen im Jahr 2045Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.



Quelle: eigene Berechnungen, ifeu/ Öko-Institut

Zu den einzelnen Varianten innerhalb der 10 Themen siehe Erläuterungen im Hauptbericht.

Abbildung 13: Jährlicher Gesamtmaterialbedarf an Lithium im Jahr 2045



Quelle: eigene Berechnungen, ifeu/ Öko-Institut
Zu den einzelnen Varianten innerhalb der 10 Themen siehe Erläuterungen im Hauptbericht.

Jährlicher Primärmaterialbedarf in der Automobilherstellung

Der Primärmaterialbedarf hängt zum einen vom Gesamtmaterialbedarf und zum anderen vom Recyclinganteil im eingesetzten Material ab. Der Gesamtmaterialbedarf für Neuwagen ändert sich aufgrund der Anzahl und Größe der Neuwagen sowie der Materialzusammensetzung der Fahrzeuge. Der Recyclinganteil am gesamten eingesetzten Material hängt ab von:

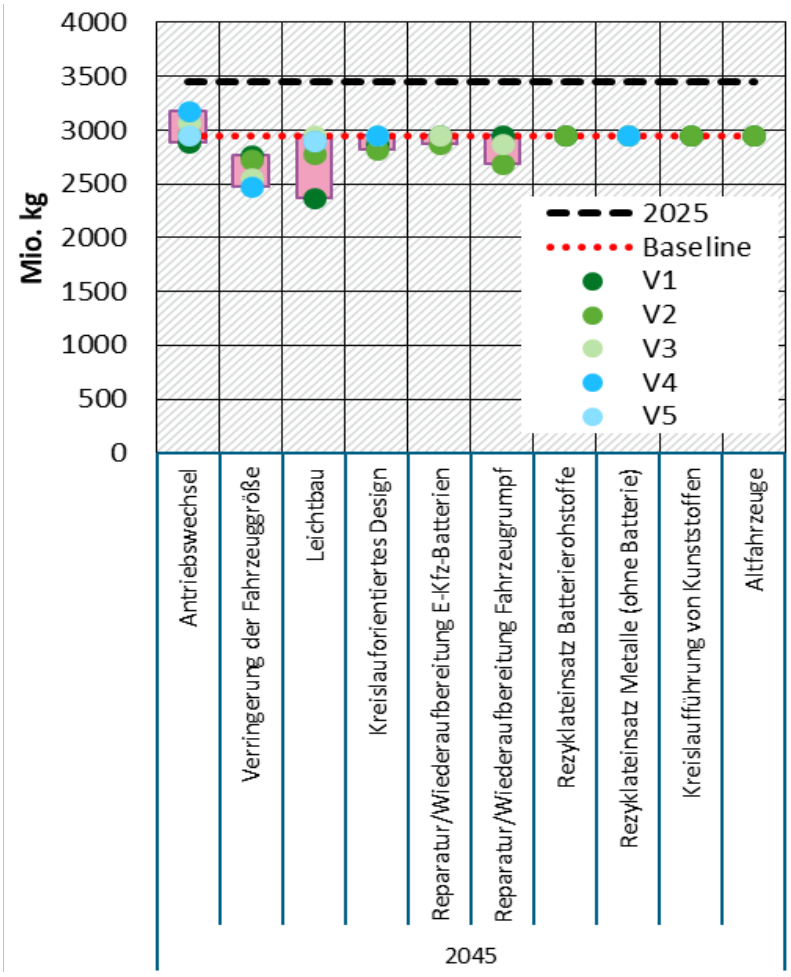
- Geschlossener Recyclingkreislauf: Menge des bei der Fahrzeugverwertung zurückgewonnenen Materials in Abhängigkeit von
  (1) Anzahl, Größe und Materialzusammensetzung der ausgemusterten Autos,
  (2) dem Anteil der ausgemusterten Autos und Komponenten, die dem Recycling zugeführt werden,
  (3) der Wiederverwendung funktionsfähiger Teile vor der Verschrottung und
  (4) (materialspezifische) Recyclingeffizienz

- Auswirkungen von geschlossenen Kreislauf-Rückgewinnungsmaterialien auf den Gesamtanteil an recycelten Inhaltsstoffen:
  (a) Erhöhung des Gesamtanteils an recycelten Materialien oder
  (b) höherer Anteil aus dem geschlossenen Kreislauf bei insgesamt unverändertem Recyclinganteil.

Während einige Themen die Materialanforderungen für Neufahrzeuge insgesamt betreffen, haben andere Themen nur eine gezielte Wirkung auf ausgewählte Materialgruppen. Daher ist es nicht möglich, einen umfassenden Vergleich der potenziellen Primärmaterialersparnisse der untersuchten Themen über alle Materialgruppen hinweg anzustellen. Vergleiche können speziell für einzelne Materialien angestellt werden. Zu diesem Zweck betrachten wir Stahl und Eisen als Beispiele für Materialien, die für alle Antriebsstränge relevant sind (Abbildung 14, Abbildung 15), und Kobalt für Batteriematerialien (Abbildung 16, Abbildung 17). Der jährliche Primärmaterialbedarf für alle in AutoRess untersuchten Materialgruppen ist im Hauptbericht zu finden.

Stahl und Eisen: In der Basisentwicklung mit aktuellen Treibern wird der Primärbedarf (Abbildung 15, schwarze gestrichelte Linie) zusammen mit einer Verringerung des Gesamtmaterialbedarfs (Abbildung 14) sinken, da die Recyclingquote in allen Jahren als konstant angenommen wird. Ebenso gibt es bei den meisten Optionen keinen Unterschied in den Modellergebnissen zwischen dem Primär- und dem Gesamtmaterialbedarf, da sie sich zwar auf den Gesamtbedarf, aber nicht auf die Recyclingquote auswirken können. Nur die Themen „Recyclinganteil Karosserie“ und „Ende der Lebensdauer“ weisen ein besonderes Potenzial für die Einsparung von Primärmaterial auf, da in diesen Themen eine Erhöhung des Gesamt-Recyclinganteils ausdrücklich untersucht wurde.

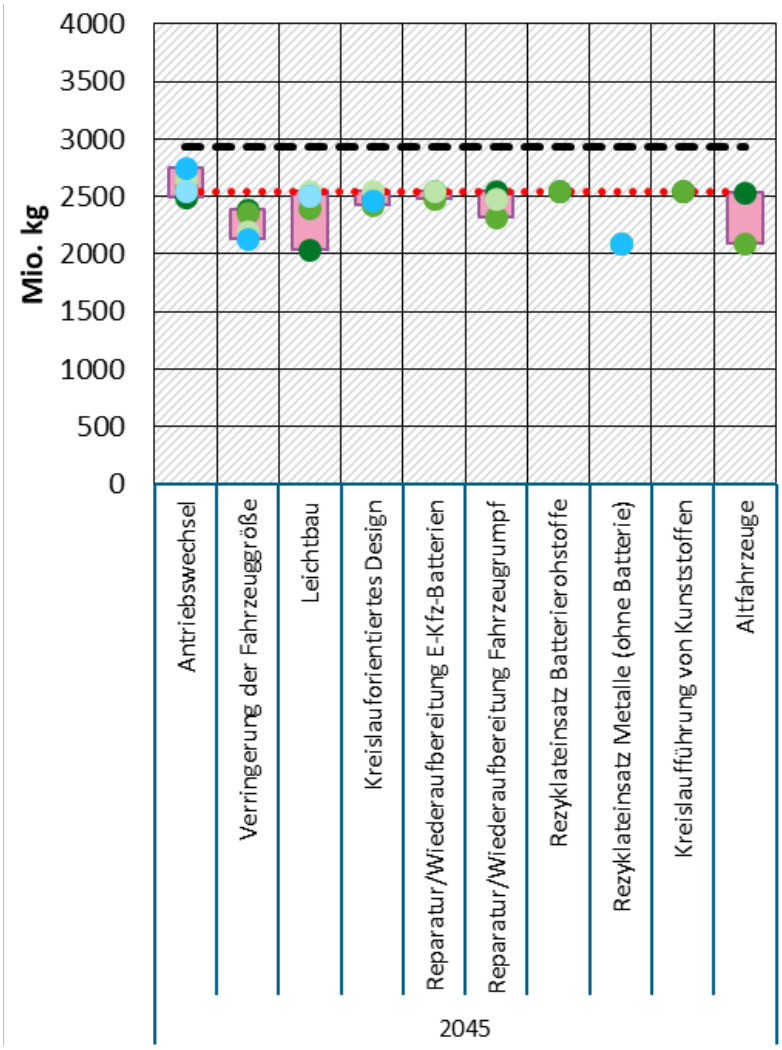
Abbildung 14: Jährlicher Gesamtmaterialbedarf an Stahl und Eisen im Jahr 2045



Quelle: eigene Berechnungen, ifeu/ Öko-Institut

Zu den einzelnen Varianten innerhalb der 10 Themen siehe Erläuterungen im Hauptbericht.

Abbildung 15: Jährlicher Primärmaterialbedarf – Stahl und Eisen



Quelle: eigene Berechnungen, ifeu/ Öko-Institut

Zu den einzelnen Varianten innerhalb der 10 Optionen siehe Erläuterungen im Hauptbericht

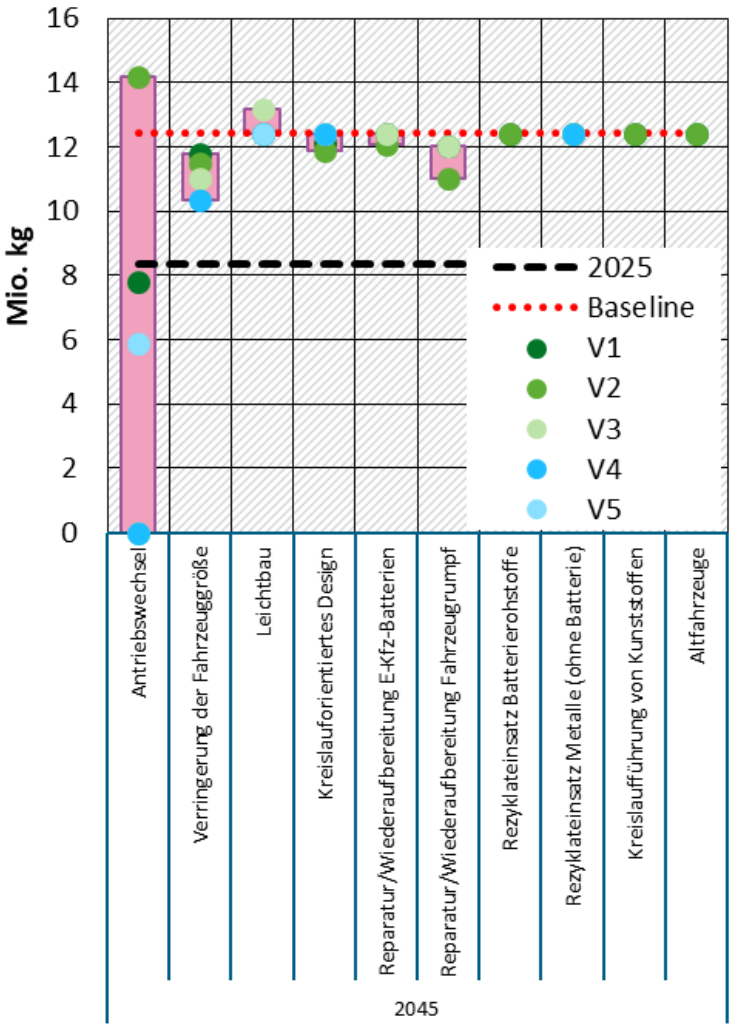
Kobalt: Im Jahr 2025 wird der gesamte Materialbedarf für Neuwagen fast vollständig durch Primärmaterial gedeckt, da es noch keine nennenswerte Anzahl von entsorgten Elektroautos und damit kaum eine Rückgewinnung von Kobalt gibt. In der Basisentwicklung bis 2035 ist der Anstieg des Primärmaterialverbrauchs deutlich geringer als der Anstieg des Gesamtmaterialverbrauchs. Im Jahr 2045 ist der Primärmaterialverbrauch trotz eines deutlich höheren Gesamtmaterialverbrauchs aufgrund der zunehmenden Verfügbarkeit von recyceltem Kobalt sogar noch geringer als im Jahr 2025. Die untersuchten Themen haben unterschiedliche Auswirkungen auf den zukünftigen Bedarf an Primärkobalt:

- Eine Umstellung auf kobaltfreie Batterietechnologien würde den Bedarf an Kobalt in Zukunft überflüssig machen.
- Durch Downsizing sinkt der Gesamt- und Primärkobaltbedarf proportional.
- Im Falle der Leichtbauweise hängt der Effekt auch von möglichen Auswirkungen des analysierten Cell-to-Chassis-Batteriedesigns auf das Fahrzeugrecycling ab. Wenn die

Entnahme und Wiederverwendung von Batterien schwieriger wird, steigt die Menge an Kobalt, die für Neuwagen recycelt wird.

- Durch den vermehrten Einsatz von Batterien als stationäre Energiespeicher wird Kobalt aus dem Automobilsektor abgezogen, wodurch die Verfügbarkeit von recycelten Materialien für Neuwagen sinkt. Gleichzeitig werden Materialien für die Herstellung neuer stationärer Batterien eingespart, was im AutoRess-Modell nicht berücksichtigt wird.[2]
- Themen, die nicht mit Elektromobilität zusammenhängen (z. B. Kunststoffrecycling, Recyclingeffizienz am Ende der Lebensdauer), haben keinen Einfluss auf die Gesamtnachfrage nach Kobalt oder die Nachfrage nach Primärmaterial.

Abbildung 16: Jährlicher Gesamtbedarf – Kobalt

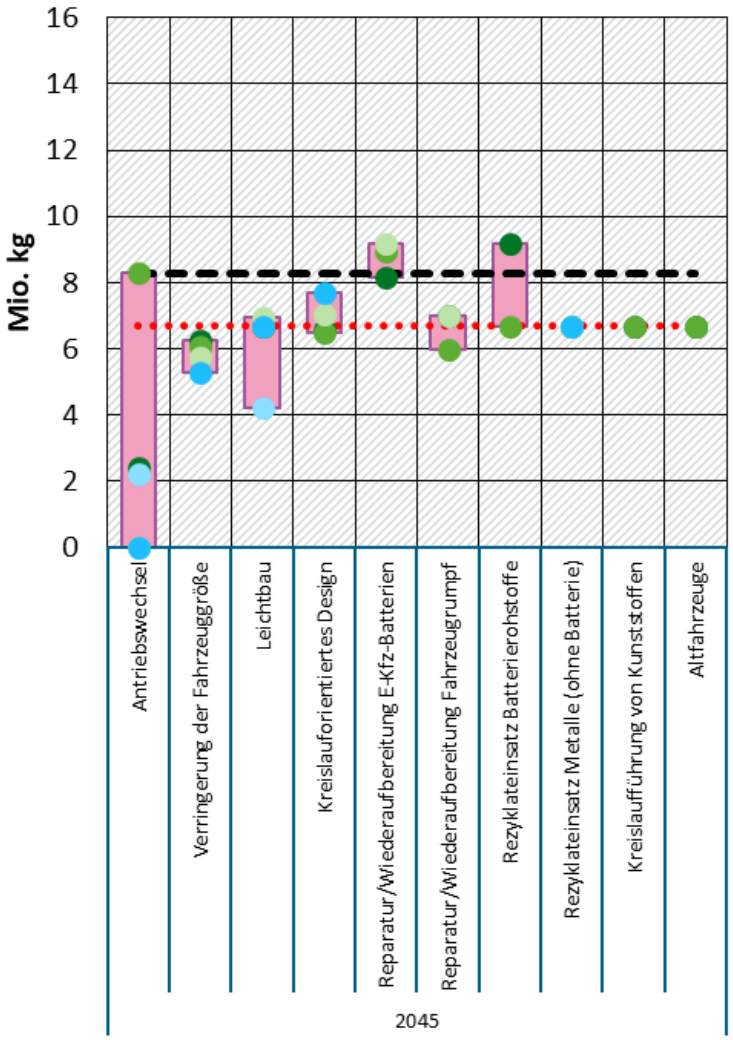


Quelle: eigene Berechnungen, ifeu/ Öko-Institut

Zu den einzelnen Varianten innerhalb der 10 Optionen siehe Erläuterungen im Hauptbericht

[2] Eine sektorübergreifende Betrachtung würde auch die Frage aufwerfen, ob Kobalt und andere kritische Materialien für neue stationäre Energiespeichersysteme mit kobaltfreien Batterien generell nicht benötigt werden.

Abbildung 17: Jährlicher Primärmaterialbedarf – Kobalt



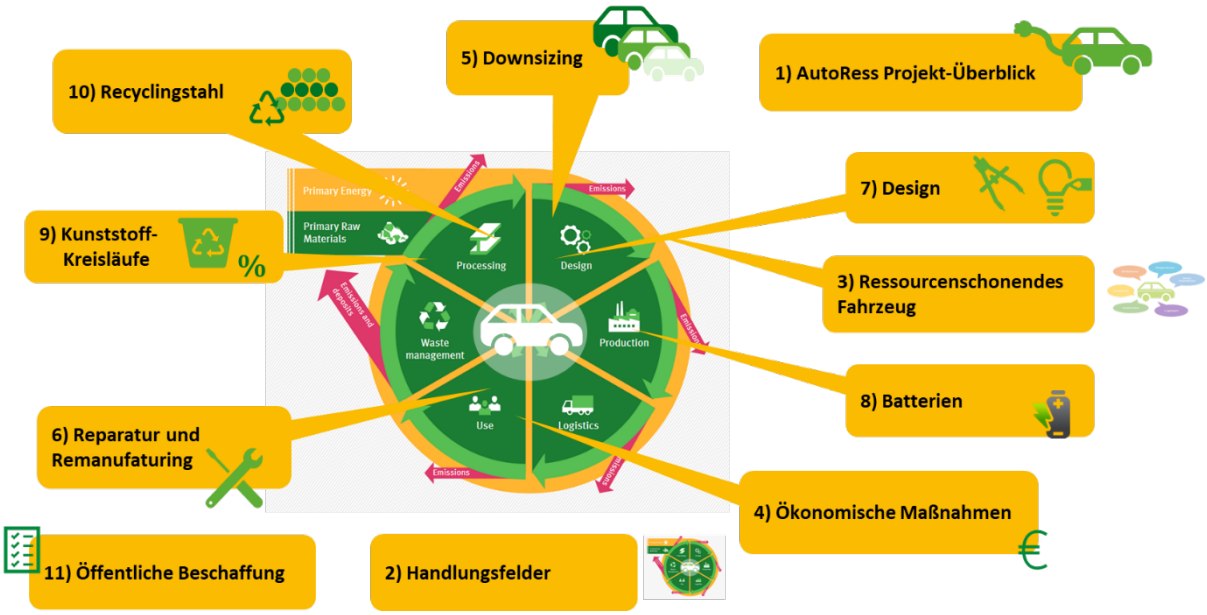
Quelle: eigene Berechnungen, ifeu/ Öko-Institut
Zu den einzelnen Varianten innerhalb der 10 Optionen siehe Erläuterungen im Hauptbericht

Insgesamt lässt sich feststellen, dass Vergleiche der potenziellen Materialeinsparungen der AutoRess-Themen für einzelne Materialien möglich sind, jedoch nicht für alle ausgewählten Materialgruppen. Themen, die für ein Material besser abschneiden, können für ein anderes Material weniger (oder gar nicht) wirksam sein. Der Grund für die Reduzierung des Materialbedarfs in der Automobilproduktion ist die Verringerung des gesamten Ressourcenverbrauchs und der damit verbundenen ökologischen und sozialen Folgen der Automobilproduktion. Durch die Reduzierung des gesamten Materialbedarfs werden auch diese Folgen in gleichem Maße verringert. Wenn Optionen jedoch nur ausgewählte Materialien betreffen, können wir die Wirksamkeit verschiedener Optionen nicht auf einfache Weise miteinander vergleichen. Dazu müssen wir geeignete und akzeptierte Bewertungsparameter entwickeln, die auf alle Materialien angewendet werden können.

2 Factsheets

In AutoRess wurden elf Factsheets erarbeitet, die Übersichten zu verschiedenen Fragestellungen (siehe hierzu Abbildung 18) mit Ergebnissen und Empfehlungen aus dem Projekt. Diese Factsheets sind in den folgenden Unterkapiteln aufgeführt.

Abbildung 18: Die 11 Factsheets in AutoRess



Quelle: Eigene Abbildung Öko-Institut / ifeu basierend auf Müller et al. 2020 [3]

2.1 Factsheet 1: Projektübersicht

Das AutoRess-Projekt hat vier relevante Ergebnisse hervorgebracht

- Eine modellbasierte Analyse von Handlungsfeldern für die Reduzierung von Treibhausgasemissionen und einen ressourceneffizienten Pkw-Sektor
- Definition und Kriterien für ein ressourceneffizientes und kreislaufwirtschaftsfähiges Fahrzeug
- Übergeordnete und themenspezifische Empfehlungen für politische Maßnahmen
- Eine Roadmap für die Kreislaufwirtschaft im Fahrzeugbereich

Hintergrund und Fokus von AutoRess

Die Pariser Vereinbarungen und der Klimaschutzplan 2050 setzen auch im Verkehrssektor klare CO_2-Reduktionsziele. Diese können nur mit einer ambitionierten Umstellung auf Elektrofahrzeuge erreicht werden. Elektrofahrzeuge zeichnen sich durch spezielle Komponenten wie den elektrischen Antriebsmotor, die Batterie oder die Leistungselektronik aus. Das Projekt konzentrierte sich auf batterieelektrische Fahrzeuge. Im Rahmen des Projekts wurden technische und nicht-technische Optionen zur Verringerung der Auswirkungen des Verkehrs auf

[3] Müller, F.; Kohlmeyer, R.; Krüger, F.; Kosmol, J.; Krause, S.; Dorer, C.; Röhreich, M. (2020): 9 GRUNDSÄTZE FÜR EINE KREISLAUFWIRTSCHAFT; Umweltbundesamt; https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2020_10_23_leitlinie_kreislaufwirtschaft_englisch_bf.pdf

das Klima und den Ressourcenverbrauch über alle Phasen des Fahrzeuglebenszyklus hinweg analysiert (siehe Abbildung unten). Auf dieser Grundlage wurden geeignete Instrumente und Maßnahmen entwickelt und mit dem Modell bewertet sowie eine Definition und Kriterien für ein ressourceneffizientes Fahrzeug erarbeitet. All dies wurde zu einer Roadmap für die Kreislaufwirtschaft für batterieelektrische Fahrzeuge zusammengefasst.

Die Ergebnisse wurden in verschiedenen Workshops mit dem Projektbeirat sowie mit externen und UBA-internen Expertinnen und Experten diskutiert. Das Projekt wurde vom Öko-Institut e. V. zusammen mit der ifeu gGmbH, Mehlhart Consulting und Team ewen von November 2022 bis August 2025 durchgeführt.

Potenziale zur Einsparung von Treibhausgasen und Materialien in verschiedenen Handlungsfeldern entlang des Fahrzeuglebenszyklus

Es wurden 10 technische und nicht-technische Themen für zusätzliche Treibhausgas- und Materialeinsparungen definiert und anschließend eingehend analysiert. Sie wurden auf der Grundlage einer systematischen Analyse der wichtigsten Hebel entlang aller Lebenszyklusphasen von Kraftfahrzeugen ausgewählt, einschließlich Faktoren, die sich direkt auf die Fahrzeugnutzung und -produktion selbst auswirken sowie indirekter Einflussfaktoren.

Jedes ausgewählte Thema befasst sich mit einem bestimmten Aspekt des Verkehrssystems, der durch technologische, soziale oder politische Maßnahmen beeinflusst werden kann. Es wurde ein Modell des deutschen Pkw-Verkehrs entwickelt, das alle Phasen des Fahrzeuglebenszyklus abbildet. Dieses Modell wurde verwendet, um das vergleichbare Einsparpotenzial für alle analysierten Themenbereiche in Bezug auf Treibhausgasemissionen und Primärmaterialien bis 2045 zu quantifizieren. Die analysierten 10 Themenbereiche als technische und soziale Optionen in verschiedenen Lebenszyklusphasen sind in der folgenden Abbildung dargestellt.

Abbildung 19: Die analysierten 10 Themenbereiche in AutoRess



Quelle: Eigene Abbildung Öko-Institut / ifeu basierend auf Müller et al. 2020

Die einzelnen Themen bieten zudem sehr unterschiedliche technische Ansatzpunkte und vielfältige Gestaltungsmöglichkeiten. Darüber hinaus hat die Intensität der Umsetzung einen entscheidenden Einfluss auf die möglichen Effekte. Aus diesem Grund wurden für jedes Thema bis zu fünf Varianten modelliert und Bandbreiten der Treibhausgas- und Materialeffekte abgeschätzt.

Detaillierte Informationen zu den Themenbereichen und den modellierten Treibhausgas- und Materialeinsparpotenzialen finden sich im englischen Abschlussbericht in Kapitel 3 sowie in zusätzlichen zusammenfassenden Papieren zu ausgewählten Themenbereichen.

Definition und Kriterien: Was macht ein Fahrzeug ressourceneffizient und kreislaufwirtschaftsfähig?

Basierend auf den Modellergebnissen, Recherchen und Expertengesprächen gilt ein Fahrzeug als ressourceneffizient und kreislaufwirtschaftsfähig, wenn es die folgenden Anforderungen erfüllt:

a) Über den gesamten Lebenszyklus wird so wenig Primärrohstoffe wie möglich verbraucht.

b) Über den gesamten Lebenszyklus werden möglichst wenig Treibhausgase ausgestoßen.

c) Über den gesamten Lebenszyklus wird so wenig Energie wie möglich verbraucht.

d) Die Lebensdauer des Fahrzeugs ist so lang wie möglich.

e) Die Fahrzeugkomponenten können auf möglichst effiziente Weise recycelt werden, ohne dass ein Downcycling erforderlich ist.

f) Zusätzliche negative Auswirkungen auf die Umwelt und die Gesellschaft werden minimiert.

Abbildung 20: Aspekte der vorgeschlagenen Definition für ein ressourcenschonendes und kreislaufwirtschaftsfähiges Fahrzeug



Weitere detaillierte Informationen im englischen AutoRess-Abschlussbericht in Kapitel 4 (Kriterien)
Quelle: Eigene Darstellung Öko-Institut

Zur Erfüllung dieser Anforderungen an ein ressourceneffizientes Fahrzeug wurden Hauptkriterien entwickelt. Anhand der Ergebnisse des Modells in Kombination mit Expertenwissen und weiteren Forschungsergebnissen wurden Kriterien formuliert. Beispielsweise ist die Verringerung der Treibhausgasemissionen und der Fahrzeuggröße ein Kriterium zur Reduzierung des Energieverbrauchs und des Materialbedarfs eines Fahrzeugs. Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über die Kriterien.

Tabelle 7: Kriterien, die die Aspekte der Definition eines ressourceneffizienten Fahrzeugs abdecken

Primärroh-stoffeinsatz	Treibhausgas-emissionen	Langlebigkeit	Rezyklier-barkeit	Energie-verbrauch	Umwelt-wirkungen
Rohstoffindex[4]	Product Carbon Footprint[1]	Modulari-sierung	Modulari-sierung	Product Carbon Footprint	Sorgfalts-pflichten in den Lieferketten
Fahrzeugmaße	Rezyklat-einsatzquoten	Lebensdauer-garantie Batterien	Rezyklat-einsatzquoten	Energie-verbrauch in der Nutzung	Fahrzeugmaße
Batterie-kapazität	Fahrzeugmaße	Bereitstellung Ersatzteile und Software-updates	Rohstoffindex[2]	Fahrzeugmaße	Rohstoffindex[2]
Rezyklat-einsatzquoten					

Quelle: eigene Darstellung Öko-Institut

Detaillierte Informationen zur Definition und zu den Kriterien einschließlich konkreter Werte für verschiedene Ambitionsstufen finden Sie im englischen Abschlussbericht (Kapitel 4) sowie in einem zusätzlichen zusammenfassenden Papier (Kriterien für ressourceneffiziente, kreislaufwirtschaftsfähige Fahrzeuge).

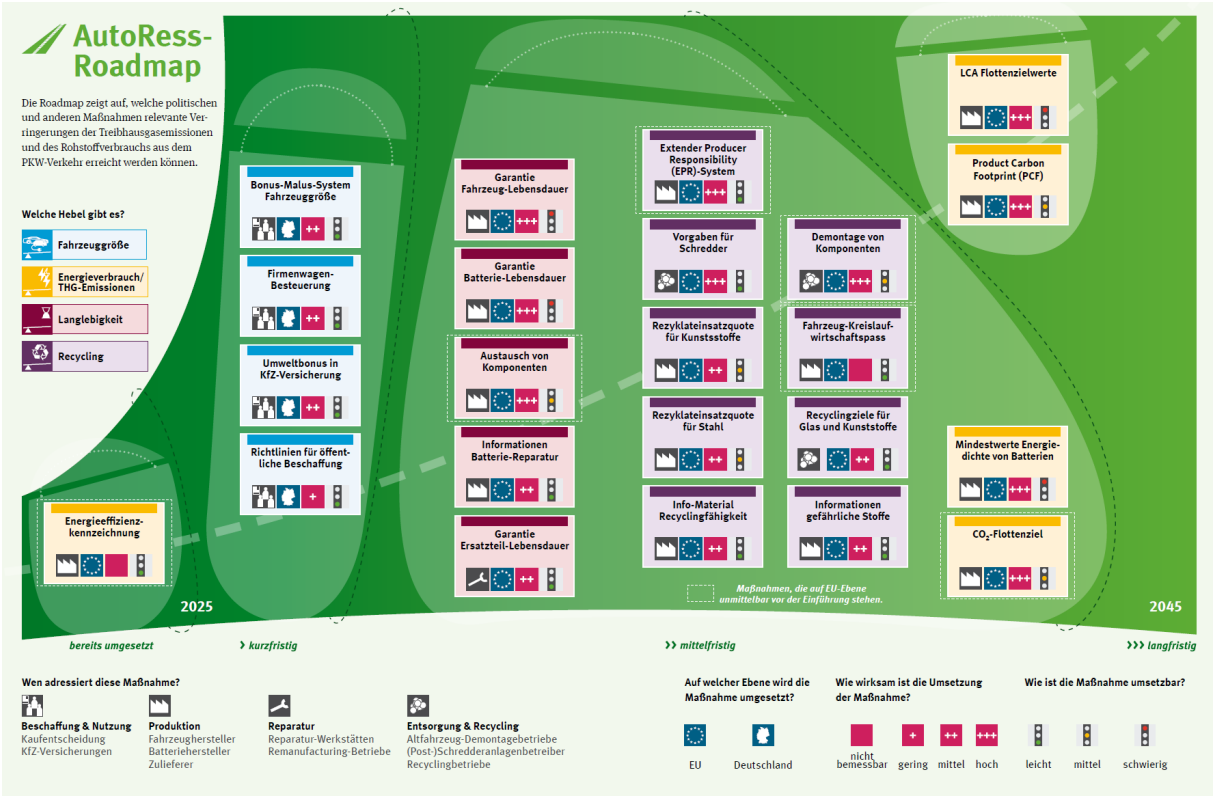
Die Roadmap für ressourcenschonende und kreislaufwirtschaftsfähige E-Fahrzeuge

Auf der Grundlage der entwickelten Kriterien wurden die identifizierten Maßnahmen und Instrumente nach spezifischen Kriterien (z. B. aktueller Stand der Umsetzung der Maßnahme, Lebenszyklusphase, betroffene Interessengruppen, Wirkungsmechanismus, Zeithorizont, geografische Ebene der Maßnahme, Verpflichtungsgrad) klassifiziert, bewertet und priorisiert.

Die Roadmap zeigt, welche Maßnahmen und Instrumente einen wesentlichen Beitrag zur Reduzierung der Treibhausgasemissionen und des Ressourcenverbrauchs leisten können und in welchem Zeithorizont und durch welche Akteure diese erreicht werden können.

