

LCA-Studie zur Untersuchung der Umweltauswirkungen  
von Kfz-Leitungssätzen konventioneller und  
elektrischer Fahrzeuge

Y. S. Astono, S. Solms-Baruth, W. Weindorf, P. Schmidt  
G. Espinosa, M. Engelhardt  
N. Langmaack

April 2025

# LCA-Studie zur Untersuchung der Umweltauswirkungen von Kfz-Leitungssätzen konventioneller und elektrischer Fahrzeuge

Y. S. Astono, S. Solms-Baruth, W. Weindorf, P. Schmidt – LBST GmbH  
G. Espinosa, M. Engelhardt – TÜV SÜD  
N. Langmaack – OHLF e.V. & TU Braunschweig

## Vorwort

Liebe Leserin, lieber Leser,

die vorliegende Studie wurde im Rahmen des Projektes „Transformations-Hub Leitungssatz“ vom Open Hybrid LabFactory (OHLF) e.V. beauftragt, von der Ludwig-Bölkow-Systemtechnik (LBST) GmbH bearbeitet und angefertigt und durch die TÜV SÜD Energietechnik GmbH Baden-Württemberg (TÜV SÜD) einem Critical Review unterzogen. Die vorliegende Veröffentlichung setzt sich zusammen aus dem LCA-Bericht selbst und dem Prüfbericht des Reviews.

Inhaltliches Ziel der Untersuchung ist es, für die Leitungssatz-Branche anhand von zwei unterschiedlichen, beispielhaften Teilleitungssätzen Stellschrauben für zukünftige Reduktionen der Umweltauswirkungen aufzuzeigen. Insbesondere soll die Studie identifizieren, welche Prozessschritte und Ausgangsmaterialien jeweils die größten Auswirkungen auf unterschiedliche Wirkungskategorien im Sinne der Lebenszyklusanalyse haben. Hierzu wird zunächst ein genaues Verständnis über die Produktzusammensetzung und die Prozesskette aufgebaut. Datenlücken in der Modellierung werden erkannt und benannt. Zuletzt werden anhand der in der Analyse identifizierten Hotspots erste Handlungsempfehlungen abgeleitet.

Übergeordnetes Ziel der Studie und ihrer Veröffentlichung ist zudem, die Schritte und Methoden der LCA zu vermitteln. Sie soll als Grundlage und Anwendungsbeispiel für eine Reihe von Schulungen dienen, die im Rahmen des Leitungssatz-Hubs in 2025 angeboten werden. Aus diesem Grund ist der Bericht konsequent entlang der Schritte einer LCA nach ISO 14040/44 gegliedert und wurde für die Veröffentlichung einer unabhängigen, kritischen Prüfung unterzogen.

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

Niklas Langmaack

Wolfsburg im April 2025

## Beiträge der Autoren

Y. S. Astono: Recherche, Datenverarbeitung, Analyse, Berichtsentwurf

S. Solms-Baruth: Datenverarbeitung, Visualisierung, internes Review

W. Weindorf: Recherche, internes Review

P. Schmidt: Projektmanagement

G. Espinosa: unabhängige kritische Prüfung

M. Engelhardt: unabhängige kritische Prüfung

N. Langmaack: Beauftragung, Projektleitung, Vorwort, Herausgeber

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Veröffentlicht unter der Creative-Commons-Lizenz CC BY-SA 4.0



# LCA Kfz-Leitungssätze

Untersuchung der Umweltauswirkungen konventioneller und elektrischer Fahrzeuge für den Open Hybrid LabFactory e.V.

Bericht

27. März 2025

**Patrick Schmidt**

Patrick.Schmidt@LBST.de

**Yanni Astono**

**Sandra Solms-Baruth**

**Werner Weindorf**

## Disclaimer

Das Team der Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH hat diesen Bericht erstellt.

Die Sichtweisen und Schlüsse, die in diesem Bericht ausgedrückt werden, sind jene der Mitarbeitenden der Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH. Alle Angaben und Daten sind sorgfältig recherchiert. Allerdings gibt weder die Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH noch irgendeiner ihrer Mitarbeitenden, Vertragspartner oder Unterauftragnehmer irgendeine ausdrückliche oder implizierte Garantie oder übernimmt irgendeine rechtliche oder sonstige Verantwortung für die Korrektheit, Vollständigkeit oder Nutzbarkeit irgendeiner Information, eines Produktes oder eines enthaltenen Prozesses.

Diese Studie wurde in Auftrag gegeben vom Open Hybrid LabFactory (OHLF) e.V. im Rahmen des Projektes „Transformations-Hub Leitungssatz“, unter dem Förderkennzeichen 16THB0003C gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des deutschen Bundestages.



 		<p>Gefördert durch:</p>  <p>Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz</p> <p>aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages</p>
--	--	---

## Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung .....	11
2. Ziel und Untersuchungsrahmen .....	12
2.1. Untersuchungsziel.....	12
2.2. Untersuchungsrahmen.....	13
2.2.1. Produktsysteme und Funktionen .....	13
2.2.2. Funktionelle Einheit .....	14
2.2.3. Systemgrenzen.....	14
2.2.4. Allokationsverfahren.....	15
2.2.5. Wirkungsabschätzungsmethoden .....	16
2.2.6. Anforderungen an die Datenqualität .....	16
2.2.7. Datenverfügbarkeit und Datenqualität.....	16
2.2.8. Einschränkungen und Unsicherheiten .....	17
2.2.9. Datenvalidierung.....	18
2.2.10. Critical Review .....	18
3. Sachbilanz .....	19
3.1. Werkstoffherstellung.....	19
3.1.1. Kupferkabel und Kupferlegierungen.....	23
3.1.2. Kunststoffe .....	24
3.1.3. Transport der Werkstoffe zur Fertigung.....	25
3.2. Fertigung Leitungssatz .....	25
3.2.1. Strombedarf für Fertigung .....	26
3.2.2. Transport der Leitungssätze.....	26
3.3. Nutzung .....	27
3.4. End-of-Life.....	27
3.4.1. Transport zu EoL .....	27
3.4.2. Entsorgung und Recycling von Leitungssatzbestandteilen .....	27
4. Ergebnisse der Wirkungsabschätzung .....	29
4.1. Gesamtergebnisse für Werkstoffherstellung .....	29
4.1.1. BEV-Leitungssatz.....	29
4.1.2. Ottomotor-Leitungssatz .....	30
4.2. Ressourcenverbrauch.....	32
4.2.1. BEV-Leitungssatz.....	34
4.2.2. Ottomotor-Leitungssatz .....	35
4.3. Treibhausgaspotential.....	35
4.3.1. BEV-Leitungssatz.....	35
4.3.2. Ottomotor-Leitungssatz .....	39
4.3.3. Vergleich der GWP-Ergebnisse für Kupfer mit Literaturwerten .....	42
4.4. Versauerungspotential.....	43

4.4.1.	BEV-Leitungssatz.....	43
4.4.2.	Ottomotor-Leitungssatz .....	46
4.4.3.	Vergleich der AP-Ergebnisse für Kupfer mit Literaturwerten .....	49
4.5.	Erneuerbarer Primärenergieverbrauch (CED – renewable).....	49
4.5.1.	BEV-Leitungssatz.....	49
4.5.2.	Ottomotor-Leitungssatz .....	52
4.6.	Nicht-Erneuerbarer Primärenergieverbrauch (CED – fossil) .....	55
4.6.1.	BEV-Leitungssatz.....	55
4.6.2.	Ottomotor-Leitungssatz .....	58
4.6.3.	Vergleich der CED-Ergebnisse für Kupfer mit der Literatur (CED renewable + CED fossil) 62	
4.7.	Sensitivitätsanalyse „Best-Case“ .....	63
4.7.1.	BEV-Leitungssatz.....	63
4.7.2.	Ottomotor-Leitungssatz .....	66
4.7.3.	Interpretation der Sensitivitätsanalyse „Best Case“ .....	69
4.8.	Sensitivitätsanalyse „Worst-Case“ .....	69
4.8.1.	BEV-Leitungssatz.....	70
4.8.2.	Ottomotor-Leitungssatz .....	72
4.8.3.	Interpretation der Sensitivitätsanalyse „Worst Case“ .....	75
5.	Fazit.....	76
	Literaturverzeichnis.....	78
	Anhang.....	83



## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Wirkungsfaktoren für die Treibhausgaswirksamkeit (GWP-100) für ausgewählte Treibhausgase nach [IPCC 2021].....	16
Tabelle 2: Definierte Werkstoffgruppen und übergeordnete Materialgruppen .....	19
Tabelle 3: Stückliste der Hauptwerkstoffe (Gesamtmasse > 95%) im BEV-Leitungssatz .....	20
Tabelle 4: Stückliste aggregierter Werkstoffe (Gesamtmasse < 5%) im BEV-Leitungssatz.....	21
Tabelle 5: Stückliste der Hauptwerkstoffe (Gesamtmasse > 95%) im Ottomotor-Leitungssatz .....	22
Tabelle 6: Stückliste aggregierter Werkstoffe (Gesamtmasse < 5%) im Ottomotor-Leitungssatz.....	23
Tabelle 7: Absolute Ergebnisse der Werkstoffherstellung aller Wirkungskategorien des BEV-Leitungssatzes .....	29
Tabelle 8: Absolute Ergebnisse der Werkstoffherstellung aller Wirkungskategorien des Ottomotor-Leitungssatzes .....	31
Tabelle 9: Absoluter Materialbedarf für den BEV-Leitungssatz und den Ottomotor-Leitungssatz.....	33



## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Beispielhafter Hochvolt-Teilleitungssatz mit Ladebuchse im Neuzustand (Foto: N. Langmaack).....	13
Abbildung 2: Beispielhafter Niedervolt-Teilleitungssatz eines Motorkabelbaums am End-of-Life (Foto: N. Langmaack).....	14
Abbildung 3: Lebenszyklusphasen von Kfz-Leitungssätzen (Cradle-to-cradle).....	15
Abbildung 4: Übersicht von Vordergrundprozessen in allen Lebenszyklusphasen .....	15
Abbildung 5: Fertigungsprozess von Kabelbäumen nach [Abouljalil & Amrani 2020] .....	26
Abbildung 6: Relative Ergebnisse der Werkstoffherstellung aller Wirkungskategorien des BEV-Leitungssatzes .....	30
Abbildung 7: Relative Ergebnisse der Werkstoffherstellung aller Wirkungskategorien des Ottomotor-Leitungssatzes .....	32
Abbildung 8: Relativer Materialbedarf für den BEV-Leitungssatz und Ottomotor-Leitungssatz (gesamt) ....	34
Abbildung 9: Relativer Materialbedarf für den BEV-Leitungssatz (nach Materialgruppe).....	34
Abbildung 10: Relativer Materialbedarf für den Ottomotor-Leitungssatz (nach Materialgruppe).....	35
Abbildung 11: Ergebnis des Treibhausgaspotentials des BEV-Leitungssatzes über den gesamten Lebenszyklus .....	36
Abbildung 12: Ergebnis Anteile des Treibhausgaspotentials der Werkstoffherstellung des BEV-Leitungssatzes nach Materialkategorien.....	37
Abbildung 13: Ergebnis der Anteile des Treibhausgaspotentials der Werkstoffherstellung des BEV-Leitungssatzes nach Materialgruppen (detailliert) .....	37
Abbildung 14: Spezifisches Treibhausgaspotential der Materialien im BEV-Leitungssatz (kg CO <sub>2</sub> -Eq / kg Material).....	38
Abbildung 15: Ergebnisse des Treibhausgaspotentials aus dem EoL des BEV-Leitungssatzes .....	38
Abbildung 16: Ergebnis des Treibhausgaspotentials des Ottomotor-Leitungssatzes über den gesamten Lebenszyklus .....	39
Abbildung 17: Ergebnis der Anteile des Treibhausgaspotentials der Werkstoffherstellung des Ottomotor-Leitungssatzes nach Materialkategorien.....	40
Abbildung 18: Ergebnis der Anteile des Treibhausgaspotentials der Werkstoffherstellung des Ottomotor-Leitungssatzes nach Materialgruppen (detailliert) .....	40
Abbildung 19: Spezifisches Treibhausgaspotential der Materialien im Ottomotor-Leitungssatz (kg CO <sub>2</sub> -Eq / kg Material) .....	41
Abbildung 20: Ergebnisse des Treibhausgaspotentials aus dem EoL des Ottomotors .....	41
Abbildung 21: Vergleich der GWP-Ergebnisse für Kupfer mit den Ergebnissen der Literaturlauswertung nach [Sanjuan-Delmás et al. 2022] (kg CO <sub>2</sub> -Eq / kg Material).....	42
Abbildung 22: Ergebnis des Versauerungspotentials des BEV-Leitungssatzes über den gesamten Lebenszyklus .....	43
Abbildung 23: Ergebnis der Anteile des Versauerungspotentials der Werkstoffherstellung des BEV-Leitungssatzes nach Materialkategorie .....	44

Abbildung 24: Ergebnis der Anteile des Versauerungspotentials der Werkstoffherstellung des BEV-Leitungssatzes nach Materialgruppe (detailliert)..... 44

Abbildung 25: Spezifisches Versauerungspotential der Materialien im BEV-Leitungssatz (kg SO<sub>2</sub>-Eq / kg Material)..... 45

Abbildung 26: Ergebnisse des Versauerungspotentials aus dem EoL des BEV-Leitungssatzes..... 45

Abbildung 27: Ergebnis des Versauerungspotentials des Ottomotor-Leitungssatzes über den gesamten Lebenszyklus..... 46

Abbildung 28: Ergebnis der Anteile des Versauerungspotentials der Werkstoffherstellung des Ottomotor-Leitungssatzes nach Materialkategorie ..... 47

Abbildung 29: Ergebnis der Anteile des Versauerungspotentials der Werkstoffherstellung des Ottomotor-Leitungssatzes nach Materialgruppe (detailliert)..... 47

Abbildung 30: Spezifisches Versauerungspotential der Materialien im Ottomotor-Leitungssatz (kg SO<sub>2</sub>-Eq / kg Material) ..... 48

Abbildung 31: Ergebnisse des Versauerungspotentials aus dem EoL des Ottomotor-Leitungssatzes ..... 48

Abbildung 32: Vergleich der AP-Ergebnisse für Kupfer mit Literaturwerten nach [Dong et al. 2020], [International Copper Association 2021] und [Sanjuan-Delmás et al. 2022] (kg SO<sub>2</sub>-Eq / kg Material) ..... 49

Abbildung 33: Ergebnis des Erneuerbaren Primärenergieverbrauchs des BEV-Leitungssatzes über den gesamten Lebenszyklus..... 50

Abbildung 34: Ergebnis der Anteile des Erneuerbaren Primärenergieverbrauchs der Werkstoffherstellung des BEV-Leitungssatzes nach Materialkategorie ..... 50

Abbildung 35: Ergebnis der Anteile des Erneuerbaren Primärenergieverbrauchs der Werkstoffherstellung des BEV-Leitungssatzes nach Materialgruppe (detailliert)..... 51

Abbildung 36: Spezifischer erneuerbarer Primärenergieverbrauch der Materialien im BEV-Leitungssatz (MJ / kg Material)..... 51

Abbildung 37: Ergebnis des Erneuerbaren Primärenergieverbrauchs aus dem EoL des BEV-Leitungssatz 52

Abbildung 38: Ergebnis des Erneuerbaren Primärenergieverbrauchs des Ottomotor-Leitungssatzes über den gesamten Lebenszyklus..... 52