[4] Zukünftiges Kriterium nach Standardisierung der Berechnungsmethodik

Abbildung 21: Die Roadmap für die Kreislaufwirtschaft

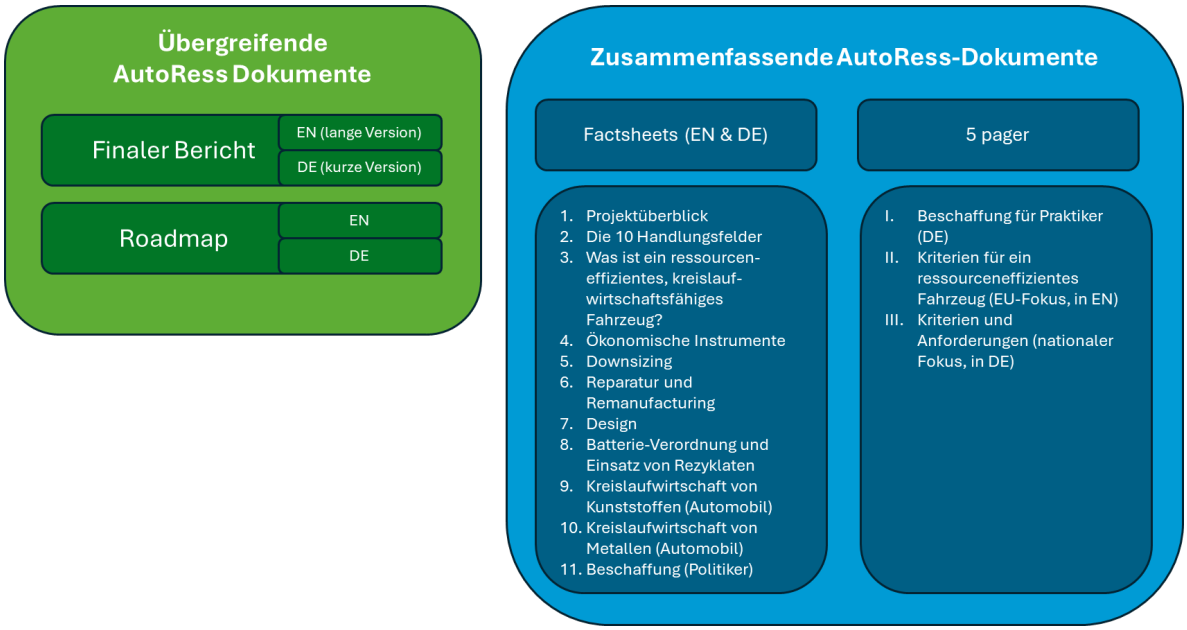


Weitere Informationen finden Sie in der AutoRess-Broschüre und im AutoRess-Abschlussbericht in Kapitel 5 zur Entwicklung von Instrumenten und Maßnahmen sowie in Kapitel 6 zur Roadmap.
Quelle: AutoRess Roadmap „In die Zukunft navigieren“ (Sutter, Jürgen (2025): In die Zukunft navigieren. Die AutoRess-Roadmap für ressourcenschonende und kreislaufwirtschaftsfähige E-Kraftfahrzeuge; veröffentlicht vom Umweltbundesamt)

Die Roadmap ist in einer zusätzlichen Broschüre enthalten (siehe Sutter 2025). Weitere Informationen und alle Maßnahmen sind im englischen Abschlussbericht (siehe Sutter et al. 2025a) in Kapitel 5 detailliert aufgeführt.

Die AutoRess-Veröffentlichungen stehen alle auf der UBA-Website zur Verfügung unter http://umweltbundesamt.de/themen/verkehr/ ressourcenschonung-im-verkehr. Eine Übersicht über die veröffentlichten AutoRess-Dokumente finden Sie unten.

Abbildung 22: Die AutoRess-Publikationen



Quelle: eigene Darstellung Öko-Institut

2.2 Factsheet 2: Handlungsfelder für ein treibhausgas- und ressourcenschonendes Auto

Wichtigste Ergebnisse

Das Ziel von AutoRess ist es, geeignete Handlungsempfehlungen zur Reduzierung der Treibhausgasemissionen und des Ressourcenverbrauchs zukünftiger Autos über den gesamten Lebenszyklus abzuleiten. Als Grundlage für wirksame Maßnahmen wurden Potenziale für eine Vielzahl technischer und nichttechnischer Handlungsfelder untersucht. Diese reichen von der Größe neuer Autos und Batterien über Langlebigkeit und bessere Reparierbarkeit bis hin zu Leichtbau, der Verwendung von recycelten Materialien in der Automobilproduktion und einer erhöhten Materialrückgewinnung am Ende der Lebensdauer.

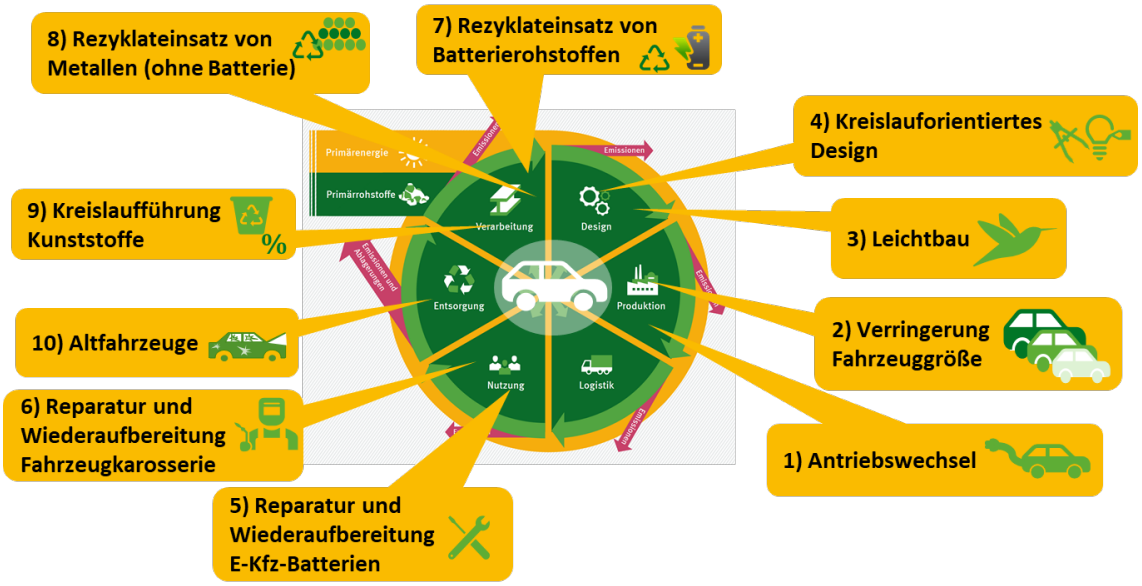
Die meisten Handlungsfelder zeigen je nach ihrer spezifischen Ausgestaltung und Umsetzungsintensität eine erhebliche Bandbreite möglicher Einsparungen. Die höchsten Treibhausgaseinsparungen lassen sich durch eine deutliche Verringerung des Gesamtmaterialbedarfs (kleinere und weniger Neuwagen) und den geringeren Einsatz fossiler Materialien erzielen. Es bestehen auch potenzielle Zielkonflikte zwischen der Reduzierung ausgewählter kritischer Materialien (z. B. Lithium, Kobalt) und der Reduzierung von Treibhausgasemissionen. Maßnahmen für ein treibhausgas- und ressourcenschonendes Auto müssen daher solche Wechselwirkungen berücksichtigen.

Zehn technische und nicht-technische Handlungsfelder wurden für ausführliche Analysen zu deren möglichen Wirkungen über den gesamten Fahrzeuglebensweg ausgewählt

Das Ziel des Projekts AutoRess ist es, Instrumente zu identifizieren, die einerseits den Verbrauch von Primärrohstoffen und die damit verbundenen ökologischen und sozialen Folgen reduzieren und andererseits zusätzliche Treibhausgas-Einsparungen über den gesamten Lebenszyklus hinweg erzielen. Zu diesem Zweck wurden technische und nicht-technische Ansätze über alle Lebenszyklusphasen von Fahrzeugen hinweg auf ihre Auswirkungen auf Treibhausgasemissionen und Materialbedarf untersucht. In einem ersten Schritt wurden

wichtige Hebel zur Reduzierung der Treibhausgasemissionen und zur Begrenzung des Rohstoffverbrauchs entlang aller Lebenszyklusphasen von Kraftfahrzeugen identifiziert. Diese systemische Analyse umfasste Faktoren, die sich direkt auf die Fahrzeugnutzung und -produktion selbst auswirken (Treibhausgase in allen Lebenszyklusphasen, Materialbedarf in der Fahrzeugproduktion), sowie indirekte Einflussfaktoren (insbesondere Materialversorgung in der Fahrzeugproduktion, Wartung und Fahrzeugentsorgung). Eine grundlegende Priorisierung der Einflussfaktoren diente als Ausgangspunkt für die Analyse vielversprechender Handlungsfelder.

Abbildung 23: Ausgewählte Handlungsfelder in AutoRess



Quelle: Eigene Darstellung Öko-Institut / ifeu auf Basis von Müller et al 2020

Es wurden 10 spezifische technische und nicht-technische Handlungsfelder entlang des Lebenszyklus eines Autos definiert und anschließend eingehend analysiert. Jedes Thema befasst sich mit einem bestimmten Aspekt entlang des Fahrzeuglebens, der durch technologische, soziale oder politische Maßnahmen beeinflusst werden kann. Der aktuelle Status quo, Entwicklungstrends mit aktuellen Treibern und Ansatzpunkte für zusätzliche Treiber zur Reduzierung von Treibhausgasemissionen und Materialbedarf wurden untersucht und in Expertenworkshops diskutiert. Es wurde ein Modell des Pkw-Verkehrs in Deutschland entwickelt, das alle Phasen des Fahrzeugleben umfasst, um vergleichbare Treibhausgas- und Materialeinsparpotenziale bis 2045 abzuleiten. Innerhalb der untersuchten Handlungsfelder gibt es verschiedene Ausgestaltungsmöglichkeiten. Darüber hinaus hat die Intensität der Umsetzung einen entscheidenden Einfluss auf die möglichen Wirkungen. Aus diesem Grund wurden für jedes Handlungsfeld bis zu fünf Varianten modelliert, um die Bandbreite der potenziellen Treibhausgas- und Materialwirkungen abzuschätzen.

Alternative Antriebe

Die Elektrifizierung von Pkw ist ein wichtiger Hebel zur Reduzierung der Treibhausgasemissionen im Verkehr. Nach der aktuellen Gesetzgebung dürfen ab 2035 in Deutschland nur noch batterieelektrische Personenkraftwagen (BEV) neu zugelassen werden. Ein Teil der Treibhausgaseinsparungen in der Nutzungsphase von Elektroautos wird jedoch durch zusätzliche Emissionen aus der Fahrzeugproduktion, insbesondere aufgrund der Batterien, wieder aufgehoben. Darüber hinaus werden für die Batterien immer größere Mengen kritischer Rohstoffe

benötigt. Daher konzentriert sich dieses Handlungsfeld auf die Auswirkungen batteriebezogener Schlüsselparameter:

1. Fahrzeugreichweite und Batteriegröße: Basierend auf einer durchschnittlichen nutzbaren Batteriekapazität von 80 kWh im Trend werden eine mögliche Erhöhung auf 100 kWh und eine Verringerung auf die Größe von 55 kWh (Mittel im Jahr 2021) modelliert.
2. Neue Batterietechnologien: In drei Varianten wird ein möglicher Wechsel zu LFP-, Na-Ionen- oder Festkörperbatterien ab 2030 modelliert.

Verringerung der Fahrzeuggröße („Downsizing“)

In der Vergangenheit gab es einen klaren Trend zu größeren und schwereren Autos. Auch in Zukunft ist mit einer weiteren Zunahme der Fahrzeuggrößen zu rechnen. Eine Verkleinerung der Fahrzeuge würde sowohl beim Betrieb als auch bei der Pkw-Herstellung klare ökologische Vorteile mit sich bringen. Die zunehmenden Größen sind weniger auf technische Notwendigkeiten zurückzuführen als vielmehr auf die Kundennachfrage nach mehr Komfort, zusätzlicher Ausstattung und größeren Fahrzeugen getrieben. Dies wird auch von den Herstellern gefördert, für die große Modelle rentabler sind. Eine Verringerung der Fahrzeuggrößen ist daher in erster Linie eine Frage von Marktangebot und -nachfrage.

Kleinere Fahrzeugsegmente sind bereits heute verfügbar, eine grundlegende technische Neuentwicklung neuer Konzepte ist nicht erforderlich. Die Potenzialanalyse für Downsizing in AutoRess konzentriert sich auf eine Verlagerung des Neuwagenmarktes hin zu kleineren Kaufsegmenten. Es werden zwei verschiedene Größenklassen (EU-Kleinstwagensegment, Kei-Cars wie in Japan) und zwei verschiedene Marktanteile (moderat und ambitioniert) modelliert.

Leichtbau

Leichtbau ist eine technische Möglichkeit, das Fahrzeuggewicht durch die Verwendung besonders leichter Materialien oder durch spezielle Konstruktionsverfahren zu reduzieren, ohne Fahrzeuggröße und -ausstattung zu verändern. Dadurch werden die spezifischen Treibhausgasemissionen während des Fahrzeugbetriebs reduziert. Allerdings können zusätzliche Treibhausgasemissionen bei der Fahrzeugproduktion diese Einsparungen ausgleichen oder sogar übersteigen. Darüber hinaus wirkt sich der Leichtbau auf den spezifischen Materialbedarf aus und kann auch Auswirkungen auf die eingesetzten Rezyklatmengen in der Pkw-Herstellung und auf die mögliche Rückgewinnung von Materialien in der Fahrzeugentsorgung haben.

In AutoRess werden Potenziale von Leichtbau sowohl für etablierte Ansätze als auch für ausgewählte aufkommende Technologien analysiert.

1. Herkömmlicher Leichtbau: Stahlkomponenten in Karosserie und Fahrwerk werden durch Aluminium ersetzt.
2. Gigacasting: Großformatige Aluminiumdruckgussteile ersetzen mehrere Karosserieteile und Materialien.
3. Cell-to-chassis Design: Die Batteriezellen sind direkt in die Fahrzeugstruktur integriert, sodass kein Batteriegehäuse erforderlich ist. Dadurch kann das Gewicht der Batterie um etwa ein Drittel reduziert werden, allerdings kann die spätere Wiederverwendung von funktionsfähigen Batterien und das Recycling von Batteriematerialien erschwert werden.

Die analysierten Varianten umfassen auch mögliche Auswirkungen auf die Reparaturfähigkeit und damit auf die Lebensdauer des Fahrzeugs sowie auf die Demontierbarkeit zur Wiederverwendung von Batterien aus ausgemusterten Fahrzeugen.

Kreislauforientiertes Design

Das Design von Fahrzeugen bildet die Grundlage für die Einsparung von Materialien und Treibhausgasen während des gesamten Lebenszyklus. Bei AutoRess lag der Schwerpunkt auf Langlebigkeit und Demontierbarkeit.

1. Die Umstellung auf Elektromobilität und der steigende Anteil erneuerbarer Energien werden voraussichtlich zu einer starken Reduzierung der Treibhausgasemissionen im Fahrzeugbetrieb führen und gleichzeitig die Bedeutung der Fertigung erhöhen. Eine längere Lebensdauer von Fahrzeugen verringert den Bedarf an Neufahrzeugen und damit Treibhausgasemissionen und Materialbedarf in der Fahrzeugproduktion. Durch die Aufrüstbarkeit von Hardware- oder Softwarekomponenten, die eine Anpassung an neue Anforderungen ermöglichen, kann ein Fahrzeug länger den Nutzeranforderungen gerecht werden, wodurch sich auch seine Lebensdauer verlängert.
2. Eine verbesserte Demontierbarkeit ist ein wichtiger Faktor für Reparaturen während der Nutzungsphase. Am Ende der Lebensdauer erleichtert eine einfache Demontage die Wiederverwendung von Komponenten (Ersatzteile, Zweitverwendung von Batterien). Darüber hinaus kann eine einfache Demontage verschiedener Materialien einen wichtigen Beitrag zur hochwertigen Rückgewinnung von Materialien leisten.

Die Modellanalysen umfassen zwei Varianten im Zusammenhang mit einer verlängerten Lebensdauer von Fahrzeugen (+10 % und +20 %), die ab 2035 schrittweise eingeführt werden sollen. Zwei weitere Varianten modellieren Verbesserungen bei der Demontierbarkeit, insbesondere durch höhere Wiederverwendungs- und Recyclingquoten für Materialien und Batterien.

Reparatur und Wiederaufbereitung E-Kfz-Batterien

Die Batterie ist eine der teuersten und umweltrelevantesten Komponenten von Elektrofahrzeugen. Die Verlängerung ihrer Lebensdauer und damit der Lebensdauer des gesamten Fahrzeugs bietet ein großes Potenzial zur Reduzierung von Abfall, Primärmaterialbedarfe und damit verbundenen Umweltauswirkungen. Darüber hinaus können funktionsfähige Batterien aus Altfahrzeugen für andere Zwecke weiterverwendet werden, z. B. als stationäre Energiespeicher. Gleichzeitig können Materialien aus weiterverwendeten Batterien erst nach einer gewissen Verzögerung für die Produktion neuer Fahrzeuge zurückgewonnen werden.

Um die Auswirkungen der Reparatur, Wiederverwendung und Wiederaufarbeitung von Elektro-Pkw-Batterien zu modellieren, wird die mögliche Einführung von BEV-Modellen mit hoher Reparierbarkeit und hohem Wiederverwendungspotenzial der Batterien untersucht. Darüber hinaus werden Aspekte wie Sammelquoten, Batteriezustand (SoH) und Fahrzeugalter für Altfahrzeuge sowie potenzielle Sekundärverwendungen in stationären Speicheranwendungen in der Modellierung variiert.

Reparatur und Wiederaufbereitung Fahrzeugkarosserie

Reparatur und Wiederaufarbeitung verlängern die Lebensdauer von Bauteilen und Fahrzeugen, wodurch der Bedarf an Neuproduktion und die damit verbundenen Umweltauswirkungen sinken. Im Gegensatz zur Reparatur beschreibt die Wiederaufarbeitung einen industriellen, standardisierten Prozess mit hohen Qualitätsstandards. Wiederaufgearbeitete Einheiten machen etwa die Hälfte des Kfz-Ersatzteilmarktes in der EU aus. Mit ihrer Funktionalität und Garantie, die mit denen von Neuteilen vergleichbar sind, könnten wiederaufgearbeitete Teile auch in Neufahrzeugen eingesetzt werden.

AutoRess untersucht die potenziellen Auswirkungen vorhersehbarer Entwicklungstrends auf die Reparatur und Wiederaufarbeitung von Fahrzeugkomponenten. Die fortschreitende Digitalisierung erhöht die Komplexität durch den Wandel von mechanischen zu elektromechanischen und elektronischen Komponenten. Mit der Umstellung auf Elektromobilität wird die Nachfrage nach traditionellen Antriebskomponenten zurückgehen, jedoch bieten Komponenten für Elektroautos neue, hochwertige Möglichkeiten für Wiederaufbereiter. Vom Antriebsstrang unabhängige Komponenten werden sich weiterentwickeln, auch wenn sich Design und Verschleißmuster ändern können (z. B. aufgrund von regenerativem Bremsen). Auf der Grundlage dieser Analysen werden verschiedene Anteile für die Rückgewinnung von Ersatzteilen aus Altfahrzeugen vor dem Schreddern modelliert, die wiederverwendet oder wiederaufbereitet werden können. Die daraus resultierenden Einsparpotenziale an Materialien für neue Komponenten werden analysiert.

Rezyklateinsatz von Batterierohstoffen

Die weltweite Nachfrage nach Batteriematerialien wie Lithium, Kobalt und Graphit steigt mit dem Wachstum der Elektromobilität stark an. Derzeit sind Sekundärrohstoffe kaum verfügbar. Mit zunehmender Verfügbarkeit gebrauchter Batterien müssen recycelte Batteriematerialien einen wichtigen Beitrag zur Verringerung des künftigen Bedarfs an Primärrohstoffen leisten. Der Aufbau geschlossener Materialkreisläufe ist in diesem Zusammenhang aufgrund globalisierter Lieferketten und der zunehmenden Bedeutung internationaler Handelsströme mit recycelten Zwischenprodukten eine zentrale Herausforderung. Auch die Rücknahme von Altfahrzeugen und das Recycling von Altbatterien sind komplex, da ein erheblicher Teil dieser Fahrzeuge die EU verlässt. Unsicherheiten hinsichtlich zukünftiger Batterietechnologien und Second-Life-Anwendungen erschweren die Einschätzung des Bedarfs an Recyclingkapazitäten.

Die EU-Batterieverordnung legt verbindliche Recyclingquoten und Mindestanteile für die Verwendung von Sekundärrohstoffen fest. In AutoRess werden die Erreichbarkeit dieser EU-Quoten und die Auswirkungen ihrer Verfehlung auf den Treibhausgasausstoß und Primärrohstoffbedarfe bewertet. Darüber hinaus wurde besonderes Augenmerk auf die Auswirkungen der Einführung des Graphitrecyclings im industriellen Maßstab gelegt.

Rezyklateinsatz von Metallen (ohne Batterie)

Die Fahrzeugherstellung gilt als eine der ressourcenintensivsten Branchen in Europa: Sie macht rund 19 % der Stahlnachfrage, 10 % des Kunststoffverbrauchs und einen erheblichen Teil der Nachfrage nach Aluminium, Kupfer und Glas aus. Der Sektor benötigt nicht nur erhebliche Mengen an Rohstoffen, sondern liefert durch Altfahrzeuge auch einen bedeutenden Strom an Sekundärrohstoffen. Je nach Material ist jedoch ein Downcycling etabliert (z. B. Stahl in Baustahl), und Sekundärrohstoffe werden nicht in einem geschlossenen Kreislauf in den Kfz-Produktionsprozess zurückgeführt.

Zielstellung in diesem Handlungsfeld ist es, das aktuelle und zukünftige Potenzial für sekundäre Basismetalle in Fahrzeugkarosserien systematisch zu bewerten. Verschiedene Varianten werden hinsichtlich damit erreichter Rezyklatanteile in Neufahrzeugen analysiert. Dabei werden offene und geschlossene Materialkreisläufe berücksichtigt, letztere durch Steigerungen der Anteile rückgewonnener hochwertiger Recyclingmaterialien aus Altfahrzeugen. Bei der Erörterung möglicher Maßnahmen werden sowohl die technische Machbarkeit als auch die Risiken globaler Verdrängungseffekte berücksichtigt.

Kreislaufführung von Kunststoffen

Der Anteil von Kunststoffen in einem Fahrzeug variiert in der Regel zwischen 14 % und 18 %, aber nur ein sehr geringer Teil davon ist recyceltes Material. Die Gründe für die geringe

Verwendung von recycelten Materialien liegen in den hohen Qualitätsanforderungen, der mangelnden Reinheit und den niedrigen Recyclingquoten von Altfahrzeugen. Dementsprechend bieten eine stärkere Verwendung von recycelten Materialien in einem geschlossenen Kreislauf und ein besseres Recycling von Altfahrzeugen ein großes Potenzial für die Schonung von Ressourcen und die Reduzierung von Treibhausgasemissionen.

Darüber hinaus kann der CO_2-Fußabdruck von Kunststoffen durch verschiedene Maßnahmen reduziert werden, z. B. durch chemisches Recycling, Kunststoffe aus Biomasse und aus CO_2-Abscheidung sowie die Maximierung der Energieeffizienz in Produktionsprozessen.

In AutoRess wird ein starker zukünftiger Anstieg von recycelten Kunststoffen in Neuwagen und eine Zunahme der Wiederverwendung und des Recyclings von Altfahrzeugen modelliert. Darüber hinaus wird das Potenzial analysiert, bis 2050 durch den Einsatz aller Hebel Treibhausgasneutralität im Kunststoffsektor zu erreichen.

Altfahrzeuge

Bei der Entsorgung von Altfahrzeugen sind die gesetzlich vorgeschriebene Gesamtverwertungsquote, materialspezifische Verwertungsquoten und deren Qualitäten sowie die Reduzierung der Anzahl von Pkw, die nicht in die regulären Entsorgungskanäle gelangen, besonders relevante Handlungsfelder. Wichtige Fragen betreffen beispielsweise die Auswirkungen höherer Verwertungsquoten für einzelne Materialien oder Nutzen und Wirksamkeit materialspezifischer Ziele für ein hochwertiges Recycling. Darüber hinaus stellt sich die Frage nach dem ökologischen Nutzen einer gezielten Demontage vor dem Schreddern im Vergleich zu verbesserten Nachschreddertechnologien. In AutoRess werden drei Schlüsselmaßnahmen modelliert:

1. Demontage von Komponenten vor dem Zerkleinern, um eine Wiederverwendung oder ein hochwertigeres Materialrecycling zu ermöglichen
2. Verstärkte stoffliche Verwertung von Glas zu neuen Glasprodukten
3. Hochwertiges Recycling bestimmter Materialien, um geschlossene Kreisläufe im Fahrzeugsektor zu ermöglichen

Die spezifische Ausgestaltung der Handlungsfelder führt zu einer großen Bandbreite der ermittelten Wirkungen auf Treibhausgasemissionen und Materialbedarfe

Die Auswirkungen auf Treibhausgase und Materialien für alle 10 Handlungsfelder wurden modelliert und mit einer Referenzentwicklung ohne zusätzliche Maßnahmen verglichen. Die spezifische Ausgestaltung der Handlungsfelder und betrachtete Variationen führen zu einer größeren Ergebnisbandbreite. Dies lässt sich anhand ausgewählter Beispiele veranschaulichen.

- Alternative Batterietechnologien zur Einsparung kritischer Materialien können die Treibhausgasemissionen geringfügig reduzieren, aber auch erheblich erhöhen.

- Leichtbau erhöht in den meisten der analysierten Varianten die Treibhausgasemissionen über den gesamten Lebensweg. Dies ist auf erhöhte Treibhausgasemissionen bei der Fahrzeugproduktion zurückzuführen, die höher sind als die Emissionseinsparungen in der Nutzungsphase. Darüber hinaus verringert die Leichtbauweise den Bedarf an (Primär-)Stahl. Bei einem einfachen Materialaustausch steigt der Bedarf an dem anderen Material (z. B. Aluminium). Andere Konstruktionsmethoden können dagegen auch zu einer Verringerung des Gesamtmaterialbedarfs führen.

- Durch Downsizing werden Autos sowohl kleiner als auch leichter; dadurch sinkt der Material- und Energiebedarf sowohl bei der Herstellung als auch in der Nutzungsphase. Die Höhe der Treibhausgaseinsparungen durch Downsizing variiert je nach angenommener Verringerung der Fahrzeuggrößen sowie dem Anteil kleiner Autos an den Neuzulassungen.

Ein zusätzlicher Vorteil des Downsizings wäre der geringere Bedarf an Parkflächen in Städten.

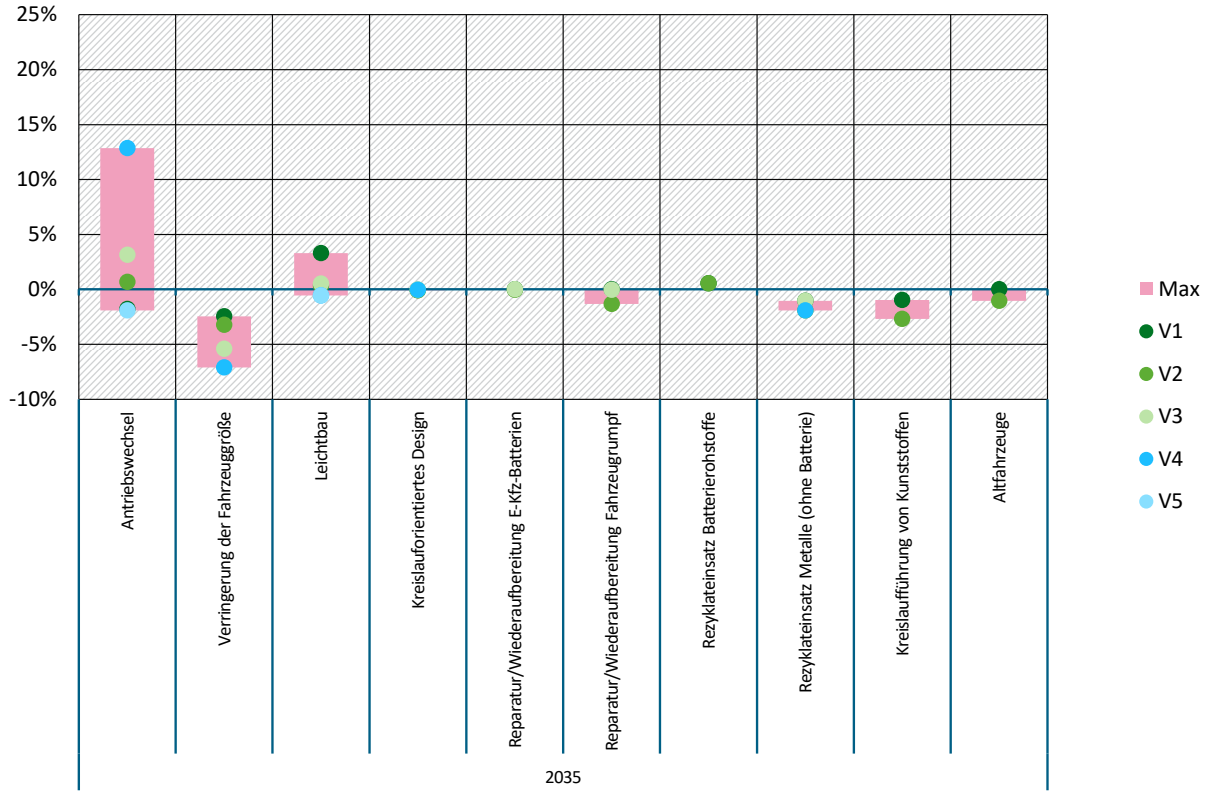
- Aufrüstbare Fahrzeugdesigns und eine bessere Reparaturfähigkeit haben auf das einzelne Fahrzeug nur geringe Auswirkungen. Durch eine längere Fahrzeuglebensdauer werden jedoch weniger Autos pro Jahr produziert, wodurch die gesamten Treibhausgasemissionen und der Materialbedarf für die neue Fahrzeugflotte erheblich reduziert werden könnten.

Insgesamt lassen sich die höchsten Treibhausgaseinsparungen in den untersuchten Handlungsfeldern durch eine erhebliche Verringerung des Gesamtmaterialbedarfs (kleinere und weniger Neuwagen) und durch die Verringerung fossiler Fahrzeugmaterialien erzielen. Der Primärmaterialbedarf kann durch eine Verringerung des Gesamtmaterialbedarfs oder eine Erhöhung des Recyclinganteils im verwendeten Material reduziert werden. Während einige Themen den Materialbedarf von Neufahrzeugen insgesamt beeinflussen, wirken sich andere Themen nur gezielt auf ausgewählte Materialgruppen aus. Es bestehen auch potenzielle Zielkonflikte zwischen der Reduzierung ausgewählter kritischer Materialien (z. B. Lithium, Kobalt) und der Reduzierung der Treibhausgasemissionen. Maßnahmen für ein treibhausgas- und ressourcenschonendes Auto müssen daher solche Wechselwirkungen berücksichtigen.

Ein Vergleich der einzelnen Handlungsfelder zeigt, welche Optionen für sich genommen wie viel zusätzliche Treibhausgasauswirkungen haben können. Durch die Kombination mehrerer Handlungsfelder lassen sich langfristig deutlich größere zusätzliche Treibhausgaseinsparungen erzielen. Oder an einer Stelle mit der Einsparung kritischer Rohstoffe verbundene erhöhte Treibhausgasemissionen könnten durch Treibhausgaseinsparungen an anderer Stelle ausgeglichen werden.

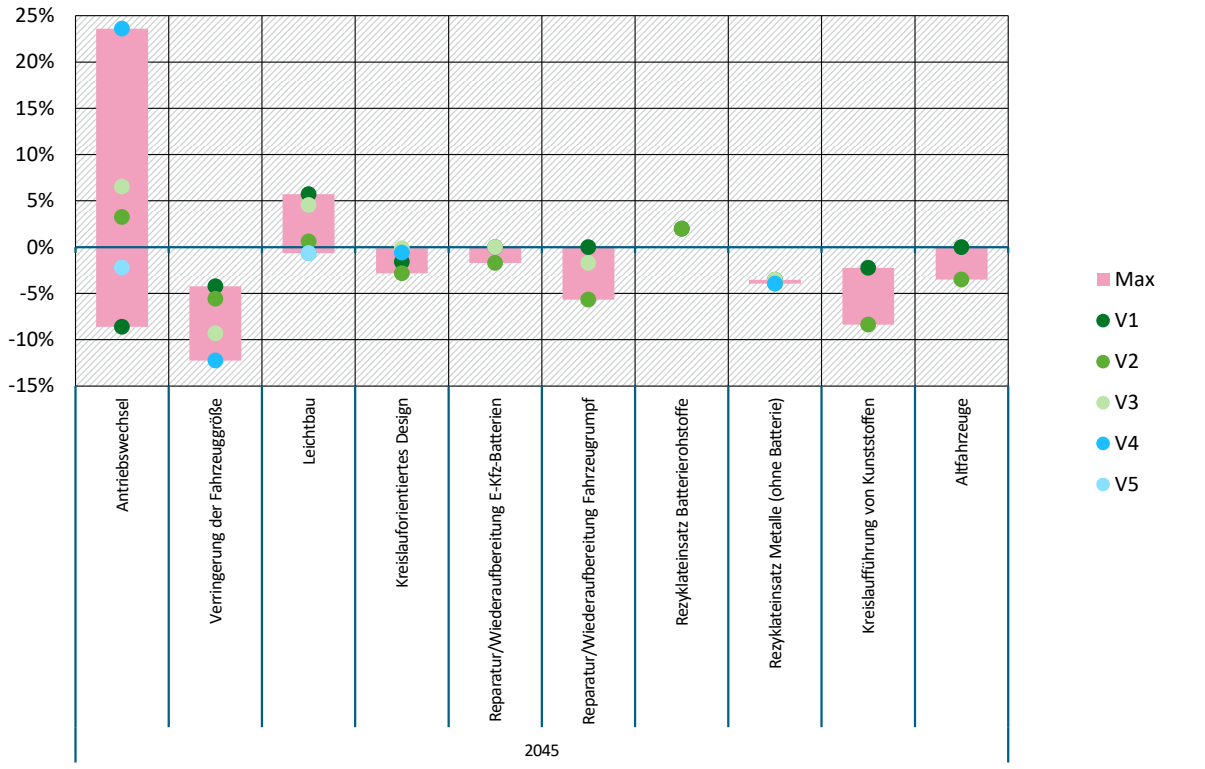
Ausführliche Informationen zu den in AutoRess untersuchten Handlungsfeldern und zur Modellierung der Potenziale von Treibhausgas- und Materialeinsparungen finden Sie im englischen Abschlussbericht in Kapitel 3.

Abbildung 24: Änderung der Treibhausgasemissionen des Pkw-Verkehrs in Deutschland 2035 (alle Lebensphasen) im Vergleich zur Referenz des jeweiligen Szenariojahres



Quelle: Eigene Darstellung Öko-Institut / ifeu

Abbildung 25: Änderung der Treibhausgasemissionen des Pkw-Verkehrs in Deutschland 2045 (alle Lebensphasen) im Vergleich zur Referenz des jeweiligen Szenariojahres



Quelle: Eigene Darstellung Öko-Institut / ifeu

2.3 Factsheet 3: Vision eines ressourcenschonenden Fahrzeugs

Wichtigste Ergebnisse

Im Projekt AutoRess wurde die Vision eines ressourcenschonenden Fahrzeugs entwickelt. Hierbei wird von rein batterieelektrischen PKWs ausgegangen. Sie gelten als ressourceneffizient und kreislaufwirtschaftsfähig, wenn sie folgende Bedingungen erfüllen:

- Die Fahrzeuge benötigen über den gesamten Lebenszyklus möglichst wenig Primärrohstoffe.
- Die Fahrzeuge verbrauchen über den gesamten Lebenszyklus möglichst wenig Energie.
- Die Fahrzeuge emittieren über den gesamten Lebenszyklus möglichst wenig Treibhausgase.
- Die Fahrzeuge sind möglichst langlebig.
- Die Bestandteile lassen sich am Lebensende möglichst vollständig und ohne Downcycling wieder dem Stoff-/Materialkreislauf zuführen.
- Die zusätzlichen Umwelt- und Sozialwirkungen über den gesamten Lebenszyklus sind möglichst minimal.

Hebel zur Verringerung des Rohstoffbedarfs und der Emission von Treibhausgasen

Die im Projekt „AutoRess“ durchgeführte Modellierung zu Ressourcennutzung und Treibhausgasemissionen in der Fahrzeugbranche ergab drei Hebel, die sich besonders stark auf die Ziele auswirken:

- Reduktion von Fahrzeug- und Batteriegröße
- Verlängerung der Lebensdauer
- Höhere Menge an Rezyklaten

Einsparungen durch die Verkehrsverlagerung auf öffentliche Verkehrsmittel oder nicht motorisierte Verkehrsmittel (z. B. Fahrrad) wurden im Projekt AutoRess nicht untersucht.

Das ressourcenschonende Fahrzeug

Ein ressourceneffizientes Fahrzeug zeichnet sich unter anderem dadurch aus, dass es die spezifischen Anforderungen des Nutzers so genau wie möglich erfüllt, ohne diese zu überschreiten. Das bedeutet, dass das kleinste Fahrzeug mit der alltäglich bedarfsgerechten Reichweite und damit der kleinsten Batteriegröße und der minimalen erforderlichen Sonderausstattung gekauft wird.

Ein ideales ressourcenschonendes Fahrzeug stellt daher zunächst die Angemessenheit der bestehenden Fahrzeugklassen in Frage.

Um Ressourcen und Treibhausgasemissionen so effizient wie möglich einzusparen, könnten Kompromisse hinsichtlich der erforderlichen Sicherheitsmaßnahmen gerechtfertigt sein, insbesondere bei Fahrzeugen, die ausschließlich in Städten genutzt werden. Allerdings besteht bei den Fahrzeugklassen für leichtere Fahrzeuge eine erhebliche Lücke.

Abbildung 26: Renault Twizy aus der Fahrzeugklasse L7e



Quelle: Mariordo, Wikimedia Commons5, CC BY-SA 4.0

Während Kleinstwagen (Klasse M1) aufgrund von Sicherheitsvorschriften in der Regel mehr als 1000 kg wiegen, werden Elektrofahrzeuge der Klassen L7E/L6E, die sehr strengen Gewichtsbeschränkungen (max. 450 kg) unterliegen, von Nutzer*innen oft als nicht sicher genug empfunden. Es wurde daher vorgeschlagen, diese Lücke durch die Einführung einer neuen Fahrzeugklasse („M0“) zu schließen, die besonders für städtische und vorstädtische Regionen geeignet ist, Gewichts- und Größenbeschränkungen unterliegt und dennoch grundlegende Sicherheitsmerkmale aufweist. Da die Kollisionsgeschwindigkeiten bei Unfällen in diesem anvisierten Nutzungsprofil durchweg geringer sind, können insbesondere Deformationsräume in der M0-Klasse sehr viel kleiner und gewichtssparender ausgelegt werden, ohne das Verletzungsrisiko zu erhöhen.

Um dies zu erreichen, wäre ein ideales batterieelektrisches Fahrzeug für den Stadtverkehr unter 2,39 m lang und unter 1,32 m breit und für den Überlandverkehr einer Familie mit Gepäck unter 4,5 m lang und unter 1,85 m breit, würde zu 100 % aus Sekundärmaterialien bestehen, eine garantierte Haltbarkeit inkl. Ersatzteilverfügbarkeit und Software-Updates von 20 Jahren aufweisen und auch hinsichtlich seiner Reparierbarkeit optimiert sein. Dies erfordert, dass alle Fahrzeugteile (insbesondere diejenigen, die schnell kaputt gehen oder verschleißen können) leicht zugänglich und austauschbar sind. Diese totale Modularität wird auch die Kreislauffähigkeit der im Fahrzeug eingesetzten Komponenten und Materialien fördern, indem sie die Demontage von Teilen vor dem Schreddern der Karosserie am Ende ihrer Lebensdauer erleichtert. Für die gesamte Lebensdauer des Fahrzeugs Upgrades von Software und Hardware garantiert.

2.4 Factsheet 4: Ökonomische Maßnahmen zur Reduktion des Rohstoffbedarfs im PKW-Verkehr

Wichtigste Ergebnisse

- **Im Projekt AutoRess wurden verschiedene ökonomische Maßnahmen untersucht, um den Rohstoffbedarf im Automobilsektor in Deutschland zu verringern. Als wirksam haben sich folgende Maßnahme erwiesen:**
- Bonus-Malus-System auf Basis der Fahrzeuggröße

[5] https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Autolib_Paris_04_2016_7374.JPG (19.11.2025)

- Besteuerung von Firmenwagen
- Umweltbonus in der Kfz-Versicherung
- EPR-System zur Finanzierung einer ordnungsgemäßen Behandlung von Altfahrzeugen

Hebel zur Verringerung des Rohstoffbedarfs und der Emission von Treibhausgasen

Die im Projekt „AutoRess“ durchgeführte Modellierung zu Ressourcennutzung und Treibhausgasemissionen in der Fahrzeugbranche ergab drei Hebel, die sich besonders stark auf die Ziele auswirken:

- Reduktion von Fahrzeug- und Batteriegröße
- Verlängerung der Lebensdauer
- Höhere Menge an Rezyklaten

Einsparungen durch die Verkehrsverlagerung auf öffentliche Verkehrsmittel oder nicht motorisierte Verkehrsmittel (z. B. Fahrrad) wurden im Projekt AutoRess nicht untersucht.

Bonus-Malus-System auf Basis der Fahrzeuggröße

In einem Bonus-Malus-System erhalten Käufer eines kleineren Autos einen Bonus, während beim Kauf eines Autos mit größeren Abmessungen ein Malus zu zahlen ist, der ebenfalls mit zunehmender Größe steigt. Einmalige Zahlungen beim Kauf eines Autos haben eine größere Wirkung als jährliche Kfz-Steuern. Vorgeschlagene Werte für den Bonus liegen bei einem batterieelektrischen Fahrzeug für den Stadtverkehr bei unter 2,39 m Länge und 1,32 m Breite und für den Überlandverkehr einer Familie mit Gepäck bei unter 4,5 m Länge und unter 1,85 m Breite.

Besteuerung von Firmenwagen

Schätzungsweise 20 bis 25 % der Neuzulassungen in Deutschland sind Firmenwagen, die auch privat genutzt werden (Blanck and Zimmer 2021). Der Grund für die Attraktivität des Autos als Gehaltsbestandteil ist die geringe Besteuerung: Für Arbeitnehmer ist der steuerpflichtige geldwerte Vorteil deutlich günstiger als die Kosten für ein privat gekauftes Auto. Unternehmen können den Kauf von Autos für geschäftliche Zwecke ohne Höchstpreisgrenze und unabhängig von den CO_2-Emissionen der Fahrzeuge als Betriebsausgaben absetzen. Hier ist der Vorschlag aus AutoRess, ressourceneffiziente Elektroautos, z. B. solche mit geringen Dimensionierungen, geringer zu besteuern als andere Fahrzeuge.

Umweltbonus in der KfZ-Versicherung

In Bezug auf die CO_2-Emissionen eines Autos bieten viele Kfz-Versicherungen mittlerweile Umweltrabatte an, wenn ein umweltfreundliches Fahrzeug versichert werden soll. Ein Beispiel aus Deutschland ist der R+V: Umweltbonus: 10 % Rabatt auf die Versicherungsprämie für Elektro- und Hybridautos und 5 % für Autos mit geringen CO_2-Emissionen (bis 95 g/km). Weitere solche Umweltrabatte können kurzfristig eingeführt werden.

EPR-System zur Finanzierung einer ordnungsgemäßen Behandlung von Altfahrzeugen

Um eine angemessene Finanzierung der vorgeschriebenen Altfahrzeugbehandlung zu gewährleisten und Recyclingunternehmen Anreize zur Qualitätsverbesserung zu bieten, wird ein EPR-System eingeführt, in dem die Fahrzeughersteller entsprechend der Erweiterten Herstellerverantwortung (Extended Producer Responsibility, EPR) für die Finanzierung der Altfahrzeugbehandlung verantwortlich gemacht werden.

2.5 Factsheet 5: Downsizing

Wichtigste Ergebnisse

Neue Pkw sind in den letzten Jahrzehnten stetig schwerer geworden, sowohl durch Verschiebungen zu höheren Kaufsegmenten als auch aufgrund schwererer Modelle innerhalb der Segmente. Die Elektromobilität trägt aufgrund ihrer schweren Batterien zusätzlich zum Gewichtszuwachs bei.

Eine **Verringerung der Fahrzeuggrößen ("Downsizing") neuer Pkw spart Treibhausgase und Rohstoffe**. Downsizing ist in erster Linie eine Frage von Marktangebot und -nachfrage und erfordert keine grundlegenden technischen Neuentwicklungen neuer Fahrzeugkonzepte.

Downsizing-Maßnahmen sollten den Kauf von Privat- und Geschäftswagen adressieren, einschließlich finanzieller Anreize auf nationaler Ebene (z. B. Bonus-Malus) für ausgewählte Nutzergruppen (z. B. Besteuerung von Firmenwagen) sowie Anforderungen im öffentlichen Beschaffungswesen oder lokale Parkvorschriften. Japan zeigt, dass kleine Fahrzeuge erfolgreich gefördert werden können. Kei-Cars profitieren von finanziellen Vorteilen auf nationaler und lokaler Ebene sowie von Ausnahmen von den gesetzlichen Parkplatzanforderungen und haben einen Marktanteil von rund 40 %.

Wichtige Maßnahmen

Downsizing ist weit mehr als nur ein technisches Thema. Es ist eine politische und gesellschaftliche Herausforderung: Es geht darum, Märkte, Kaufanreize und Infrastrukturen neu auszurichten – hin zu einer Mobilität, die nicht auf Größe und Leistung setzt, sondern auf Effizienz, Verantwortung und Ressourcenschonung. Ein Schlüssel zum Downsizing sind finanzielle Vorteile für Kleinwagen durch nationale und kommunale Vorschriften sowie weitere Nutzervorteile, insbesondere beim Parken. Wichtige in AutoRess und anderen Studien identifizierte Maßnahmen sind:



In einem **Bonus-Malus-System auf Basis der Fahrzeugabmessungen**, erhalten Käufer kleinerer Autos einen Bonus, während beim Kauf von Autos mit größeren Abmessungen ein Malus gezahlt werden muss, der mit zunehmender Größe ebenfalls steigt.



Gezielte Anreize für gewerblichen Pkw-Käufer (z. B. über die Besteuerung von Firmenwagen und Abschreibungsregeln) sind Maßnahmen mit hoher Relevanz, da rund zwei Drittel aller Pkw-Neuzulassungen in Deutschland gewerblich sind.



Die **Förderung oder verbindliche Festlegung von Spezifikationen für nachhaltige Fahrzeuge im öffentlichen Beschaffungswesen** sollte eine bedarfsgerechte Dimensionierung der Fahrzeuge umfassen. In der Beschaffungspraxis verwendeten **Tools und Anforderungskataloge** können auch im privaten Sektor eingesetzt werden.



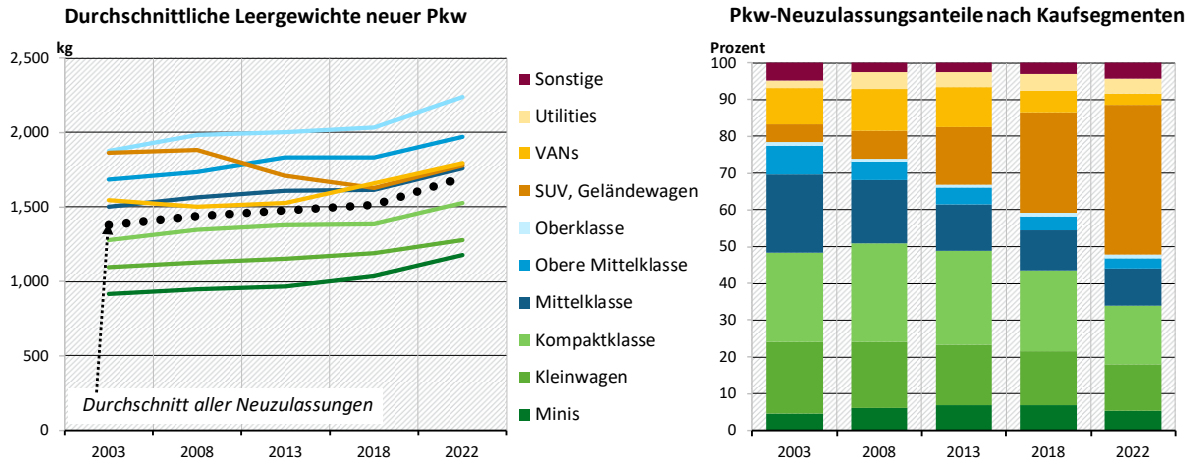
In einigen Städten in Deutschland sparen Kleinwagenbesitzer bei den **Anwohnerparkgebühren**. Lokale Anreize für Kleinwagen (z. B. niedrigere Gebühren, spezielle öffentliche Parkplätze) sind jedoch durch den gesetzlichen Rahmen begrenzt. Zusätzliche gesetzliche Befugnisse, wie beispielsweise die Kei-Car-Vorschriften in Japan, würden lokalen Behörden zusätzliche Vorteile für Besitzer von Kleinwagen ermöglichen.

Ausführliche Informationen zu allen wichtigen Maßnahmen für ressourceneffiziente und kreislauffähige Elektroautos finden Sie im englischen Abschlussbericht in Kapitel 5. Weitere Informationen zum öffentlichen Beschaffungswesen finden Sie im Factsheet 11 „Beschaffung (für die Politik)“ und im zusammenfassenden Papier „Beschaffung für Praktiker“.

Downsizing von Pkw ist ein wirksamer Hebel, um Treibhausgasemissionen und Rohstoffbedarf zu reduzieren

In der Vergangenheit war ein deutlicher Trend zum Wachstum bei Personenkraftwagen zu beobachten. Das durchschnittliche Leergewicht neuer Autos in Deutschland ist in den letzten 20 Jahren um rund 23 % von etwa 1.400 kg auf 1.700 kg gestiegen. Dies zeigt sich sowohl in einer Zunahme der Marktanteile größerer Fahrzeugsegmente als auch in einer Verschiebung hin zu höheren Leergewichten innerhalb der Segmente. Die Elektromobilität trägt aufgrund ihrer schweren Batterien zusätzlich zum Gewichtszuwachs bei. Dieser Trend spiegelt sich auch auf den globalen Fahrzeugmärkten wider. Verschiedene Quellen erwarten für die Zukunft eine weitere Zunahme der Fahrzeuggrößen. Die zunehmende Größe der Fahrzeuge (über-) kompensiert Effizienzgewinne im Antriebsstrang. Das bedeutet, dass potenzielle Energieeinsparungen und Treibhausgasreduktionen im Fahrzeugbetrieb nicht realisiert werden. Gleichzeitig steigt auch der Materialbedarf für Neuwagen und damit der Rohstoffverbrauch.

Abbildung 27: Mittlere Leergewichte neuer Pkw und prozentuale Aufschlüsselung der Neuzulassungen nach Kaufsegmenten in Deutschland 2003–2022



Quelle: eigene Darstellung auf Basis der KBA-Statistiken

Eine Umkehrung dieses Trends, d. h. eine Verkleinerung hin zu kleineren Fahrzeugen mit weniger und kleineren Bauteilen, würde sowohl beim Betrieb als auch bei der Herstellung von Pkw klare Umweltvorteile bewirken und gleichermaßen zu deutlich geringeren Treibhausgasemissionen wie auch einem geringeren Ressourcenverbrauch führen. Ein zusätzlicher Neuzulassungsanteil von 15 % bis 33 % für Klein- oder Kleinstwagen würde den jährlichen Gesamtmaterialbedarf in der Automobilproduktion um bis zu 16 Prozent senken. Dies gilt auch für Elektroautos: Eine Verkleinerung, insbesondere der Batteriekapazitäten, reduziert nicht nur den Bedarf an erneuerbarer Energie für den Betrieb der Autos, sondern senkt auch den ökologischen Fußabdruck der Automobilproduktion erheblich. Ein weiterer lokaler Vorteil wäre der geringere Bedarf an Parkflächen in den Städten.

Downsizing betrifft in erster Linie Marktangebot und -nachfrage neuer Pkw, nicht neue technische Entwicklungen

Auswertungen zeigen, dass die zunehmende Größe neuer Pkw zum Teil durch Sicherheitsoptimierungen und gesetzliche Anforderungen bedingt ist. Der Großteil des Wachstums wird jedoch durch die Kundennachfrage nach mehr Komfort, zusätzlicher Ausstattung und größeren Fahrzeugen getrieben. Dies wird auch von den Herstellern gefördert, für die große Modelle rentabler sind. Analysen zeigen, dass die Anzahl der auf dem Markt verfügbaren Kleinwagenmodelle in den letzten Jahren deutlich zurückgegangen ist. Dementsprechend ist Downsizing weniger ein technisches Thema, sondern in erster Linie eine Frage des Marktangebots und des Kaufverhaltens.

Eine Neuausrichtung des Pkw-Markts hin zu kleineren Segmenten mit geringerem Energie- und Materialverbrauch ist notwendig. Das Kaufverhalten sowohl privater als auch gewerblicher Kunden spielt dabei eine entscheidende Rolle. Rund zwei Drittel aller Neuzulassungen in Deutschland entfallen auf Unternehmen, darunter Autovermieter, Flottenbetreiber und Kfz-Händler. Ein großer Teil dieser Pkw gelangt nach kurzer Zeit auf den privaten Gebrauchtwagenmarkt und prägt langfristig den Pkw-Bestand. Unterschiede im Kaufverhalten einzelner Branchen zeigen, dass die Auswahl der Fahrzeugklassen und Ausstattungen auch vom jeweiligen Nutzungskontext abhängt.

Downsizing erfordert keine technische Neuentwicklung komplett neuer Fahrzeugkonzepte. Kleinere Segmente sind bereits heute verfügbar. Die Analysen in AutoRess konzentrieren sich auf eine Verschiebung im Markt für neue Elektroautos hin zu folgenden Fahrzeugkonzepten:

- **Minis und Kleinwagen** sind auf dem europäischen Markt bereits etabliert und machen etwa 5 % der Neuzulassungen in Deutschland aus, ihr Marktanteil ist allerdings rückläufig.
- **Japanische Kei-Cars** sind vollwertige Kleinstwagen, die in Japan besonders beliebt sind. Trotz ihrer geringen Größe bieten sie modernen Komfort und Sicherheit und machen rund 40 Prozent des japanischen Pkw-Marktes aus. Diese Fahrzeuge bieten auch für den europäischen Markt ein interessantes Potenzial, nicht nur im städtischen Umfeld.
- **L7e-Leichtkraftfahrzeuge** sind leichter und kostengünstiger, erfüllen jedoch nicht die Anforderungen für eine vollwertige Alternative zum Pkw und wurden in AutoRess nicht im Detail analysiert. Sie bieten nur begrenzten Komfort und Sicherheit, in der Regel nur zwei Sitze und geringe Höchstgeschwindigkeiten, wobei der Schwerpunkt auf dem innerstädtischen Einsatz liegt. Ihr derzeitiger Marktanteil ist vernachlässigbar.

Mit europäischen Minis oder Kei-Cars lässt sich das Fahrzeuggewicht einzelner Pkw um 40 bis 50 % reduzieren. Da der Schwerpunkt auf der Nutzung in Städten liegt und somit eine geringere Reichweite erforderlich ist, könnten die Treibhausgasemissionen und der ressourcenintensive Batteriebedarf sogar um 60 % bis 70 % gesenkt werden. Der Energieverbrauch und damit der Bedarf an erneuerbarer Elektrizität werden durch kleinere Autos ebenfalls erheblich reduziert.

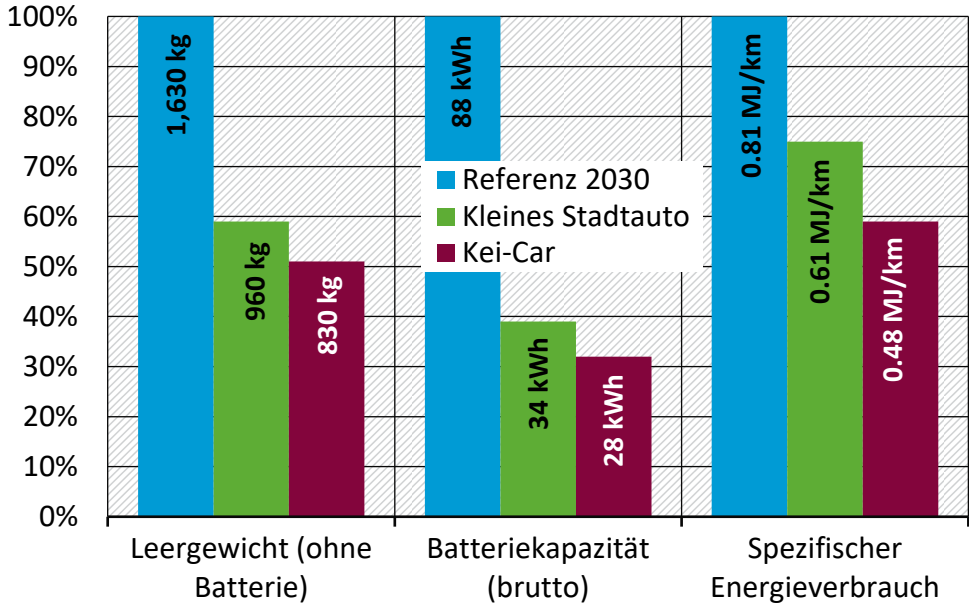
 Ausführliche Informationen zu Trends, Handlungsfeldern und zur Modellierung von Downsizing neuer Elektroautos in AutoRess finden Sie im englischen Abschlussbericht in Kapitel 3.3.

Wir können aus den Erfahrungen Japans lernen

Der rechtliche Rahmen in Europa bietet bislang kaum Anreize für kleinere Fahrzeuge. Insbesondere für kleine Elektrofahrzeuge gibt es keine Anreize, da nur die direkten Emissionen aus dem Fahrzeugbetrieb reguliert werden. Frankreich hat gewichtsabhängige Strafsteuern für

Autos mit Verbrennungsmotoren eingeführt, diese gelten jedoch nicht für Elektroautos. Neue Sicherheitsvorschriften dürften in Zukunft ebenfalls zu weiteren Gewichtszunahmen führen.

Abbildung 28: Konfiguration von Downsizing-Pkw im Vergleich zum mittleren Pkw im Jahr 2030 im AutoRess-Modell



Quelle: eigene Darstellung (ifeu)

In Japan hingegen machen Kei-Cars (siehe z. B. Abbildung 29) etwa 40 % des Neuwagenmarktes und des Fahrzeugbestands aus. Der Hauptgrund dafür sind die erheblichen finanziellen Vorteile, die sie bieten, z. B. bei verschiedenen Steuern, ermäßigten Mautgebühren auf Autobahnen und Schnellstraßen sowie ermäßigten Parkgebühren auf öffentlichen Parkplätzen und in Parkhäusern (das Parken auf öffentlichen Straßen ist in Japan generell verboten). Außerdem müssen Besitzer von Standard-Pkw in der Regel nachweisen, dass sie über einen privaten Parkplatz verfügen, um ihr Fahrzeug anzumelden. Kei-Cars sind in ländlichen Gebieten und kleineren Städten von dieser Parkplatzpflicht befreit. In Ballungsräumen waren Kei-Cars in der Vergangenheit ebenfalls oft von der Parkplatzpflicht befreit. Inzwischen gilt diese Regulierung hier auch für Kei-Cars, aber aufgrund ihrer geringeren Größe sind die Anforderungen und Kosten für einen Parkplatz deutlich geringer.

Abbildung 29: Mitsubishi i-MiEV als Beispiel für einen vollelektrischen Kei Car



Quelle: OSX, Wikimedia Commons, Public Domain

2.6 Factsheet 6: Reparatur und Wiederaufbereitung: Herausforderungen beim Übergang zur Elektromobilität und empfohlene Maßnahmen

Empfohlene Maßnahmen

Designphase

Der Rechtsrahmen der EU sollte hohe Standards für die Standardisierung und Modularität von Komponenten festlegen. Die Reparatur und Wiederaufarbeitung von Elektrofahrzeugen wird häufig durch das Design eingeschränkt. Ein reparaturfreundliches Design zielt darauf ab, die Haltbarkeit und Reparierbarkeit von Fahrzeugen und ihren Teilen zu verbessern, und sollte im Rechtsrahmen verankert werden. Dies erfordert ein hohes Maß an Standardisierung und Modularität der Komponenten, insbesondere mit Blick auf die Batterien. Durch eine verstärkte Standardisierung und Angleichung der Designs von Traktionsbatterien könnten die Prozesskosten für die Wiederaufbereitung durch die Einführung von Automatisierung erheblich gesenkt werden. Darüber hinaus sind die Batterien für eine größere Bandbreite von Fahrzeugtypen und Anwendungen geeignet.

Einführung einer Bewertungsskala für die Reparierbarkeit von Fahrzeugen auf nationaler Ebene. Ziel dieser Maßnahme ist es, den Verbrauchern eine fundierte Kaufentscheidung zu ermöglichen und so die Hersteller zu ermutigen, ihre Praktiken zu verbessern. Daher sollte zumindest auf nationaler Ebene eine Bewertungsskala für die Reparierbarkeit von Fahrzeugen, insbesondere für Elektrofahrzeuge, eingeführt werden. Die Reparierbarkeit von Fahrzeugen würde somit eine größere Rolle bei Verbraucherbewertungen spielen, wie sie beispielsweise vom ADAC durchgeführt werden. Neben der Verfügbarkeit von Ersatzteilen und der Leichtigkeit der Demontage sollte der Index auch die Kosten und Aufwendungen widerspiegeln, die für komplexere Reparaturen erforderlich sind, um eine Bewertung ihrer Durchführbarkeit auch für ältere Fahrzeuge zu ermöglichen.

Nutzungsphase

„Recht auf Reparatur“. Eine Initiative für den Ersatzteilmarkt, die Fahrzeughersteller verpflichtet, nach Produktionsende für einen bestimmten Zeitraum erschwinglichen Zugang zu Software, Informationen wie Wartungshandbücher, Reparaturanleitungen und Explosionszeichnungen sowie

Ersatzteilen zu gewähren. Dies würde legitime Wiederaufbereitungsaktivitäten unterstützen und sollte als Verantwortung der Hersteller in den nationalen Rechtsrahmen aufgenommen werden.

Obligatorischer Zugang zu Gebrauchtteilen. Betreiber von Wartungs- und Reparaturdiensten müssen ihren Kunden die Möglichkeit bieten, ihr Fahrzeug mit gebrauchten, wiederaufbereiteten oder generalüberholten Teilen und Komponenten reparieren zu lassen, genauso wie wenn ein neues Bauteil verwendet wird. Dies steht im Einklang mit der freiwilligen Initiative gemäß Artikel 33 des Vorschlags für eine Verordnung über Altfahrzeuge (ELVR), die für die Mitgliedstaaten verbindlich ist.

Empfohlene Maßnahmen

End-of-Life-Phase

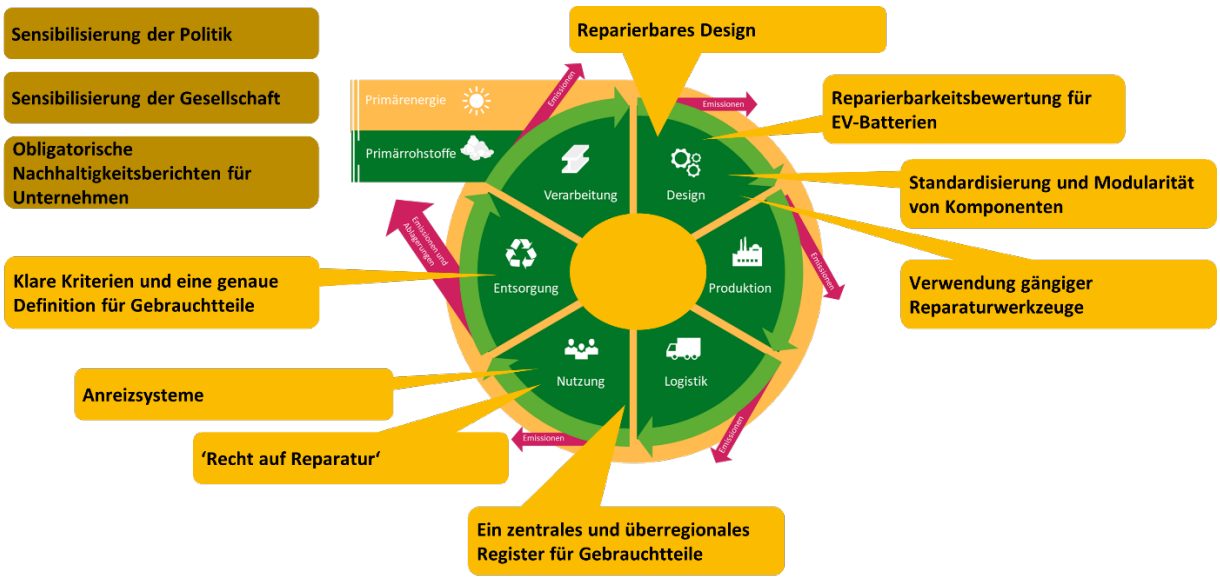
Klarer Rechtsstatus für wiederverwendete Teile. Um die Kreislaufwirtschaft zu fördern, sollte rechtlich eindeutig festgelegt werden, dass Teile und Komponenten aus Altfahrzeugen, die sich zur Wiederverwendung oder Wiederaufarbeitung eignen, nicht als Abfall gelten.

Verbesserte Rückverfolgbarkeit und Qualität von wiederverwendeten Teilen. Zur Bekämpfung illegaler Aktivitäten müssen alle gebrauchten und wiederaufbereiteten Teile rückverfolgbar sein etwa über ein Etikett mit der Fahrzeug -Identifikationsnummer und Angaben zum Betreiber und zudem mit einer Garantie versehen werden.

Diese Maßnahmen sollten vorzugsweise in die ELV-Verordnung aufgenommen werden.

Die folgende Grafik zeigt empfohlene und andere ausgewählte Maßnahmen, die für die Reparatur und Wiederaufbereitung relevant sind. Übergreifende Maßnahmen sind keiner Phase zugeordnet und dunkelgelb markiert.