Abbildung 39: Ergebnis der Anteile des Erneuerbaren Primärenergieverbrauchs der Werkstoffherstellung des Ottomotor-Leitungssatzes nach Materialkategorie..... 53

Abbildung 40: Ergebnis der Anteile des Erneuerbaren Primärenergieverbrauchs der Werkstoffherstellung des Ottomotor-Leitungssatzes nach Materialgruppe (detailliert) ..... 54

Abbildung 41: Spezifischer erneuerbarer Primärenergieverbrauch der Materialien im Ottomotor-Leitungssatz (MJ / kg Material)..... 54

Abbildung 42: Ergebnis des Erneuerbaren Primärenergieverbrauchs aus dem EoL des Ottomotor-Leitungssatzes ..... 55

Abbildung 43: Ergebnis des Nicht-Erneuerbaren Primärenergieverbrauchs des BEV-Leitungssatzes über den gesamten Lebenszyklus..... 56

Abbildung 44: Ergebnis der Anteile des Nicht-Erneuerbaren Primärenergieverbrauchs der Werkstoffherstellung des BEV-Leitungssatzes nach Materialkategorie..... 56

Abbildung 45: Ergebnis der Anteile des Nicht-Erneuerbaren Primärenergieverbrauchs der Werkstoffherstellung des BEV-Leitungssatzes nach Materialgruppe ..... 57

Abbildung 46: Spezifischer nicht-erneuerbarer Primärenergieverbrauchs der Materialien im BEV-Leitungssatz (MJ / kg Material)..... 57

Abbildung 47: Ergebnis des Nicht-Erneuerbaren Primärenergieverbrauchs aus dem EoL des BEV-Leitungssatz ..... 58

Abbildung 48: Ergebnis des Nicht-Erneuerbaren Primärenergieverbrauchs des Ottomotor-Leitungssatzes über den gesamten Lebenszyklus..... 58

Abbildung 49: Ergebnis der Anteile des Nicht-Erneuerbaren Primärenergieverbrauchs der Werkstoffherstellung des Ottomotor-Leitungssatzes nach Materialkategorie ..... 59

Abbildung 50: Ergebnis der Anteile des Nicht-Erneuerbaren Primärenergieverbrauchs der Werkstoffherstellung des Ottomotor-Leitungssatzes nach Materialgruppe ..... 60

Abbildung 51: Spezifischer nicht-erneuerbarer Primärenergieverbrauchs der Materialien im Ottomotor-Leitungssatz (MJ / kg Material)..... 60

Abbildung 52: Ergebnis des Nicht-Erneuerbaren Primärenergieverbrauchs aus dem EoL des Ottomotor-Leitungssatzes ..... 61

Abbildung 53: Vergleich der CED-Ergebnisse für Kupfer mit den Ergebnissen der Literaturlauswertung nach [Sanjuan-Delmás et al. 2022] (MJ / kg Material) ..... 62

Abbildung 54: Ergebnis des Treibhausgaspotentials des BEV-Leitungssatzes mit Sekundärkupfer über den gesamten Lebenszyklus..... 63

Abbildung 55: Ergebnis des Versauerungspotentials des BEV-Leitungssatzes mit Sekundärkupfer über den gesamten Lebenszyklus..... 64

Abbildung 56: Ergebnis des Erneuerbaren Primärenergieverbrauchs des BEV-Leitungssatzes mit Sekundärkupfer über den gesamten Lebenszyklus ..... 65

Abbildung 57: Ergebnis des Nicht-Erneuerbaren Primärenergieverbrauchs des BEV-Leitungssatzes mit Sekundärkupfer über den gesamten Lebenszyklus ..... 65

Abbildung 58: Ergebnis des Treibhausgaspotentials des Ottomotor-Leitungssatzes mit Sekundärkupfer über den gesamten Lebenszyklus..... 66

Abbildung 59: Ergebnis des Versauerungspotentials des Ottomotor-Leitungssatzes mit Sekundärkupfer über den gesamten Lebenszyklus..... 67

Abbildung 60: Ergebnis des Erneuerbaren Primärenergieverbrauchs des Ottomotor-Leitungssatzes mit Sekundärkupfer über den gesamten Lebenszyklus ..... 68

Abbildung 61: Ergebnis des Nicht-Erneuerbaren Primärenergieverbrauchs des Ottomotor-Leitungssatzes mit Sekundärkupfer über den gesamten Lebenszyklus..... 68

Abbildung 62: Ergebnis des Treibhausgaspotentials des BEV-Leitungssatzes ohne Recycling über den gesamten Lebenszyklus..... 70

Abbildung 63: Ergebnis des Versauerungspotentials des BEV-Leitungssatzes ohne Recycling über den gesamten Lebenszyklus..... 71

Abbildung 64: Ergebnis des Erneuerbaren Primärenergieverbrauchs des BEV-Leitungssatzes ohne Recycling über den gesamten Lebenszyklus ..... 72

Abbildung 65: Ergebnis des Nicht-Erneuerbaren Primärenergieverbrauchs des BEV-Leitungssatzes ohne Recycling über den gesamten Lebenszyklus ..... 72

Abbildung 66: Ergebnis des Treibhausgaspotentials des Ottomotor-Leitungssatzes ohne Recycling über den gesamten Lebenszyklus ..... 73

Abbildung 67: Ergebnis des Versauerungspotentials des Ottomotor-Leitungssatzes ohne Recycling über den gesamten Lebenszyklus ..... 73

Abbildung 68: Ergebnis des Erneuerbaren Primärenergieverbrauchs des Ottomotor-Leitungssatzes ohne Recycling über den gesamten Lebenszyklus ..... 74

Abbildung 69: Ergebnis des Nicht-Erneuerbaren Primärenergieverbrauchs des Ottomotor-Leitungssatzes ohne Recycling über den gesamten Lebenszyklus ..... 74



## Abkürzungsverzeichnis

AC	Alternating Current (Wechselstrom)
AP	Acidification Potential (Versauerungspotential)
BEV	Battery Electric Vehicle (batterie-elektrisches Fahrzeug)
CED	Cumulative Energy Demand (kumulierter Energieaufwand)
DC	Direct Current (Gleichstrom)
EEA	Ethylen-Ethyl-Acrylat
EoL	End of Life
EPDM	Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk
GLO	Global (ecoinvent code)
GWP	Global warming potential (Treibhausgaspotential)
HDPE	High-Density-Polyethylen
HHV	Higher heating value
ICEV	Internal Combustion Engine Vehicle (Fahrzeug mit Verbrennungsmotor)
Kfz	Kraftfahrzeug
LBST	Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH
LCA	Life Cycle Analysis (Lebenszyklusanalyse)
OHLF	Open Hybrid LabFactory e.V.
PA	Polyamid
PBT	Polybutadien
PCF	Product Carbon Footprint
PE	Polyethylen
PES	Polyester
PET	Polyethylenterephthalat
Pkw	Personenkraftwagen
PVC	Polyvinylchlorid
RER	Europe (ecoinvent code)
THG	Treibhausgas

## 1. EINLEITUNG

Der Verkehrssektor trägt sowohl in Deutschland als auch global maßgeblich zu ökologischen Belastungen bei. Eine zunehmende Elektrifizierung von Kraftfahrzeugen (Kfz) führt zu einer Reduktion von Emissionen durch fossile Brennstoffe, geht jedoch auch mit einem hohen Rohstoffbedarf und entsprechenden Umweltauswirkungen einher. Um den ökologischen Fußabdruck von Verkehrsmitteln weiter zu reduzieren, müssen auch deren Wertstoffketten untersucht und Einsparungspotentiale identifiziert werden. Eine der zu untersuchenden Komponenten ist der Leitungssatz von Automobilen, welcher neben verschiedenen Kunststofffraktionen und weiteren Materialien einen hohen Anteil von Kupfer enthält.

Nach einigen Schätzungen reichen die weltweiten Kupfer-Reserven bei gleichbleibender Förderung etwa 40 Jahre. Gleichzeitig steigt der weltweite Bedarf an Kupfer an, zum Teil auch angetrieben durch den Zubau an Stromverteilungs-Infrastruktur. Kupfer wird darüber hinaus benötigt für Kupferkabel und Elektromotoren in Hybrid-Fahrzeugen, deren Marktdurchdringung steigt [Sprovieri 2014]. Dazu kommt inzwischen auch der Kupferbedarf rein batterie-elektrischer Fahrzeuge sowie der zunehmende Kupferbedarf für die Einbindung von Komfort-Einrichtungen (z.B. elektrisch verstellbare Sitze) und IT-Komponenten in Fahrzeugen sowohl mit Verbrennungsmotor als auch mit Elektromotor.

Eine Literaturrecherche ergab, dass in den letzten sieben Jahren drei LCA-Studien zu Kfz-Leitungssätzen veröffentlicht wurden, darunter eine LCA-Studie [Abouljalil & Amrani 2020], die sich mit der Fertigung von Kfz-Kabelsätzen in Marokko befasste. Eine weitere Studie [Abouljalil & Amrani 2022] hatte einen Vergleich verschiedener Wirkungsabschätzungsmethoden bei der Erstellung von Lebenszyklusanalysen für Kfz-Leitungssätzen zum Inhalt und eine weitere LCA [Villanueva-Rey et al. 2018] betrachtete eine innovativen Kabellösung für Kfz-Leitungssätze.

Keine der oben genannten LCA-Studien hat bisher den gesamten Lebenszyklus eines Kfz-Leitungssatzes umfassend betrachtet und keine LCA-Studie hat Kabelsätze für batterieelektrisch betriebene Fahrzeuge (BEV) und Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren (ICEV) gegenübergestellt.

Im Rahmen des Projekts „Transformations-Hub Leitungssatz“ soll die Leitungssatzbranche bei Transformationsprozessen unterstützt werden. Das Projektkonsortium besteht aus ARENA2026, Bayern-Innovativ und dem Open Hybrid LabFactory e.V. (OHLF) [OHLF 2024].

Die vorliegende Studie stellt eine Lebenszyklusanalyse (LCA) für automobiler Leitungssätze dar, welche von der Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH (LBST) im Auftrag von OHLF erstellt worden ist. Dabei werden sowohl ein Leitungssatz eines konventionell betriebenen sowie eines elektrisch angetriebenen Pkw betrachtet. Hierfür wurden Primärdaten eines europäischen Leitungssatz-Konfektionärs herangezogen, welcher beide Produkte herstellt.

## 2. ZIEL UND UNTERSUCHUNGSRAHMEN

Die Lebenszyklusanalyse (Life Cycle Analysis – LCA) erfolgt nach dem in [ISO 14040 : 2006] und [ISO 14044 : 2006] beschriebenen Vorgehen und besteht aus vier Phasen:

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

Die Datenerhebung für die Sachbilanz erfolgt auf Basis von Daten des Konfektionärs und aus Literaturrechen. Die Modellierung und Berechnung der LCA erfolgt mit der Software openLCA 2.2 [Ciroth 2007] und der Datenbank ecoinvent v.3.10 [Wernet et al. 2016].

Es werden die Wirkungskategorien Ressourcenverbrauch, Treibhauseffekt, Versauerung, Primärenergieverbrauch und betrachtet. Für die Auswahl der Kategorien liegen vor dem Hintergrund der Zielsetzung und der Zielgruppe (siehe Abschnitt 2.1) drei Gründe vor. Erstens ist das Treibhausgaspotential von Produkten für die Treibhausgasminderungsziele Deutschlands und Europas sowie für entsprechende Berichtspflichten von Unternehmen von hoher Relevanz. Zweitens wird für die betrachteten Produkte, welche jeweils einen hohen Anteil an Kupfer enthalten, im Vergleich zu anderen Umweltauswirkungen eine besonders hohe Versauerungswirkung erwartet. Drittens ermöglicht eine Analyse des Primärenergie- und Ressourcenbedarfs ein besseres Verständnis der Produktzusammensetzung und Prozessketten. Dadurch wird auch eine Identifikation von Ineffizienzen und Risiken entlang der Wertschöpfungskette ermöglicht, wie z.B. dem Einsatz von kritischen und strategischen Rohstoffen nach Verordnung (EU) 2024/1252 [EU 2024].

### 2.1. Untersuchungsziel

Die Studie verfolgt folgende Ziele:

- Erstellung einer LCA nach ISO 14040/44 für zwei Kfz-Leitungssätze mit Wirkungsabschätzung der Kategorien Ressourcenbedarf, Treibhauspotential, Versauerung und Primärenergieverbrauch
- Aufbau eines Verständnisses über die Produktzusammensetzung und Prozessketten basierend auf Projektdaten von Konfektionär und einer Literaturrecherche
- Die Identifikation von Datenlücken
- Die Identifikation von ökologischen Hotspots (bei Komponenten und Prozessen) und die Ableitung von Handlungsempfehlungen

Die Zielgruppe sind hierbei deutsche Unternehmen aus der Leitungssatz-Industrie (Automobilhersteller, Zulieferer der Automobilbranche, Leitungssatz-Konfektionäre, Material- und Komponentenproduzenten der Branche). Es ist eine Veröffentlichung vorgesehen, welche als Basis für Schulungen zum Vermitteln des Vorgehens bei der Erstellung einer Lebenszyklusanalyse dient. Die Ergebnisse der LCA können allerdings nicht für vergleichende Analysen verwendet werden, da sich beide vorliegenden Datensätze auf Teilleitungssätze beziehen, die nicht die gesamte Verkabelung eines Fahrzeugs abbilden.

## 2.2. Untersuchungsrahmen

### 2.2.1. Produktsysteme und Funktionen

Leitungssätze, oft auch als „Kabelbäume“ oder „Kabelsätze“ bezeichnet, verbinden alle elektrischen und elektronischen Komponenten in einem Fahrzeug [Open Hybrid LabFactory e.V. 2022].

Als typischer Teilleitungssatz für ein Elektrofahrzeug wird der Abschnitt von der Ladebuchse zur Hochvoltbatterie und dem Ladegerät betrachtet. Dieser Kabelbaum umfasst die Ladebuchse selbst, zwei Hochvoltleitungen mit großem Querschnitt für die DC-Schnellladung, eine mehradrige Hochvoltleitung für die AC-Versorgung des Ladegerätes, diverse Steuerleitungen mit geringeren Querschnitten sowie unterschiedliche Hoch- und Niedervoltsteckverbinder (Vgl. Abbildung 1). Das Gesamtgewicht der Baugruppe beträgt knapp 6 kg. Dieses Produkt wird in dieser LCA „BEV-Leitungssatz“ genannt.



Abbildung 1: Beispielhafter Hochvolt-Teilleitungssatz mit Ladebuchse im Neuzustand (Foto: N. Langmaack)

Zweiter Betrachtungsgegenstand der Studie ist der Motorkabelbaum eines Ottomotors. Dieser umfasst eine Vielzahl an Niedervoltsteuerleitungen und ist nahezu vollständig mit Klebebandern umwickelt. Hinzu kommen diverse Steckverbinder, Kabelschuhe sowie einige kleine Kabelkanäle und Schutzschläuche (Vgl. Abbildung 2). Sein Gesamtgewicht beträgt etwa 2 kg. Der Teilleitungssatz des Motorkabelbaums wird in dieser LCA „Ottomotor-Leitungssatz“ genannt.