Abbildung 30: Übersicht der Maßnahmen in verschiedenen Lebensphasen



Quelle: Eigene Abbildung Öko-Institut / ifeu basierend auf Müller et al. 2020

Vorteile

Eine längere Lebensdauer ist aus **ökologischer** Sicht besonders wünschenswert und ein grundlegender Baustein einer Kreislaufwirtschaft. Durch Reparatur und Wiederaufarbeitung

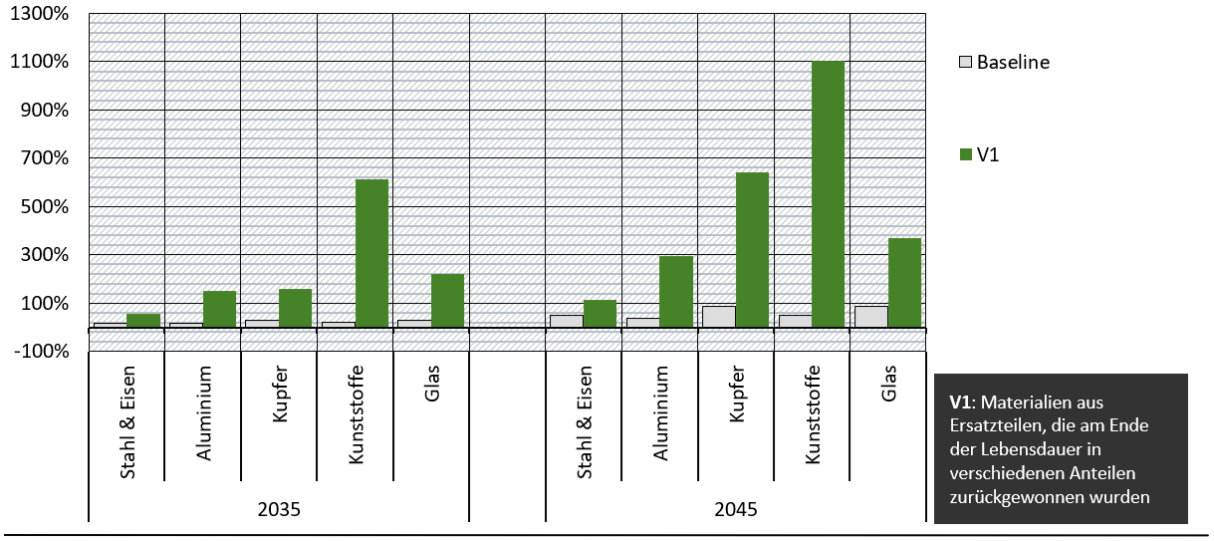
wird am Lebensende eines Produkts ein Höchstmaß an Energie- und Materialrecycling erreicht. Da Elektrofahrzeuge in der Regel auch einen höheren Bedarf an kritischen Rohstoffen haben, ist es noch wichtiger geworden, die Lebensdauer von Fahrzeugen zu verlängern, um die Unabhängigkeit der Europäischen Union in Bezug auf kritische Rohstoffe zu unterstützen.

Über den Lebenszyklus eines Fahrzeugs hinweg werden die höheren Anschaffungskosten von Elektrofahrzeugen durch die im Vergleich zu herkömmlichen Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor geringeren Betriebskosten ausgeglichen. Dies ist jedoch durch die Lebensdauer des Fahrzeugs begrenzt. Eine Verlängerung der Lebensdauer würde daher auch die **finanziellen Vorteile** von Elektrofahrzeugen für die Kunden erhöhen.

Überholte Originalteile unterliegen denselben Qualitätsrichtlinien wie neue Originalteile. Auch die **Garantie ist dieselbe**. Durch die Wiederaufarbeitung erhalten Kunden Zugang zu generalüberholten Originalteilen zu einem **niedrigeren Preis** als bei neuen Ersatzteilen.

Die folgende Grafik zeigt die Materialeinsparungen durch Ersatzteile und Komponenten (ohne Batterien), die am Ende ihrer Lebensdauer (EoL) in den Jahren 2035 und 2045 im Vergleich zu 2025 zurückgewonnen werden. Die dargestellten Einsparungen basieren auf dem geschätzten Anteil der Materialien, die während des Modellierungszeitraums aus demontierten Teilen und Komponenten von EoL-Fahrzeugen zurückgewonnen werden. So wird beispielsweise davon ausgegangen, dass der Anteil von Aluminium aus wiederverwendeten Teilen bis 2040 von derzeit 7 % auf 20 % steigen wird. Der Anteil von Kunststoffen wird voraussichtlich um 8 % steigen, ausgehend vom derzeitigen Niveau von 1 %. Detaillierte Beschreibungen und Annahmen finden Sie im englischen Abschlussbericht des Projekts.

Abbildung 31: Materialersparnis durch wiederverwertete Ersatzteile und Komponenten am Ende ihrer Lebensdauer im Vergleich zu 2025.



Quelle: eigene Darstellung

Hintergrundinformationen

Die Reparatur und Wiederaufarbeitung von Fahrzeugkomponenten verlängert die Funktionsfähigkeit und damit die Lebensdauer von Fahrzeugen. Folglich müssen keine neuen Teile gekauft werden, was bedeutet, dass der Bedarf an Primärrohstoffen (einschließlich kritischer Rohstoffe) sinkt und produktionsbedingte Treibhausgasemissionen und Abfälle vermieden werden.

Die zunehmende **Digitalisierung** von Fahrzeugen wirkt sich bereits auf Reparatur und Wiederaufarbeitung aus. Bauteile werden zunehmend von mechanischen zu elektromechanischen Bauteilen umgestellt, und die Digitalisierung erhöht die Komplexität durch mehr elektronische Teile. Darüber hinaus werden Geschäftsmodelle zunehmend digitaler, was sich auf die Praktiken und Perspektiven im Bereich Reparatur und Wiederaufarbeitung auswirkt.

Elektrofahrzeuge stellen sowohl Herausforderungen als auch Chancen für den Reparatur - und Wiederaufbereitungsmarkt dar. Der Übergang zur Elektromobilität erfordert mittel- bis langfristige Investitionen und Forschung und Entwicklung im Bereich der Wiederaufbereitung von Komponenten von Elektrofahrzeugen. Ähnliche Komponenten von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor und Elektroantrieb (z. B. Bremsen) werden weiterhin repariert und wiederaufbereitet werden, auch wenn sich ihre Konstruktion und ihre Verschleißmuster ändern können (z. B. aufgrund von regenerativem Bremsen). Insgesamt werden diese Veränderungen wahrscheinlich dazu führen, dass sich Reparaturen verlagern von lokalen Werkstätten hin zu zentralisierten Reparatur- und Wiederaufbereitungszentren mit speziellen Kompetenzen und Werkzeugen. Dieser Wandel erfordert auch eine Umschulung der Belegschaft, insbesondere in Bezug auf Hochspannungsbatterien und elektronische Sachverhalte.

2.7 Factsheet 7: Ökodesign: Wie E-Fahrzeuge länger nutzbar und reparierbar werden, ohne zu veralten

Wichtigste Ergebnisse

Eine Lebenszeitverlängerung von Fahrzeugen kann Rohstoffe einsparen und Emissionen verringern. Eine Lebenszeitverlängerung von derzeit etwa 15,8 Jahren auf 19 Jahre (+20 %) kann den Rohstoffbedarf für die Produktion von Fahrzeugen im Jahr 2045 für einzelne Materialien um bis zu 12 Prozentpunkte senken.

Das Fahrzeugdesign stellt die Grundlage für langlebige und reparierbare Fahrzeuge dar. Vor allem die Modularität und Standardisierung von zentralen Komponenten sind hier Ansatzpunkte. Änderungen im Design übertragen sich mit deutlichem zeitlichem Verzug auf mögliche Einsparungen.

Neue Herausforderungen durch Umstellung auf E-Mobilität



Die Produktionsphase gewinnt an Bedeutung
Die Verlängerung der Lebensdauer von Fahrzeugen gewinnt vor dem Hintergrund der Umstellung auf Elektroautos an noch größerer Bedeutung, da sich die emissionsintensive Lebenszyklusphase von der Nutzungs- zur Produktionsphase verlagert.



Die Fahrzeugbatterie als begrenzender Faktor
Solange die Lebensdauer der Batterie kürzer ist als die des restlichen Fahrzeugs, bleibt sie der begrenzende Faktor – zumindest, wenn sie nicht modular verbaut ist.



Abhängigkeit von Software und Spezialkomponenten
Es bestehen Bedenken hinsichtlich einer Zunahme der Abhängigkeit von Software und proprietären Spezialkomponenten. Dies könnte Reparaturen erschweren und zu frühzeitiger technischer Obsoleszenz führen.



Langlebigkeit darf nicht als Technologiebremse wirken
Eine Erhöhung der Langlebigkeit darf nicht dazu führen, dass sich wichtige technische Neuerungen und Effizienzsteigerungen nur schleppend durchsetzen.

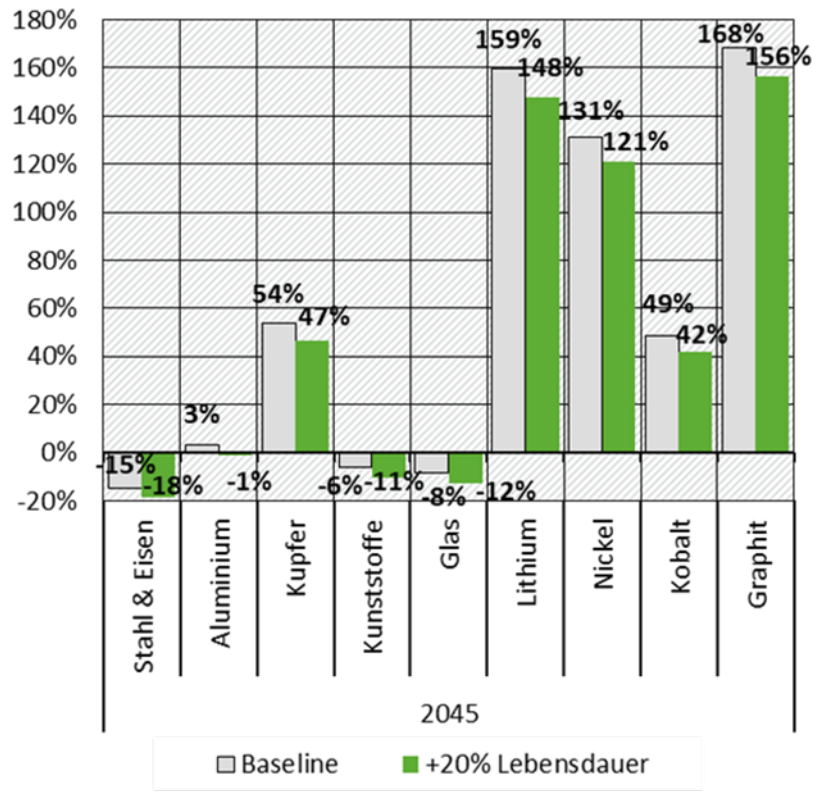
Einsparpotenziale einer Lebensdauerverlängerung

Veränderungen auf Designebene benötigen in der Regel eine lange Zeit, bis sie sich auswirken, da Fahrzeuge langlebige Güter sind und sich die Zusammensetzung der Fahrzeugflotte entsprechend nur langsam verändert. Dies zeigt sich auch in der Modellrechnung für eine Lebensdauerverlängerung um 20 %. Während vorher kaum ein Effekt zu sehen ist, zeichnet sich ab 2045 eine deutliche Reduktion für einige Rohstoffe ab: Es ergeben sich Einsparungen der Gesamtrohstoffnachfrage von bis zu 12 Prozentpunkten für einzelne Materialien, gegenüber der Referenzentwicklung (Baseline). Der verringerte Primärmaterialbedarf schlägt sich ebenfalls in einer Reduktion der herstellungsbezogenen THG-Emissionen von rund einem Prozentpunkt im Vergleich zur Baseline nieder. Der Effekt auf THG-Emissionen fällt damit gering aus. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die betrachteten Fahrzeuge überwiegend aus Stahl und Aluminium bestehen und Materialien, bei denen stärkere Einsparungen erzielt werden, mengenmäßig im Fahrzeug kaum von Bedeutung sind.

Ökodesign: Stellschrauben für eine längere Fahrzeugnutzung

Reparierbarkeit und Upgrade-fähigkeit sind wichtige Aspekte, die zur Langlebigkeit eines Fahrzeugs beitragen. Feste Verbundtechniken und ein Mangel an modularer Bauweise können dazu führen, dass der Austausch von defekten oder veralteten Komponenten nicht wirtschaftlich ist. Langfristige Auswirkungen neuer Fertigungstechniken, wie z. B. Gigacasting auf die Reparierbarkeit, sind derzeit noch unklar. Durch ein modulares Fahrzeugdesign wird zudem die Demontagefähigkeit und damit die Verwertbarkeit am Ende der Fahrzeuglebenszeit erhöht.[6]

Abbildung 32: Änderungen des Gesamtrohstoffbedarfs im Vergleich zu 2025



Quelle: eigene Darstellung (ifeu)

[6] Weitere Informationen zur Bedeutung von Reparierbarkeit und Zerlegbarkeit von Fahrzeugen und Politikmaßnahmen, die zusätzlich die Lebenszyklusphase der Nutzung und der Entsorgung einbeziehen, finden sich im AutoRess-Factsheet 6

Im Abschlussberichts dieses Projekts wird daher eine Liste von Teilen vorgeschlagen, die mit vertretbarem Zeitaufwand und herkömmlichem Werkzeug austauschbar sein sollte. Hierzu zählen unter anderem: die Batterie und ihre einzelnen Module, der Elektromotor mit Steuereinheit und Kabelsträngen, sowie Verschleißteile und Flüssigkeitsbehälter. Darüber hinaus kann eine modell- und (bestenfalls) herstellerübergreifende Standardisierung dieser Bauteile dazu beitragen, Reparatur oder Austausch dieser Komponenten zu vereinfachen, da weniger Spezialwerkzeuge benötigt und Ersatzteile besser bereitzustellen sind. Darüber hinaus wirken sich Skaleneffekte bei Standardisierung sowohl auf das Recycling als auch auf die Herstellung positiv aus.

Eine durch verbesserte Modularität und Standardisierung erhöhte Reparierbarkeit und Upgradefähigkeit kann zudem dazu beitragen den Second-Hand-Markt für E-Fahrzeuge attraktiver zu machen und so die Nutzungsdauer von Fahrzeugen erhöhen. Weitere Ansatzpunkte auf Designebene wären außerdem die Reduktion von Modellvarianten oder die Zerlegbarkeit des Fahrzeugs schon während dem Design-Prozess mitzudenken und das Fahrzeug auf eine bessere Zerlegbarkeit zu optimieren. OEMs könnten entsprechend verpflichtet werden, detaillierte Informationen und Anleitungen zur Zerlegung ihres Fahrzeugs mitzuliefern.

2.8 Factsheet 8: Rezyklatanteil von Batteriematerialien im Zusammenhang mit der EU-Batterieverordnung und der Umstellung auf Elektromobilität

Die neue **EU-Batterieverordnung** ((EU) 2023/1542) legt wichtige regulatorische Anforderungen für den gesamten Lebenszyklus von Batterien fest, von der Herstellung bis zur Entsorgung. Neben Anforderungen an die Recyclingeffizienz (Art. 71, Anhang 12) werden auch explizite Anforderungen an den Sekundäranteil in ausgewählten Batterierohstoffen gestellt (Art. 8). Das AutoRess-Projekt ermöglicht die Bewertung und Quantifizierung der festgelegten Ziele für den Rezyklatanteil in Batteriematerialien der EU-Batterieverordnung unter Verwendung des für den deutschen Fahrzeugbestand entwickelten AutoRess-Modells in der Zukunft.

Wichtige Ergebnisse

Überprüfung der EU-Ziele für Rezyklatanteile in Batteriematerialien im AutoRess-Modell

- **Recyclingmaterial in Neufahrzeugen ausschließlich aus dem europäischen Fahrzeugbestand:** Die Basislinie geht von einem offenen Recyclingkreislauf aus, um die EU-Ziele zu erreichen. Wenn nur Recyclingmaterial aus europäischen Fahrzeugen verwendet werden soll (geschlossener Kreislauf), können die EU-Ziele für 2031 aufgrund der verzögerten Materialrückführung aus dem Recycling von verschrotteten Elektrofahrzeugen bis 2030 nicht vollständig erreicht werden. Bis 2040 könnten die Ziele aufgrund eines größeren Volumens an recycelten Elektrofahrzeugen übertroffen werden. Beispiel: Lithium kann bis 2030 3 % erreichen (Ziel: 6 %), bis 2040 20 % (Ziel: 12 %).
- **Szenario 1 – Geringerer Anteil an hochwertigen Rezyklat aus Altfahrzeugen:** Obwohl die EU-Ziele für die Recyclingeffizienz sehr hoch sind (2030: Lithium 80 %; Nickel/Kobalt 90 %), bedeutet dies nicht automatisch, dass auch hochwertige Materialien in ausreichender Menge für die Zellherstellung zur Verfügung stehen. Ein geringerer Anteil an hochwertigen Recyclingprodukten (-50 %) würde bis 2045 zu einem deutlich höheren Bedarf an Primärmaterialien führen.
- **Szenario 2 – Verbessertes Graphitrecycling:** Graphit als Material wird in der EU-Batterieverordnung nicht speziell behandelt, hat jedoch einen erheblichen Anteil an der

Massenbilanz einer Batterie. Im herkömmlichen Recyclingverfahren wird Graphit in der Regel verbrannt, was zu direkten Kohlenstoffemissionen führt. Mit einer Recyclingeffizienz von 90 % bis 2045 könnte Primärgraphit eingespart werden, aber der Sekundäranteil würde 2045 immer noch unter 30 % liegen.



Wichtigste Herausforderungen und politische Empfehlungen

Die Verwendung von recycelten Materialien reduziert den Bedarf an Primärrohstoffen und erfordert in der Regel weniger Energie, wodurch die Treibhausgasemissionen gesenkt werden, obwohl das Recycling immer noch Energie verbraucht und Treibhausgasemissionen verursachen kann. Die Wirksamkeit variiert je nach Sektor und hängt von der Materialkonzentration ab, da geringe Konzentrationen in Altprodukten die Rückgewinnung erschweren. Bei Batterien sind technologisch strategische Materialien auf Zellebene wie Lithium, Nickel und Kobalt eine entscheidende Quelle für Treibhausgasemissionen. Um die steigende Nachfrage nach mobilen und stationären Batterien zu decken, muss die weltweite Produktion erheblich gesteigert werden. Derzeit stützt sich die Produktion hauptsächlich auf Primärquellen, da hohe Qualitätsstandards und begrenzte Sekundärquellen das Recycling einschränken. Mit der wachsenden Zahl von Elektrofahrzeugen können recycelte Batterien jedoch zunehmend wichtige Sekundärrohstoffe liefern.

Die EU-Batterieverordnung legt Ziele für den Rezyklatanteil in Batteriematerialien für 2031 und 2036 fest. Das AutoRess-Projekt analysiert die Massenströme von recyceltem Material aus europäischen Autos und wie viel davon zum Recyclinganteil in der deutschen Elektrofahrzeugflotte beitragen kann. Die Analyse zeigt, dass die ehrgeizigen Ziele der EU bis 2035 nicht allein mit recycelten Materialien aus europäischen Altfahrzeugen erreicht werden können, sondern dass Recyclingmaterial aus anderen Sektoren benötigt wird. Nach 2035 gelangen größere Mengen ausrangierter Elektrofahrzeuge in das Recyclingsystem, sodass ausreichend Recyclingmaterial aus Elektrofahrzeugen bereitgestellt werden kann, um die EU-Ziele zu erreichen.

Das europäische Recyclingsystem sollte sich auf die rasche Ausweitung effizienter und hochwertiger Recyclingprozesse konzentrieren, um einen Mangel an Recyclingmaterial für Batterieprodukte, insbesondere für Lithium und Graphit, zu verhindern. Im Falle von Lithium gibt es nicht viele andere Sektoren, in denen recyceltes Lithium bereitgestellt werden kann, und es fehlen noch industrielle Kapazitäten für ein effizientes Lithiumrecycling. Im Falle von Graphit ist die Entwicklung eines effizienten Recyclingsystems noch weiter von einem industriellen Maßstab entfernt. Es wird außerdem noch diskutiert, ob die Qualität des recycelten Graphits dem Niveau der Batteriequalität entsprechen muss. Derzeit gibt es keine EU-Ziele für den Rezyklatanteil in Graphit. Da das Material einen großen Teil der Batteriemasse insgesamt ausmacht, ist es für die Gesamtziele der Recyclingeffizienz relevant und sollte in den Recyclingprozessen berücksichtigt werden.

Überbrückung der langen Übergangsphase, bis größere Mengen an Elektroautobatterien die Recyclingphase erreichen: Eine lange Batterielebensdauer ist aus ökologischer Sicht vorzuziehen, auch wenn dadurch die Verfügbarkeit von Rezyklaten auf dem Markt verzögert wird. Um in den nächsten 10 bis 15 Jahren recyceltes Material für die Batterieherstellung bereitzustellen, müssen andere Quellen für Rezyklate im Hinblick auf ihre Nachhaltigkeit bewertet werden. Gleichzeitig sollten die Vorbereitungen für höhere Recyclingkapazitäten für wachsende Mengen an Altbatterien in Europa nicht vernachlässigt werden.

Zertifikate für recycelte Materialien: Der internationale Handel mit Sekundärrohstoffen oder Zwischenprodukten erschwert die Rückverfolgbarkeit und erhöht das Betrugsrisiko.

Rohstoffabhängigkeiten: Während einige OEMs in den Zugang zu Rohstoffen und Recycling investieren, sind die meisten Rohstoffe noch nicht durch langfristige Verträge gesichert. Die Lieferketten für strategische Batteriematerialien werden von asiatischen Unternehmen dominiert. Der Aufbau einer europäischen Recyclingindustrie verringert diese Rohstoffabhängigkeiten.

Dynamische Entwicklung der Batterietechnologien: In den letzten Jahren hat sich die Batterietechnologie rasant weiterentwickelt. Neben der Verbesserung der Leistung werden auch andere Materialzusammensetzungen (z. B. Natrium-basierte Batterien) erforscht oder sind bereits auf dem Markt erhältlich. In diesem dynamischen Sektor ist eine regelmäßige Überprüfung der Recyclingziele unter Berücksichtigung der Markttrends erforderlich.

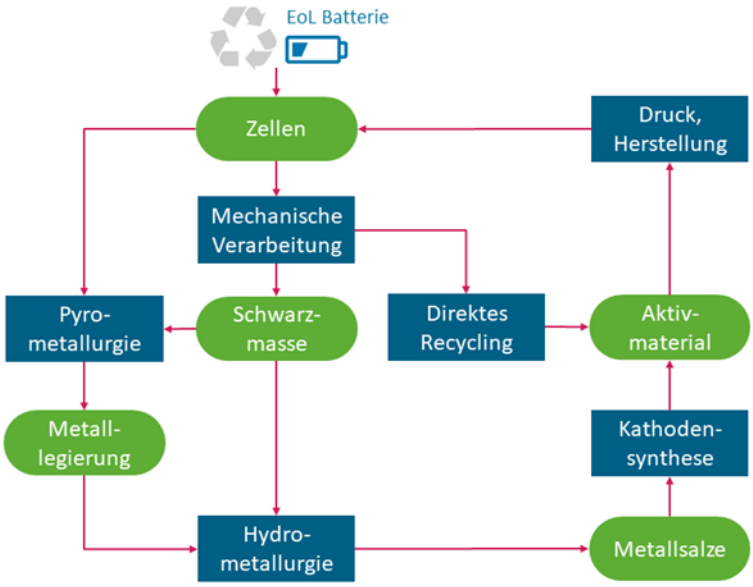
Exportierte Gebrauchtfahrzeuge: Sobald Elektrofahrzeuge die EU verlassen, wird das Recycling weniger nachvollziehbar. Der Batteriepass liefert den Recyclingbetrieben wichtige Informationen über das Produkt. Um jedoch effiziente Recyclingprozesse zu gewährleisten, sollten die europäischen Interessengruppen Investitionen in Sammelsysteme oder sogar Recyclingbetriebe in den wichtigsten Zielländern für Gebrauchtfahrzeuge außerhalb der EU in Betracht ziehen.

Batterierecyclingprozesse und Marktentwicklung

Effiziente Recyclingsysteme reduzieren die Umweltbelastung, verringern die Abhängigkeit von Importen und unterstützen den Übergang der EU zu einer Kreislaufwirtschaft. Die wichtigsten Prozessschritte, die derzeit beim Batterierecycling zum Einsatz kommen, lassen sich in drei Grundtypen zusammenfassen: Pyrometallurgie, Hydrometallurgie und direktes Recycling (physikalische/mechanische Verfahren). Wie im Flussdiagramm dargestellt, wird überwiegend eine Kombination verschiedener Prozessschritte angewendet.

Bislang befinden sich die meisten Recyclingkapazitäten für Lithiumbatterien in Ostasien, insbesondere in China. Derzeit werden auch in Europa entsprechende Kapazitäten für das Recycling von Lithiumbatterien aufgebaut. Stephan (2025) schätzt die installierte Recyclingkapazität für Lithium-Ionen-Batterien (Vorbehandlung bis zur Produktion von Schwarzmasse) in Europa bis 2026 auf mehr als 400.000 Tonnen pro Jahr, was das prognostizierte Rücklaufvolumen einschließlich des gesamten Fahrzeug-Altbatterien übersteigt.

Abbildung 33: Flussdiagramm der Batterie-Recyclingrouten



Quelle: Angepasst aus Sommerville et al. (2021)

Verfügbarkeit von Rezyklat aus Fahrzeug-Altbatterien im Verhältnis zu den Zielen der EU-Batterieverordnung

Die EU-Batterieverordnung selbst schreibt nicht vor, dass das Rezyklat aus dem Batterierecycling stammen muss. Daher kann Rezyklat auch aus anderen Sektoren bezogen werden. Das Ziel der Modellanalysen in AutoRess war die Bewertung, inwieweit die EU-Anforderungen an den Rezyklatanteil in Batteriematerialien erreicht werden können, wenn nur ein geschlossener Recyclingkreislauf innerhalb des Automobilsektors in der Europäischen Union betrachtet wird.

Tabelle 8: Rezyklatanteil in Batteriematerialien für den deutschen Pkw-Markt mit Herkunft aus einem geschlossenen Recyclingprozess (closed-loop)

Material	2025	2030	2035	2040	2045
Lithium	0%	3% (6%, 2031)	7% (12%, 2036)	20%	33%
Nickel	1%	4% (6%, 2031)	9% (15%, 2036)	23%	40%
Kobalt	1%	7% (16%, 2031)	15% (26%, 2036)	32%	46%
Graphit	0%	0%	0%	1%	2%

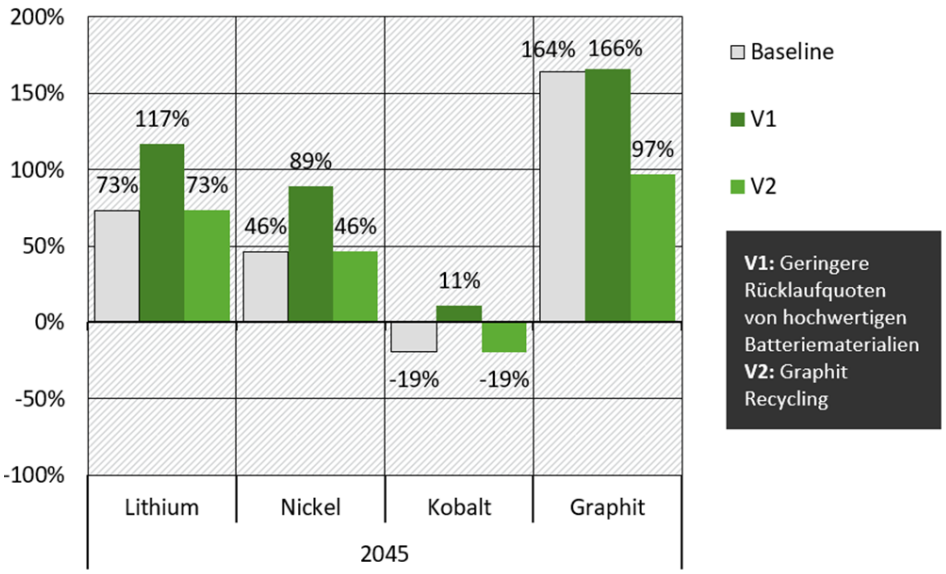
Quelle: Ergebnisse Basisszenario, AutoRess Model 2025. Zahlen in Klammern aus EU-Batterieverordnung, Art. 8.

Die Tabelle mit den Baseline-Ergebnissen aus AutoRess zeigt, dass die EU-Anforderungen für Batteriematerialien bis 2031 nicht erfüllt werden, wenn nur ein geschlossenes Recycling angenommen wird. Im Fall von Lithium (3 %) liegt der von der EU-Batterieverordnung geforderte Prozentsatz bei 6 %. Auch die Zahlen für Nickel und Kobalt im Jahr 2030 liegen deutlich unter den Zielen für 2031. Die EU-Ziele für 2031 werden erst 2035 erreicht, aber die

höheren Ziele, die ab 2036 gelten, werden noch deutlich verfehlt. Um die EU-Ziele für 2036 zu erreichen, müssen mindestens zwei Drittel des Recyclingmaterials aus anderen Sektoren stammen. Im Jahr 2040, wenn eine erhebliche Anzahl von Elektrofahrzeugen in das Recycling gelangt, werden die Ziele für den Recyclinganteil jedoch allein durch europäische (Alt-) Elektrofahrzeuge mehr als erfüllt (Li: 20 %, Ni: 23 %, Co: 32 %).

Zwei weitere Varianten werden zusätzlich in AutoRess analysiert: (1) Eine geringere Rücklaufquote von hochwertigem Batteriematerial und (2) ein gefördertes Graphitrecycling. Das Balkendiagramm veranschaulicht die Veränderungen im Primärmaterialbedarf für Elektrofahrzeugbatterien in den beiden Varianten im Jahr 2045 im Vergleich zum Basisszenario von 2025. Die Auswirkungen einer verringerten Rücklaufquote von hochwertigem Material (- 50 %) sind im Jahr 2045 erheblich, da Rezyklat aus einem geschlossenen Recyclingkreislauf die EU-Ziele deutlich übertrifft. Wenn Sekundärmaterial aus anderen Sektoren nicht beschafft werden kann, wird der Mangel an recyceltem Material aus europäischen Elektrofahrzeugbatterien die Nachfrage nach Primärmaterialien erhöhen (Lithium um 44 Prozentpunkte, Nickel um 43 Prozentpunkte und Kobalt um 30 Prozentpunkte). Das Recycling von Graphit führt zu einem deutlichen Rückgang der Nachfrage nach Primärgraphit, mit einer Verringerung um 67 Prozentpunkte im Vergleich zum Basisszenario, in dem kein Graphitrecycling angenommen wird.

Abbildung 34: Veränderung des Primärmaterialbedarfs für Fahrzeuge im Jahr 2045 im Vergleich zu 2025



Quelle: Eigene Darstellung (ifeu)

2.9 AutoRess Factsheet 9: Verbesserung der Kreislaufwirtschaft für Kunststoffe in Kraftfahrzeugen – Technische und rechtliche Prioritäten

Dieses Factsheet beschreibt Maßnahmen zur Verbesserung der Kreislaufwirtschaft von Kunststoffen im Automobilsektor, die mit den Nachhaltigkeitszielen und der vorgeschlagenen Verordnung über Altfahrzeuge (ELV) in Einklang stehen.

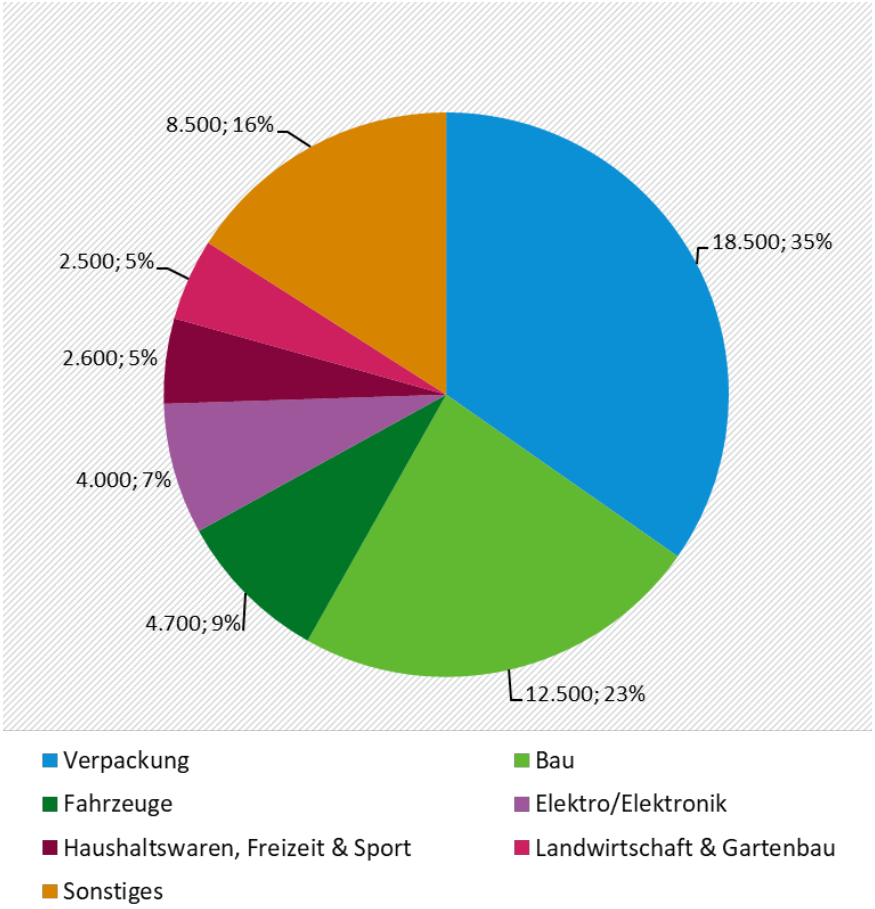
Wichtige Maßnahmen

- **Vorgeschriebene Rezyklateinsatzquoten für Kunststoffe** (ausgenommen biobasierte Kunststoffe): Mindestens 25 % Post-Consumer-Rezyklatanteil in Kunststoffen für Kraftfahrzeuge (ausgenommen biobasierte Materialien, Artikel 6 des ELV-Verordnungsvorschlags), um den Bedarf an Primärressourcen zu senken. Anreize sollten vorrangig auf Kunststoffrezyklate aus Altfahrzeugen ausgerichtet sein, um den Materialkreislauf zu schließen. Falls ein Ziel für biobasierte Kunststoffe festgelegt wird, sollte dies zusätzlich zur Rezyklateinsatzquote festgelegt werden und nur biobasierte Abfälle umfassen, um die Investitionssicherheit sowohl für Recycling als auch für biobasierte Materialien zu gewährleisten.
- **Festlegung von Rückgewinnungsquoten für das Recycling von Kunststoffen**: Einführung einer Mindestrecyclingrate von 30 % für Kunststoffe im Automobilsektor (Artikel 34 des ELV-Verordnungsvorschlags), um Treibhausgasemissionen und den Verbrauch von Neuware zu reduzieren. Abfallentsorgungsunternehmen sollten jährlich mindestens 30 % der Kunststoffe in Altfahrzeugen zurückgewinnen, um den Bedarf an neuen Kunststoffen zu verringern.
- **Förderung von recyclinggerechter Konstruktion**: Verpflichtung der OEMs, Kunststoffkomponenten so zu konstruieren, dass sie leicht zu entfernen sind und aus gut recycelbaren Materialkombinationen bestehen, sowie Bereitstellung detaillierter Anweisungen für die Demontage und den Austausch. Dies gewährleistet ein effizientes Recycling und unterstützt die Prinzipien der Kreislaufwirtschaft.
- **Investitionen in fortschrittliche Recyclingtechnologien**: Förderung von Investitionen der Industrie und der Regierung in die Erforschung und den Kapazitätsaufbau von Post-Schredder-Technologien zur Verbesserung der Qualität der recycelten Kunststoffe. Erweiterte Forschung und Infrastruktur werden die Recyclingeffizienz und die Materialrückgewinnung verbessern.

Hintergrund

Etwa 9 % des Kunststoffverbrauchs in Europa entfällt auf den Automobilsektor.

Abbildung 35: Kunststoffverbrauch pro Sektor in der EU27+3 in %



Die Mengen wurden anhand der angegebenen Anteile und der Gesamtmenge von 53,3 Mio. t berechnet.
Quelle: Eigene Abbildung Öko-Institut; Daten von Plastics Europe (2024)

Der Anteil von Kunststoffen am Gesamtgewicht von Fahrzeugen hängt stark von der Art des Antriebs, dem Fahrzeugmodell und dem Hersteller ab. Seit zwei Jahrzehnten hat der Kunststoffanteil in Neuwagen zugenommen, was zu einem großen Unterschied in der Kunststoffmenge zwischen Altfahrzeugen und Neuwagen geführt hat. Derzeit liegt der Kunststoffanteil in einem Pkw zwischen 14 und 18 %. In absoluten Zahlen liegt der Gewichtsanteil im gewerblichen Bereich zwischen 190 und 360 kg pro Fahrzeug (Maury et al-. 2023). Im Jahr 2023 stammten 110 Kilotonnen (7,7 %) des in der Automobilbranche verarbeiteten Kunststoffs aus sekundären Quellen (aus Nebenprodukten oder Abfällen), jedoch nur ein kleiner Teil davon aus Altfahrzeugen. Die Recyclingquote für Kunststoffe (Post-Consumer-Abfälle) aus dem Fahrzeugsektor lag insgesamt bei nur 13,8 %, wobei nicht alle für neue Fahrzeuge wiederverwendet wurden (Lindner et al. 2024). Recycelte Kunststoffe für Fahrzeuge stammen nicht nur aus Altfahrzeugen, sondern auch aus anderen Sektoren wie dem Verpackungssektor (z. B. PET aus Einweg-Plastikflaschen, die für Textilien in einem Auto verwendet werden). Dies steht den eigenen Zielen des Verpackungssektors entgegen.

Gemäß der Abfallhierarchie ist das Recycling von Kunststoffen nach der Reduzierung und Wiederverwendung von Kunststoffen von größter Bedeutung. Im Zusammenhang mit chemischem Recycling ist es jedoch unerlässlich, auch zwischen den Verfahren entsprechend ihren Ergebnissen zu unterscheiden. Die Depolymerisation ist ein Verfahren, bei dem bestimmte Monomere und Oligomere direkt hergestellt werden. Im Vergleich zu thermochemischen Verfahren wie der Pyrolyse, bei denen Rohstoffe entstehen, die weiterverarbeitet werden

müssen, bevor sie wieder zu Monomeren werden, ist dieses Verfahren vorzuziehen, da es eine effizientere Nutzung des Materials darstellt. Neben dem Recycling von Materialien wird auch die Verwendung alternativer Materialien diskutiert, um die CO_2-Emissionen bei der Herstellung von Kunststoffen zu reduzieren und die Wertschöpfungskette zu de-fossilisieren. Da jedoch neues Material hergestellt wird, ist dies nicht Teil der Abfallhierarchie und muss separat betrachtet werden.

Abbildung 36: Abfallhierarchie mit dem Fokus Kunststoff im AutoRess-Projekt



Quelle: Eigene Abbildung Öko-Institut

Zu den Kunststoffaspekten im Fokus des Projekts

Mechanisches Recycling

Dieses Recyclingverfahren sollte für die meisten Kunststoffe die erste Wahl sein. Im Gegensatz zum chemischen Recycling bleiben beim mechanischen Recycling die chemischen Bindungen innerhalb der Polymerketten (vorwiegend Kohlenstoff-Kohlenstoff-Bindungen) (größtenteils) intakt. Daher ist es energieeffizient und hat hohe Ausbeuten. Für höhere Recyclingquoten hat die Vorsortierung höchste Priorität, um homogene Inputströme zu erreichen und mechanische Recyclingverfahren nutzen zu können.

Chemisches Recycling

Chemisches Recycling bezieht sich auf verschiedene Verfahren, bei denen Polymerabfälle durch Veränderung ihrer chemischen Struktur in ihre Bestandteile (z. B. Monomere, Oligomere) oder Kohlenwasserstoffe und chemische Wirkstoffe als Grundlage für neue Kunststoffe umgewandelt werden. Dies kann durch verschiedene Verfahren erreicht werden, bei denen eine Kombination aus Wärme und Druck in einer sauerstoffarmen Umgebung zum Einsatz kommt, die u. a. als Depolymerisation, Pyrolyse und Vergasung bezeichnet werden. Die Unterschiede zwischen „Rohstoffrecycling“ (bei dem die Produkte Grundchemikalien sind) und „Depolymerisation“ (bei der die Produkte Monomere sind) müssen berücksichtigt werden. Chemisches Recycling

beinhaltet einen höheren Energiebedarf und höhere Verluste und damit eine höhere CO_2-Intensität im Vergleich zum mechanischen Recycling.

Aus Biomasse hergestellte Kunststoffe

Kunststoffe aus Biomasse bedienen bislang nur einen sehr kleinen Nischenmarkt. Gründe dafür sind vor allem der im Vergleich zu fossilen Kunststoffen höhere Preis und fehlende Anreize. Der Anteil von Kunststoffen aus Biomasse in der Kunststoffproduktion wird ohne gesetzliche Verpflichtungen oder andere Fördermaßnahmen nicht steigen.

Kunststoffe aus abgeschiedenem Kohlenstoff

Die Verfahren zur Herstellung von Kunststoffen aus CO_2 befinden sich noch in der Entwicklung und werden im Automobilsektor in der EU noch nicht angewendet. Wie zuvor geschildert wird sich daran nichts ändern, solange es keine gesetzlichen Vorgaben gibt, die dies unterstützen.

Weitere Einzelheiten finden Sie im englischen Abschlussbericht in Kapitel 3.10.

Kunststoffrecycling in der Liste der Kriterien für ressourceneffiziente und kreislauffähige Fahrzeuge

Die Maßnahmen zur Förderung des Kunststoff-Rezyklateinsatzes in Fahrzeugen sind auch in den Kriterien für ein ressourceneffizientes und recyclingfähiges Fahrzeug enthalten (s. Factsheet 3 „Vision eines ressourcenschonenden Fahrzeugs“). Hier wird ein konkretes Ziel für den Rezyklatanteil festgelegt, das sich an der derzeit verhandelten EU-Altfahrzeugverordnung orientiert und verschiedene Ambitionsstufen vorsieht. Demnach soll der Anteil an Rezyklaten aus dem Post-Consumer-Recycling ab 2030 bei 25 % liegen. Umgerechnet auf den aktuellen Verbrauch von 1.420 Kilotonnen Kunststoff in der Automobilindustrie in Deutschland (Lindner et al. 2024) entspricht dies einem absoluten Wert von rund 355 Kilotonnen an benötigten Rezyklaten. Außerdem wird vorgeschlagen, dass in Zukunft 25 % davon (d. h. 6,25 % der Gesamtmenge) „closed-loop“ sein, also aus dem Recycling von Fahrzeugen stammen müssen. Das bedeutet, dass ein Anteil von rund 89 Kilotonnen aus Altfahrzeugen gewonnen und für die Verwendung in Neufahrzeugen aufbereitet werden muss. Der Rest kann aus dem offenen Recycling stammen, d. h. aus anderen Bereichen wie Elektro- und Elektronikaltgeräten oder Verpackungen:

- Vorgeschriebene Rezyklateinsatzquote: 25 % recyceltes Material aus dem Endverbraucherbereich, davon 25 % aus dem geschlossenen Kreislauf
- Umweltkennzeichnung: 30 % recycelte Post-Consumer-Materialien, davon 25 % aus geschlossenem Kreislauf

Weitere Einzelheiten zu den Kriterien sind im englischen Abschlussbericht (Kapitel 4) enthalten.

Nach Ansicht mehrerer Experten ist die Schreddertechnologie eine notwendige und wirtschaftliche Methode, um Altfahrzeuge zu zerkleinern und in Sekundärstoffströme zu trennen. Es wird jedoch in Frage gestellt, ob die Schredderleichtfraktion überhaupt für eine hochwertiges Recycling geeignet ist. Zurzeit ist der Strom der demontierten Materialien viel gefragter, um direkt als Ersatzteile verwendet oder als leichter zu behandelnder Abfallstrom recycelt zu werden.

Generell sollten weitere Investitionen in die Erforschung von Post-Shredder-Technologien getätigt werden, um die Qualität der Output-Fraktionen zu optimieren, da die Demontage nicht für alle Teile eine wirtschaftliche Lösung darstellen wird. Darüber hinaus wird die Bedeutung

des Designs für das Recycling hervorgehoben, das hochgradig recycelbare Materialkombinationen umfasst. Außerdem sollten Bauteile leicht mechanisch entfernbar sein, und dieser Schritt sollte auch wirtschaftlich lohnenswert sein.

2.10 Factsheet 10: Einsatz von Recyclingstahl in der Automobilherstellung

Wichtigste Ergebnisse

Einsatz von Sekundärstahl in der Automobilherstellung

- Eine Quote für den Einsatz von Sekundärstahl von 30 % aus Closed-Loop-Recycling in der Automobilherstellung ist umsetzbar (Gesamtquote für Flachstahl, Langstahl und Gusseisen).
- Aus einem Open-Loop-Recycling sind bis zu 50 % Sekundärstahl darstellbar.
- Hierfür muss es wesentliche Verbesserungen in der Aufbereitung von Stahlschrott erfolgen, insbesondere zur Abtrennung von Kupferbestandteilen.

Herausforderungen für den Einsatz von Recyclingstahl

In Automobilen werden unterschiedliche Stahl- und Eisenprodukte eingesetzt, von Flachstahl über **Langstahl** bis hin zu **Gusseisen**. Von diese macht Flachstahl den größten Anteil in einem PKW aus.

Stahlschrott weist typischerweise eine **Verunreinigung mit anderen Elementen** auf, von denen **Kupfer** ein Problem bei der Sekundärstahlproduktion darstellt. Vor allem dünne Bleche werden durch eine zu hohen Kupferanteil brüchig, was zu Oberflächenrissen beim Warmwalzen und Umformen führt. Deshalb kommt Flachstahl heutzutage fast ausschließlich aus der Primärstahlproduktion, in der keine Post-Consumer-Schrotte eingesetzt werden.

Dagegen können Langstahl- und Gusseisen-Bauteile auch aus Sekundärstahl hergestellt werden

Die effektive **Entfernung von Kupfer** aus dem Stahlschrott ist für hochwertigen Recyclingstahl, der zur Produktion von Flachstahlerzeugnisse verwendet werden kann, unerlässlich.

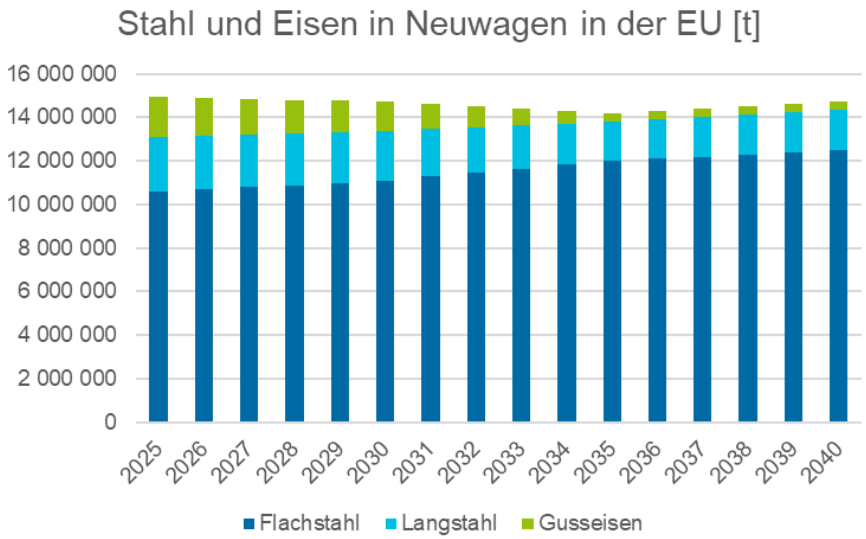
Vom Stahlschrott zum hochwertigen Flachstahlprodukt

Stahl wird traditionell auf einem von zwei Wegen hergestellt: Entweder über die Route Hochofen – Sauerstoffblas-Konverter (blast furnace - basic oxigen furnace, BF-BOF), bei der Eisenerz eingesetzt wird, oder über die Route des Elektrolichtbogenofens (electric arc furnace, EAF), bei der Schrott zum Einsatz kommt.

Die Stahlindustrie in der EU produzierte im Jahr 2023 mehr als 126 Millionen Tonnen Stahl. Mehr als 28 % davon wurden in Deutschland produziert (etwa 35 Millionen Tonnen), was Deutschland zum größten Stahlproduzenten Europas und zum siebtgrößten

Rohstahlproduzenten der Welt macht. Der Automobilsektor ist nach dem Bausektor der zweitgrößte Stahlverbraucher (19,1 %) in Europa (Eurofer 2024). Die folgende Abbildung zeigt den Bedarf an Eisen und Stahl in Neuwagen in der EU bis 2040. Da in Elektroautos weniger Langstahl und Gusseisen verbaut sind als in Verbrennerfahrzeugen, nimmt mit der Verschiebung hin zur Elektromobilität der Bedarf an Langstahl und Gusseisen ab.

Abbildung 37: Mengen an Stahl und Eisen in Neuwagen in der EU



Quelle: nach [Sutter et al. 2025]

Die höchste Nachfrage nach Bandstahlerzeugnissen (d. h. Flachstahlerzeugnissen) besteht in der Automobilbranche. Sie entspricht etwa 39,2 % der Gesamtproduktion von Bandstahlerzeugnissen im Jahr 2023 (in der EU insgesamt 48,8 Millionen Tonnen).

Dagegen wird Post-Consumer-Stahlschrott in der Regel im Bausektor zur Herstellung von Bewehrungsstäben verwendet. Der meiste Stahlschrott enthält andere Metalle, die, wenn sie nicht während des Schmelzprozesses im Elektrolichtbogenofen (EAF) entfernt werden, als „Begleitelemente“ bezeichnet werden. Dazu gehören Metalle wie Kupfer (Cu), Nickel (Ni), Zinn (Sn), Arsen (As), Chrom (Cr), Molybdän (Mo), Blei (Pb) und andere. Die wichtigsten Begleitelemente beim Stahlrecycling sind Kupfer und Zinn, da beide Heißkurzschlüsse verursachen können - ein Phänomen, das beim Warmwalzen und Umformen zu Oberflächenrissen führt. Bei Kupfer tritt dies auf, wenn seine Konzentration 0,1 Gew.-% übersteigt, während Zinn bereits bei Konzentrationen von 0,04 Gew.-% ähnliche Probleme verursachen kann (Daehn et al., 2017a).

Die nominale Toleranz für die Kupferkonzentration im Stahl bestimmt die Eignung von recyceltem Stahl für verschiedene Anwendungen. Für Flacherzeugnisse (z. B. Ziehstahl, Bleche) liegen die Grenzwerte in der Regel bei weniger als 0,06 Gew.-% Kupfer. Die Kupferkonzentration in geschreddertem Altfahrzeugschrott kann derzeit meist zwischen 0,23 % und 0,7 % liegen (Sander et al. 2020, Daehn et al. 2017b).

Die Minimierung von Kupferverunreinigungen in recyceltem Stahl ist von entscheidender Bedeutung, um sicherzustellen, dass Stahl, der aus Post-Consumer-Schrott, insbesondere aus Altfahrzeugen, gewonnen wird, die Qualitätsstandards erfüllt, die zur Erhöhung des Recyclinganteils in der Fahrzeugproduktion erforderlich sind.

Zwei Wege, den Kupferanteil im Stahlschrott zu verringern, werden aktuell verfolgt: Zum einen werden kupferhaltige Komponenten vor dem Schreddern entfernt (insbesondere Demontage des Hauptkabelstrangs). Untersuchungen, die für die „Car to Car Steel“-Studie durchgeführt wurden, ergaben, dass eine tiefere Kupfer-Entnahme vor dem Schreddern eine erheblich geringere Restkupfer-Konzentration im Stahl-Schredderschrott ermöglicht (< 0,1%) und aufgrund der zusätzlichen Erlöse durch das abgetrennte Kupfer auch ökonomisch machbar ist (Gross&Hermine 2025). Eine Forderung aus dieser Studie ist auch die Einführung einer neuen

Schrottklasse „E40+“ mit einem Kupfergehalt von < 0,15 %. Zum anderen werden neue Techniken zur Aufbereitung des Stahlschrotts nach dem Schreddern entwickelt. Moderne Aufbereitungsanlagen können bereits heute eine hohe Reinheit des Stahlschrotts (Cu < 0,08 %) erreichen, die auch für die Primärstahlerzeugung im Hochofen und Konverter geeignet ist und somit auch für die Herstellung von hochwertigem Flachstahl eingesetzt werden kann (Kusters 2024).

Die Mengen an Stahlschrott, die aus Altfahrzeugen in der EU anfallen, würden bei einer entsprechenden Aufbereitung eine Sekundarstahlanteil von rund 30 % in der Automobilherstellung darstellbar machen (Sutter et al. 2025). Es gibt verschiedene Möglichkeiten für die Quellen, aus denen zusätzliche Mengen an hochwertigem Recyclingstahl kommen könnten. Zum einen könnte recycelter Stahl verwendet werden, der bisher in andere Anwendungen, z. B. in den Bausektor, geflossen ist, und zum anderen könnte recycelter Stahl verwendet werden, der bisher in Nicht-EU-Länder exportiert wurde. Eine dritte Möglichkeit wäre der Import von recyceltem Stahl. In allen Fällen wird der recycelte Stahl derzeit nicht in der Qualität verarbeitet, die für die Verwendung als Flachstahl im Automobilsektor erforderlich ist, so dass unabhängig von der Herkunft eine weitere Verarbeitung erforderlich ist, insbesondere die Abtrennung von Kupfer. Vorteile der zusätzlichen Aufbereitung des Stahlschrotts, um den Sekundarstahlanteil in PKWs zu steigern, liegen in der zusätzlichen Rückgewinnung von Kupfer und dass aufbereiteter Recyclingstahl deutlich günstiger sein wird als Primärstahl aus einer künftigen grünen Wasserstoffdirektreduktion.

2.11 Factsheet 11: Öffentliche Beschaffung

Wichtigste Ergebnisse

- Kleinere Fahrzeuge mit kleinerer Motorisierung verbrauchen weniger Ressourcen in der Herstellung und haben zudem meistens einen geringeren Energieverbrauch im Betrieb
- Der Antriebswechsel hin zu E-Pkws ist eine wichtige Maßnahme zur Verringerung der Treibhausgasemissionen. Gleichzeitig hat die Größe der Batterien erhebliche Bedeutung für die Emissionen und vor allem auch für die Rohstoffbedarfe in der Fahrzeugherstellung. Die Vermeidung von überdimensionierten Batteriekapazitäten für die im Fuhrpark geplante Fahrzeugnutzung birgt daher auch relevante Potenziale zur Ressourcenschonung.
- In der Leistungsbeschreibung können ressourcenschonende Kriterien aufgenommen werden. Dazu zählen beispielsweise Obergrenzen für den Energieverbrauch und eine möglichst lange Garantie für die Batterielebensdauer sowie die Bereitstellung von Ersatzteilen und Softwareupdates.

- Die öffentliche Hand ist mit etwa 500 Mrd. €/Jahr (ca. 13 % des BIP (KNB 2025)) die größte Einkäuferin Deutschlands. Dieses Auftragsvolumen begründet eine besondere Verantwortung zur ressourcenschonenden Beschaffung. Der direkte Anteil der öffentlichen Beschaffung am Pkw-Gesamtmarkt ist mit ca. 20.000 Fahrzeugen pro Jahr (KBA 2023) bei jährlich insgesamt knapp 3 Mio. neuen Pkw zwar gering. Die öffentliche Hand hat jedoch eine Vorbildfunktion für Unternehmen, die ca. zwei Drittel aller neuen Pkw beschaffen, und auch für Privatpersonen.

Hebel zur Verringerung des Rohstoffbedarfs und der Emission von Treibhausgasen

Die im Projekt „AutoRess“ durchgeführte Modellierung zu Ressourcennutzung und Treibhausgasemissionen in der Fahrzeugbranche ergab drei Hebel, die sich besonders stark auf die Ziele auswirken:

- Reduktion von Fahrzeug- und Batteriegröße
- Verlängerung der Lebensdauer
- Höhere Menge an Rezyklaten

Aus den drei Hebeln wurden in AutoRess mehrere Kriterien für zu beschaffende E-Pkw aus Ressourcen- und Treibhausgassicht entwickelt:

Tabelle 9: THG- und Ressourcenschonende Pkw-Konfigurationen im AutoRess-Anspruchsniveau „Öffentliche Beschaffung“

Einsatz-profil	Anzahl Sitzplätze	Maximale Abmessungen (mm)	Lade-volumen	Reich-weite (WLTP)[7]	Batterie--kapazität (kWh)	Energieverbrauch (Wh/km)	Energieverbrauch (Wh/km)
1	2	2740 x 1480	0	200 km	18	90	105
2	5	4650 x 1900	ca. 600 l	500 km	70	140	165
3	max. 9	5000 x 1980	ca. 1500 l	500 km	100	200	230

In allen Einsatzprofilen:
- Verfügbarkeit von Ersatzteilen und Softwareupdates: 20 Jahre
- Batterielebensdauer-Garantie: 20 Jahre bzw. 300.000 km bei SOH 80 %
Quelle: Eigene Darstellung

Einsparungen durch die Verkehrsverlagerung auf öffentliche Verkehrsmittel oder nicht motorisierte Verkehrsmittel (z. B. Fahrrad) wurden im Projekt AutoRess nicht untersucht.

Herausforderungen für die Öffentliche Beschaffung

In der Öffentlichen Beschaffung werden oft pro Ausschreibung nur wenige Fahrzeuge angeschafft. In der Vergabe gibt es oft nur wenige Anbieter, da der Aufwand im Vergleich zur Zahl der tatsächlich erworbenen Fahrzeuge groß ist. Es werden Fahrzugklassen gebündelt ausgeschrieben, damit man mehrere Angebote bekommt. Wenn Beschaffung gut läuft, findet im Voraus meist schon viel Kommunikation mit potentiellen Anbietern statt. Beschaffende haben heute eher die Herausforderung, überhaupt den Antriebswechsel zur Elektromobilität zu erreichen.

Welche Hilfestellungen benötigen Beschaffende?

Auch mit Verfügbarkeit geeigneter Bewertungskriterien und Tools für die (Vor-)Auswahl THG- und ressourcenschonender Pkw-Modelle stellen sich in der öffentlichen Beschaffung weitere Herausforderungen im konkreten Beschaffungsprozess. Beispiele dafür sind:

[7] Worldwide Harmonised Light-Duty Vehicles Test Procedure

- **Technische/praktische Anforderungen**: Bestimmte erforderliche Fahrzeugausstattungen schränken die Modellauswahl ein, beispielsweise nötige Bodenfreiheit für Zugang zu Baustellen, fest verbaute Fahrzeugeinrichtungen (mobile Werkstatt).
- **Bürokratie**: Aus der Beschaffungspraxis wird berichtet, dass ohnehin wenige Angebote auf Fahrzeugausschreibungen eingehen. Aus der Beschaffungspraxis wird berichtet, dass ohnehin wenige Angebote auf Fahrzeugausschreibungen eingehen. Als Hemmnis wird dabei der Formalismus für die Bietenden gesehen, der sich aus den verschiedenen Vorgaben des öffentlichen Vergaberechts ergibt[8]. Weitere Anforderungen könnten die Ausschreibung für Bietende daher noch unattraktiver machen. Dieser Hürde könnte man begegnen, indem einige ressourcenschonende Vorgaben als Zuschlagskriterien statt als Mindestanforderungen aufgenommen werden.
- **Verbindlichkeit**: Bei nicht formal vorgeschriebenen Anforderungen bestehen bei den Beschaffenden bezüglich der Verwendung teilweise Unsicherheiten. Die Überführung ressourcenschonender Vorgaben in die Beschaffungsvorschriften von Bund und Ländern ist daher essentiell.

Der letzte Punkt unterstreicht die Rolle von **regulativen Vorgaben** in Form von konkreten Beschaffungsvorschriften. Diese sollten von den Beschaffenden einfach zu übernehmen sein und das Angebot nicht zu sehr einschränken, wenngleich das Ambitionsniveau der Vorbildfunktion der öffentlichen Hand gerecht werden sollte. Im deutschen föderalen System ist es wichtig, dass sich Bund und Länder möglichst auf Standards einigen und Best-Practice-Beispiele verbreiten. Die Harmonisierung von zukünftigen konkreten Beschaffungsvorschriften für ressourcenschonende Fahrzeuge würde den Einfluss der öffentlichen Hand auf den Markt bündeln und zudem der Bürokratie-Hürde entgegenwirken, da sich die Bietenden in diesem Fall auf einheitliche Anforderungen einstellen könnten.

[8] Vgl. z.B. Ergebnisse aus dem Projekt "Entwicklung von Instrumenten für die umweltverträgliche Beschaffung von Pkw durch öffentliche Stellen"

3 Kriterien für ressourcenschonende, kreislaufwirtschaftsfähige Fahrzeuge

Das ressourcenschonende kreislaufwirtschaftsfähige Fahrzeug

Mit der in den letzten Jahrzenten immer weiter wachsenden Zahl an PKW sowie dem Trend hin zu größeren, schwereren Fahrzeugen steigen Treibhausgasemissionen und Ressourcennutzung durch Fahrzeugproduktion und -nutzung ebenfalls stark an. Im Zuge der Verkehrswende hin zur Elektromobilität werden außerdem zusätzliche, zum Teil kritische Rohstoffe benötigt. Da diese zur Einhaltung des Übereinkommens von Paris und des Klimaschutzplans 2050 essentiell vonnöten ist, werden in den Projektergebnissen ausschließlich batterieelektrische Fahrzeuge behandelt.

Möglichst ressourcenschonende und zirkuläre Fahrzeugkonzepte sind also essentiell, um die Umweltwirkungen und den Rohstoffbedarf während aller Phasen des Fahrzeuglebenszyklus zu senken. Im Rahmen des Projekts „AutoRess“ wurden die folgenden Vorschläge für die Definition und die Kriterien für ressourcenschonende, kreislaufwirtschaftsfähige Fahrzeuge entwickelt.

3.1 Vorschlag: Definition eines ressourcenschonenden Fahrzeugs

Abbildung 38: Aspekte der vorgeschlagenen Definition für ein ressourcenschonendes und kreislaufwirtschaftsfähiges Fahrzeug



Quelle: eigene Darstellung

Als ressourcenschonend und kreislaufwirtschaftsfähig wird ein ein Elektro-Fahrzeug definiert,

- das über den gesamten Lebenszyklus möglichst wenige Primärrohstoffe benötigt;
- über dessen gesamten Lebenszyklus möglichst wenig Energie verbraucht wird und Treibhausgase emittiert werden;
- das möglichst langlebig ist;
- dessen Bestandteile sich am Lebensende möglichst vollständig und ohne Downcycling dem Stoff-/Materialkreislauf wieder zuführen lassen.
- dessen zusätzliche Umwelt- und Sozialwirkungen möglichst minimal sind.

3.2 Größte Hebel auf die Ressourcennutzung für Fahrzeuge

Die im Projekt „AutoRess“ durchgeführte Modellierung zu Ressourcennutzung und Treibhausgasemissionen in der Fahrzeugbranche in 10 ausgewählten Themenfeldern ergab 3 Aspekte, die sich besonders stark auf beide Ziele auswirken:

Die sich aus der Modellierung ergebenden größten Hebel auf Ressourcennutzung und Treibhausgasemissionen im Fahrzeugbau sind:

Reduktion von Fahrzeug- und Batteriegröße 

Verlängerung der Lebensdauer 

Höhere Menge an Rezyklaten 

3.3 Kriterien

Auf Basis der identifizierten größten Hebel wurden für die verschiedenen Aspekte der Definition eines ressourcenschonenden Fahrzeugs Kriterien definiert, die diese positiv beeinflussen. Dabei standen neben Richtungssicherheit der einzelnen Kriterien auch deren und Überprüfbarkeit im Vordergrund der Auswahl.

Tabelle 10: Kriterien, die die Aspekte der Definition für ein ressourcenschonendes Fahrzeug abdecken

Primär-rohstoff-einsatz	Treibhausgas-emissionen	Langlebigkeit	Rezyklierbar-keit	Energie-verbrauch	Umwelt-wirkungen
Rohstoffindex[9]	Product Carbon Footprint[1]	Modularisier-ung	Modularisier-ung	Product Carbon Footprint	Sorgfalts-pflichten in den Lieferketten
Fahrzeugmaße	Rezyklat-einsatzquoten	Lebensdauer-garantie Batterien	Rezyklateinsatz - quoten	Energie-verbrauch in der Nutzung	Fahrzeugmaße
Batterie-kapazität	Fahrzeugmaße	Bereitstellung von Ersatzteilen und Software-updates	Rohstoffindex[1]	Fahrzeugmaße	Rohstoffindex[1]
Rezyklat-einsatzquoten					

[9] Zukünftiges Kriterium nach Standardisierung der Berechnungsmethodik

Fahrzeugabmessungen

Das naheliegendste Kriterium für den Gesamtrohstoffverbrauch eines Fahrzeugs ist dessen Gewicht. Die einfache Ersetzung von schwereren Materialien, wie beispielsweise Stahl, durch leichtere, die gegebenenfalls in der Herstellung energieaufwändiger oder umweltbelastender oder am Lebensende des Fahrzeugs schlechter rezyklierbar sind, jedoch nicht zielführend für die Schonung von Ressourcen. Um Fehlanreize zum Leichtbau durch eine Begrenzung des Fahrzeuggewichts zu vermeiden, eignen sich die Fahrzeugdimensionen besser ein richtungssicheres, einfach überprüfbares Kriterium für die Ressourcennutzung zu geben. Zudem wird dabei der Flächenverbrauch des Fahrzeugs mit einbezogen.

Materialspezifische Rezyklateinsatzquoten

Als Treiber für den Markt für hochwertige Sekundärrohstoffe und den Aufbau entsprechender Recyclingkapazitäten werden Rezyklateinsatzquoten bzw. die Verpflichtung zur Offenlegung des Rezyklatgehalts für ausgewählte Materialien vorgeschlagen. Diese umfassen Stahl, Batteriematerialien gemäß der Batterieverordnung der EU, Kunststoffe und seltene Erden.

Batteriekapazität

Um den Einsatz von z.T. als kritisch eingestuften Materialien in der Antriebsbatterie zu beschränken, wird vorgeschlagen, die Batteriekapazität für die jeweilige Fahrzeugnutzungsklasse nach oben zu beschränken.

Energieverbrauch in der Nutzung

Um den Energieverbrauch auch nach der Umstellung auf Elektromobilität mit erneuerbaren Energien nicht unbegrenzt ansteigen zu lassen, wird vorgeschlagen, den maximal zulässige Energieverbrauch in der Nutzung (nach WLTP-Protokoll sowie unter Berücksichtigung von zusätzlichen Verbrauchern, wie z. B. der Fahrzeugklimatisierung) zu begrenzen.

Modularität

Reparierbarkeit und Upgradefähigkeit sind wichtige Aspekte, die zur Langlebigkeit eines Fahrzeugs beitragen. Diese wird oft durch die feste Installation und den damit sehr zeitaufwendigen Austausch von defekten Teilen oder die fehlende Austauschbarkeit veralteter Komponenten eingeschränkt. Zusätzlich fördert ein modularer Fahrzeugaufbau die Demontagefähigkeit und damit Rezyklierbarkeit am Lebensende. Aus diesem Grund wird eine Liste von Teilen vorgeschlagen (link zum Abschlussbericht), die mit vertretbarem Zeitaufwand und herkömmlichem Werkzeug austauschbar sind.