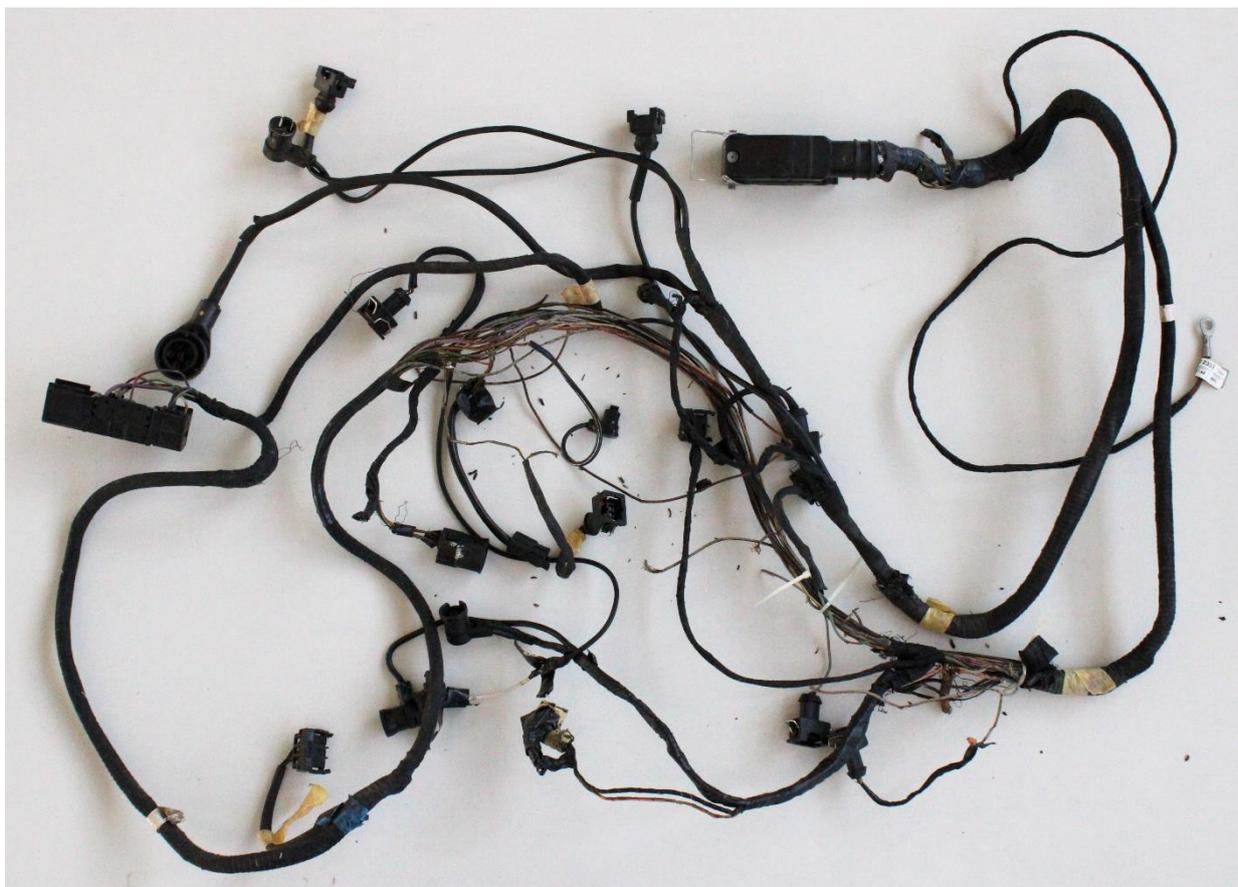


Abbildung 2: Beispielhafter Niedervolt-Teilungssatz eines Motorkabelbaums am End-of-Life (Foto: N. Langmaack)

### 2.2.2. Funktionelle Einheit

Da es sich bei den beiden betrachteten Produkten jeweils um Teilleitungssätze und nicht um die vollständigen Steck- und Kabelverbindungen eines Kfz handelt, lässt sich ihre Funktion nicht genau quantifizieren (z.B. in gefahrenen Kilometern eines Pkw). Zu Qualitäts- bzw. Leistungsunterschieden der Produkte liegen keine Informationen vor. Eine Wartung oder ein Austausch von Kabelbäumen findet während der Nutzung von Fahrzeugen nur in Ausnahmefällen statt, weshalb angenommen wird, dass nur jeweils ein Leitungssatz während der Lebensdauer eines Kfz zum Einsatz kommt. Entsprechend wird der Referenzfluss „ein (Teil)-Leitungssatz eines Pkw“ als funktionelle Einheit definiert. Dies ermöglicht die Durchführung der LCA für beide betrachteten Produkte, wenngleich diese nicht direkt miteinander vergleichbar sind. Eine Betrachtung der Nutzungsphase ist ausgeschlossen.

### 2.2.3. Systemgrenzen

Die Lebenszyklusanalyse umfasst die Produktion der Rohmaterialien, deren Verarbeitung und Transport zum Hersteller des Kfz-Leitungssatz, den Transport zum Fahrzeughersteller sowie Entsorgung und Recycling (Abbildung 3). Die Nutzung im Kfz (Pkw) wird nicht betrachtet. Es handelt sich um eine Analyse nach den Systemgrenzen Cradle-to-cradle, bei der über den Lebenszyklus eines einzelnen Produkts hinaus eine Gutschrift durch das Recycling modelliert wird. Es wird also angenommen, dass rezyklierte Materialien wieder für die Werkstoffherstellung eines Neuprodukts verwendet werden. Im Vergleich hierzu würde ein Analyse nach Cradle-to-gate nur die Umweltauswirkungen bis zum Ende der Produktfertigung

betrachten und nach Cradle-to-grave bis zum End-of-Life, ohne Berücksichtigung einer Gutschrift durch das Recycling.

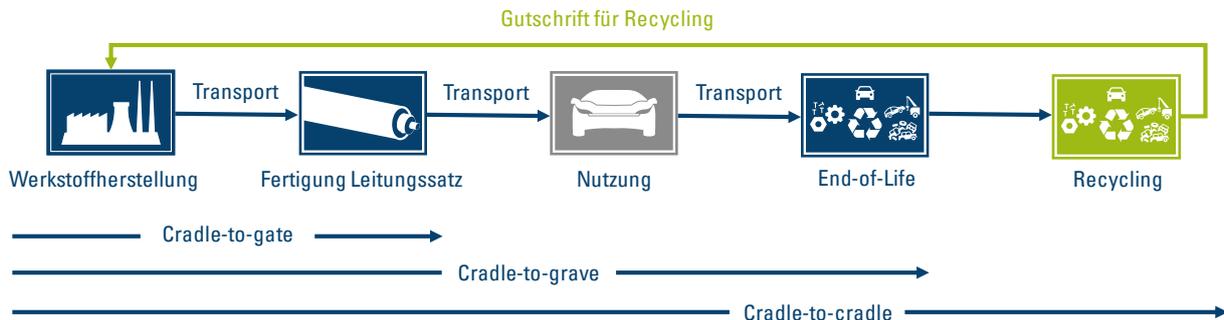


Abbildung 3: Lebenszyklusphasen von Kfz-Leitungssätzen (Cradle-to-cradle)

Zu Umweltauswirkungen des verbauten Leitungssatzes im Kfz während der Nutzung liegen keine Daten vor, weshalb diese Lebenszyklusphase im Folgenden nicht aufgeführt wird.

Es werden keine Abschneidekriterien definiert, mit Ausnahme der Aufteilung aller Werkstoffe in Hauptwerkstoffe und zu Werkstoffgruppen aggregierte Produktbestandteile, abhängig vom Massenanteil in den jeweiligen Kabelsätzen.

Da in der Datenbank ecoinvent nur generische Prozesse für die Herstellung und das End-of-Life von Kabelprodukten zur Verfügung stehen, ist eine eigene Modellierung der Werkstoffherstellung aus den Rohstoffen, der Fertigung der Leitungssätze sowie des End-of-Life im Rahmen dieser Studie notwendig. Abbildung 4 stellt eine Übersicht der Vordergrundprozesse, also aller selbst modellierten Prozesse auf Basis von Primär- und Sekundärdaten dar.

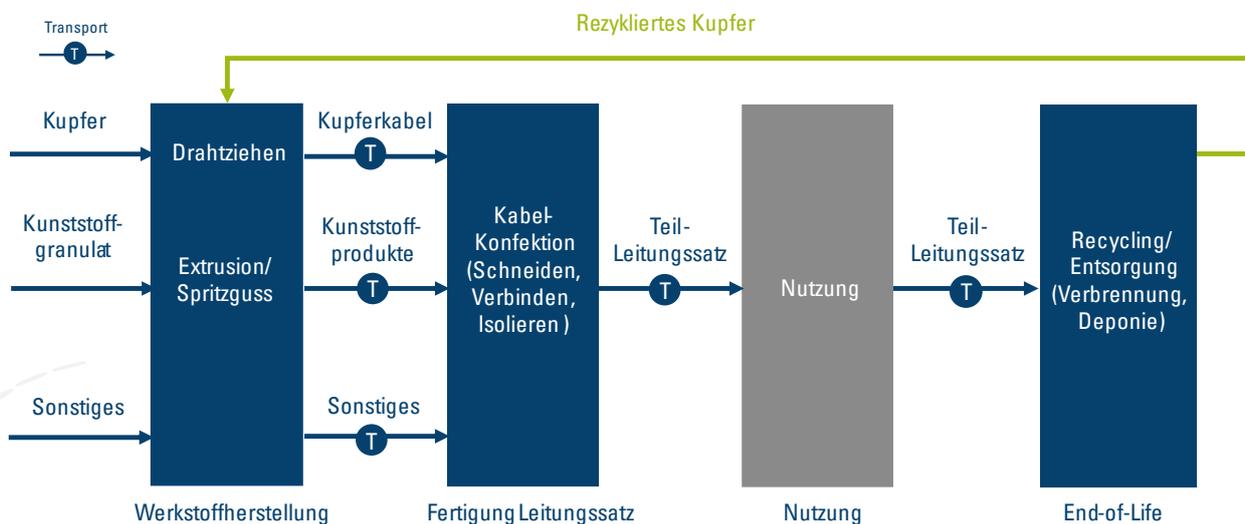


Abbildung 4: Übersicht von Vordergrundprozessen in allen Lebenszyklusphasen

### 2.2.4. Allokationsverfahren

In den Vordergrundprozessen werden alle Umweltauswirkungen dem Hauptprodukt zugewiesen, nachdem es keine Nebenprodukte gibt. Entsprechend wurde keine Allokation durchgeführt. Bei Hintergrundprozessen mit mehreren Produkten erfolgt die Allokation gemäß der ecoinvent-Datensätze. Die Allokation des End-of-Life (EoL) erfolgt entsprechend dem ecoinvent-Modell mit Cut-off

(Umweltauswirkungen durch Recycling werden dem Nachfolgeprodukt zugeordnet) mit Ausnahme von Recycling von Kupferkabeln, bei denen eine Gutschrift für dieses Produkt berücksichtigt wird.

### 2.2.5. Wirkungsabschätzungsmethoden

Für die Berechnung des Treibhausgaspotentials der verschiedenen Treibhausgase (THG) werden die Emissionswerte des Sixth Assessment Report des IPCC [IPCC 2021] für einen Betrachtungszeitraum von 100 Jahren (GWP 100) herangezogen (Tabelle 1).

Tabelle 1: Wirkungsfaktoren für die Treibhausgaswirksamkeit (GWP-100) für ausgewählte Treibhausgase nach [IPCC 2021]

Treibhausgas	GWP (g CO <sub>2</sub> -Eq/g)
CO <sub>2</sub>	1
CH <sub>4</sub>	27*
N <sub>2</sub> O	273
SF <sub>6</sub>	24300

\*Ohne Berücksichtigung des im Methan gebundenen Kohlenstoffs, um zwischen fossilem und nicht-fossilem Methan unterscheiden zu können

Die Versauerung wird nach der in [Universität Leiden 2016] beschriebenen Methode CML v.4.8 2016 berechnet und in SO<sub>2</sub>-Äquivalent angegeben. Diese bezieht sich auf das durchschnittliche Versauerungspotential in Europa.

Der kumulierte Energieaufwand (Cumulated Energy Demand – CED) bezieht sich auf den oberen Heizwert (H<sub>s</sub>) nach [VDI 2012].

Für den Ressourcenverbrauch wird keine Wirkungsabschätzung mit einer spezifischen Methode und Charakterisierungsfaktoren durchgeführt, sondern stattdessen eine Materialbilanz aufgestellt. Dies ermöglicht eine Übersicht über die Materialzusammensetzung der Produkte und eine Identifizierung kritischer und strategischer Rohstoffe nach Verordnung (EU) 2024/1252 [EU 2024].

Die Ergebnisse und deren Auswertung werden in Abschnitt 4 dargestellt und beschrieben.

### 2.2.6. Anforderungen an die Datenqualität

Da es ein Ziel der Studie ist, ein Verständnis über die Zusammensetzung und Prozessketten der beiden betrachteten Produkte aufzubauen, sind hier vor allem möglichst repräsentative Sachbilanzdaten für die enthaltenen Materialien sowie für die Verarbeitungsschritte vor der Nutzung erforderlich. Entsprechende Primärdaten sollten möglichst aktuell sein. Nachdem die Zielgruppe deutsche Unternehmen umfasst, sind zudem v.a. deutschland- bzw. europaspezifische Daten zu verwenden.

### 2.2.7. Datenverfügbarkeit und Datenqualität

Primärdaten eines europäischen Leitungssatz-Konfektionärs, welche für firmeninterne Analysen im Jahr 2023 erhoben worden sind, liegen in Form von Stücklisten für die Bestandteile (Werkstoffe) der beiden Leitungssätze vor. Diese sind sehr genau, umfangreich, aktuell und spezifisch für diesen Hersteller. Die meisten Werkstoffe bzw. Materialien der Stücklisten werden von Zulieferern aus Europa bezogen.

Nachdem diese Daten sowohl für die Sachbilanz der Werkstoffherstellung als auch des End-of-Life verwendet werden, ist der Detailgrad dieser beiden Lebenszyklusphasen sehr hoch.

Für die Fertigung und den Transport des Leitungssatzes liegen dem Konfektionär Emissionswerte vor, die im Jahr 2023 für einen nicht veröffentlichten Product Carbon Footprint (PCF) erhoben worden sind. Aus Vertraulichkeitsgründen wurden vom Hersteller nur aggregierte Emissionswerte als kg CO<sub>2eq</sub> pro Teilleitungssatz für die Erstellung der vorliegenden Studie zur Verfügung gestellt. Entsprechend sind die Daten zwar aktuell und spezifisch für den Kabelsatz-Konfektionär, ermöglichen jedoch nur eine oberflächliche Analyse dieser Lebenszyklusphasen. Nachdem auch die Emissionsquellen bzw. verwendeten Energieträger der einzelnen Fertigungsschritte nicht bekannt sind, wurde Strom aus dem deutschen Strommix als alleinige Quelle angenommen (Vgl. Abschnitt 3.2.1). Es wird nicht erwartet, dass bei den Konfektionierungsprozessen weitere Emissionsquellen auftreten. Unterstützende Prozesse wie etwaige Instandhaltungsmaßnahmen von Maschinen der Produktion, Verpackung und Lagerung der Produkte sowie die Behandlung von Abfällen werden nicht berücksichtigt.

Detaillierte Literaturdaten zu dem Lebenszyklus von Kfz-Kabelbäumen liegen nicht vor. Auf Basis von öffentlich verfügbaren Daten wurde jedoch die Materialzusammensetzung der Werkstoffe aus der Stückliste des Herstellers erarbeitet (Vgl. Anhang A. 3 und A. 4). Die daraus resultierende Materialbilanz wurde in Microsoft Excel entsprechenden Prozessbezeichnungen aus der Datenbankecoinvent zugeordnet („Mapping“) und daraufhin in openLCA eingefügt. Für die Fälle, in denen keine passenden Datensätze verfügbar waren, sind möglichst verwandte Prozesse („Proxys“) ausgewählt worden. Daraus ergeben sich teilweise Unschärfen. Im folgenden Abschnitt wird im Detail auf die Einschränkungen und Unsicherheiten der Modellierung der Sachbilanz eingegangen.

### 2.2.8. Einschränkungen und Unsicherheiten

Geringe Unschärfen bei der Modellierung der Werkstoffherstellung ergeben sich durch die Aggregation aller Werkstoffe zu Werkstoffgruppen, die nicht als Hauptwerkstoffe definiert sind. Die hat nur einen geringfügigen Einfluss auf die Ergebnisse, da mit Platin und Gold die Materialien mit den höchsten Umweltauswirkungen in den betrachteten Kategorien trotz generischer Modellierung in vollem Umfang berücksichtigt werden. Weitere geringfügige Unsicherheiten in dieser Lebenszyklusphase ergeben sich bei der Modellierung von Materialzusammensetzungen für das Mapping, welche auf Literaturrecherchen beruht. Die dabei vorgenommenen Vereinfachungen, wie die Vernachlässigung sehr geringer Werkstoffbestandteile, lassen ebenfalls nur einen sehr geringen Einfluss auf die Wirkungsabschätzung erwarten, da Stoffe mit hoher Umweltauswirkung wie Blei z.B. bei CuPb1P<sup>1</sup> trotzdem berücksichtigt werden. Dasselbe gilt für die Vernachlässigung der Verarbeitung aller Werkstoffgruppen außer Kupferkabeln und Kunststoffen.

Unschärfen durch generische Sekundärdaten (z.B. Primärenergiebedarfe für Herstellung von Werkstoffen) haben einen höheren Einfluss auf die Berechnungsergebnisse. Für die Wirkungsabschätzung der Kupferherstellung zeigt eine Studie von [Sanjuan-Delmás et al. 2022] je nach verwendetem Datensatz und Berechnungssoftware Abweichungen von bis zu einem Faktor von 7,5 für bestimmte Wirkungskategorien. Dementsprechend wird für Kupfer, dem Hauptbestandteil der beiden Leitungssätze, in Abschnitt 4.7 eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Für die Sachbilanz des Silikonkautschuks ergeben sich Unsicherheiten

---

<sup>1</sup> Kupfer-Legierung mit einem Gehalt von 0,8-1,2% Blei (Pb) und 0,01-0,04% Phosphor (P)

vor allem durch den hohen Anteil an erneuerbarem Primärenergiebedarf für diesen Prozess (Vgl. Abschnitt 3.1.2).

Die Sachbilanz von Fertigung und Transport ist durch Umrechnung der vom Hersteller angegebenen Emissionswerte zu kWh und Tonnenkilometern basierend auf ecoinvent-Daten aufgestellt worden, was mit hohen Unsicherheiten verbunden ist. Der Einfluss auf die Gesamtergebnisse ist jedoch sehr gering (Vgl. Abschnitt 4).

Die vereinfachte Modellierung des EoL für Werkstoffgruppen statt für einzelne Werkstoffe und Unsicherheiten durch Annahmen zu Entsorgungsprozessen (Vgl. Abschnitt 3.4.2) lassen nur geringfügige Auswirkungen auf das Gesamtergebnis erwarten. Die Annahme einer Recyclingquote von 90% für Kupferkabel hat signifikante Auswirkungen auf die Wirkungsabschätzung, weshalb hierfür eine weitere Sensitivität in Abschnitt 4.8 betrachtet wird.

Auch bei der Wirkungsabschätzung treten methodenbedingte Unsicherheiten auf. Bei den verschiedenen Wirkungskategorien gibt es große Unterschiede bezüglich der Verfügbarkeit und der Qualität der Basisdaten.

Am zuverlässigsten ist die Wirkungsabschätzung von THG-Emissionen und Energieeinsatz (Unsicherheit  $\pm 10\%$ ). Die Emissionen von  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$  und Feinstaub hängen von den eingesetzten Brennstoffen, der Verbrennungstechnologie (z.B. Low- $\text{NO}_x$ -Brenner) und der Wirksamkeit der Abgasreinigung in den jeweiligen Produktionsprozessen ab (z.B. bei der Herstellung von Kupfer und Stahl). Daher ist die Datenbasis für die Berechnung von Versauerung und Eutrophierung weniger zuverlässig ( $\pm 30\%$ ) [Joliet et al. 2016]. Wenn die Region, aus der die eingesetzten Materialien (zum Beispiel Kupfer, Nickel, Stahl) bezogen wird, nicht bekannt ist, kann der Unterschied aufgrund unterschiedlicher Umweltstandards auch größer sein.

Es werden keine allgemeinen Abschneidekriterien für Prozesse festgelegt, die nur geringfügig zu Umweltauswirkungen beitragen, so lange Daten für diese Prozesse verfügbar sind.

### 2.2.9. Datenvalidierung

Eine Qualitätssicherung der Sachbilanz und der Wirkungsabschätzungsergebnisse wurde durch eine Überprüfung der Massenbilanz (Masse aller Inputs entspricht Masse aller Outputs) sowie durch ein internes Review des Berichts durch einen weiteren Mitarbeiter der LBST („4-Augen-Prinzip“) durchgeführt.

### 2.2.10. Critical Review

Der Bericht ist mit Microsoft Word geschrieben und Ergebnisse sind in Microsoft Excel dokumentiert und visualisiert. Für die Veröffentlichung der LCA ist nach ISO 14044 ein vorangehendes Critical Review durch eine Drittpartei notwendig. Dieses wurde von Februar bis März 2025 durch Frau Dr. Espinosa von TÜV SÜD nach ISO 14071 durchgeführt.

### 3. SACHBILANZ

#### 3.1. Werkstoffherstellung

Insgesamt sind im untersuchten BEV-Leitungssatz 203 und im Ottomotor-Leitungssatz 86 verschiedene Werkstoffe enthalten. Um den Aufwand für die Modellierung der Werkstoffherstellung zu begrenzen, sind die Hauptwerkstoffe mit dem höchsten Massenanteil im Detail modelliert, während die restlichen Bestandteile eines Kabelsatzes zu generischen Werkstoffgruppen zusammengefasst worden sind. Eine Übersicht aller definierten Werkstoffgruppen ist in Tabelle 2 aufgeführt.

Tabelle 2: Definierte Werkstoffgruppen und übergeordnete Materialgruppen

Materialgruppe	Werkstoffgruppe
Metall	Kupferkabel
	Kupferlegierungen
	Stahl
	Zink und Zinklegierungen
	Aluminium und Aluminiumlegierungen
	Zinn und Zinnlegierungen
	Silber und Silberlegierungen
	Nickel und Nickellegierungen
	Gold
	Siliziummetall
	Platin
Kunststoff	Elastomere / Elastomer-Verbunde
	gefüllte Thermoplaste
	ungefüllte Thermoplaste
	Schaumstoffe
Klebstoff/Farben	Kleber, Dichtstoffe
	Lacke
	Druckfarben / Tinten
Sonstiges	Textilien
	Gläser
	Halbleiter / Elektronik
	Unspezifische Beschichtungen

Als Hauptwerkstoffe für den BEV-Leitungssatz sind die ersten 26 Einträge der originalen Stückliste definiert, welche dort in absteigender Reihenfolge nach den höchsten Anteilen aufgeführt sind und in Summe etwa 95% der Gesamtmasse ausmachen. Für den Ottomotor-Leitungssatz sind es die ersten 34 Werkstoffe. Da manche Werkstoffe mit demselben Namen in der vom Kabelkonfektionär bereitgestellten Stückliste mehrmals aufgeführt sind, erfolgte eine anschließende Bereinigung der Liste, indem alle mehrfachen Einträge zusammengefasst und deren Gewichte addiert worden sind. Dementsprechend ergibt sich für die

Hauptwerkstoffe ein etwas höherer Anteil an der Gesamtmasse als 95%. Die bereinigten Stücklisten der Hauptwerkstoffe der Leitungssätze sind mit ihren zugeordneten Werkstoffgruppen in Tabelle 3 und Tabelle 5 abgebildet. Eine Übersicht der restlichen Materialmengen pro Werkstoffgruppe ist jeweils in Tabelle 4 und Tabelle 6 aufgeführt. Bei ein paar Einträgen wie PVC-P-KD20 und PVC-KD20 P handelt es sich um das gleiche Produkt, welches mit unterschiedlichen Bezeichnungen in der originalen Stückliste aufgeführt ist. Diese namensunterschiedlichen Einträge sind nicht zusammengefasst. Für die Verarbeitung der Werkstoffe werden Drahtziehen für Kupferkabel, Spritzguss für gefüllte Thermoplaste und Extrusion für gefüllte Thermoplaste und Elastomere angenommen. Die detaillierte Material-zusammensetzung alle Hauptwerkstoffe ist in den Anhängen A. 1 und A. 2 aufgeführt. Alle für die detaillierte Modellierung der Hauptwerkstoffe verwendeten ecoinvent-Datensätze sind in den Anhängen A. 3 und A. 4 angegeben.

Tabelle 3: Stückliste der Hauptwerkstoffe (Gesamtmasse > 95%) im BEV-Leitungssatz

Werkstoff	Werkstoffgruppe	Menge [g]	Anteil
Cu-ETP1	Kupferkabel	3403,6	57,53%
MQ	Elastomere / Elastomer-Verbunde	955,7	16,15%
PA6-GF30 (FR30)	gefüllte Thermoplaste	196,7	3,32%
PA66-GF30	gefüllte Thermoplaste	179,4	3,03%
PET	ungefüllte Thermoplaste	93,5	1,58%
CuPb1P	Kupferlegierungen	81,5	1,38%
PUR Flexible Integral Foam	Schaumstoffe	77,0	1,30%
PBT GF20	gefüllte Thermoplaste	75,9	1,28%
PVC-P-KD25	ungefüllte Thermoplaste	72,9	1,23%
CuZn37Pb2	Kupferlegierungen	72,2	1,22%
PES cloth 1	Textilien	62,1	1,05%
PA6-(GF10+GB20)	gefüllte Thermoplaste	58,7	0,99%
PA6-I-GF15	gefüllte Thermoplaste	38,2	0,64%
Cu-ETP	Kupferkabel	36,8	0,62%
High Copper Alloy	Kupferlegierungen	36,4	0,62%
65 (Hot rolled carbon steel strips)	Stahl	34,8	0,59%
Pressure sensitive adhesive 3	Kleber, Dichtstoffe	33,4	0,56%
PVC-P-KD20	ungefüllte Thermoplaste	31,4	0,53%
PVC-KD20 P	ungefüllte Thermoplaste	27,9	0,47%
PA6-GF15	gefüllte Thermoplaste	24,5	0,41%
PA66	ungefüllte Thermoplaste	20,0	0,34%
X5CrNi18-10	Stahl	18,4	0,31%
PA66-I	ungefüllte Thermoplaste	18,4	0,31%
PA66-I GF25 FR(52)	gefüllte Thermoplaste	17,4	0,29%
PA66-GF20	gefüllte Thermoplaste	16,1	0,27%
Cu-PHC	Kupferlegierungen	12,8	0,22%
<b>SUMME</b>			<b>96,26%</b>

Tabelle 4: Stückliste aggregierter Werkstoffe (Gesamtmasse &lt; 5%) im BEV-Leitungssatz

Werkstoff	Werkstoffgruppe	Menge [g]	Anteil
Weitere Elastomere / elastomere Verbunde	Elastomere / elastomere Verbunde	58,1	0,98%
Weitere gefüllte Thermoplaste	gefüllte Thermoplaste	48,3	0,82%
Weitere ungefüllte Thermoplaste	ungefüllte Thermoplaste	16,4	0,28%
Weitere Kupferlegierungen	Kupferlegierungen	20,1	0,34%
Weiterer Stahl	Stahl	30,4	0,51%
Weitere Schaumstoffe	Schaumstoffe	1,2	0,02%
Weitere Textilien	Textilien	4,8	0,08%
Weitere Kleber, Dichtstoffe	Kleber, Dichtstoffe	15,1	0,26%
Zink und Zinklegierungen	Zink und Zinklegierungen	9,1	0,15%
Aluminium und Aluminiumlegierungen	Aluminium und Aluminiumlegierungen	8,5	0,14%
Halbleiter / Elektronik	Halbleiter / Elektronik	6,2	0,10%
Zinn und Zinnlegierungen	Zinn und Zinnlegierungen	1,5	0,02%
Silber und Silberlegierungen	Silber und Silberlegierungen	0,7	0,01%
Nickel und Nickellegierungen	Nickel und Nickellegierungen	0,7	0,01%
Lacke	Lacke	0,02	0,0003%
Unspezifische Beschichtungen	Unspezifische Beschichtungen	0,01	0,0001%
Druckfarben / Tinten	Druckfarben / Tinten	0,01	0,0001%
Gold	Gold	0,002	0,00004%
Siliziummetall	Siliziummetall	0,001	0,00002%
Gläser	Gläser	0,001	0,00002%
Platin	Platin	0,0001	0,000001%
<b>SUMME</b>			<b>3,74%</b>

Tabelle 5: Stückliste der Hauptwerkstoffe (Gesamtmasse &gt; 95%) im Ottomotor-Leitungssatz

Werkstoff	Werkstoffgruppe	Menge [g]	Anteil
Cu-ETP1	Kupferkabel	1029,3	50,23%
HDPE FR(60)	ungefüllte Thermoplaste	154,8	7,55%
>PA66-I<	ungefüllte Thermoplaste	112,8	5,51%
PBT	ungefüllte Thermoplaste	92,8	4,53%
PA66-GF30	gefüllte Thermoplaste	54,0	2,63%
PE	ungefüllte Thermoplaste	52,3	2,55%
PE-HD FR(61)	ungefüllte Thermoplaste	48,9	2,39%
PA Cloth	Textilien	45,4	2,22%
PES cloth 1	Textilien	42,6	2,08%
PE-X-MD40-FR(61)	gefüllte Thermoplaste	35,3	1,72%
VMQ	Elastomere / Elastomer-Verbund	33,1	1,61%
PAK Adhesive	Kleber, Dichtstoffe	28,4	1,39%
PA66	ungefüllte Thermoplaste	27,4	1,34%
HDPE FR(61)	ungefüllte Thermoplaste	25,9	1,26%
Pressure sensitive adhesive 3	Kleber, Dichtstoffe	22,9	1,12%
PA46	ungefüllte Thermoplaste	22,7	1,11%
PA66-GF15	gefüllte Thermoplaste	21,8	1,06%
PA66 GF30	gefüllte Thermoplaste	18,9	0,92%
PA6-I-GF15	gefüllte Thermoplaste	15,0	0,73%
PA66-GF50	gefüllte Thermoplaste	13,9	0,68%
PE-HD-TD5-FR(61)	gefüllte Thermoplaste	12,8	0,63%
Copper Nickel	Kupferlegierungen	12,7	0,62%
CuSn0,15	Kupferlegierungen	11,6	0,57%
X10CrNi18-8	Stahl	9,3	0,45%
PA66-I	ungefüllte Thermoplaste	9,2	0,45%
PBT-GF30	gefüllte Thermoplaste	6,9	0,34%
PE-HD-MD40-FR(61)	gefüllte Thermoplaste	6,8	0,33%
PE-LD-X+EEAK-X	ungefüllte Thermoplaste	6,7	0,33%
CuSn6	Kupferlegierungen	6,6	0,32%
Copper Alloy	Kupferlegierungen	6,5	0,32%
PET Fabric	Textilien	6,0	0,29%
High Copper Alloy	Kupferlegierungen	5,1	0,25%
C75S	Stahl	4,0	0,19%
PVC	ungefüllte Thermoplaste	3,4	0,17%
<b>SUMME</b>			<b>97,89%</b>

Tabelle 6: Stückliste aggregierter Werkstoffe (Gesamtmasse &lt; 5%) im Ottomotor-Leitungssatz

Werkstoff	Werkstoffgruppe	Menge [g]	Anteil
Weitere ungefüllte Thermoplaste	ungefüllte Thermoplaste	4,1	0,20%
Weitere gefüllte Thermoplaste	gefüllte Thermoplaste	22,0	1,07%
Weitere Kleber, Dichtstoffe	Kleber, Dichtstoffe	2,5	0,12%
Weitere Kupferlegierungen	Kupferlegierungen	9,9	0,48%
Gläser	Gläser	4,0	0,20%
Zinn und Zinnlegierungen	Zinn und Zinnlegierungen	0,5	0,02%
Zink und Zinklegierungen	Zink und Zinklegierungen	0,2	0,01%
Nickel und Nickellegierungen	Nickel und Nickellegierungen	0,1	0,004%
Silber und Silberlegierungen	Silber und Silberlegierungen	0,03	0,001%
Lacke	Lacke	0,02	0,001%
Gold	Gold	0,02	0,001%
Druckfarben / Tinten	Druckfarben / Tinten	0,004	0,0002%
<b>SUMME</b>			<b>2,11%</b>

Die nicht als Hauptwerkstoffe definierten Bestandteile der Leitungssätze sind den zuvor definierten Werkstoffgruppen zugeordnet und anschließend als generische Werkstoffe modelliert. In den Anhängen A. 6 und A. 7 sind die hierbei verwendeten ecoinvent-Datensätze aufgeführt.