Sorgfaltspflichten in den Lieferketten

Es wird vorgeschlagen, die Einhaltung der Sorgfaltspflichten in den Lieferketten laut EU-Lieferkettenrichtlinie nicht nur wie darin vorgesehen für unmittelbare, sondern auch für mittelbare Lieferanten vom Hersteller zu fordern.

Bereitstellung von Softwareupdates und Ersatzteilen

Zur weiteren Unterstützung der Reparierbarkeit und Langlebigkeit wird vorgeschlagen, vor Herstellern eine garantierte Verfügbarkeit von Softwareupdates und Ersatzteilen für mindestens 20 Jahre zu fordern (in ähnlicher Weise, wie beispielsweise die Ökodesign-Anforderungen für Waschmaschinen (Europäische Kommission 2019) bereits enthalten).

Lebensdauergarantie auf Antriebsbatterien

Auf die Antriebsbatterie wird vorgeschlagen, vom Hersteller eine Lebensdauergarantie auf Antriebsbatterien zu fordern. Diese sollte den Erhalt eines festgelegten Anteils der ursprünglichen Batteriekapazität für mindestens 300.000 km oder 20 Jahre umfassen.

3.3.1 Zukünftige Kriterien

Neben den oben genannten Kriterien wurden zusätzlich zwei weitere identifiziert, die gemäß der Projektergebnisse essentiell zur Treibhausgaseinsparung und Ressourcenschonung beitragen würden, jedoch zum heutigen Zeitpunkt noch nicht standardisiert überprüfbar sind. Hier wir deshalb die Empfehlung ausgesprochen, jeweils die Standardisierung der Bestimmungsmethodik voranzutreiben, und im Nachgang Maximalwerte als Kriterien festzulegen.

Product Carbon Footprint

Mit der Verkehrswende hin zur Elektromobilität gewinnen die Treibhausgasemissionen in anderen Fahrzeuglebenszyklusphasen neben denen der Nutzungsphase zunehmend an Relevanz. Für die Begrenzung der Emissionen von batterieelektrischen Fahrzeugen ist deshalb ein Kriterium notwendig, das die Herstellungsphase berücksichtigt. Hier bietet sich der CO_2-Fußabdruck oder Product Carbon Footprint (PCF) an. Die Standardisierung der Bestimmungsmethodik ist hierfür allerdings noch im Gange, so dass konkrete Werte erst in nahegelegener Zukunft festgelegt werden können.

Rohstoffindex

Durch die Beschränkung der Fahrzeugmaße statt des Gewichts werden zwar Fehanreize zum Leichtbau vermieden, verschiedene Aspekte neben der reinen Materialmenge, wie beispielsweise die Unterscheidung zwischen Primär- und Sekundärrohstoffen, den Herstellungsprozess und weitere spezifische Umweltwirkungen werden damit jedoch nicht berücksichtigt. Das ideale Kriterium für den Rohstoffverbrauch eines Fahrzeugs ist demnach ein Rohstoffindex, in dem diese Aspekte einzeln berücksichtigt und gewichtet werden.
Da für diese Art von Index keine (international) standardisierte Methodik vorliegt, wird als Ergebnis von AutoRess eine weitere wissenschaftliche Auseinandersetzung mit dem Thema sowie eine Erarbeitung eines solchen Standards vorgeschlagen.

3.4 Nutzungsprofile

Zur Festlegung der Maximalwerte für die verschiedenen Kriterien wurden zunächst verschiedene Nutzungsprofile definiert, um die unterschiedlichen Nutzeransprüche an PKW widerzuspiegeln. Diese spezifizieren jeweils, wie viele Personen und Gepäck im hauptsächlichen Nutzungsfall transportiert werden, und ob das Fahrzeug eher auf Kurz- oder Langstrecken genutzt wird. Die sich daraus ergebenden Nutzungsprofile und ihre Minimalanforderung an Platzangebot und Reichweite finden sich in Tabelle 2.

Für bereits quantifizierbare Kriterien wie Fahrzeuggröße, Batteriekapazität und Energieverbrauch wurden für die verschiedenen Nutzungsprofile Maximalwerte vorgeschlagen (vgl. Tabelle 3). Hierfür wurden die Werte für ca. 400 bereits auf dem Markt erhältliche Elektroautos analysiert und Wertvorschläge anhand der in das jeweilige Nutzungsprofil einzuordnenden Modelle gemacht.

Tabelle 11: Festgelegte Nutzungsprofile und ihre Anforderungen

Nutzungsprofil10	Hauptnutzung	Sitze	Reichweite	Transportkapazität
Stadt (2)	Stadtverkehr (bis 50 kmh)	2	200 km	0
Familie (5)	Stadtverkehr, Landstraße, Autobahn	5	500 km	ca. 600 l
Transport (9)	Stadtverkehr, Landstraße, Autobahn	bis 9	500 km	ca. 1500 l

3.5 Anwendungsmöglichkeiten für Kriterien

Zur Implementierung der vorgeschlagenen Kriterien für ressourcenschonende Fahrzeuge gibt es verschiedene Ansatzpunkte. Zum einen sollten zentrale Kriterien als Mindestanforderungen für alle zukünftig zugelassenen Elektrofahrzeuge gelten, zum anderen können an bestimmte Teilmengen an Fahrzeugen auch strengere Kriterien gestellt werden, z. B. um ein anspruchsvolles Umweltlabel tragen zu können. In Tabelle 3 sind die vorgeschlagenen Werte für Fahrzeug- und Batteriegröße sowie Energieverbrauch für die verschiedenen denkbaren Anspruchsniveaus zusammengefasst. Der Zeitrahmen, in dem die jeweiligen Kriterien eingeführt werden, hängt dabei stark von den jeweiligen zugehörigen Maßnahmen ab.

Anspruchsniveau 1: Basisanforderungen für möglichst viele zukünftig zugelassenen Elektrofahrzeuge

Der größte Hebel ergibt sich aus den vorgeschlagenen Kriterien, wenn sie für möglichst viele der zukünftig in Deutschland zugelassenen Fahrzeuge gelten. Hierfür gibt es verschiedene (gesetzliche) Verankerungsmöglichkeiten, die für die Integration verschiedener Kriterien unterschiedlich gut geeignet sind. Da auf die Kaufentscheidung von Privatkunden kein bindender Einfluss geübt werden kann, setzen die Verankerungsmöglichkeiten hier eher auf der Angebotsseite an oder geben Käufern Anreize für die Entscheidung für ressourcenschonendere Fahrzeuge. Für die Nutzungsprofilspezifischen Kriterien wäre beispielsweise eine unterschiedlich hohe Besteuerung oder eine **Ökomodulation** von in einer Organisation für Herstellerverantwortung zu zahlenden Beiträgen, wie z. B. im Vorschlag für die neue EU-Altfahrzeugverordnung (Europäische Kommission 2023) angelegt, denkbar. Kriterien wie Rezyklateinsatzquoten und PCF, die eine standardisierte Berechnungsmethodik benötigen und bindend für jedes zukünftig auf dem Markt gebrachte Fahrzeug gelten sollen, können direkt in den entsprechenden Verordnungen zu Fahrzeugzulassung verankert werden.

Anspruchsniveau 2: Anspruchsvoll. Beispiel: Bevorzugte öffentliche Beschaffung

Die Beschaffung von Fahrzeugen für öffentliche Institutionen stellt einen nicht unerheblichen Marktanteil dar, dessen Vorteil ist, dass neben der Angebotsseite auch auf die Kaufentscheidung aktiv Einfluss genommen wird. Die umweltfreundliche öffentliche Beschaffung in Deutschland ist bereits in §45 des Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG 2012) sowie in der Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zur Beschaffung klimafreundlicher Leistungen (AVV Klima 2021) adressiert. Zusätzlich werden im Gesetz und der Verwaltungsvorschrift zur Beschaffung sauberer Fahrzeuge (AVV Saubere Fahrzeuge 2022; KrWG 2021) Spezifikationen für Fahrzeuge festgelegt. Diese beziehen sich momentan jeweils ausschließlich auf Abgasemissionen. In einer zukünftigen Fassung könnten hier zusätzlich die im vorherigen Abschnitt vorgeschlagenen und

[10] Die Nutzungsprofile werden jeweils mit der Hauptnutzungsart sowie der maximalen Anzahl an Fahrgästen in Klammern bezeichnet.

in Tabelle 12 in der Spalte „öffentliche Beschaffung“ spezifizierten Kriterien zur Ressourcenschonung integriert werden. Die Nachweisführung kann dabei wir folgt gestaltet werden:

- Länge/ Breite gemäß Zulassungsbescheinigung Teil I, Felder (18) „Länge in mm“ und (19) „Breite in mm“
- Batteriekapazität: Batteriepass gemäß (Europäisches Parlament, Europäischer Rat 2023)
- Energieverbrauch: Herstellerangabe lauf WLTP[11]-Protokoll

Zusätzlich spielt hier die Anschaffung nach dem minimalen Bedarf eine wichtige Rolle. Hier gibt es bereits erste Tools zur Bedarfsermittlung[12] deren Ausbau und Nutzung weiter ausgebaut werden könnten.

Anspruchsniveau 3: Besonders anspruchsvoll: Umweltzeichen für besonders ressourcenschonende Fahrzeuge

Zur Auszeichnung von Fahrzeugen, die durch eine besondere Ressourceneffizienz und Treibhausgas-Reduktion hervorstechen, wäre die Einführung eines entsprechenden **Umweltlabels** angebracht. Eine Möglichkeit dafür wäre eine Neueinführung des vom Bundesministerium für Umwelt, Klimaschutz, Naturschutz und nukleare Sicherheit und dem Umweltbundesamt vergebene **„Blauen Engel“** (Blauer Engel 2025) speziell für Pkw**,** der die im vorherigen Abschnitt genannten und in Tabelle 12 unter der Spalte „Umweltzeichen“ spezifizierten Kriterien. Da dieser ein ambitioniertes Umweltzeichen darstellt und die ausgezeichneten Produkte wegweisend für die zukünftige Entwicklung sein sollten, wurden die Wertvorschläge hierfür an den besten Fällen der heute auf dem Markt verfügbaren Fahrzeuge orientiert. Auch für die weiteren Kriterien wie Rezyklateinsatzquoten und Product Carbon Footprint können hier ambitionierte Werte angesetzt werden.

Tabelle 12: Vorgeschlagene Maximalwerte für die Kriterien Größe, Batteriekapazität und Energieverbrauch für die verschiedenen Nutzungsprofile und Ambitionsniveaus eines ressourcenschonenden Fahrzeugs

Ambitionsniveau	Basisanforderungen			Öffentliche Beschaffung			Umweltzeichen		
Nutzungsprofil	1 Stadt	2 Familie	3 Gepäck	1 Stadt	2 Familie	3 Gepäck	1 Stadt	2 Familie	3 Gepäck
Länge/Breite [mm]	3700 x 1650	4740 x 1930	5200 x 2200	2740 x 1480	4650 x 1900	5000 x 1980	2390 x 1320	4500 x 1850	4980 x 1920
Batteriekapazität [kWh]	22	88	130	18	70	100	12	65	95
Energieverbrauch [Wh/km]	110	17	260	90	140	200	60	130	190

[11] Worldwide harmonised light vehicles test procedure

[12] z. B. https://www.nachhaltige-oeffentliche-pkw-beschaffung.de/

Einhaltung der Kriterien durch momentan auf dem Markt verfügbare Fahrzeuge

Die zentralen Kriterien Fahrzeuggröße, Batteriekapazität und Energieverbrauch sind bereits heute einfach zu ermitteln und nachzuweisen und werden für jedes Fahrzeug auf dem Markt vom Hersteller zur Verfügung gestellt.

Nutzungsprofil Stadt (2) (2 Sitzplätze für Fahrten im urbanen Umfeld) ist innerhalb der Fahrzeugklasse M1 quasi nicht vertreten. Fast sämtliche auf dem Markt befindliche Fahrzeuge haben 4 Sitzplätze und sind damit größer als die hier vorgeschlagenen Maximalwerte.

In den Fahrzeugklassen L7e und L6e (elektrische Leichtmobilität) zeigt sich jedoch deutlich, dass sich bei Verzicht auf nicht genutzte Sitz- und Transportkapazitäten sowie bestimmte Komfortausstattung weiter Platz einsparen lässt. Die hier untersuchten Modelle genügen alle den Minimalanforderungen an Nutzungsprofil 1. Die Einhaltung der Kriterien zu Batteriegröße und Energieverbrauch verhält sich ähnlich. Auch hier ist jedoch davon auszugehen, dass mit Reduktion der Fahrzeuggröße ein geringerer Energieverbrauch und damit Batteriegröße technisch möglich ist und in diesem Fall hauptsächlich ein Mangel an Angeboten vorliegt.

Nutzungsprofil Familie (5) liegt die Fahrzeugklasse „Mittelklasse“ laut Kraftfahrtbundesamt zugrunde. Hiervon erfüllen bereits ca. 70% die Basis-Kriterien zu Batteriekapazität und Energieverbrauch, während nur etwa 30% den Mindestanforderungen an die maximale Größe gerecht werden. Zusätzlich bestehen etwa 20% der gesamten Fahrzeugflotte in Deutschland aus den Segmenten „Oberklasse“ und „SUV“, die in der Wertermittlung nicht berücksichtigt wurden, da sie keine zusätzliche Funktionalität im Gegensatz zu Nutzungsprofil 2 besitzen. Diese erfüllen die geforderten Maximalwerte in weiten Teilen nicht.

In **Nutzungsprofil Transport (9)** ist das Modellangebot an vollelektrischen Fahrzeugen bislang sehr überschaubar, weswegen die Wertspanne der existierenden Modelle hier recht eng ist. Da die Machbarkeit strengerer Kriterien hier also nicht eindeutig festgestellt werden konnte, erfüllen zunächst alle der auf dem Markt befindlichen Modelle die Basisanforderungen.

4 Maßnahmen und Instrumente

Das AutoRess-Projekt untersuchte verschiedene Maßnahmen zur Reduzierung des Rohstoffverbrauchs im Automobilsektor in Deutschland. Die folgenden Maßnahmen haben sich als wirksam erwiesen:

- Bonus-Malus-System basierend auf der Fahrzeuggröße
- Besteuerung von Firmenwagen
- Umweltbonus in der Kfz-Versicherung
- EPR-System zur Finanzierung der ordnungsgemäßen Behandlung von Altfahrzeugen
- Gesetzliche lebenslange Garantie für das gesamte Fahrzeug auf der Grundlage realistisch erreichbarer Lebensdauern
- Verpflichtung zur Bereitstellung detaillierter Anweisungen zum Austausch und Ausbau von Teilen und Komponenten
- Rezyklateinsatzquote für Stahl

Auf der Grundlage der Ergebnisse des Modells und der entwickelten Kriterien für ein ressourceneffizientes Fahrzeug wurden die zur Umsetzung dieser Ziele erforderlichen Maßnahmen und Instrumente abgeleitet und entwickelt. Diese Maßnahmen wurden nach bestimmten Kriterien wie dem aktuellen Stand der Umsetzung der Maßnahme, der Lebenszyklusphase, den betroffenen Interessengruppen, dem Wirkungsmechanismus, dem Zeithorizont, der geografischen Ebene der Maßnahme und dem Umfang der Verpflichtung klassifiziert, bewertet und priorisiert. Die folgenden Maßnahmen wurden priorisiert.

4.1 Bonus-Malus-System: Fahrzeugabmessungen

Beschreibung

In einem **Bonus-Malus-System auf Basis der Fahrzeugabmessungen** erhalten Käufer eines kleineren Autos einen Bonus, während beim Kauf eines Autos mit größeren Abmessungen ein Malus zu zahlen ist, der mit zunehmender Größe ebenfalls steigt. Ein Bonus kann in Form einer Kaufprämie gewährt werden, während ein Malus entweder aus einer einmaligen Zahlung beim Kauf eines Neuwagens oder aus höheren jährlichen Kosten für die Kfz-Steuer bestehen kann. Einmalige Zahlungen beim Autokauf haben eine größere Wirkung als jährliche Kfz-Steuern.

Die vorgeschlagenen Werte für den Bonus liegen bei weniger als 2,39 m Länge und 1,32 m Breite für ein batterieelektrisches Fahrzeug für den Stadtverkehr und bei weniger als 4,5 m Länge und weniger als 1,85 m Breite für eine Familie mit Gepäck für den Überlandverkehr.

- Maßnahmenebene: Deutschland
- Zeitrahmen: kurz (bis zu 5 Jahre)
- Betroffene Interessengruppen: Autokäufer
- Wirksamkeit: mittel
- Durchführbarkeit: hoch

Welche Beispiele für ähnliche Maßnahmen gibt es bereits in anderen Ländern?

Ein Bonus-Malus-System auf Basis der CO_2-Emissionen wurde bereits in mehreren europäischen Ländern eingeführt, allerdings mit unterschiedlichen Ansätzen, z. B. in Frankreich, den Niederlanden, Portugal und Schweden. (Blanck&Zimmer 2021)

Ein Bonus-Malus-System auf der Grundlage des Fahrzeuggewichts wurde in Frankreich bereits eingeführt (Bensalah 2025).

Wie effektiv steuert es den Klima- und Ressourcenschutz?

Eine Studie des Umweltbundesamtes hat gezeigt, wie Bonus-Malus-Systeme auf Basis $_{der}$ CO_2-Emissionen in den Niederlanden und Frankreich zu einer signifikanten ökologischen Lenkungswirkung bei Neuzulassungen geführt haben (Blanck et al. 2020, S. 33-43). Ein direkter Zusammenhang zwischen den durchschnittlichen CO_2-Emissionen pro Kilometer und der Emissionsabhängigkeit der Kfz-Steuer wurde auch für die anderen Mitgliedstaaten der Europäischen Union nachgewiesen (Blanck et al. 2020, S. 43-44).

Welche wirtschaftlichen und administrativen Kosten und Aufwendungen sind mit der Einführung verbunden?

Für den öffentlichen Sektor entstehen erhebliche Kosten für die Kaufprämien. Mit einem entsprechenden Malus kann die Kaufprämie vollständig finanziert werden.

Wie sieht die mögliche Verankerung in bestehenden oder möglichen Rechtsakten/Normen/Initiativen usw. aus?

In Deutschland ist die Kfz-Steuer im Kraftfahrzeugsteuergesetz (KraftStG) geregelt. Auch hier könnte das Bonus-Malus-System umgesetzt werden.

Wie sieht die praktische Durchführbarkeit der Maßnahme aus, einschließlich möglicher bestehender Hindernisse?

Vorteile:

Hohes Potenzial zur Reduzierung des Ressourcenverbrauchs und der O_2-Emissionen

Signifikanter ökologischer Lenkungseffekt bei Neuzulassungen

Auf nationaler Ebene umsetzbar

Kurzfristig umsetzbar

Nachteile/Hindernisse:

Laut Aussagen von Automobilherstellern ist die Gewinnspanne für kleinere Autos zwischen Verkaufspreis und Kosten für Konzeption, Design und Produktion deutlich geringer als bei Mittelklassewagen.

Da Haushalte mit höherem Einkommen in der Regel einen höheren Motorisierungsgrad und eine höhere individuelle Fahrleistung aufweisen, profitieren sie stärker von niedrigen Steuerbelastungen, Subventionen und staatlichen Vergünstigungen im Bereich des Pkw-Verkehrs.

Die Hälfte der Kaufprämie für Elektrofahrzeuge wird aus dem Bundeshaushalt finanziert. Allerdings profitieren davon vor allem einkommensstarke Gruppen, und es ist mit Mitnahmeeffekten zu rechnen.

4.2 Verpflichtung der Mitgliedstaaten zur Einrichtung kollektiver oder individueller EPR-Systeme

Der vorliegende Bericht befasst sich mit verschiedenen Themenbereichen und analysiert deren aktuellen Stand sowie die für umweltfreundlichere Lösungen erforderlichen zukünftigen Entwicklungen. So ist beispielsweise die Gestaltung im Sinne der Kreislaufwirtschaft eine Investition in die ferne Zukunft. Dies wirft die allgemeine Frage auf, wer die Kosten für die Ermöglichung der Kreislaufwirtschaft tragen soll. Diese Kosten sollten nicht nur von Entsorgungs- und Recyclingunternehmen getragen werden. Die erweiterte Herstellerverantwortung der EU ist daher ein wichtiges Instrument, um die Recyclingkosten von vornherein zu berücksichtigen und sicherzustellen, dass Altfahrzeuge in den Kreislauf zurückgeführt werden. Durch geeignete politische Maßnahmen kann sichergestellt werden, dass sich diese Investitionen langfristig auszahlen.

Beschreibung

Im Juli 2023 veröffentlichte die Europäische Kommission den Vorschlag für eine ELV-Verordnung (Europäische Kommission 2023a). Dieses Dokument enthielt eine Bestimmung zur Schaffung von Systemen der erweiterten Herstellerverantwortung (Extended Producer Responsibility, EPR) im Automobilsektor. Die diesbezüglichen Bestimmungen (hauptsächlich Abschnitt 2, Kapitel IV) wurden im Zuge der Fertigstellung des Rechtsdokuments geändert.

Am 3. Juli 2025 legten der Umweltausschuss und der Binnenmarktausschuss des Europäischen Parlaments endgültige Kompromissänderungsanträge zu dem Vorschlag vor (Europäisches Parlament et al. 2025) . Gemäß diesem Dokument sind Fahrzeughersteller finanziell und organisatorisch für die von ihnen in Verkehr gebrachten Fahrzeuge verantwortlich, sobald diese das Ende ihrer Lebensdauer erreicht haben. Diese Verantwortung verpflichtet die Hersteller, dafür zu sorgen, dass die Fahrzeuge gemäß den Standards der Verordnung gesammelt und behandelt werden und dass die Abfallentsorgungsunternehmen die Wiederverwendungs- und Recyclingziele erfüllen. Die Hersteller können diese Verpflichtungen einzeln oder gemeinsam über eine gemeinnützige Organisation für Herstellerverantwortung (PRO) erfüllen. Die von den Herstellern gezahlten finanziellen Beiträge müssen die Nettokosten für die Sammlung, Behandlung, Sensibilisierungskampagnen, Datenberichterstattung und den Transport zur nächstgelegenen Anlage decken. Bei kollektiven Systemen werden diese Gebühren anhand von Kriterien wie der Recyclingfähigkeit, dem Gewicht und der Verwendung von recycelten Inhaltsstoffen des Fahrzeugs moduliert, um Anreize für kreislauffähiges Design zu schaffen. Das System führt auch Regeln für die grenzüberschreitende EPR ein, die sicherstellen, dass die Hersteller die Abfallentsorgungskosten auch dann übernehmen, wenn ein Fahrzeug in einem anderen Mitgliedstaat als dem, in dem es erstmals zugelassen wurde, zu einem Altfahrzeug wird.

- Maßnahmenebene: Europäische Union
- Zeitrahmen: mittel (5 bis 10 Jahre)
- Betroffene Interessengruppen: Automobilhersteller
- Wirksamkeit: hoch

Wie wirksam trägt sie zum Klima- und Ressourcenschutz bei?

Das vorgeschlagene EPR-System für den Automobilsektor soll den Klima- und Ressourcenschutz fördern, indem es die Hersteller finanziell für die Sammlung und Behandlung ihrer Altfahrzeuge verantwortlich macht und sich damit auch an das „Verursacherprinzip“ anlehnt (Europäische Kommission 2023a) . Diese finanzielle Haftung schafft einen wirtschaftlichen Anreiz für

Hersteller, Fahrzeuge zu konstruieren, die leichter zu zerlegen und zu recyceln sind, wodurch von vornherein Ressourcen geschont werden. Das System verstärkt diesen Anreiz zusätzlich durch die Modulation der Herstellergebühren, die auf der Grundlage von Kreislaufkriterien wie der Recyclingquote des Fahrzeugs und dem Anteil der in seiner Konstruktion verwendeten recycelten Materialien angepasst werden (Europäische Kommission 2023a) . Durch die Finanzierung einer umfassenden Sammlung und einer hochwertigeren Behandlung soll das EPR-System sicherstellen, dass wertvollere Materialien, einschließlich kritischer Rohstoffe, zurückgewonnen und in der EU-Wirtschaft verbleiben, wodurch Abfall und die mit der Herstellung von Neuware verbundenen Treibhausgasemissionen reduziert werden. Letztendlich fördert dieses System einen stabilen Markt für Sekundärrohstoffe, verringert die Abhängigkeit der EU von der Gewinnung primärer Ressourcen und unterstützt den Übergang der Industrie zu einem nachhaltigeren Kreislaufmodell. Das EPR-System zielt auch darauf ab, die Zahl der „vermissten Fahrzeuge" zu verringern, indem die Sammlung verbessert und sichergestellt wird, dass sie innerhalb der EU behandelt werden, wodurch mehr Recyclingmaterialien innerhalb der EU verfügbar sind (Baron et al. 2023) .

Welche wirtschaftlichen und administrativen Kosten und Anstrengungen sind mit der Einführung verbunden?

Die Einführung und Umsetzung des vorgeschlagenen EPR-Systems wird sowohl für die Adressaten (in erster Linie Fahrzeughersteller und ihre Verantwortungsorganisationen) als auch für die Verwaltung (Behörden der Mitgliedstaaten und EU-Organe) erhebliche wirtschaftliche und administrative Kosten und Aufwendungen mit sich bringen. Das System soll die finanzielle und organisatorische Verantwortung für die Entsorgung von Altfahrzeugen gemäß dem Verursacherprinzip auf die Hersteller übertragen (Europäische Kommission 2023a).

Für die Hersteller bedeutet dies, dass sie die Nettofinanzierungskosten für die Sammlung und Behandlung tragen, Aufklärungskampagnen finanzieren und die Kosten für die Datenberichterstattung übernehmen müssen. Zusätzlich zu diesen finanziellen Aufwendungen sehen sich die Hersteller mit einem erheblichen Verwaltungsaufwand konfrontiert, darunter die Registrierung in jedem Mitgliedstaat, in dem sie Fahrzeuge verkaufen, die Einholung von Genehmigungen für ihre EPR-Systeme und die Verwaltung umfangreicher Berichts- und Selbstkontrollmechanismen zur Sicherstellung der Einhaltung der Vorschriften. (Baron et al. 2023; Europäische Kommission 2023b)

Die Europäische Kommission hat in ihren Begleitdokumenten zum Vorschlag für eine Altfahrzeugverordnung die mit der ausgewählten bevorzugten Option verbundenen Kosten bewertet. Diese Option umfasst unter anderem finanzielle und organisatorische Anreize durch die Festlegung von EPR-Anforderungen, um die Sammlung von Altfahrzeugen zu erhöhen und die Kosten für die Verbesserung der Behandlungsqualität zu kompensieren, die nicht durch den Wert der zurückgewonnenen Materialien und Bauteile ausgeglichen werden können. Weitere Maßnahmen sind Recyclingziele für Kunststoffe und die Einführung eines digitalen Produktpasses (DPP) für Fahrzeuge. Als kumulatives Ergebnis der Kosten aller in der bevorzugten Option enthaltenen Maßnahmen fallen für die Behörden der Mitgliedstaaten in erster Linie Kosten für die Überwachung und Durchsetzung an, die auf weniger als 2 EUR pro Fahrzeug geschätzt werden. Hinzu kommen der Verwaltungsaufwand für die Einrichtung und Pflege nationaler Herstellerregister, die Verwaltung der Genehmigungsverfahren für Hersteller und ihre Organisationen (PROs) sowie die Schaffung eines robusten Überwachungs- und Durchsetzungsrahmens, einschließlich regelmäßiger Inspektionen und der Festlegung von Sanktionen für Verstöße. Der Europäischen Kommission entstehen außerdem Kosten für zusätzliches Personal und technische Arbeiten, die für die Ausarbeitung zahlreicher Durchführungsrechtsakte erforderlich sind, in denen die Einzelheiten der EPR-Regelung

festgelegt werden, beispielsweise für die Gebührenmodulation und die grenzüberschreitende Zusammenarbeit. (Europäische Kommission 2023a)

Die dem Vorschlag beigefügte Folgenabschätzung schätzt, dass sich die Gesamtkosten des bevorzugten Maßnahmenpakets auf 66 EUR pro Fahrzeug belaufen werden, das 2035 auf den Markt gebracht wird, wobei schätzungsweise 39 EUR pro Fahrzeug über höhere Preise und niedrigere Preise (um 12 EUR pro Fahrzeug) beim Verkauf von Gebrauchtwagen aufgrund des Rückgangs der Exporte an die Verbraucher weitergegeben werden. Umgekehrt dürften Maßnahmen zur Förderung der Rückgewinnung und des Verkaufs von gebrauchten Ersatzteilen zu niedrigeren Kaufpreisen und günstigeren Reparatur- und Wartungskosten für die Verbraucher führen, was einen Vorteil darstellt. (Europäische Kommission 2023a)

Ein EPR-System soll den Automobilrecyclingsektor unterstützen, indem es KMU dabei hilft, die Kosten für die Einführung neuer Technologien durch höhere Sammelquoten und eine verbesserte Behandlungsqualität auszugleichen. Dies fördert wiederum Innovationen, schafft Arbeitsplätze und eröffnet neue Möglichkeiten innerhalb der Branche.

Wie sieht die praktische Durchführbarkeit der Maßnahme aus, einschließlich möglicher bestehender Hindernisse?

Vorteile:

Finanzieller Anreiz: Die Hersteller werden für die Nettokosten der Altfahrzeugverwertung verantwortlich gemacht, was sie motiviert, besser recycelbare Fahrzeuge zu konstruieren.

Gebührenmodulation: Die Gebühren werden auf der Grundlage der Recyclingfähigkeit und der Verwendung von recycelten Inhaltsstoffen angepasst, wodurch zirkuläres Design direkt belohnt wird.

Harmonisierte Umsetzung: Eine einheitliche Regelung für die gesamte EU vereinfacht die Einhaltung der Vorschriften und gewährleistet gleiche Wettbewerbsbedingungen.

Grenzüberschreitender Mechanismus: Er stellt sicher, dass die Hersteller die Kosten für die Abfallentsorgung auch dann tragen, wenn Fahrzeuge in andere EU-Länder exportiert werden.

Nachteile/Hindernisse:

Bedenken der Industrie: Einige Hersteller wehren sich gegen die erhöhte finanzielle Belastung, und die Abfallwirtschaft ist besorgt über steigende Behandlungskosten.

Governance: KMU im Demontagebereich befürchten, dass herstellergeführte PROs ihre Unabhängigkeit einschränken und unlauteren Wettbewerb schaffen könnten.

Komplexität: Die grenzüberschreitende Umsetzung erfordert einen komplexen Datenaustausch und eine komplexe Zusammenarbeit.

„Fehlende Fahrzeuge“: Das System wird durch die große Zahl illegal zerlegter oder exportierter Fahrzeuge untergraben, ein Problem, das mit dem EPR-System allein nicht gelöst werden kann.

Verwaltungsaufwand: Die Einrichtung des neuen Systems wird sowohl für die Hersteller als auch für die Behörden einen erheblichen Verwaltungsaufwand mit sich bringen.

Die vorgeschlagene Verordnung zielt darauf ab, diese Hindernisse zu überwinden, indem sie

eine faire Vertretung der Abfallentsorgungsunternehmen in den PROs sicherzustellen

die Kommission zu ermächtigen, detaillierte Vorschriften für die Gebührenmodulation und die grenzüberschreitende Zusammenarbeit zu erlassen.

die EPR-Regelung mit verbesserten Rückverfolgbarkeitsmaßnahmen wie elektronischen Verwertungsnachweisen (Certificates of Destruction, CoDs) zu integrieren, um das Problem der „vermissten Fahrzeuge“ zu bekämpfen

Förderung des Einsatzes digitaler Instrumente zur Steigerung der Effizienz und Senkung der Verwaltungskosten.

4.3 Gesetzliche lebenslange Garantie für das gesamte Fahrzeug

Beschreibung

Die Maßnahme zur Verlängerung der Garantie besteht aus mehreren Teilen: einer Garantie für das gesamte Fahrzeug, für Batterien, für Ersatzteile und für Software-Updates:

Mindestlebensdauergarantie für Fahrzeuge: Einführung einer gesetzlichen lebenslangen Garantie für das gesamte Fahrzeug auf der Grundlage realistisch erreichbarer Lebensdauern; vorgeschlagen wird eine Garantie von 20 Jahren. Verschleißteile sind davon ausgenommen.

Mindestlebensdauergarantie für Batterien: Es wird eine verbindliche Mindestgarantie für Batterien von 60 % nach 300.000 km oder 20 Jahren festgelegt. Derzeit gibt es keine gesetzlichen Verpflichtungen für weitere Anreize für lange Garantiezeiten für Batterien, mit Ausnahme der allgemeinen 2-jährigen Produktgarantie und der Anforderungen für Traktionsbatterien für M1- und N1-Fahrzeuge in der Euro-7-Verordnung (Anhang II: 5 Jahre und 100.000 km) sowie freiwilliger Herstellergarantien (z. B. 160.000 Kilometer, 8 Jahre). Die DUH hat eine gesetzlich garantierte Mindestlebensdauer von 15 Jahren oder eine Laufleistung von 300.000 km vorgeschlagen. (Deutsche Umwelthilfe 2024)

Mindestlebensdauergarantie für Ersatzteile: Es wird eine obligatorische Mindestgarantie von zwei Jahren für Ersatzteile eingeführt. Diese Maßnahme ist Teil des Vorschlags für eine neue Altfahrzeugverordnung, den die EU-Kommission am 13. Juli 2023 vorgelegt hat.

Garantie für Software-Updates: Fahrzeughersteller werden verpflichtet, über einen längeren Zeitraum Software-Updates bereitzustellen. Diese müssen für die gesamte Lebensdauer des Fahrzeugs, d. h. für 20 Jahre, garantiert werden. Die DUH hat eine 15-jährige Garantie für Software-Updates vorgeschlagen (Deutsche Umwelthilfe 2024) .

- Handlungsniveau: Europäische Union
- Zeitrahmen: mittel (5 bis 10 Jahre)
- Betroffene Interessengruppen: Automobilhersteller
- Wirksamkeit: hoch
- Durchführbarkeit: gering

Wie wirksam trägt sie zum Klima- und Ressourcenschutz bei?

Langlebigkeit ist eine der wirksamsten Maßnahmen zur Verringerung des Ressourcenverbrauchs und der Treibhausgasemissionen im Automobilverkehr, da sie sich direkt auf die Zahl der neu auf den Markt gebrachten Fahrzeuge auswirkt.

Welche wirtschaftlichen und administrativen Kosten und Aufwendungen sind mit der Einführung verbunden?

Behörden: Inspektion und Kontrolle, Datenverwaltung

Industrie: Entwurf und Entwicklung neuer Technologien

Welche Verankerung in bestehenden oder möglichen Rechtsakten/Normen/Initiativen usw. ist möglich?

Eine obligatorische Garantie sollte in der europäischen ELV-Verordnung festgelegt werden.

EU-Richtlinie über den Verkauf von Waren (Richtlinie 2019/771): Diese Richtlinie legt eine gesetzliche Mindestgarantie von zwei Jahren für alle in der EU verkauften Waren fest. Dies ist ein grundlegendes Verbraucherschutzgesetz, und jede neue, längere Garantiezeit müsste auf diesem bestehenden Rahmen aufbauen. Es enthält auch den Grundsatz der „Konformität" von Waren, den eine 20-jährige Garantie radikal erweitern würde.

In Deutschland haftet der Hersteller nach dem Produkthaftungsgesetz für Schäden, die durch seine fehlerhaften Produkte verursacht werden. Eine gesetzliche 20-jährige Garantie würde effektiv eine neue, strengere Definition von „Fehlerhaftigkeit" schaffen, wonach ein Produkt als fehlerhaft gilt, wenn es die versprochene Lebensdauer nicht erfüllt.

Diese Verordnung legt Anforderungen an die Haltbarkeit von Batterien für Fahrzeuge der Klassen M1 und N1 fest. Der Vorschlag der DUH kann als direkte Herausforderung an die als viel zu niedrig und unzureichend angesehene Gewährleistungsfrist angesehen werden. Die eigenen Folgenabschätzungen der EU-Kommission für Euro 7 erkennen die Notwendigkeit einer langen Lebensdauer der Batterien an, gehen jedoch nicht so weit wie der Vorschlag der DUH.

Wie sieht die praktische Durchführbarkeit der Maßnahme aus, einschließlich möglicher bestehender Hindernisse?

Vorteile:

Hohes Potenzial zur Reduzierung des Ressourcenverbrauchs und der CO_2-Emissionen: Eine 20-jährige Garantie würde die Hersteller dazu zwingen, Fahrzeuge zu konstruieren und zu bauen, die weitaus langlebiger und zuverlässiger sind. Dies würde die Zahl der produzierten Neuwagen drastisch reduzieren und zu einem erheblichen Rückgang der Rohstoffgewinnung, des Energieverbrauchs in der Fertigung und der damit verbundenen Emissionen führen.

Erheblicher ökologischer Lenkungseffekt auf Neuzulassungen

Mit einer langfristigen Garantie würden Verbraucher ihre Fahrzeuge viel eher reparieren lassen, anstatt sie gegen ein neues Modell auszutauschen.

Der Fokus auf Reparaturen würde einen robusteren Markt für Ersatzteile und unabhängige Reparaturdienstleistungen schaffen, den Wettbewerb fördern und möglicherweise die Kosten senken.

Eine langlebige Batterie wird nach ihrer Lebensdauer im Automobilbereich eher wiederverwendet oder für andere Anwendungen (z. B. in der Energiespeicherung) umfunktioniert, was zu einer Kreislaufwirtschaft beiträgt.

Eine Mindestgarantie (2 Jahre) auf Ersatzteile ist ein Eckpfeiler des Rechts auf Reparatur. Sie gibt Verbrauchern und unabhängigen Reparaturwerkstätten die Sicherheit, dass ein neues Teil für einen angemessenen Zeitraum einwandfrei funktioniert.

Eine langfristige Software-Garantie würde sicherstellen, dass Fahrzeuge wichtige Sicherheitspatches und Fehlerbehebungen erhalten, die vor Hackerangriffen und Funktionsausfällen schützen. Dies ist eine entscheidende Frage der öffentlichen Sicherheit.

Nachteile/Hindernisse:

Längere Nutzungszeiten können technologische Innovationen hin zu umweltfreundlicheren Technologien verzögern.

Mittelfristig realisierbar

Wie wird die Garantie erfüllt, wenn ein Lieferant insolvent wird?

Das finanzielle Risiko für OEMs, potenzielle Ausfälle über einen so langen Zeitraum abzudecken, wäre immens und würde zu einem massiven Anstieg der Fahrzeugpreise führen, um das Risiko auszugleichen.

Die Kosten für den Austausch einer Batterie belaufen sich derzeit auf mehrere Tausend Euro. Eine 20-jährige Garantie stellt für die Hersteller eine massive finanzielle Belastung dar. Dies würde sich in einem höheren Anschaffungspreis für Elektrofahrzeuge niederschlagen.

Fahrzeuge werden immer komplexer, und die Bereitstellung kontinuierlicher Software-Updates für eine Vielzahl von Hardwarekonfigurationen über einen Zeitraum von 15 bis 20 Jahren ist eine enorme technische Herausforderung.

4.4 Besteuerung von Firmenwagen

Beschreibung

Schätzungsweise 20 bis 25 % der neu zugelassenen Autos in Deutschland sind Firmenwagen, die auch privat genutzt werden (Blanck&Zimmer 2021). Der Grund für die Attraktivität des Autos als Gehaltsbestandteil ist die geringe Besteuerung: Für Arbeitnehmer kann der steuerpflichtige geldwerte Vorteil deutlich günstiger sein als die Kosten für ein privat gekauftes Auto (im Durchschnitt nur 40 % des tatsächlichen Vorteils). Unternehmen können den Kauf von Autos für geschäftliche Zwecke ohne Höchstpreisgrenze und unabhängig von den $CO_{(2)}$-Emissionen der Fahrzeuge als Betriebsausgaben absetzen.

Eine CO_2-Staffelung der geldwerten Vorteile im Rahmen der Dienstwagenbesteuerung kann einen Anreiz zum Kauf besonders effizienter Fahrzeuge bieten. Werden Dienstwagen jedoch durch eine CO_2-Staffelung günstiger, könnte dies ihre Attraktivität als Gehaltsbestandteil noch erhöhen und langfristig zu mehr statt zu weniger Autos führen. Die höhere Besteuerung von Firmenwagen mit Verbrennungsmotor hätte auch den Vorteil, dass die Förderung von elektrischen Firmenwagen nicht mehr von allen Steuerzahlern getragen würde, sondern nur noch von denen, die selbst einen – weniger umweltfreundlichen – Firmenwagen fahren. Für Plug-in-Hybride, die derzeit als Firmenwagen kaum Vorteile für das Klima bringen, ist eine kurzfristige Abschaffung der Steuerermäßigung eine Option.

Mittelfristig ist eine CO_2-Staffelung bei der Dienstwagenbesteuerung nicht mehr notwendig oder sinnvoll. Stattdessen sollte eine solche Differenzierung für jedes Fahrzeug gelten, unabhängig davon, ob es für den privaten oder geschäftlichen Gebrauch angeschafft wird – beispielsweise in Form einer CO_2-abhängigen Kfz-Steuer. Andernfalls würde eine zusätzliche Begünstigung emissionsarmer Firmenwagen das Risiko bergen, dass Firmenwagen weiterhin als Gehaltsbestandteil etabliert werden. Dies würde die Verkehrsverlagerung verlangsamen, zu erheblichen Steuerausfällen führen und sozial unausgewogene Verteilungen perpetuieren.

- Handlungsniveau: Deutschland
- Zeitrahmen: kurz (bis zu 5 Jahre)
- Betroffene Interessengruppen: Autokäufer
- Wirksamkeit: mittel
- Durchführbarkeit: hoch

Wie wirksam trägt sie zum Klima- und Ressourcenschutz bei?

Laut Fischer et al. 2021 erscheinen Steuervergünstigungen für BEVs im Vergleich zu anderen Antriebstechnologien mit direkten Emissionen grundsätzlich sinnvoll, um den Marktaufbau zu unterstützen. Für PHEVs sollten Steuervergünstigungen jedoch an den Anteil der elektrisch zurückgelegten Kilometer gekoppelt sein und bei einem geringen Anteil nicht gewährt werden. Der daraus resultierende Subventionierungseffekt für Elektroautos, der über die staatlichen Kaufprämien hinausgeht, sollte jedoch in Höhe und Dauer begrenzt und degressiv gestaltet sein. Nur so lassen sich unausgewogene Verteilungseffekte gegenüber denjenigen vermeiden, die keinen Firmenwagen nutzen können.

Zum Thema Sonderabschreibungen für batterieelektrische Fahrzeuge empfahl Agora Verkehrswende: „Sonderabschreibungen für klimafreundliche Investitionsgüter erzeugen einen Lenkungseffekt, der unter den aktuellen Finanzierungsbedingungen noch geringe Kosten für den Staat verursacht. Eine Sonderabschreibung im Jahr der Anschaffung, beispielsweise in Höhe von 50 Prozent der Anschaffungskosten, kann daher eine steuerlich effiziente Lösung sein, um die Umstellung auf rein batterieelektrische Fahrzeuge in Unternehmensflotten zu beschleunigen. Denkbar sind auch Lösungen, die die Abschreibungsdauer für klimakompatible Fahrzeuge für einen Übergangszeitraum verkürzen, aber den bestehenden linearen Charakter der „Abschreibung für Abnutzung“ (AfA) beibehalten. Eine Ausweitung oder Begrenzung der allgemeinen Abzugsfähigkeit von Fahrzeugkosten in Abhängigkeit von der Klimawirkung oder anderen Fahrzeugmerkmalen und damit eine Abweichung vom objektiven Netto-Prinzip des deutschen Einkommensteuerrechts könnte auf der Grundlage nicht-steuerlicher Lenkungsziele rechtlich gerechtfertigt sein.“ (Agora 2023)

Welche Beispiele für ähnliche Maßnahmen gibt es bereits in anderen Ländern?

In anderen europäischen Ländern wird für die Berechnung des geldwerten Vorteils in der Regel ein höherer Prozentsatz als in Deutschland verwendet. Die Berücksichtigung umweltrelevanter Fahrzeugmerkmale (z. B. CO_2-Emissionen, Kraftstoffverbrauch, Vorteile für Elektrofahrzeuge) für die Streuung der Berechnung ist ebenfalls weit verbreitet.

Agora Verkehrswende gibt einen Überblick darüber, wie die Besteuerung von Firmenwagen in verschiedenen europäischen Ländern gestaltet ist. Zur Begünstigung umweltfreundlicherer Fahrzeuge bei der Besteuerung von Firmenwagen wurden bereits verschiedene Optionen umgesetzt. In den meisten Ländern werden die Listenpreise der Fahrzeuge zur Berechnung der Einkommensteuerpflicht für die private Nutzung eines Firmenwagens herangezogen. Der Prozentsatz ist an verschiedene Faktoren gekoppelt, wobei je nach CO_2-Emissionen oft niedrigere Prozentsätze angewendet werden (z. B. Belgien, Großbritannien, Italien, Luxemburg, Österreich), für Elektrofahrzeuge manchmal 0 % gelten (z. B. Irland, Portugal) und in einigen Ländern die Bemessungsgrundlage, d. h. der auf Elektrofahrzeuge angewandte Listenpreis, reduziert wird (z. B. Griechenland, Irland, Norwegen) (Fischer et al. 2021: Tabelle A5. S. 85–86).

Belgien berücksichtigt beispielsweise die CO_2-Emissionen bei der Besteuerung von Firmenwagen, wobei der Steuersatz linear mit steigenden Emissionen pro Kilometer ansteigt. Der berechnete Satz wird auf den Listenpreis und einen altersabhängigen Korrekturfaktor angewendet. Arbeitnehmer haben außerdem die Möglichkeit, eine Mobilitätszulage/„Cash for Car“ oder ein Mobilitätsbudget zu beantragen. Diese beiden Alternativen sollen Anreize schaffen, den Firmenwagen aufzugeben und auf umweltfreundlichere Verkehrsmittel umzusteigen oder diese von vornherein zu nutzen. Die maximale jährliche Mobilitätszulage („Cash for Car“) bei Aufgabe eines bestehenden Firmenwagens wird nach einer Formel wie folgt berechnet.

Wie sieht die praktische Durchführbarkeit der Maßnahme aus, einschließlich möglicher bestehender Hindernisse?

Vorteile:

Mittleres Potenzial zur Reduzierung des Ressourcenverbrauchs und der O_2-Emissionen

Erheblicher ökologischer Lenkungseffekt bei Neuzulassungen

Auf nationaler Ebene umsetzbar

Kurzfristig umsetzbar

Nachteile/Hindernisse:

Das Firmenwagenprivileg sollte aus gesellschaftspolitischer Sicht kritisch betrachtet werden, da es einem kleinen, in der Regel privilegierten Teil der Bevölkerung zugute kommt. Nur Erwerbstätige profitieren davon, und selbst innerhalb dieser Gruppe korreliert die Nutzung von Firmenwagen mit dem Gehaltsniveau und damit auch mit dem Geschlecht.

4.5 Maßnahmen im Bereich Batterien: Energiedichte/Kapazität

Beschreibung

Bei dieser Maßnahme würden Mindestanforderungen für die Energiedichte und die maximale Kapazität festgelegt. Die Batterieverordnung definiert den Energieumsatz als Funktionseinheit (in der Regel wird wahrscheinlich die garantierte Lebensdauer herangezogen), was bereits einen Anreiz in diese Richtung darstellt – mit festen Grenzwerten könnte dies an Bedeutung gewinnen.

Ein einfaches und weitgehend zuverlässiges Kriterium für die Einsparung von Batteriematerialien ist die Verwendung kleinerer Batterien. Grenzwerte für das Batteriegewicht pro Auto können durch die Begrenzung der Batteriekapazität sowie durch höhere Energiedichten erreicht werden. Die maximal zulässige Batteriekapazität pro Nutzungsprofil wird daher begrenzt. Insbesondere ist dieser Ansatz gegenüber technologischen Entwicklungen robuster als beispielsweise die Beschränkung der Verwendung bestimmter Materialien. Für die Zukunft ist zu erwarten, dass die Nachfrage nach größeren Batterien mit der Verbesserung der Ladeinfrastruktur (insbesondere mit Schnellladetechnologie) tendenziell zurückgehen wird.

In Kapitel 3 werden Kriterien für ein ressourceneffizientes Fahrzeug entwickelt und beschrieben. Dort wird auch ein Vorschlag für maximale Batteriekapazitäten gegeben.

Für die drei Anwendungsfälle werden diese maximalen Batteriekapazitäten für alle neu zugelassenen Fahrzeuge empfohlen (Mindestziel):

Stadt (2 Sitze): 22 kWh

Familie (5 Sitze): 88 kWh

Transport (9 Sitze): 130 kWh

Es gibt auch einen Vorschlag für die öffentliche Beschaffung, der in den Leitlinien für die öffentliche Beschaffung umgesetzt werden sollte.

Stadt (2 Sitze): 18 kWh

Familie (5 Sitze): 70 kWh

Transport (9 Sitze): 100 kWh

Als dritte Zielvorgabe gibt es einen Vorschlag für eine Umweltkennzeichnung:

Stadt (2 Sitze): 12 kWh

Familie (5 Sitze): 65 kWh

Transport (9 Sitze): 95 kWh

- Maßnahmenebene: Europäische Union
- Zeitrahmen: mittel (5 bis 10 Jahre)
- Betroffene Interessengruppen: Batteriehersteller, Automobilhersteller
- Wirksamkeit: hoch
- Durchführbarkeit: gering

Wie wirksam trägt sie zum Klima- und Ressourcenschutz bei?

Eine Begrenzung der Batteriekapazität führt zu einer erheblichen Verringerung des Ressourcenverbrauchs und der Treibhausgasemissionen.

Welche wirtschaftlichen und administrativen Kosten und Aufwände sind mit der Einführung verbunden?

Berichterstattung über den Batteriepass (OEMs)

Kosten für Forschung und Entwicklung von Batterien mit höherer Energiedichte (OEM)

Überwachung der Einhaltung (Behörden)

Vorteile:

Hohes Potenzial zur Reduzierung des Ressourcenverbrauchs und der CO_2-Emissionen

Erheblicher ökologischer Lenkungseffekt auf Neuzulassungen

Auf nationaler Ebene umsetzbar

Kurzfristig umsetzbar

Nachteile/Hindernisse:

Bei öffentlichen Ausschreibungen könnte es schwieriger werden, Angebote zu erhalten, wenn nur wenige Fahrzeuge ausgeschrieben werden. Da Haushalte mit höherem Einkommen in der Regel einen höheren Motorisierungsgrad und eine höhere individuelle Fahrleistung aufweisen, profitieren sie stärker von niedrigen Steuerbelastungen, Subventionen und staatlichen Vergünstigungen im Bereich des Pkw-Verkehrs.

Mögliche Verankerung in bestehenden oder möglichen Rechtsakten/Normen/Initiativen usw.

Eine maximale Kapazität für alle neu zugelassenen Fahrzeuge sollte auf europäischer Ebene in der 3R-Typgenehmigungsverordnung umgesetzt werden.

Für die rechtliche Ausgestaltung der Kriterien für das öffentliche Beschaffungswesen gibt es verschiedene Optionen: Das umweltorientierte öffentliche Beschaffungswesen in Deutschland wird allgemein in den Verwaltungsvorschriften zur Beschaffung klimafreundlicher Dienstleistungen behandelt (AVV Klima 2021) . Auf Spezifikationen für Fahrzeuge wird jedoch ausdrücklich im Gesetz und in der Verwaltungsvorschrift zur Beschaffung sauberer Fahrzeuge Bezug genommen (AVV Saubere Fahrzeuge 2022; KrWG 2021) . Obwohl diese keine ressourcenschonenden Aspekte enthalten, scheinen diese Gesetze ein logischer Ort zu sein, um

solche Aspekte auf Bundesebene festzulegen. Auf EU-Ebene sind die entsprechenden grundlegenden Rechtsvorschriften die überarbeitete Richtlinie über saubere Fahrzeuge (Europäisches Parlament, Rat der Europäischen Union 2019) und die Kriterien für eine umweltorientierte öffentliche Beschaffung im Straßenverkehr (Europäische Kommission 2021) .

Im Bereich der Umweltkennzeichnung ist das vom Umweltbundesamt und vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMUKN) verliehene Umweltzeichen „Blauer Engel“ einer der möglichen Standards, an denen sich die Maßnahme orientieren könnte.

4.6 Verpflichtung zur Bereitstellung detaillierter Anweisungen zum Austausch und zur Entfernung von Teilen und Komponenten

Beschreibung

Artikel 7 des aktuellen Entwurfs der ELV-Verordnung sieht vor, dass neue Fahrzeugtypen so konstruiert sein müssen, dass ATFs die in Anhang VII Teil C der Verordnung (EU) Nr. aufgeführten Teile und Komponenten während der Abfallphase des Fahrzeugs leicht entfernen können. Diese Verpflichtung der OEMs muss von ihnen 72 Monate nach Inkrafttreten der Verordnung erfüllt sein. Damit soll der Austausch, die Wiederverwendung, das Recycling, die Wiederaufarbeitung oder die Aufarbeitung erleichtert werden, sofern dies technisch möglich ist. Dies soll den Austausch, die Wiederverwendung, das Recycling, die Wiederaufarbeitung oder die Aufarbeitung erleichtern, sofern dies technisch möglich ist. Den Herstellern ist es ausdrücklich untersagt, Software-Updates zu verwenden, um den Ausbau und Austausch von Teilen zu behindern, und sie müssen den Zugang zu den erforderlichen Software-Dokumentationen und Diagnosewerkzeugen gewährleisten. (Europäisches Parlament et al. 2025)

Artikel 11 ergänzt Artikel 7, indem er den Herstellern vorschreibt, detaillierte Anweisungen für den Ausbau und Austausch von Teilen, Bauteilen und Materialien bereitzustellen. Ab 36 Monaten nach Inkrafttreten der Verordnung müssen die Hersteller einen uneingeschränkten, standardisierten und diskriminierungsfreien Zugang zu den in Anhang V aufgeführten Informationen gewähren. Diese Informationen müssen den sicheren Zugang, den Ausbau und den Austausch bestimmter Teile ermöglichen, darunter: Batterien von Elektrofahrzeugen und deren Packs; Elektromotoren; Teile, die Flüssigkeiten enthalten, die einer Schadstoffentfrachtung bedürfen; alle Teile und Komponenten, die in Anhang VII Teil C als obligatorisch zu entfernen aufgeführt sind; Komponenten, die kritische Rohstoffe enthalten; digital codierte Komponenten, deren Codierung ihre Reparatur oder Wiederverwendung in einem anderen Fahrzeug verhindert. Die Informationen müssen Abfallentsorgungsunternehmen, Reparatur- und Wartungsunternehmen sowie Rettungsdiensten zur Verfügung gestellt werden. Die Informationen müssen kostenlos zur Verfügung gestellt werden, wobei die Hersteller jedoch angemessene und verhältnismäßige Verwaltungsgebühren für die Bereitstellung über ihre Kommunikationsplattformen erheben können. Langfristig (84 Monate nach Inkrafttreten) müssen diese Informationen in einem digitalen Kreislaufwirtschaftspass für jedes Fahrzeug enthalten sein, der kostenlos zugänglich ist. Ähnlich wie in Artikel 7 gilt diese Verpflichtung nicht für schwere Nutzfahrzeuge oder Anhänger. Für Fahrzeuge der Klasse L beschränkt sich der Anwendungsbereich auf die Bereitstellung von Informationen über den Ausbau von EV/LMT-Batterien, SLI-Batterien, Katalysatoren, Rädern und Reifen. (Europäisches Parlament et al. 2025)

- Maßnahmenebene: Europäische Union
- Zeitrahmen: mittel (5 bis 10 Jahre)
- Betroffene Interessengruppen: Automobilhersteller
- Wirksamkeit: hoch
- Durchführbarkeit: gering

Wie wirksam trägt sie zum Klima- und Ressourcenschutz bei?

Durch die Vorgabe, dass Fahrzeuge so konstruiert sein müssen, dass wichtige Komponenten wie Batterien von Elektrofahrzeugen (EV) und E-Antriebsmotoren einfach und zerstörungsfrei ausgebaut werden können, stellt die Verordnung sicher, dass diese wertvollen Teile für die Wiederverwendung, Wiederaufarbeitung, Aufarbeitung oder hochwertige Verwertung zurückgewonnen werden können. Durch detaillierte Anweisungen wird sichergestellt, dass die Betreiber von Behandlungsanlagen diese Aufgaben sicher und effizient ausführen können. Dadurch wird verhindert, dass wertvolle Materialien bei der Zerkleinerung verloren gehen oder beschädigt werden, wodurch die Ressourcenschonung maximiert wird. Indem sichergestellt wird, dass die Betreiber wissen, wie ein Teil zu entfernen ist, wo es sich befindet und was es enthält, schaffen die Maßnahmen die notwendigen Voraussetzungen für einen funktionierenden Kreislaufmarkt für Teile und Materialien. (Europäisches Parlament et al. 2025)

Die von der Kommission erstellte Folgenabschätzung enthält aggregierte Schätzungen für das gesamte bevorzugte Maßnahmenpaket, die die Maßnahmen „Design für die Demontage“ und „Informationsbereitstellung“ eindeutig mit spezifischen Umweltergebnissen verknüpfen. Das gesamte bevorzugte Maßnahmenpaket soll bis 2035 zu einer jährlichen Reduzierung von 12,3 Millionen Tonnen CO_2-Äquivalent führen. Dies ist vor allem auf die bessere Verwertung von Materialien zurückzuführen, wodurch die hohen Treibhausgasemissionen im Zusammenhang mit der Primärmaterialproduktion vermieden werden. Der monetäre Wert dieser CO_2- -Einsparungen wird für 2035 auf 2,8 Milliarden Euro jährlich geschätzt. Das Paket soll bis 2035 zu einer besseren Verwertung von 5,4 Millionen Tonnen Materialien pro Jahr führen. Dazu gehören Materialien wie Kunststoffe, Stahl, Aluminium und Kupfer. Die JRC schätzt, dass durch die obligatorische Entfernung von E-Antriebsmotoren (ermöglicht durch diese Konstruktions- und Informationsmaßnahmen) im Jahr 2035 350 Tonnen Seltenerdmaterialien aus Permanentmagneten für die Wiederverwendung und das Recycling verfügbar sein werden, eine Zahl, die bis 2040 auf 1.500 Tonnen ansteigen wird. (Europäische Kommission 2023b)

Welche wirtschaftlichen und administrativen Kosten und Anstrengungen sind mit der Einführung verbunden?

Die Verpflichtungen verlangen von den Fahrzeugherstellern Investitionen sowohl in die physische Konstruktion ihrer Fahrzeuge als auch in die Erstellung und Verbreitung detaillierter technischer Informationen, unter anderem:

Den Herstellern entstehen Kosten für die Neukonstruktion von Fahrzeugen, um die einfache und zerstörungsfreie Entfernung wichtiger Komponenten wie Batterien von Elektrofahrzeugen und E-Antriebsmotoren zu ermöglichen.

Um die Einhaltung der Vorschriften zu überprüfen, könnten die vorgeschlagenen Maßnahmen erfordern, dass OEMs vor der Typgenehmigung Demontage- und Schreddertests an Prototypenfahrzeugen durchführen. Dies würde Kosten für den Fahrzeugprototyp selbst, die

Beauftragung einer unabhängigen zugelassenen Behandlungsanlage (ATF) und eines Typgenehmigungsdienstleisters sowie die Dokumentation der Ergebnisse mit sich bringen. Eine begleitende Studie schätzt, dass die Kosten für OEMs in einem Szenario mit solchen Tests bei etwa einer halben Million Euro pro Jahr liegen könnten, wenn man davon ausgeht, dass 10 OEMs jeweils fünf Fahrzeuge pro Jahr testen. (Baron et al. 2023)

Während die Demontageinformationen selbst den Abfallentsorgungsunternehmen kostenlos zur Verfügung gestellt werden müssen, können den Herstellern Kosten für die Einrichtung und Wartung der erforderlichen Kommunikationsplattformen entstehen.

Die Hersteller müssen der Typgenehmigungsbehörde umfangreiche Unterlagen vorlegen, um die Einhaltung der Vorschriften nachzuweisen, was den Verwaltungsaufwand für das Typgenehmigungsverfahren erhöht. (Baron et al. 2023)

Auch die Verwaltung, darunter die Behörden der Mitgliedstaaten und EU-Einrichtungen wie die Europäische Kommission, wird Kosten zu tragen haben und unter anderem mit einem Implementierungsaufwand konfrontiert sein:

Die Behörden der Mitgliedstaaten werden Kosten für die Überprüfung der Konformität tragen müssen. Die Begleitstudie schätzt, dass die Marktüberwachungsmaßnahmen EU-weit jährlich rund 190 000 EUR kosten könnten, einschließlich der Kosten für den Kauf von Fahrzeugen/Bauteilen und der Arbeitszeit der Behörden. (Baron et al. 2023)

Die Europäische Kommission wird Personal und finanzielle Ressourcen benötigen, um die in der Verordnung geforderten detaillierten Vorschriften und Methoden zu entwickeln. Dazu gehören unter anderem die Festlegung der Anforderungen an die Entfernbarkeit von EV-Batterien und E-Antriebsmotoren, allgemeine Informationen zur Entfernung anderer relevanter Komponenten und die Angleichung der Anforderungen des CRM-Gesetzes an die Batterieverordnung. (Europäische Kommission 2023a)

Wie sieht die praktische Durchführbarkeit der Maßnahme aus, einschließlich möglicher bestehender Hindernisse?

Die im Vorschlag für eine EU-Altfahrzeugverordnung vorgesehenen neuen Bestimmungen tragen erheblich dazu bei, den Übergang des Automobilsektors zur Kreislaufwirtschaft in allen Phasen des Fahrzeuglebenszyklus – vom Entwurf bis zur endgültigen Behandlung am Ende der Lebensdauer – zu erleichtern.

Vorteile:

Die Anforderung zur Bereitstellung von Informationen nutzt bestehende Branchenplattformen wie das International Dismantling Information System (IDIS) und die Repair and Maintenance Information (RMI)-Systeme. Diese Systeme werden derzeit zwar als unzureichend angesehen, sie bieten jedoch eine Grundlage, die verbessert werden kann, anstatt von Grund auf neu aufgebaut zu werden. (Baron et al. 2023)

Die Konstruktion von Fahrzeugen, die sich leichter zerlegen lassen, kann für OEMs den Zeit- und Kostenaufwand für die Behandlung am Ende der Lebensdauer reduzieren. Dies steht im Zusammenhang mit dem vorgeschlagenen EPR-System, bei dem modulierte Gebühren Konstruktionen begünstigen, die eine einfachere und rentablere Demontage und Wiederverwertung ermöglichen. (Europäische Kommission 2023a)

Dank der beiden eingeführten Maßnahmen wird die Demontage hochwertiger Komponenten wie EV-Batterien und E-Antriebsmotoren sowie von Teilen, die kritische Rohstoffe enthalten, nicht mehr behindert. Bislang wurde dies aufgrund wirtschaftlicher Faktoren und fehlender spezifischer Anweisungen vermieden. (Baron et al. 2023)

Der freie, standardisierte und uneingeschränkte Zugang zu Demontageinformationen für alle Betreiber beseitigt eine erhebliche Hürde, insbesondere für KMU. Er schafft gleiche Wettbewerbsbedingungen für Reparatur, Wiederverwendung und Wiederaufarbeitung, was wiederum die Nachfrage nach neuen Primärrohstoffen senkt.

Nachteile/Hindernisse:

Die Neukonstruktion von Fahrzeugen, um den Ausbau von Komponenten zu erleichtern, erfordert Investitionen in Forschung und Entwicklung.

Kosten für Tests und Überprüfungen zum Nachweis der Konformität vor der Typgenehmigung.

Verwaltungsaufwand für die Erfassung, Verwaltung und Standardisierung der umfangreichen technischen Informationen, die für jeden Fahrzeugtyp erforderlich sind.

Neue Verwaltungsaufgaben für nationale Typgenehmigungsbehörden. (Baron et al. 2023)

Bedenken der OEMs, dass die Bereitstellung detaillierter technischer Informationen, insbesondere für digital codierte Komponenten, proprietäre Daten und die Fahrzeugsicherheit gefährden könnte. (Baron et al. 2023)

Kompromisse zwischen der Auslegung auf Kreislaufwirtschaft und anderen wichtigen Zielen wie Fahrzeugsicherheit, Leistung und Emissionsreduzierung während der Nutzungsphase (z. B. durch Gewichtsreduzierung mit nicht recycelbaren Materialien). (Baron et al. 2023)

Die vorgeschlagene Verordnung zielt darauf ab, diese Hindernisse zu überwinden, indem sie

Einführung von Übergangsfristen, um der Industrie ausreichend Zeit für die Anpassung ihrer Prozesse und Lieferketten zu geben.

Die Verordnung erlaubt es den Herstellern, angemessene und verhältnismäßige Gebühren zu erheben, um die Verwaltungskosten für die Unterhaltung der Kommunikationsplattformen zu decken und so einen Ausgleich zwischen Zugang und Kostendeckung zu schaffen. Andernfalls müssen die Informationen kostenlos zur Verfügung gestellt werden.

Finanzielle Anreize durch EPR, wobei die Gebühren an Designentscheidungen gekoppelt sind und Hersteller belohnt werden, die die Hindernisse überwinden und in kreislauffähigere Designs investieren.

4.7 Festlegung von Zielvorgaben für den Rezyklatanteil bei Stahl

Beschreibung

Mit dieser Maßnahme wird ein Ziel für den Rezyklatanteil von Stahl in der Automobilproduktion eingeführt. Eine Herausforderung dabei ist die Qualität von Stahlschrott aus Fahrzeugverschrottungsanlagen. Verunreinigungen wie Kupfer mindern die Qualität von recyceltem Stahl und verhindern derzeit eine höhere Recyclingquote bei der Herstellung hochwertiger Flachstahlprodukte. Ein gesetzlich festgelegtes Mindestziel für den Recyclinganteil von Stahl in Fahrzeugen würde den Markt für recycelten Stahl in Richtung höherer Qualität verschieben.

Artikel 6 des Vorschlags für eine ELV-Verordnung ermächtigt die Kommission, delegierte Rechtsakte zur Festlegung von Zielen für den Recyclinganteil anderer Materialien, wie z. B. Stahl, zu erlassen. Die Festlegung solcher potenzieller Ziele muss durch eine detaillierte Bewertung untermauert werden. Es wird eine Machbarkeitsstudie vorgeschlagen.