Die Modellierung der kupferhaltigen Hauptwerkstoffe und Kunststoffbestandteile der Leitungssätze wird im Folgenden näher dargestellt.

### 3.1.1. Kupferkabel und Kupferlegierungen

Kupfer wird in den beiden Kabelsätzen hauptsächlich für die Leitungskabel verwendet. Hierbei kommt vor allem der Werkstoff Cu-ETP<sup>2</sup> zum Einsatz, welcher einen Kupferanteil von 99,9 Massen-% hat. [Deutsches Kupferinstitut 2019].

Am Anfang des Lebenszyklus von Kupferprodukten wird zunächst kupferhaltiges Erz aus Lagerstätten gewonnen und zu Kupferkonzentraten angereichert. Bei der anschließenden Verhüttung werden diese pyrometallurgisch oder hydrometallurgisch verarbeitet. Das überwiegend angewendete Verfahren ist dabei das pyrometallurgische Verfahren für sulfidische Kupfererze [Kupferverband e.V. 2024]. Entsprechend wird für diese Studie die pyrometallurgische Verarbeitung von Kupferkonzentraten als Verfahren angenommen.

In der Datenbank ecoinvent liegt kein Prozess für die alleinige Kupferproduktion über die pyrometallurgische Route in Europa vor. Lediglich ein Datensatz zur Gewinnung von Kupfer neben Gold, Silber, Zink und Blei aus einer Mine in Schweden ist enthalten, bei der die Umweltauswirkungen zwischen den verschiedenen Produkten allokiert werden. Deshalb wird für diese Studie ein Datensatz für den globalen Herstellungsprozess verwendet, wobei es sich um eine konservative Annahme handelt.

<sup>2</sup> Durch elektrolytische Raffination hergestelltes Kupfer mit mindestens 99,9% Kupfer, maximal 0,0005 Bismut (Bi), maximal 0,04% Sauerstoff (O) und maximal 0,005% Blei (Pb)

Ein Literaturvergleich der Umweltauswirkungen von Kupfer wird für jede untersuchte Kategorien in Abschnitt 4 vorgenommen.

Für Cu-ETP, Cu-ETP1, Copper Alloy, High Copper Alloy und Cu-PHC wird jeweils 100% Kupfer modelliert. Zusätzliche Legierungsanteile werden aufgrund der sehr geringen Mengen vernachlässigt. Lediglich für CuSn0,15 wird aufgrund der genauen Angabe des Zinnanteils 0,15 Massen-% Zinn modelliert.

### 3.1.2. Kunststoffe

Für den Leitungssatz des batterieelektrisch betriebenen Fahrzeugs ist im vorliegenden Datensatz MQ nach Kupfer der Werkstoff mit dem größten Materialanteil. Bei den Werkstoffen MQ und VMQ handelt es sich um Silikonkautschuk [Northern Engineering Sheffield 2019]. Diese werden neben anderen Stoffen für die Isolierung der Kupferkabel verwendet. Nachdem es in der Datenbank ecoinvent mit „synthetic rubber production“ nur generische Prozesse für die Herstellung von synthetischem Kautschuk auf Basis von einer Sachbilanz für Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuke (EPDM) gibt, wird Silikonkautschuk eigens modelliert. Hierfür wird die Sachbilanz aus einem aktuellen Datensatz für Elastomer-Fugenbänder aus Silikonkautschuk verwendet [Ökobaudat 2023]. Dabei fällt auf, dass der erneuerbare Anteil am gesamten Primärenergieverbrauch im Vergleich zu Prozessen aus der ecoinvent-Datenbank hoch ist, was einen Einfluss auf die entsprechende Wirkungsabschätzung hat (Vgl. 4.1.1).

Die hierbei verwendeten ecoinvent-Datensätze werden in Anhang A. 5 aufgeführt.

In den beiden untersuchten Leitungssätzen kommen mehrere verschiedene Thermoplaste zum Einsatz. Polyamide (PA), Polyethylen (PE) und Polyvinylchlorid (PVC) kommen neben anderen Kunststofffraktionen als gefüllte und ungefüllte Thermoplaste vor und können Flammenschutzmittel und Weichmacher enthalten. Bei dem Werkstoff PA6-GF30 (FR30) handelt es sich beispielsweise um ein mit 30% Glasfaser gefülltes Polyamid 6 und bei dem Werkstoff HDPE FR(60) um High-Density-Polyethylen (HDPE) ohne Füllstoff. Die Kennzeichnung „FR“ beschreibt das enthaltene Flammenschutzmittel, das mit einer zweistelligen Codenummer klassifiziert wird. In beiden Fällen handelt es sich um nicht-halogenierte Flammenschutzmittel [Lumitos 2024]. Nicht-halogenierte Flammenschutzmittel haben eine insgesamt geringere Umweltauswirkung als halogenierte Alternativen und machen bei einem Massenanteil von etwa 20% bis zu 30% der Auswirkungen in den Kategorien Treibhausgaspotential, Versauerungspotential und Primärenergiebedarf eines flammgeschützten, glasfaserverstärkten Polyamid-Produkts aus [Maga et al. 2024]. Vereinfacht wird für alle modellierten flammgeschützten Werkstoffe Phosphor mit einem Massenanteil von 20% als Flammenschutzmittel angenommen.

Bei PE-HD-TD5-FR(61) handelt es sich um flammgeschütztes HDPE mit 5 Massen-% Talkfüllung [Xiamen Keyuan Plastic 2024]. Diese Füllung wird bei der Modellierung aufgrund der geringen Menge und Umweltwirkung vernachlässigt.

In PVC-P-KD25 ist ein Weichmacheranteil von 25% enthalten [Netzsch 2024]. Hierfür wird Dioctylterephthalat modelliert, welcher u.a. als Weichmacher für Kunststoffe Anwendung findet [Lumitos 2025].

Bei PA6-I und PA66-I handelt es sich um schlagzäh-modifizierte Polyamid-Komponenten [Albis 2024]. Hierbei kommt beispielsweise ein geringer Anteil an Elastomeren zum Einsatz [Ardlon 2024]. Da keine signifikanten Unterschiede der Umweltauswirkungen vorliegen, wird vereinfacht PA6 und PA66 modelliert.

Ebenso wird für PA46 vereinfacht der Prozess für PA66 im Modell verwendet, da es hierzu keinenecoinvent-Prozess gibt.

Bei PE-X-MD40-FR(61) handelt es sich um vernetztes PE mit 40 Massen-% mineralischen Additiven [Kunststoffrohrverband e.V 2007], [Rehau 2021]. Die Vernetzung des Kunststoffs wird vernachlässigt. Für die Füllung wird bei der Modellierung Kreide angenommen.

PE-LD-X+EEAK-X ist ein Werkstoff aus PE und einem Ethylen-Ethyl-Acrylat (EEA) Copolymer [Entec 2024]. Da zur genauen Zusammensetzung keine Daten verfügbar sind und auch für Ethylen-Ethyl-Acrylat kein Prozess in ecoinvent enthalten ist, wird hinsichtlich des geringen Anteils von 7 g im Leitungssatz des Ottomotor-PKW für diesen Werkstoff vereinfacht PE angenommen.

Zu Polybutadien (PBT) gibt es in der Datenbank ecoinvent ebenfalls keinen entsprechenden Prozess. Die Herstellung dieses Kunststoffs wird nach dem veröffentlichten Datenblatt von Plastics Europe zu PBT eigens modelliert [Boustead 2005]. Die Modellierung der Sachbilanz für PBT wird in Anhang A. 5 dargestellt.

### 3.1.3. Transport der Werkstoffe zur Fertigung

Für den Transport der Werkstoffe zu der Kabelsatzfertigung werden generische Transportdistanzen und Transportmodi für in Europa hergestellte Vorprodukte angenommen. Hierfür werden alle Transportprozesse aus dem ecoinvent-Datensatz "market for nylon 6 | nylon 6 | Cutoff, U - RER" übernommen. Die Transportdistanzen betragen hierbei etwa 44 km für Zugtransport, 22 km für inländischen Schifftransport und 171 km für den Straßentransport. Die Transportleistungen in Tonnenkilometern sind jeweils auf die Gesamtmasse der Werkstoffe für die Leitungssätze hochgerechnet. Die letztendlichen Transportleistungen sowie die für die Modellierung verwendeten Prozesse sind in den Anhängen A. 8 und A. 9 aufgeführt.

Nachdem es sich hierbei um eine generische Darstellung der Produktion der Werkstoffe bzw. Materialien in Europa handelt, können die Transportdistanzen nicht als repräsentativ für beide Produkte im Allgemeinen gesehen werden. Tatsächliche Entfernungen hängen von den Standorten der Zulieferer und der Konfektionäre ab. Transporte in internationalen Lieferketten gehen in den meisten Fällen mit höheren Emissionen einher.

## 3.2. Fertigung Leitungssatz

Abbildung 5 stellt die Inputs, Outputs sowie einzelne Teilprozesse der Fertigung von Teilleitungssätzen nach [Abouljalil & Amrani 2020] dar. Zunächst werden Werkstoffe miteinander verbunden (Spleißen) und Kabel montiert (Konfektionierung). Anschließend werden alle Steckverbindungen hergestellt und Kabel weiter isoliert (Taping). Zuletzt erfolgt eine Nachbearbeitung.

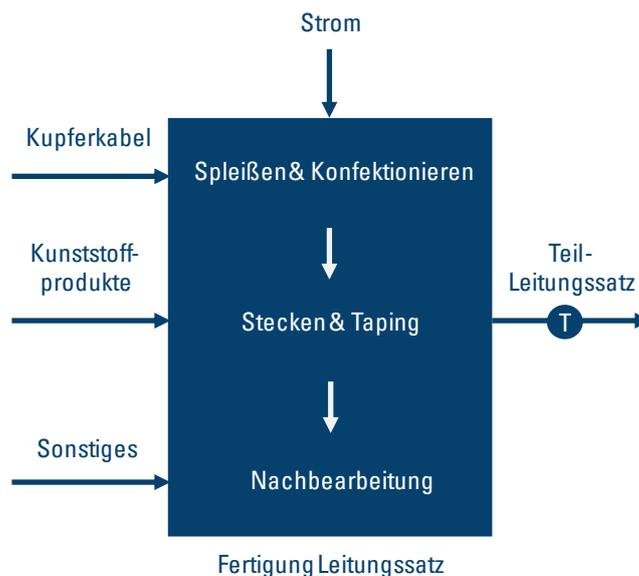


Abbildung 5: Fertigungsprozess von Kabelbäumen nach [Abouljalil & Amrani 2020]

### 3.2.1. Strombedarf für Fertigung

Bei der Serienfertigung von Kabelbäumen werden Kabelenden mit verschiedenen Verfahren miteinander verbunden oder für Anschlüsse vorbereitet [COOP 2024]. Für die Fertigung des BEV-Leitungssatzes teilt der Konfektionär einen Emissionswert von 1,5687 kg CO<sub>2</sub>-Eq mit und für den Ottomotor-Leitungssatzes einen Emissionswert von 1,5181 kg CO<sub>2</sub>-Eq. Zu den dabei zum Einsatz kommenden Energieträgern liegen keine Daten vor. Es wird deshalb angenommen, dass die Emissionen ausschließlich durch den Strombedarf für die Fertigung entstehen und hierbei der deutsche Strommix verwendet wird. Entsprechend dem ecoinvent-Prozess „market for electricity, medium voltage | electricity, medium voltage | Cutoff, U – DE“ ergibt sich daraus für Leitungssatz des BEV ein Strombedarf von etwa 3,7 kWh und für den Ottomotor-Leitungssatz 3,6 kWh (Vgl. Anhänge A. 10 und A. 11).

### 3.2.2. Transport der Leitungssätze

Für den Transport des fertigen BEV-Leitungssatzes zur Installation gibt der Konfektionär einen Emissionswert von 0,9487 kg CO<sub>2</sub>-Eq an und für den Kabelsatz des Ottomotors einen Emissionswert von 0,835 kg CO<sub>2</sub>-Eq. Für die Berechnung der Transportleistungen wird der generische ecoinvent-Prozess „market for transport, freight, lorry, unspecified - RER“ modelliert. Aus dem Dividieren der Transportemissionen des Herstellers durch den Emissionsfaktor pro Tonnenkilometer für den modellierten Prozess ergeben sich die Werte in den Anhängen A. 12 und A. 13. Für den BEV-Leitungssatz entspricht dies einer Transportdistanz von etwa 1047 km und für den Ottomotor-Leitungssatz einer Distanz von ungefähr 2662 km. Die signifikant höhere Transportstrecke für den Leitungssatz des konventionell betriebenen Kfz lässt sich auf den von Zentraleuropa weiter entfernt liegenden Herstellungsort zurückführen.

Diese Transportdistanzen können nicht als repräsentativ für BEV- und Ottomotor-Kabelsätze allgemein gesehen werden. Tatsächliche Entfernungen hängen von den Standorten der Konfektionäre und der Kunden ab.

Es wird angenommen, dass keine Umweltauswirkungen durch den Einbau der Kabelsätze in Fahrzeuge entstehen und dass die Nutzungsphase ebenfalls keinen Einfluss auf die Wirkungsabschätzung hat.

### 3.3. Nutzung

Die Nutzung der Teilleitungssätze wird wie bereits in Abschnitt 2.2.3 erläutert nicht betrachtet.

### 3.4. End-of-Life

#### 3.4.1. Transport zu EoL

Für den Transport der Leitungssätze nach der Nutzung wird der generische Transportmodus und die Transportleistung aus dem ecoinvent-Datensatz „market for scrap copper | scrap copper | Cutoff, U - Europe without Switzerland“ übernommen. Dieser gibt eine Distanz von 77 km bis zum Standort der Entsorgung bzw. des Recyclings an. Die entsprechenden Transportleistungen werden in den Anhängen A. 14 und A. 15 aufgeführt.

#### 3.4.2. Entsorgung und Recycling von Leitungssatzbestandteilen

Am Ende des Lebenszyklus von Fahrzeugen werden diese demontiert und anschließend geschreddert. Kabelbäume verbleiben dabei überwiegend in den Altfahrzeugen und werden geschreddert [Umweltbundesamt 2020]. Im Anschluss erfolgt die Wiedergewinnung einzelner Materialien aus den Schredderfraktionen. In Deutschland wurden im Jahr 2021 so insgesamt 97,5 % der Altfahrzeugmasse verwertet, davon 90,0 % stofflich [Umweltbundesamt 2024]. Als edles Metall bestehen bei Kupfer sehr gute Möglichkeiten der Abtrennung von Fremdstoffen und der Gewinnung von hochreinem Sekundärkupfer, jedoch kommt es auch zu geringen Verlusten [Umweltbundesamt 2020].

Der Schredderprozess wird in der vorliegenden Studie mit dem ecoinvent-Datensatz „treatment of waste electric and electronic equipment, shredding | waste electric and electronic equipment | Cutoff, U – GLO“ modelliert. Daraufhin folgt ein Sortieren der Schredderfraktionen mit dem Prozess „treatment of metal scrap, mixed, for recycling, unsorted, sorting | iron scrap, sorted, pressed | Cutoff, U - Europe without Switzerland“. Die vorangehende Entnahme des Kabelsatzes aus dem Fahrzeug wird nicht berücksichtigt.

Für Kupferkabel wird eine Recyclingquote von 90% angenommen und eine entsprechende Gutschrift durch die Substitution von Primärmaterial durch dieses Sekundärkupfer modelliert. Um einen geschlossenen Wertstoffkreislauf (Closed Loop) für Kupfer darzustellen, wird nach der „Avoided Burden“ Methode eine Gutschrift in Höhe der Materialmenge des rezyklierten Kupferanteils modelliert [Frischknecht 2010]. Es wird also angenommen, dass das durch elektrolytische Raffination im Recyclingprozess gewonnene Sekundärkupfer zu 100% als Sekundärmaterial für die Herstellung eines neuen Leitungssatzes verwendet wird. Hier ist anzumerken, dass diese Gutschrift nur unter den Annahmen angerechnet werden kann, dass ein Auto am Ende des Lebenszyklus wirklich in Deutschland verbleibt und einen fachgerechten Verwertungsprozess durchläuft. Für das End-of-Life in anderen Ländern, insbesondere im EU-Ausland, sind andere Annahmen zu treffen. Jährlich werden über eine halbe Million Gebrauchtwagen aus Deutschland ins Ausland verkauft und am Ende des Lebenszyklus belastet der Schrott in Ländern wie Ghana die Umwelt und die Gesundheit der Bevölkerung [Bayerischer Rundfunk 2023]. Entsprechend wird als Sensitivität in Abschnitt 4.8 eine unsachgerechte Verwertung der Leitungssätze in Ghana durch Kabelverbrennung, ohne eine Recycling-Gutschrift betrachtet.

Für Silber, Nickel, Gold und Platin wird ebenfalls ein Recyclingprozess modelliert, jedoch die Gutschrift vernachlässigt. Ein Recycling von Stahl und Aluminium im Kabelsatz ist technisch möglich, wird hier jedoch

wegen der sehr geringen Mengen nicht berücksichtigt. Ebenso wird angenommen, dass Legierungen nicht stofflich wiederverwertet werden. Für alle Kunststoffe wird angenommen, dass diese nach dem Schreddern zu 100% entsorgt werden.

Die Auswahl der Entsorgungsverfahren ist begrenzt durch die Verfügbarkeit an entsprechenden Prozessen in der ecoinvent-Datenbank. Für die Entsorgung der meisten Werkstoffgruppen wurde eine thermische Verwertung ohne Berücksichtigung der Energierückgewinnung modelliert. Eine Übersicht aller für die Modellierung des End-of-Life verwendeten ecoinvent-Datensätze ist im Anhang A. 16 abgebildet.

## 4. ERGEBNISSE DER WIRKUNGSABSCHÄTZUNG

### 4.1. Gesamtergebnisse für Werkstoffherstellung

Die Werkstoffherstellung ist für beide Leitungssätze und alle Wirkungskategorien mit den höchsten Umweltauswirkungen verbunden. Deshalb wird hier zunächst eine Übersicht der Ergebnisse für diese Lebenszyklusphase dargestellt. In den Ergebnissen für die Werkstoffherstellung ist keine Gutschrift durch das Recycling der Kupferkabel enthalten, da diese der Lebenszyklusphase End-of-Life angerechnet wird. In den darauffolgenden Abschnitten werden dann jeweils die Ergebnisse für den ganzen Lebenszyklus für die einzelnen Wirkungskategorien aufgeführt. Es ist anzumerken, dass die Wirkungsabschätzungsergebnisse relative Aussagen sind und daraus keine Voraussagen über Auswirkungen auf die Wirkungsendpunkte, Schwellenwertüberschreitungen, Sicherheitsspannen oder Risiken getroffen werden können.

#### 4.1.1. BEV-Leitungssatz

Tabelle 7 stellt die Ergebnisse aller Wirkungskategorien für die Werkstoffherstellung des BEV-Leitungssatzes dar. Entsprechend der hohen Materialanteile im Produkt stellen Kupferkabel und Elastomere in nahezu allen Wirkungskategorien die beiden Werkstoffgruppen mit den höchsten absoluten Umweltwirkungen dar. In Abbildung 6 sind die relativen Gesamtergebnisse aller Materialgruppen dar, wobei auffällig ist, dass Metalle mit etwa 98% den weitaus höchsten Anteil am Versauerungspotential des Leitungssatzes haben.

Tabelle 7: Absolute Ergebnisse der Werkstoffherstellung aller Wirkungskategorien des BEV-Leitungssatzes

	Resources	GWP 100	AP	CED Renewable	CED Fossil
Einheit	[kg]	[kg CO <sub>2</sub> -Eq]	[kg SO <sub>2</sub> -Eq]	[MJ]	[MJ]
Kupferkabel	3,404	31,057	2,378	98,877	415,134
Elastomere / Elastomer-Verbunde	1,014	8,079	0,017	66,294	111,636
gefüllte Thermoplaste	0,655	4,995	0,020	4,874	85,957
ungefüllte Thermoplaste	0,280	1,196	0,004	1,223	25,443
Kupferlegierungen	0,260	2,062	0,157	6,497	27,444
Stahl	0,084	0,239	0,001	0,396	2,772
Schaumstoffe	0,078	0,400	0,001	0,680	8,515
Textilien	0,067	0,312	0,001	0,274	6,348
Kleber, Dichtstoffe	0,049	0,304	0,001	0,288	5,678
Zink und Zinklegierungen	0,009	0,023	0,0002	0,058	0,375
Aluminium und Aluminiumlegierungen	0,008	0,062	0,0003	0,372	0,989
Halbleiter / Elektronik	0,006	0,396	0,004	0,580	5,622
Zinn und Zinnlegierungen	0,001	0,016	0,0001	0,026	0,212
Silber und Silberlegierungen	0,001	0,394	0,003	0,438	5,376
Nickel und Nickellegierungen	0,001	0,007	0,001	0,021	0,077

Lacke	0,00002	0,00004	0,0000005	0,0001	0,001
Unspezifische Beschichtungen	0,00001	0,00004	0,0000003	0,0001	0,001
Druckfarben / Tinten	0,00001	0,00002	0,0000001	0,0001	0,0004
Gold	0,000002	0,025	0,001	0,418	0,549
Siliziummetall	0,000001	0,0001	0,0000002	0,001	0,002
Gläser	0,000001	0,000001	0,00000001	0,000001	0,00001
Platin	0,0000001	0,001	0,001	0,001	0,019
<b>Total</b>	<b>5,916</b>	<b>49,569</b>	<b>2,591</b>	<b>181,317</b>	<b>702,150</b>

GWP: Global Warming Potential (Treibhauseffekt); AP: Acidification Potential (Versauerung); CED: Cumulative Energy Demand (kumulierter Energiebedarf)

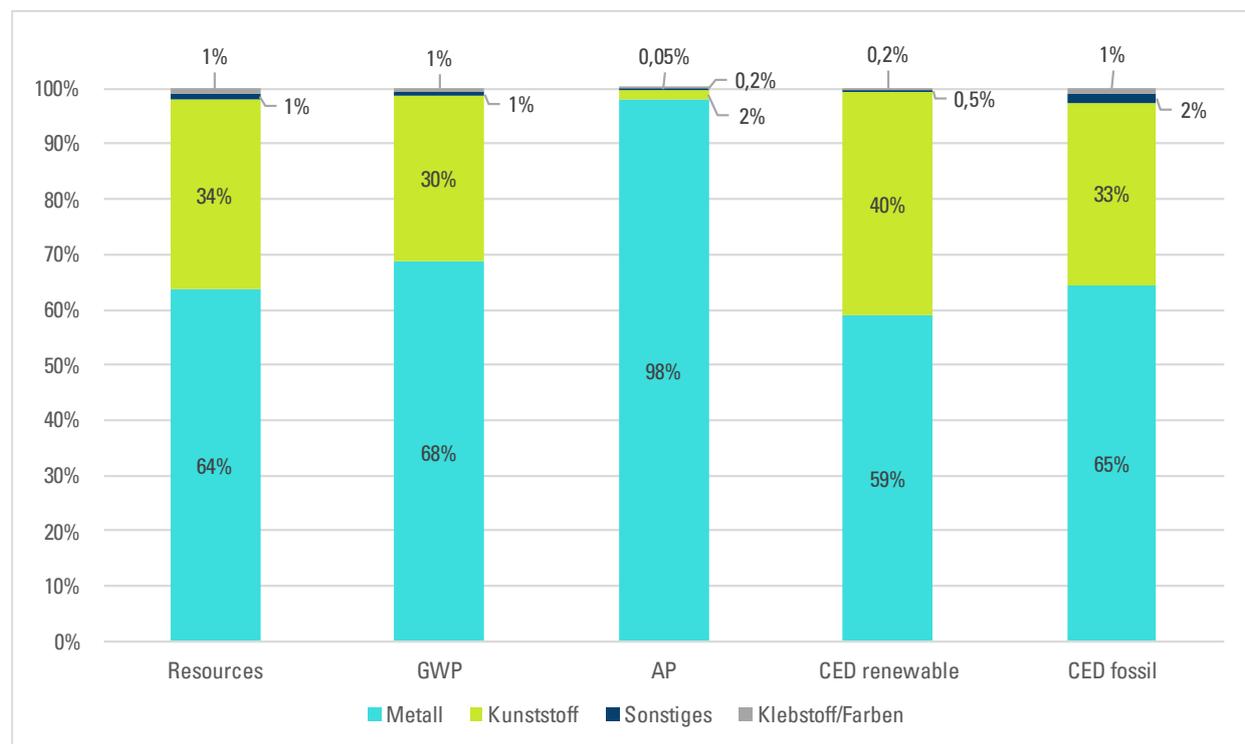


Abbildung 6: Relative Ergebnisse der Werkstoffherstellung aller Wirkungskategorien des BEV-Leitungssatzes

#### 4.1.2. Ottomotor-Leitungssatz

Eine Übersicht der Ergebnisse aller Wirkungskategorien für die Werkstoffherstellung des Ottomotor-Leitungssatzes ist in Tabelle 8 aufgeführt. Neben Kupferkabeln sind ungefüllte und gefüllte Thermoplaste die größten Verursacher von Umweltauswirkungen, was sich darauf zurückführen lässt, dass diese die drei Werkstoffgruppen mit den höchsten Materialanteilen im Kabelsatz ausmachen. Abbildung 7 zeigt ein ähnliches relatives Ergebnis wie für den BEV-Leitungssatz, wobei Metalle hier etwa 97% des Versauerungspotentials verursachen. In dem Vergleich fällt auch auf, dass Kunststoffe beim Leitungssatz des Ottomotors einen höheren Anteil an der Gesamtmasse ausmachen, was in den meisten Wirkungskategorien prozentual höhere Umweltauswirkungen durch diese Materialgruppe zur Folge hat.

Tabelle 8: Absolute Ergebnisse der Werkstoffherstellung aller Wirkungskategorien des Ottomotor-Leitungssatzes

	Resources	GWP 100	AP	CED Renewable	CED Fossil
Einheit	[kg]	[kg CO <sub>2</sub> -Eq]	[kg SO <sub>2</sub> -Eq]	[MJ]	[MJ]
Kupferkabel	1,029	9,392	0,719	29,901	125,540
ungefüllte Thermoplaste	0,876	2,969	0,014	3,256	66,119
gefüllte Thermoplaste	0,242	1,661	0,006	1,693	30,196
Textilien	0,094	0,607	0,002	0,267	11,154
Kleber, Dichtstoffe	0,052	0,452	0,036	1,423	5,920
Kupferlegierungen	0,054	0,338	0,001	0,319	6,301
Elastomere / elastomere Verbunde	0,033	0,273	0,001	2,283	3,683
Stahl	0,00002	0,244	0,005	4,136	5,430
Gläser	0,013	0,051	0,0002	0,128	0,611
Zinn und Zinnlegierungen	0,00003	0,014	0,0001	0,016	0,193
Zink und Zinklegierungen	0,0005	0,005	0,00005	0,009	0,069
Nickel und Nickellegierungen	0,004	0,004	0,00003	0,002	0,047
Silber und Silberlegierungen	0,0001	0,001	0,0001	0,002	0,009
Lacke	0,0002	0,001	0,000004	0,001	0,009
Gold	0,00002	0,0001	0,000001	0,000	0,001
Druckfarben / Tinten	0,000004	0,00002	0,0000001	0,0001	0,0003
<b>Grand Total</b>	<b>2,399</b>	<b>16,013</b>	<b>0,785</b>	<b>43,438</b>	<b>255,283</b>

GWP: Global Warming Potential (Treibhauseffekt); AP: Acidification Potential (Versauerung); CED: Cumulative Energy Demand (kumulierter Energiebedarf)