Tabelle 13 zeigt die erreichbaren Ziele für den Recyclinganteil von Stahl- und Eisenprodukten in Personenkraftwagen (PoM) in der EU auf der Grundlage von Post-Consumer-Schrott sowie die

erreichbaren Ziele auf der Grundlage von Post-Industrial-Schrott und Post-Consumer-Schrott. Bezieht sich der Recyclinganteil nur auf Stahl, ist ein hohes Ziel nur erreichbar, wenn auch entsprechende hochwertige Recyclingmaterialien für die Flachstahlproduktion zur Verfügung stehen. Angesichts der aktuellen Entwicklung im Stahlrecycling ist eine Steigerung der Verarbeitung solcher hochwertiger Stahlschrotts aus dem offenen Recycling in der erforderlichen Menge in der EU zwar ambitioniert, aber innerhalb von sieben Jahren durchaus denkbar.

Tabelle 13: Erreichbare Rezyklatanteile für Stahl und Eisen in Neufahrzeugen

	Aktueller Status quo (2025):	Bis 2035 mit ambitionierten Technologien
Erreichbare Ziele für den Rezyklatanteil von Stahl- und Eisenprodukten in Personenkraftwagen PoM in der EU auf der Grundlage von Post-Consumer-Schrott	11 %	25 %
Erreichbare Ziele für den Rezyklatanteil von Stahlprodukten in Personenkraftwagen PoM in der EU auf Basis von Post-Consumer-Schrott	4 %	23 %
Erreichbare Ziele für den Rezyklatanteil von Stahl und Eisenprodukten in Personenkraftwagen PoM in der EU auf der Grundlage von Industrieabfällen und Verbraucherabfällen	26 %	43 %
Erreichbare Ziele für den Rezyklatanteil von Stahl in Personenkraftwagen PoM in der EU auf der Grundlage von postindustriellen Abfällen und Post-Consumer-Abfällen	25 %	41 %

Quelle: eigene Berechnungen, basierend auf dem Modell, Öko-Institut

- Maßnahmenebene: Europäische Union
- Zeitrahmen: mittel (5 bis 10 Jahre)
- Betroffene Interessengruppen: Automobilhersteller
- Wirksamkeit: mittel
- Durchführbarkeit: mittel

Vorteile:

Verhindert die Verunreinigung von recyceltem Stahl mit Kupfer.

Recycelter Stahl ist wirtschaftlich günstiger als Primärstahl (Green Steel).

Fördert die Entwicklung von Sortier- und Recyclingtechnologien, um recycelten Stahl von höherer Qualität zu erhalten.

Bessere Materialrückgewinnung von Kupfer.

Nachteile/Hindernisse:

Stahl wird bereits heute recycelt (Bauwesen).

Mit der Einführung dieser Maßnahme könnte es erforderlich werden, den Einsatz von Primärstahl in der Bauindustrie zu erhöhen. Die Auswirkungen dieser Veränderungen auf die CO_2-Emissionen sind nicht klar.

5 Die Rolle der öffentlichen Beschaffung

Die öffentliche Hand ist mit etwa 500 Mrd. €/Jahr (ca. 13 % des BIP)[13] die größte Einkäuferin Deutschlands. Dieses Auftragsvolumen begründet eine besondere Verantwortung zur ressourcenschonenden Beschaffung. Der direkte Anteil der öffentlichen Beschaffung am Pkw-Gesamtmarkt ist mit ca. 20.000 Fahrzeugen pro Jahr[14] bei jährlich insgesamt knapp 3 Mio. neuen Pkw zwar gering. Jedoch hat die öffentliche Hand eine Vorbildfunktion für Unternehmen, die ca. zwei Drittel aller neuen Pkw beschaffen, und auch für Privatpersonen.

Während der direkte politische Einfluss auf private und gewerbliche Anschaffungen beschränkt ist, können an öffentliche Beschaffungsstellen konkrete Vorgaben gestellt werden. Zudem können Tools und Anforderungskataloge, die zur Unterstützung der ressourcenschonenden Beschaffung in der Praxis entwickelt werden, auch in der Privatwirtschaft genutzt werden, und somit Hilfestellung für ressourcenschonende Beschaffung in einem großen Anteil des Pkw-Markts geben.

5.1 Handlungsansätze für Ressourcenschonung in der Fahrzeugbeschaffung: Was können Beschaffende heute konkret tun?

Regulatorische Vorgaben mit Einfluss auf die Fahrzeugbeschaffung konzentrieren sich bisher primär auf die Begrenzung der Treibhausgas- und Luftschadstoffemissionen. Das Saubere-Fahrzeuge-Beschaffungs-Gesetz, das die EU-weit geltende Clean Vehicles Directive in deutsches Recht umsetzt, schreibt Mindestquoten für die Beschaffung von sauberen Fahrzeugen durch öffentliche Auftraggeber vor. Dies bedeutet einen steigenden Anteil an Elektro-Fahrzeugen in öffentlichen Fuhrparks und damit sinkende Treibhausgas-Emissionen.

Die Beschaffung von E-Fahrzeugen ist allerdings nicht gleichbedeutend mit einer ressourcenschonenden Beschaffung, da die Akkus je nach Zusammensetzung diverse kritische Rohstoffe enthalten und auch insgesamt keine Lenkung hin zu Fahrzeugen mit möglichst geringen Material- und somit Rohstoffbedarfen erfolgt. Konkrete rechtliche Vorschriften zur Ressourcenschonung bei der Fahrzeugbeschaffung fehlen bisher. Daher liegt es in der Bedarfsprüfung und der Leistungsbeschreibung eines Auftragsgegenstandes in den Händen der Beschaffenden, die Vergabe möglichst ressourcenschonend zu gestalten.

Wichtige Handlungsansätze in der Fahrzeugbeschaffung sind nachfolgend kurz erläutert:

[13] KNB (2025): Die Kompetenzstelle für nachhaltige Beschaffung. Letzter Zugriff: 27.08.2025

[14] KBA (2023): Jährliche Sonderauswertung des Kraftfahrzeugbestands und der Neuzulassungen des Kraftfahrt-Bundesamtes für TREMOD

Tabelle 14: Fahrzeugpooling

Handlungsansatz	Was können Beschaffende tun?
Die beste Maßnahme zur Ressourcenschonung ist die Verkleinerung des Fuhrparks. Dies kann durch die Verlagerung von Dienstwegen auf andere Verkehrsmittel mit geringerem Ressourcenverbrauch passieren (z. B. Diensträder, Bahn) oder durch eine optimale Ausnutzung des Fuhrparks mithilfe des Fahrzeugpooling. Beschäftigte einer Behörde oder auch benachbarter Einrichtungen können vorhandene Pkw gemeinsam nutzen und dadurch Neuanschaffungen vermeiden. Auch Kooperationen mit Carsharing-Anbietern reduzieren den eigenen Fuhrpark.	Damit die optimale Auslastung des vorhandenen Fuhrparks gelingt und Neubeschaffungen tatsächlich vermieden werden können, bedarf es einer koordinierten Abstimmung innerhalb der eigenen Einrichtung sowie mit anderen benachbarten Institutionen. Zentral dafür ist das Fuhrparkmanagement, das nicht nur in die Organisation des Fahrzeugpoolings, sondern bereits auch in die Bedarfsprüfung eingebunden werden sollte. Bei elektrischen Poolfahrzeugen ist zudem die gemeinsame Nutzung von Ladeinfrastruktur mitzudenken.

Quelle: eigene Darstellung, ifeu

Tabelle 15: Dimensionierung des Fahrzeugs (Downsizing)

Handlungsansatz	Was können Beschaffende tun?
Kleinere Fahrzeuge mit kleinerer Motorisierung verbrauchen weniger Ressourcen in der Herstellung und haben zudem meistens einen geringeren Energieverbrauch im Betrieb.	Bei der Frage nach der Größe einzelner Fahrzeuge sollte genau geprüft werden, wie viele Sitzplätze tatsächlich benötigt werden. Bei Poolfahrzeugen kann es hingegen ratsam sein, nicht nur kleine Fahrzeuge zu beschaffen, um eine gewisse Flexibilität im Einsatzzweck zu ermöglichen. Sollen nicht nur Personen transportiert werden, sondern z. B. auch große Gegenstände, muss dies bei der ausgeschriebenen Fahrzeuggröße berücksichtigt werden. Einen Anhaltspunkt für Obergrenzen zur Fahrzeuggröße bieten die in AutoRess für verschiedene Einsatzprofile abgeleiteten Fahrzeugabmessungen (vgl. untenstehende Tabelle).

Quelle: eigene Darstellung, ifeu

Tabelle 16: Dimensionierung der Batteriekapazitäten

Handlungsansatz	Was können Beschaffende tun?
Der Antriebswechsel hin zu E-Pkw ist eine wichtige Maßnahme zur Verringerung der Treibhausgas-emissionen. Gleichzeitig hat die Größe der Batterien erhebliche Bedeutung für die Emissionen und vor allem auch für die Rohstoffbedarfe in der Fahrzeugherstellung. Die Vermeidung von überdimensionierten Batteriekapazitäten für die im Fuhrpark geplante Fahrzeugnutzung birgt daher auch relevante Potenziale zur Ressourcenschonung.	Oftmals werden Pkw-Modelle mit verschiedenen Reichweiten und Batteriekapazitäten angeboten. Viele Fahrzeuge in öffentlichen Fuhrparks, insbesondere in Kommunen, werden täglich selbst bei Mehrfachnutzung im Fahrzeugpooling nur für vergleichsweise kurze Distanzen benötigt. Bei Einsatzprofilen mit geringen benötigten Tagesreichweiten bzw. genügend Zeit für Ladepausen sollten daher in der Beschaffung Batterien mit geringeren Kapazitäten gewählt werden. Wenn bisher üblicherweise elektrische Mindestreichweiten ausgeschrieben werden, ist zukünftig die Beschränkung auf Bandbreiten von Batteriekapazität bzw. Reichweite zu erwägen. Eine Orientierung für Batteriekapazitäten je nach benötigter Tagesreichweite bieten die in AutoRess definierten Einsatzprofile (vgl. untenstehende Tabelle).

Quelle: eigene Darstellung, ifeu

Tabelle 17: Mindestanforderungen und Zuschlagskriterien

Handlungsansatz	Was können Beschaffende tun?
In der Leistungsbeschreibung können ressourcenschonende Kriterien aufgenommen werden. Dazu zählen beispielsweise Obergrenzen für den Energieverbrauch und eine möglichst lange Garantie für die Batterielebensdauer sowie die Bereitstellung von Ersatzteilen und Softwareupdates.	Für den Energieverbrauch eines Pkw wurden in AutoRess konkrete Obergrenzen für verschiedene Einsatzprofile abgeleitet (s. Tabelle). Diese können bei der Beschaffung neuer Fahrzeuge als Mindestanforderungen in die Leistungsbeschreibung aufgenommen werden. Abweichende Obergrenzen können für spezielle Anforderungen (z. B. erhöhte Bodenfreiheit) festgelegt werden, wenn keine sparsamen Modelle im Pkw-Markt verfügbar sind. Auch Vorschläge für die Garantie der Batterielebensdauer sowie für die Bereitstellung von Ersatzteilen und Softwareupdates wurden in AutoRess erarbeitet. Wenn das Risiko besteht, mit Mindestanforderungen (Ausschlusskriterien) die Zahl der eingehenden Angebote zu sehr einzuschränken, können diese Aspekte als Zuschlagskriterien (Bewertungskriterien) aufgenommen und entsprechend hoch gewichtet werden.

Quelle: eigene Darstellung, ifeu

Tabelle 18: Ausstattungsverzicht

Handlungsansatz	Was können Beschaffende tun?
Bei der Pkw-Beschaffung sollte auf Sonderausstattungen verzichten werden, die keinen Beitrag zu Sicherheit oder Komfort leisten, sondern lediglich dekorativen Charakter haben.	Auf den Einsatz von edlen Materialien in der Innenraumverkleidung sollte verzichten werden. Dazu zählen beispielsweise Edelhölzer, Edelmetalle und Kohlefaser (Carbon). Auch Panorama-Glasdächer sollten vermieden werden, da diese einen negativen Einfluss auf die Fahrzeugisolation und damit auf den Heiz- und Kühlbedarf haben.

Quelle: eigene Darstellung, ifeu

Tabelle 19: THG- und Ressourcenschonende Pkw-Konfigurationen im AutoRess-Anspruchsniveau „Öffentliche Beschaffung“

Einsatz-profil	Anzahl Sitzplätze	Maximale Abmessungen (mm)	Lade-volumen	Reichweite (WLTP)[15]	Batterie-kapazität (kWh)	Energieverbrauch (Wh/km)	Energieverbrauch inkl. Nebenverbraucher (Wh/km)
1	2	2740 x 1480	0	200 km	18	90	105
2	5	4650 x 1900	ca. 600 l	500 km	70	140	165
3	max. 9	5000 x 1980	ca. 1500 l	500 km	100	200	230

In allen Einsatzprofilen:

- Verfügbarkeit von Ersatzteilen und Softwareupdates: 20 Jahre
- Batterielebensdauer-Garantie: 20 Jahre, 300.000 km

Quelle: eigene Darstellung, ifeu

[15] Worldwide Harmonised Light-Duty Vehicles Test Procedure

Ergänzende Hilfestellungen für Beschaffende im Online-Tool „Umweltverträgliche Mobilität für die öffentliche Hand“

Im Rahmen des öffentlich geförderten Projekts „Entwicklung von Instrumenten für die umweltverträgliche Beschaffung von Pkw durch öffentliche Stellen“ (ifeu 2024) wurde das Online-Tool „Umweltverträgliche Mobilität für die öffentliche Hand“ (www.nachhaltige-oeffentliche-pkw-beschaffung.de) entwickelt. Dieses Tool hält Instrumente bereit, die mit dem Fokus auf Treibhausgas-Einsparungen entwickelt wurden, aber dennoch die ressourcenschonende Fahrzeugbeschaffung in der Praxis unterstützen können.

- Der Tooleinstieg „**Vorüberlegungen**“ unterstützt Beschaffende dabei, den Fuhrpark zu verkleinern, indem einzelne Pkw-(Ersatz-)Beschaffungen vermieden werden.
- Im Tooleinstieg „**Empfehlungen**“ werden entsprechend der eigenen Angaben Hinweise zum geeigneten Fahrzeugsegment gegeben, um einer Überdimensionierung entgegenzuwirken.
- Im **Lebenszykluskosten-Rechner** werden neben dem Fahrzeugpreis auch Energiekosten über die Haltedauer und externe Umweltkosten berücksichtigt. Kleinere Fahrzeuge, die aus Ressourcensicht wünschenswert sind, haben in der Regel geringere Energieverbräuche und daher auch geringere Energie- und externe Umweltkosten für die verbrauchsbezogenen Emissionen. Kleinere Akkus haben zudem geringere Herstellungsemissionen, was über die Berücksichtigung der externen Umweltkosten ebenfalls honoriert wird.

5.2 Welche weiteren Hilfestellungen benötigen Beschaffende?

Auch mit Verfügbarkeit geeigneter Bewertungskriterien und Tools für die (Vor-)Auswahl THG- und ressourcenschonender Pkw-Modelle stellen sich in der öffentlichen Beschaffung weitere Herausforderungen im konkreten Beschaffungsprozess. Beispiele dafür sind:

- Technische/praktische Anforderungen: Bestimmte erforderliche Fahrzeugausstattungen schränken die Modellauswahl ein, beispielsweise nötige Bodenfreiheit für Zugang zu Baustellen, fest verbaute Fahrzeugeinrichtungen (mobile Werkstatt).
- Bürokratie: Aus der Beschaffungspraxis wird berichtet, dass ohnehin wenige Angebote auf Fahrzeugausschreibungen eingehen. Als Hemmnis wird dabei der Formalismus für die Bietenden gesehen, der sich aus den verschiedenen Vorgaben des öffentlichen Vergaberechts ergibt[16]. Weitere Anforderungen könnten die Ausschreibung für Bietende daher noch unattraktiver machen. Dieser Hürde könnte man begegnen, indem einige ressourcenschonende Vorgaben als Zuschlagskriterien statt als Mindestanforderungen aufgenommen werden.
- Verbindlichkeit: Bei nicht formal vorgeschriebenen Anforderungen bestehen bei den Beschaffenden bezüglich der Verwendung teilweise Unsicherheiten. Die Überführung ressourcenschonender Vorgaben in die Beschaffungsvorschriften von Bund und Ländern ist daher essentiell.

Der letzte Punkt unterstreicht die Rolle von **regulativen Vorgaben** in Form von konkreten Beschaffungsvorschriften. Diese sollten von den Beschaffenden einfach zu übernehmen sein und das Angebot nicht zu sehr einschränken, wenngleich das Ambitionsniveau der Vorbildfunktion der öffentlichen Hand gerecht werden sollte. Im deutschen föderalen System ist es wichtig, dass sich Bund und Länder möglichst auf Standards einigen und Best-Practice-Beispiele verbreiten.

[16] Vgl. z. B. Ergebnisse aus dem Projekt “Entwicklung von Instrumenten für die umweltverträgliche Beschaffung von Pkw durch öffentliche Stellen”

Die Harmonisierung von zukünftigen konkreten Beschaffungsvorschriften für ressourcenschonende Fahrzeuge würde den Einfluss der öffentlichen Hand auf den Markt bündeln und zudem der Bürokratie-Hürde entgegenwirken, da sich die Bietenden in diesem Fall auf einheitliche Anforderungen einstellen könnten.

6 Quellenverzeichnis

Agora Verkehrswende (2023): Fair Prices in Road Transport - Guidelines for a climate-friendly, economically efficient and socially balanced reform of taxes, levies and subsidies related to passenger cars. S. 46. https://www.agora-verkehrswende.org/fileadmin/Projekte/2023/Fiskalarchitektur_EN/Fiskalarchitektur_EN_28-04-2023.pdf (24.09.205)

AVV Klima (2021): Allgemeine Verwaltungsvorschrift der Bundesregierung zur Beschaffung klimafreundlicher Leistungen. Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK). https://www.verwaltungsvorschriften-im-internet.de/bsvwvbund_19102021_IB3.html (22.08.2025).

AVV Saubere Fahrzeuge (2022): Allgemeine Verwaltungsvorschrift der Bundesregierung zur Beschaffung sauberer Straßenfahrzeuge in der Bundesverwaltung. Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK). https://www.bmv.de/SharedDocs/DE/Anlage/Gesetze/Gesetze-20/verwaltungsvorschrift-beschaffung-sauberer-strassenfahrzeuge-in-der-bundesverwaltung.html (22.08.2025).

Baron, Y.; Kosińska-Terrade, I.; Loew, C.; Köhler, A.; Moch, K.; Sutter, J.; Graulich, K.; Adjei, F.; Mehlhart, G. (2023): Study to support the impact assessment for the review of Directive 2000/53/EC on end-of-life vehicles. Publications Office of the European Union, Luxembourg. S. 809. https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/2fa7e161-2083-11ee-94cb-01aa75ed71a1/language-en (10.10.2024). DOI: 10.2779/855228.

Bensalah, I. (2025): Ökologischer Malus 2024: die neue offizielle Malus-Tabelle für Kraftfahrzeuge. https://www.beev.co/de/blog/elektroautos/malus-ecologique-2024-le-nouveau-bareme-officiel-du-malus-automobile/ (07.10.2024).

Biemann, K.; Helms, H.; Münter, D.; Liebich, A.; Pelzeter, J.; Kämper, C. (2024): Analyse der Umweltbilanz von Kraftfahrzeugen mit alternativen Antrieben oder Kraftstoffen auf dem Weg zu einem treibhausgasneutralen Verkehr. UBA TEXTE ifeu - Institut für Energie- und Umweltforschung, Dessau. https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/analyse-der-umweltbilanz-von-kraftfahrzeugen (02.09.2025).

Blanck, R.; Zimmer, W.; Runkel, M.; Kresin, J.; Klinski, S. (2020): Klimaschutz im Verkehr: Reformbedarf der fiskalpolitischen Rahmenbedingungen und internationale Beispiele. Teilbericht, S. 66. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/texte_165-2020_reformbedarf_der_fiskalpolitischen_rahmenbedingungen_und_internationale_beispiele.pdf (24.09.2025).

Blanck, R.; Zimmer, W. (2021): Klimaschutzinstrumente im Verkehr. Umgestaltung der Kfz Steuer Bonus Malus System. Umweltbundesamt (Hrsg.). S. 8. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/366/dokumente/uba-kurzpapier_bonus-malus-system_kliv.pdf (24.09.205)

Blanck, R.; Zimmer, W.; Runkel, M.; Kresin, J.; Klinski, S. (2020): Klimaschutz im Verkehr: Reformbedarf der fiskalpolitischen Rahmenbedingungen und internationale Beispiele. Teilbericht, S. 66. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/texte_165-2020_reformbedarf_der_fiskalpolitischen_rahmenbedingungen_und_internationale_beispiele.pdf (24.09.2025).

Blauer Engel (2025): Prinzipien des Umweltzeichens „Blauer Engel“. https://www.blauer-engel.de/de. (22.08.2025)

Daehn, K. E. Cabrere Serenho, A.; Allwood, J. M. (2017a): How Will Copper Contamination Constrain Future Global Steel Recycling? Environmental Science & Technology: 51, Pages 6599-6606. https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.est.7b00997 (22.08.2025)

Daehn, K.E. Cabrere Serenho, A.; Allwood, J. M. (2017b): How will copper contamination constrain future steel recycling? - Supplementary Information. DOI: 10.1021/acs.est.7b00997.

Deutsche Umwelthilfe e.V. (2024): Resource efficiency for electric vehicle batteries: Strengthening ecodesign, reuse, repair and high-quality recycling; Position paper. https://share.google/bvVzK0CGxZFKjpH2H (22.08.2025)

ecoinvent (2021): ecoinvent release 3.8 (2021) Allocation, cut-off by classification. https://ecoinvent.org/ (22.08.2025)

Eurofer (2024): European steel in figures. 2024. https://www.eurofer.eu/assets/publications/brochures-booklets-and-factsheets/european-steel-in-figures-2024/EUROFER-2024-Version-June14.pdf (26.09.2025)

Europäische Kommission (2019): Verordnung (EU) 2019/2023 der Kommission vom 1. Oktober 2019 zur Festlegung von Ökodesign-Anforderungen an Haushaltswaschmaschinen und Haushaltswaschtrockner gemäß der Richtlinie 2009/125/EG des Europäischen Parlaments und des Rates, zur Änderung der Verordnung (EG) Nr. 1275/2008 der Kommission und zur Aufhebung der Verordnung (EU) Nr. 1015/2010 der Kommission. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/HTML/?uri=CELEX:32019R2023 (26.09.2025)

Europäische Kommission (2021): EU green public procurement criteria for road transport. European Commission. https://green-forum.ec.europa.eu/green-business/green-public-procurement/gpp-criteria-and-requirements_en (22.08.2025).

Europäische Kommission (2023): Vorschlag für eine Verordnung der Europäischen Parlaments und des Rates zur Schaffung eines Rahmens zur Gewährleistung einer sicheren und nachhaltigen Versorgung mit kritischen Rohstoffen und zur Änderung der Verordnungen (EU) 168/2013, (EU) 2018/858, (EU) 2018/1724 und (EU) 2019/1020 (EU). https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/HTML/?uri=CELEX:52023PC0160 (26.09.2025)

Europäische Kommission (2023a): Vorschlag für eine VERORDNUNG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES über Anforderungen an die kreislauforientierte Konstruktion von Fahrzeugen und über die Entsorgung von Altfahrzeugen, zur Änderung der Verordnungen (EU) 2018/858 und (EU) 2019/1020 und zur Aufhebung der Richtlinien 2000/53/EG und 2005/64/EG. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX:52023PC0451 (26.09.2025)

Europäische Kommission (2023b): ARBEITSUNTERLAGE DER KOMMISSIONSDIENSTSTELLEN BERICHT ÜBER DIE FOLGENABSCHÄTZUNG (ZUSAMMENFASSUNG) Begleitunterlage zum Vorschlag für eine Verordnung des Europäischen Parlaments und des Rates über Anforderungen an die kreislauforientierte Konstruktion von Fahrzeugen und über die Entsorgung von Altfahrzeugen, zur Änderung der Verordnungen (EU) 2018/858 und (EU) 2019/1020 und zur Aufhebung der Richtlinien 2000/53/EG und 2005/64/EG. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX:52023SC0257 (26.09.2025)

Europäisches Parlament, Europäischer Rat (2019): Richtlinie (EU) 2019/1161 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 20. Juni 2019 zur Änderung der Richtlinie 2009/33/EG über die Förderung sauberer und energieeffizienter Straßenfahrzeuge. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX:32019L1161 (25.02.2025)

Europäisches Parlament, Europäischer Rat (2023): Verordnung (EU) 2023/1542 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 12. Juli 2023 über Batterien und Altbatterien, zur Änderung der Richtlinie 2008/98/EG und der Verordnung (EU) 2019/1020 und zur Aufhebung der Richtlinie 2006/66/EG. https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2023/1542/oj (30.09.2024).

Europäisches Parlament, Europäischer Rat; Ausschuss für Umweltfragen, öffentliche Gesundheit und Lebensmittelsicherheit; Ausschuss für Binnenmarkt und Verbraucherschutz (2025): Final compromise amendments for Proposal for a regulation of the European Parliament and of the Council on circularity requirements for vehicle design and on management of end-of-life vehicles. https://share.google/7lLZG3P2gndY61aGj (25.02.2025)

Fischer, B.; Karcher, L.; Kreye, K.; Hacker, F. (2021): Dienstwagen auf Abwegen. Warum die aktuellen steuerlichen Regelungen einen sozial gerechten Klimaschutz im Pkw-Verkehr ausbremsen. S. 33. https://www.agora-verkehrswende.de/veroeffentlichungen/dienstwagen-auf-abwegen (30.09.2024)

Gross, H.; Hermine, J. (2025): Potential of End-of-Life Vehicle deep-dismantling and use of copper depolluted steel scrap to decarbonize automotive flat steel production. March 2025; https://circulareconomy.europa.eu/platform/sites/default/files/2025-03/IMT_Car-to-car_Steel_final.pdf (19.11.2025)

Harthan, R.; Förster, H.; Braungardt, S.; Bürger, V.; Cook, V.; Emele, L. (2024): Technischer Anhang der Treibhausgas-Projektionen 2024 für Deutschland (Projektionsbericht 2024). Umweltbundesamt. https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/technischer-anhang-der-treibhausgas-projektionen (03.09.2024).

ifeu (2024): Entwicklung von Instrumenten für die umweltverträgliche Beschaffung von Pkw durch öffentliche Stellen. ifeu Heidelberg, gefördert durch Deutsche Bundesstiftung Umwelt; Senatsverwaltung für Mobilität, Verkehr, Klimaschutz und Umwelt - Berlin; Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt und Klimaschutz des Landes Brandenburg; Januar 2022 – Dezember 2024. https://www.ifeu.de/projekt/beschaffung-pkw/ (11.09.2025).

Kraftfahrt-Bundesamt (KBA) (2023): Neuzulassungen nach Umwelt-Merkmalen (FZ 14), Jahr 2023. https://www.kba.de/DE/Statistik/Nachrichten/2023/Statistik/fz_14_2023.html (02.12.2025).

Kraftfahrt-Bundesamt (KBA) (2024): Neuzulassungen nach Umwelt-Merkmalen (FZ 14), Jahr 2024. https://www.kba.de/DE/Statistik/Produktkatalog/produkte/Fahrzeuge/fz14_n_uebersicht.html (25.03.2024).

KNB (Kompetenzstelle für nachhaltige Beschaffung) (2025): Die Kompetenzstelle für nachhaltige Beschaffung. https://www.nachhaltige-beschaffung.info/DE/Allgemeines/1_0_KNB/1_0_Ueberuns_node.html; Letzter Zugriff: 27.08.2025

KrWG (Kreislaufwirtschaftsgesetz) (2012): Bundestag, Bundesrat . Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen. https://www.gesetze-im-internet.de/krwg/ (22.08.2025)

KrWG (Kreislaufwirtschaftsgesetz) (2021): Gesetz zur Umsetzung der Richtlinie (EU) 2019/1161 vom 20. Juni 2019 zur Änderung der Richtlinie 2009/33/EG über die Förderung sauberer und energieeffizienter Straßenfahrzeuge sowie zur Änderung vergaberechtlicher Vorschriften. Bundestag. https://www.bmv.de/SharedDocs/DE/Anlage/G/gesetzesentwurf-foerderung-sauberer-energieeffizienter-strassenfahrzeuge.pdf?__blob=publicationFile (22.08.2025).

Kusters, W. (2024): Presentation at ARN Relatiedag. HKS Scrap Metals BV. 2 Oktober 2024; https://arn.nl/wp-content/uploads/pdf_presentation-hks-arn-relatiedag-2-oktober-2024.pdf

Lindner, C.; Schmitt, J.; Hein, J.; Fischer, E. (2024): Stoffstrombild Kunststoffe in Deutschland 2023 – Zahlen und Fakten zum Lebensweg von Kunststoffen. Kurzfassung der Conversion Studie, Conversio Market & Strategy GmbH, Mainaschaff/Germany. S. S. 13. https://www.vci.de/ergaenzende-downloads/kurzfassung-stoffstrombild-2023.pdf (11.09.2025).

Maisel, F.; Neef, C.; Marscheider-Weidemann, F.; Nissen, N. F. (2023): Eine Prognose zum künftigen Rohstoffbedarf und Recyclingpotenzial von Lithium-Ionen-Batterien in Elektrofahrzeugen. In: Resources, Conservation and Recycling. Band 192, S. 106920. DOI: 10.1016/j.resconrec.2023.106920.

Maury, T.; Nacef, N.; Torres de Matos, C.; Antonopoulos, I.; Nessi, S.; Pierri, E.; Baldassarre, B.; Garbarino, E.; Gaudillat, P.; Mathieux, F. (2023): Towards recycled plastic content targets in new passenger cars and light commercial vehicles. JRC Publications Repository, European Comission. DOI: 10.2838/834615. https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC129008 (11.09.2025).

Müller, F.; Kohlmeyer, R.; Krüger, F.; Kosmol, J.; Krause, S.; Dorer, C.; Röhreich, M. (2020): Leitsätze einer Kreislaufwirtschaft; Umweltbundesamt; https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/leitsaetze-einer-kreislaufwirtschaft. (11.09.2025).

Plastics Europe (2024): The Circular Economy for Plastics – A European Analysis 2024. https://plasticseurope.org/knowledge-hub/the-circular-economy-for-plastics-a-european-analysis-2024/. (11.09.2025).

Sander, K.; Rödig, L.; Wagner, L.; Jepsen, D.; Holzhauer, R.; Baberg, L. et al. (2020): Evaluierung und Fortschreibung der Methodik zur Ermittlung der Altfahrzeugverwertungsquoten durch Schredderversuche unter der EG-Altfahrzeugrichtlinie 2000/53/EG. Umweltbundesamt (UBA). Ökopol. Dessau (UBA-Texte, 15/2020). https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2020-01-20_texte_15-2020_altfahrzeugemonitoring.pdf (11.09.2025)

Schäfer, P.; Schmidt, M. (2020): Discrete-point analysis of the energy demand of primary versus secondary metal production. In: Environmental Science & Technology. Band 54, Nr. 1, S. 507–516. DOI: 10.1021/acs.est.9b05101.

Sommerville, R.; Zhu, P.; Rajaeifar, M. A.; Heidrich, O.; Goodship, V.; Kendrick, E. (2021): A qualitative assessment of lithium ion battery recycling processes. In: Resources, Conservation and Recycling. Bd. 165. DOI: 10.1016/j.resconrec.2020.105219.

Stephan, M. (2025): Recycling capacities for lithium-ion batteries will exceed demand in Europe for the time being. Fraunhofer ISI. https://www.isi.fraunhofer.de/en/blog/themen/batterie-update/batterie-recycling_europa_kapazitaeten_bedarf_update_2025.html (11.09.2025)

Sutter, J. (2025): In die Zukunft navigieren. Die AutoRess-Roadmap für ressourcenschonende und kreislaufwirtschaftsfähige E-Kraftfahrzeuge;. Umweltbundesamt (UBA). http://umweltbundesamt.de/themen/verkehr/ ressourcenschonung-im-verkehr

Sutter, J., Adjei, F., Baron, Y., Kosińska-Terrade, I. (2025): Boosting the use of recycled steel in the EU automotive industry under the ELV Regulation. Quantitative Impact Study for Transport & Environment. Oeko-Institut e.V., Darmstadt 2025. https://www.transportenvironment.org/uploads/files/2025_04_Report_Recycled_steel_EU_automotive_industry_final.pdf (11.09.2025)

Sutter, J.; Degreif, S.; Göckeler, K.; Klinge, J.; Hurst, S.; Kosińska-Terrade, I.; Schön-Blume, N.; Winter, E.; Biemann, K.; Dünnebeil, F.; Ewers, B.; Kämper, C.; Limberger, S.; Petri, F.; Mehrlhart, G. (2025a): AutoRess: Resource efficient and circular electric cars; Umweltbundesamt (UBA). http://umweltbundesamt.de/themen/verkehr/ ressourcenschonung-im-verkehr

Wagner-Wenz, R.; Van Zuilichem, A.-J.; Göllner-Völker, L.; Berberich, K.; Weidenkaff, A.; Schebek, L. (2022): Recycling routes of lithium-ion batteries: A critical review of the development status, the process performance, and life-cycle environmental impacts. In: MRS Energy & Sustainability. Bd. 10, Nr. 1, S. 1–34. DOI: 10.1557/s43581-022-00053-9.