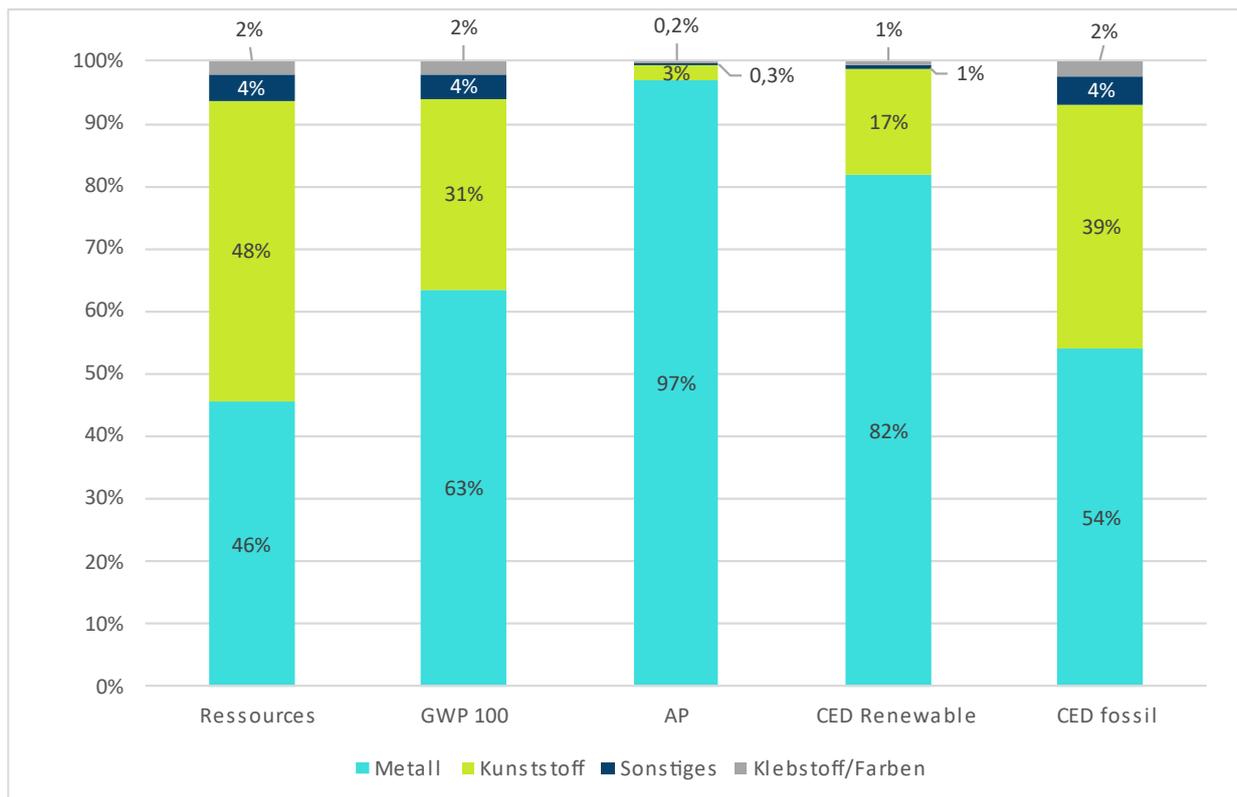


Abbildung 7: Relative Ergebnisse der Werkstoffherstellung aller Wirkungskategorien des Ottomotor-Leitungssatzes

## 4.2. Ressourcenverbrauch

Für den Ressourcenverbrauch ist im Folgenden eine Materialbilanz statt eine Wirkungsabschätzung dargestellt. Hierdurch lässt sich ein besseres Verständnis über die Materialzusammensetzung der beiden Produkte und über enthaltene strategische und kritische Rohstoffe gewinnen.

Die verwendeten Werkstoffe und Materialien für die Kabelsatz-Herstellung wurden zuvor in 3.1 aufgeführt. Tabelle 9 stellt die Mengen aller Werkstoffe der beiden betrachteten Leitungssätze gegenüber. Dabei ist anzumerken, dass durch Aggregation der Werkstoffe mit geringen Mengen zu Werkstoffgruppen nicht die exakten Materialmengen abgebildet werden.

Es fällt auf, dass der Leitungssatz des Ottomotors aufgrund des geringeren Gesamtgewichts geringere Mengen an Metallen und Kunststoffen enthält. Auf Werkstoffgruppen-Ebene stellen hier nur Gold und ungefüllte Thermoplaste eine Ausnahme dar, die in höheren Mengen als im BEV-Leitungssatz vorkommen. Aluminium und Aluminiumlegierungen, Siliziummetalle, Platin und Schaumstoffe sind der Stückliste nach nicht im Ottomotor-Kabelsatz enthalten.

Im Gegensatz hierzu weist der Kabelsatz des BEV jeweils geringere Mengen für die Materialgruppen Klebstoffe und Farben sowie Sonstiges auf. Dies lässt sich vor allem auf den mengenmäßig höheren Einsatz von Klebern, Dichtstoffen, Lacken, Textilien und Gläsern im Ottomotor-Leitungssatz zurückführen. Halbleiter, Elektronik und nicht spezifische Beschichtungen sind nicht im Ottomotor-Kabelsatz enthalten.

Insgesamt enthält der BEV-Leitungssatz mehr strategische und kritische Rohstoffe.

Tabelle 9: Absoluter Materialbedarf für den BEV-Leitungssatz und den Ottomotor-Leitungssatz

Materialgruppe	Werkstoffgruppe	Menge in BEV-Leitungssatz [g]	Menge in Ottomotor-Leitungssatz [g]
Metall	Kupferkabel*	3403.64	1029.29
	Kupferlegierungen*	259.63	52.36
	Stahl	83.60	13.26
	Zink und Zinklegierungen	9.07	0.22
	Aluminium und Aluminiumlegierungen	8.49	-
	Zinn und Zinnlegierungen	1.47	0.48
	Silber und Silberlegierungen	0.71	0.03
	Nickel und Nickellegierungen*	0.68	0.08
	Gold	0.0021	0.02
	Siliziummetall*	0.0013	-
	Platin*	0.00008	-
	<b>SUMME</b>	<b>3767.30</b>	<b>1095.73</b>
Kunststoff	Elastomere / Elastomer-Verbunde	1013.83	33.09
	gefüllte Thermoplaste	655.15	207.32
	ungefüllte Thermoplaste	280.34	560.98
	Schaumstoffe	78.24	-
	<b>SUMME</b>	<b>2027.56</b>	<b>801.39</b>
Klebstoff/Farben	Kleber, Dichtstoffe	48.51	53.83
	Lacke	0.017	0.022
	Druckfarben / Tinten	0.005	0.004
	<b>SUMME</b>	<b>48.53</b>	<b>53.86</b>
Sonstiges	Textilien	66.84	94.00
	Gläser	0.001	4.00
	Halbleiter / Elektronik*	6.21	-
	Unspezifische Beschichtungen	0.006	-
	<b>SUMME</b>	<b>73.06</b>	<b>97.99</b>

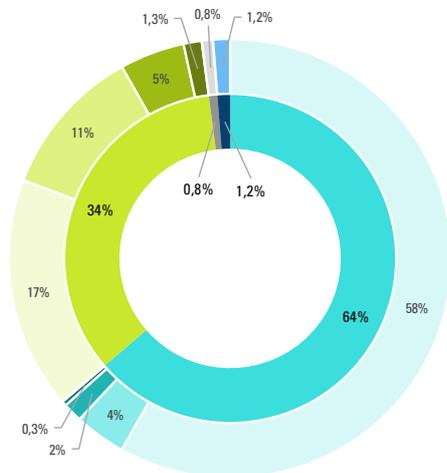
\* Kupfer, Nickel, Platingruppenmetalle sowie Siliziummetall und natürlicher Graphit (z.B. in Elektronik) sind strategische und kritische Rohstoffe nach Verordnung (EU) 2024/1252 [EU 2024]

Abbildung 8 stellt den relativen Materialbedarf der beiden Kabelsätze gegenüber. Auffällig ist, dass der BEV-Leitungssatz mit 64% insgesamt einen höheren Anteil an Metallen enthält, was sich aufschlüsseln lässt nach 58% Kupferkabeln, 4% Kupferlegierungen sowie etwa 2% Stahl und sonstigen Metallen. Im Vergleich hierzu weist der Ottomotor-Leitungssatz einen Metallanteil von 53% auf, der sich aus 50% Kupferkabeln, 2% Kupferlegierungen und 1% sonstigen Metallwerkstoffen zusammensetzt.

Der BEV-Kabelsatz enthält hingegen nur 34% Kunststoffe, davon Elastomere bzw. Elastomerverbunde mit einem Anteil von 17% an der Gesamtmasse, gefüllte Thermoplaste mit 11% und ungefüllte Thermoplaste

mit 5%. Im Ottomotor-Leitungssatz sind 39% Kunststoffe enthalten, wobei ungefüllte Thermoplaste hier mit 27% den größten Anteil ausmachen, gefolgt von gefüllten Thermoplasten mit 10% und Elastomeren sowie Schaumstoffen mit etwa 2%.

Ressourcenverbrauch BEV-Leitungssatz



Ressourcenverbrauch Ottomotor

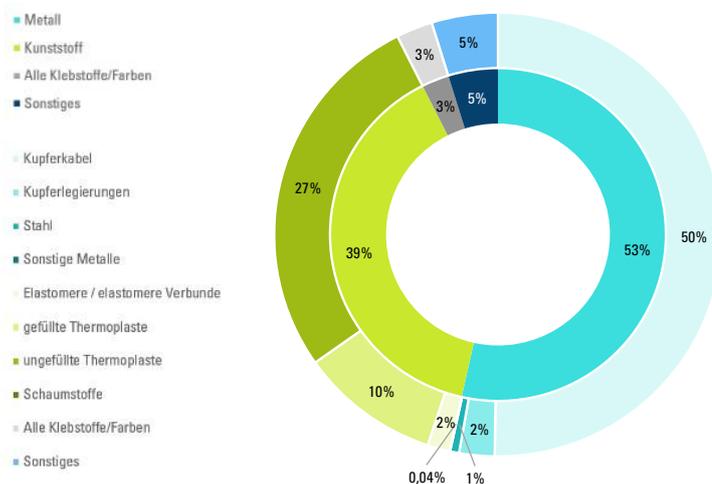


Abbildung 8: Relativer Materialbedarf für den BEV-Leitungssatz und Ottomotor-Leitungssatz (gesamt)

### 4.2.1. BEV-Leitungssatz

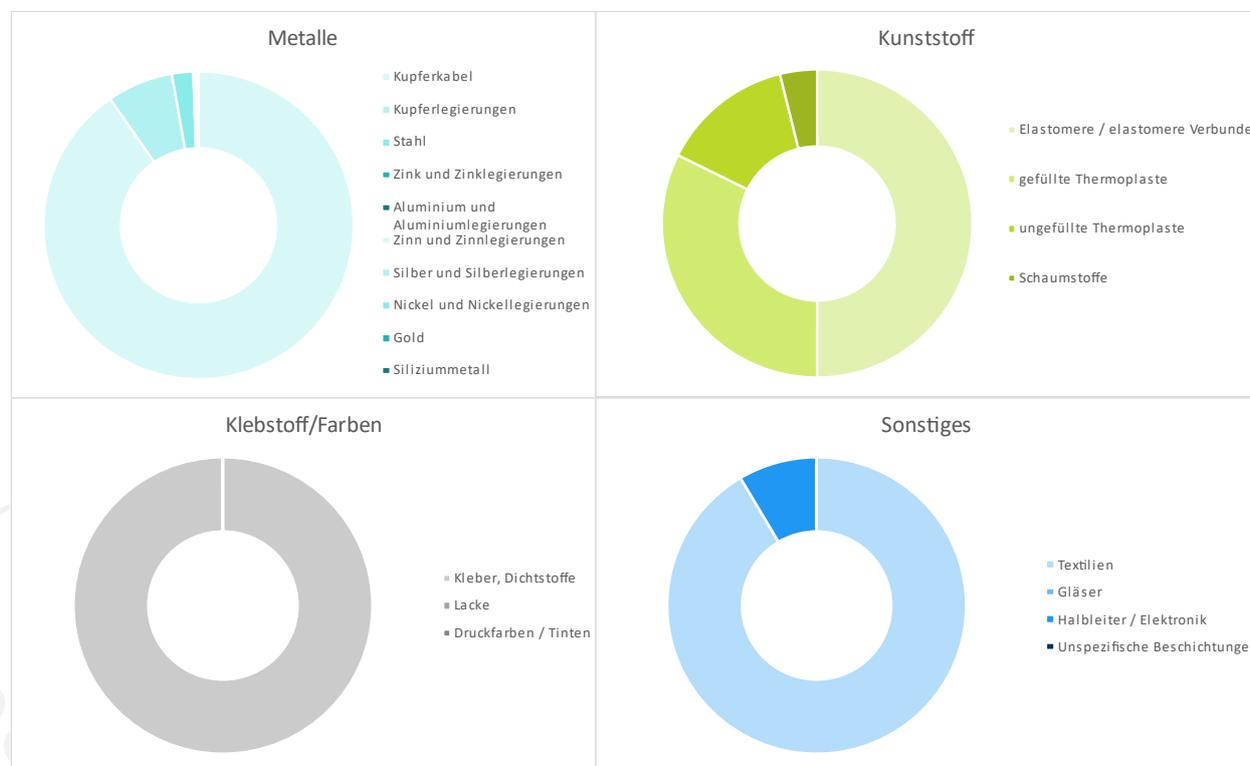


Abbildung 9: Relativer Materialbedarf für den BEV-Leitungssatz (nach Materialgruppe)

Innerhalb der Materialgruppen des BEV-Leitungssatzes lässt sich in Abbildung 9 erkennen, dass Zink, Aluminium, Zinn, Silber, Nickel, Gold und Silizium zusammen nur einen sehr geringen Anteil (etwa 1%) an

allen enthaltenen Metallen aufweisen. Schaumstoffe stellen unter allen Kunststoffen einen Massenanteil von knapp 4% dar. Innerhalb der Materialgruppe Klebstoffe und Farben machen letztere nur weniger als 0,0005% des Gewichts aus. Die Sonstigen Werkstoffe teilen sich zu 91% in Textilien, zu nahezu 9% in Halbleiter und Elektronik sowie ansonsten zu Gläsern und unspezifischen Beschichtungen auf.

#### 4.2.2. Ottomotor-Leitungssatz

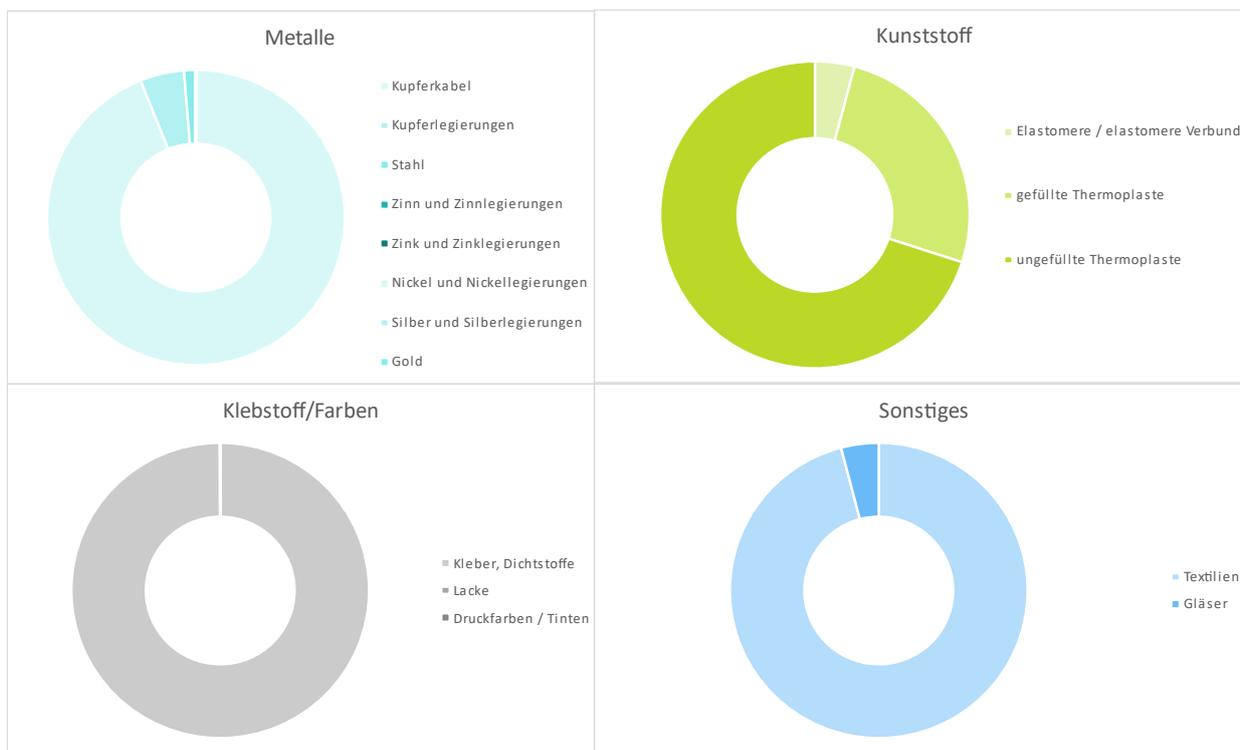


Abbildung 10: Relativer Materialbedarf für den Ottomotor-Leitungssatz (nach Materialgruppe)

Abbildung 10 stellt die Anteile der Werkstoffe des Ottomotor-Kabelsatzes innerhalb der Materialgruppen dar. Auch hier stellen Zinn, Zink, Nickel, Silber und Gold zusammen nur einen Anteil von etwa 1% dar. Kunststoffe lassen sich zu 70% ungefüllten Thermoplasten, 26% gefüllten Thermoplasten und 4% Elastomeren und Elastomerverbunden aufschlüsseln. Wie beim BEV-Leitungssatz machen Lacke, Druckfarben und Tinten in einer Gruppe mit Klebstoffen und Farben nur einen Anteil von etwa 0,0005% aus. Die Gruppe der sonstigen Bestandteile setzt sich zusammen aus 96% Textilien und 4% Gläsern.

### 4.3. Treibhausgaspotential

#### 4.3.1. BEV-Leitungssatz

##### 4.3.1.1. Gesamtergebnis

Abbildung 11 stellt das Treibhausgaspotential für alle Lebenszyklusphasen des BEV-Leitungssatzes dar. Es fällt auf, dass die Fertigung sowie alle Transporte im Vergleich zur Werkstoffherstellung nur mit sehr geringen Emissionen (< 6%) verbunden sind. Aufgrund der mangelnden Primärdaten und der oberflächlichen Modellierung der Transporte und der Fertigung sind die Ergebnisse für Fertigung und Transport in dieser und allen anderen Wirkungskategorien jedoch mit hohen Unsicherheiten verbunden

(Vgl. Abschnitt 2.2.8, 3.1.3, 3.2 und 3.4.1). Durch End-of-Life-Prozesse treten Emissionen in Höhe von 24% der Werkstoffherstellung auf. Die Gutschrift für das Recycling von Kupferkabeln wird in der Grafik zur besseren Übersicht als separater Balken dargestellt, auch wenn sie Teil des End-of-Life ist. In Summe ergibt sich aus EoL-Emissionen und Gutschrift eine Einsparung.

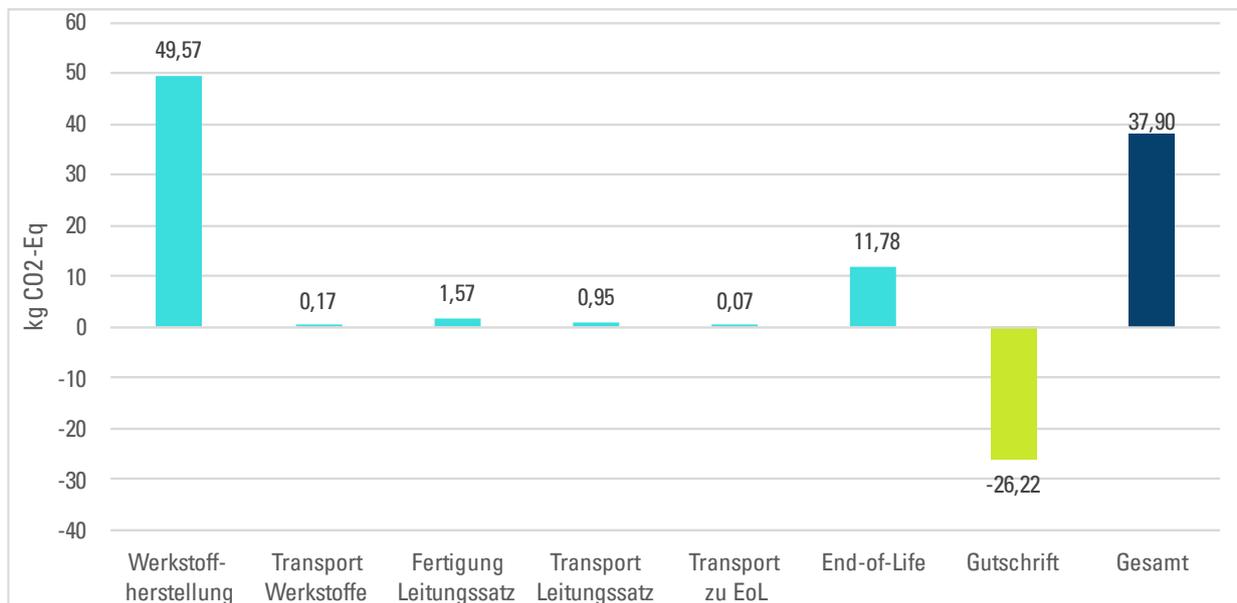


Abbildung 11: Ergebnis des Treibhausgaspotentials des BEV-Leitungssatzes über den gesamten Lebenszyklus

#### 4.3.1.2. Werkstoffherstellung

Abbildung 12 zeigt das relative Treibhausgaspotential der Materialgruppen des BEV-Kabelsatzes für die Werkstoffherstellung. Metalle haben den höchsten Einfluss auf diese Wirkungskategorie, gefolgt von Kunststoffen. Weitere Komponenten wie Klebstoffe und Farben machen etwa 2% des Ergebnisses aus. In Abbildung 13 werden die relativen Emissionen weiter nach Werkstoffkategorie unterteilt. 63% des Treibhausgaspotentials der Werkstoffherstellung entsteht durch Kupferkabel, während Elastomere bzw. Elastomerverbunde einen Anteil von 16% aufweisen. Bei Letzteren handelt es sich fast ausschließlich um die Kabelisolierung durch den Werkstoff MQ, welcher etwa 16% der Gesamtmasse ausmacht (Vgl. Abschnitt 3.1). Gefüllte und ungefüllte Thermoplaste machen zusammen etwa 12% der Emissionen aus. Kupferlegierungen tragen zu 4% bei und alle weiteren Werkstoffgruppen haben jeweils einen Anteil von etwa 1% oder geringer. Abbildung 14 illustriert die materialspezifischen Ergebnisse der Werkstoffgruppen in diesem Kabelsatz, wobei Platin und Gold jeweils Werte von über 10.000 kg CO<sub>2</sub>-Eq pro kg Material aufweisen. Die spezifischen Treibhausgaspotentiale von Silber und Silizium liegen mit etwa 550 und 80 kg CO<sub>2</sub>-Eq pro kg Material ebenfalls deutlich über den anderen Werkstoffgruppen. Diese vier Materialien machen zusammen aber nur etwa 0,01% der Leitungssatzmasse aus, weshalb ihr Einfluss auf das Gesamtergebnis sehr gering ist.

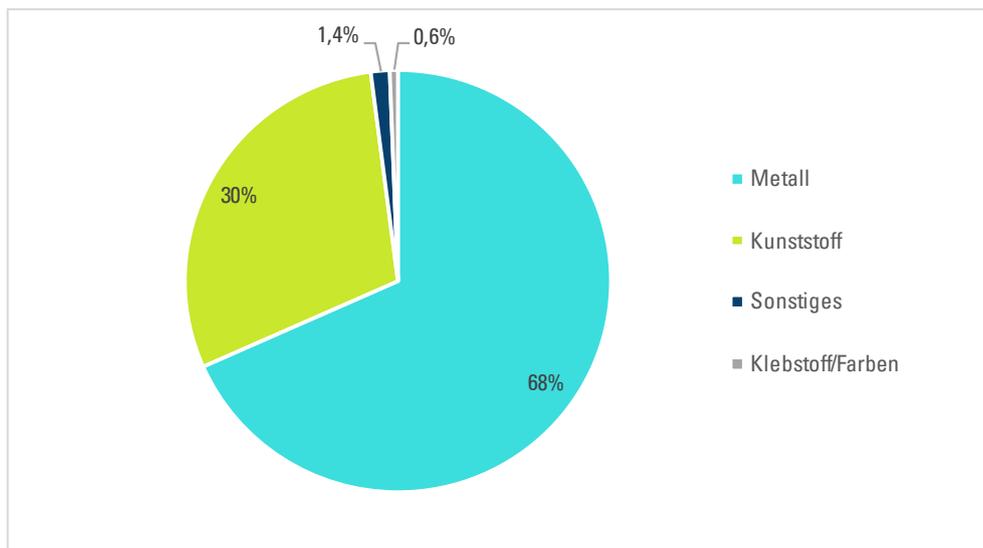


Abbildung 12: Ergebnis Anteile des Treibhausgaspotentials der Werkstoffherstellung des BEV-Leitungssatzes nach Materialkategorien

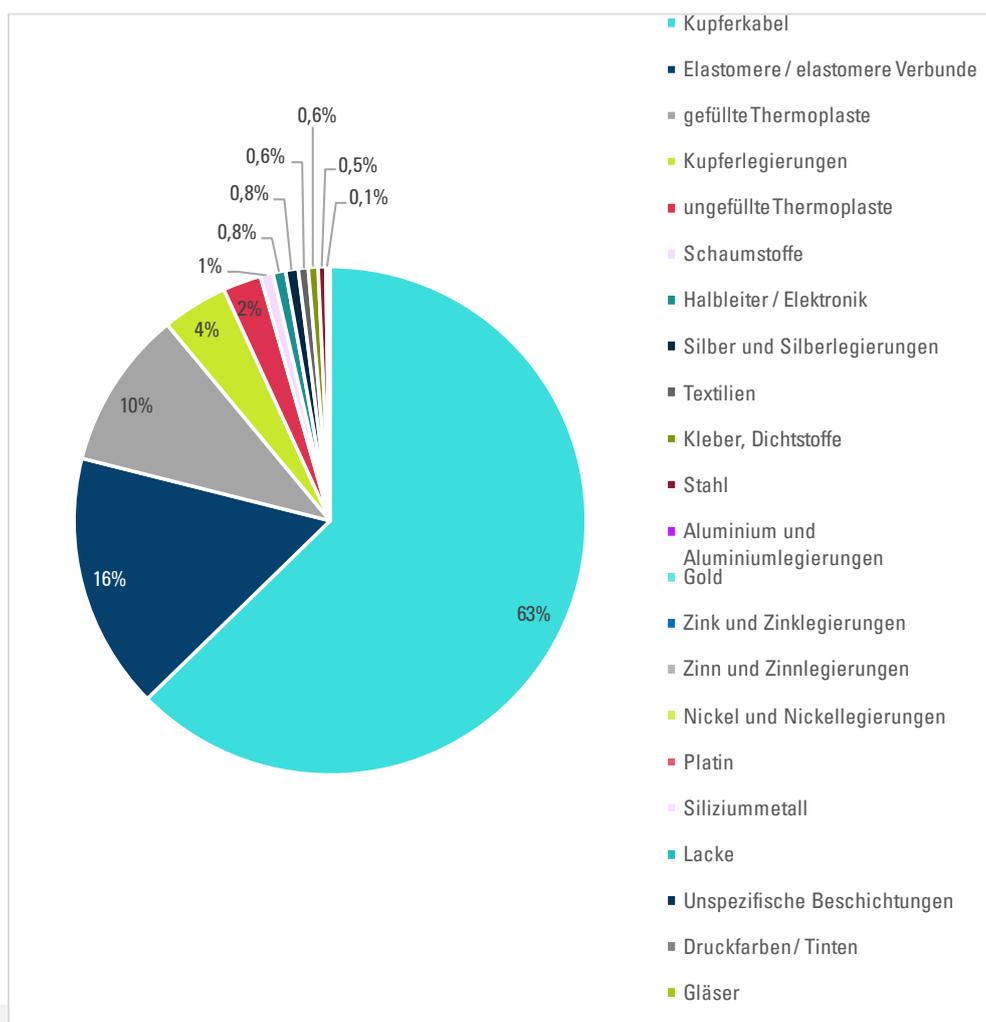


Abbildung 13: Ergebnis der Anteile des Treibhausgaspotentials der Werkstoffherstellung des BEV-Leitungssatzes nach Materialgruppen (detailliert)

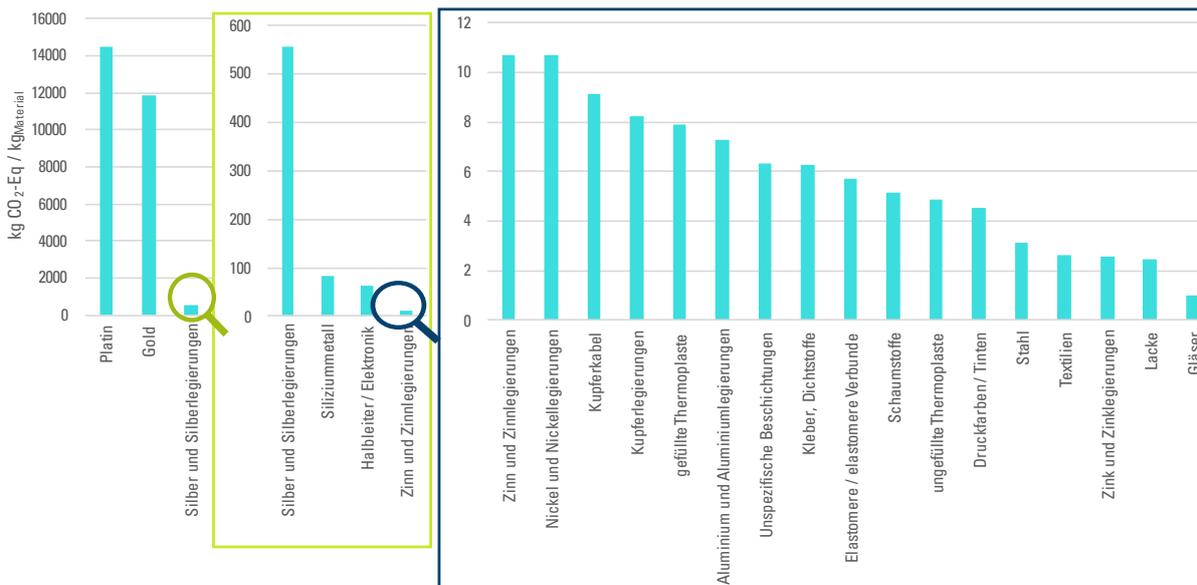


Abbildung 14: Spezifisches Treibhausgaspotential der Materialien im BEV-Leitungssatz (kg CO<sub>2</sub>-Eq / kg Material)

### 4.3.1.3. End-of-Life

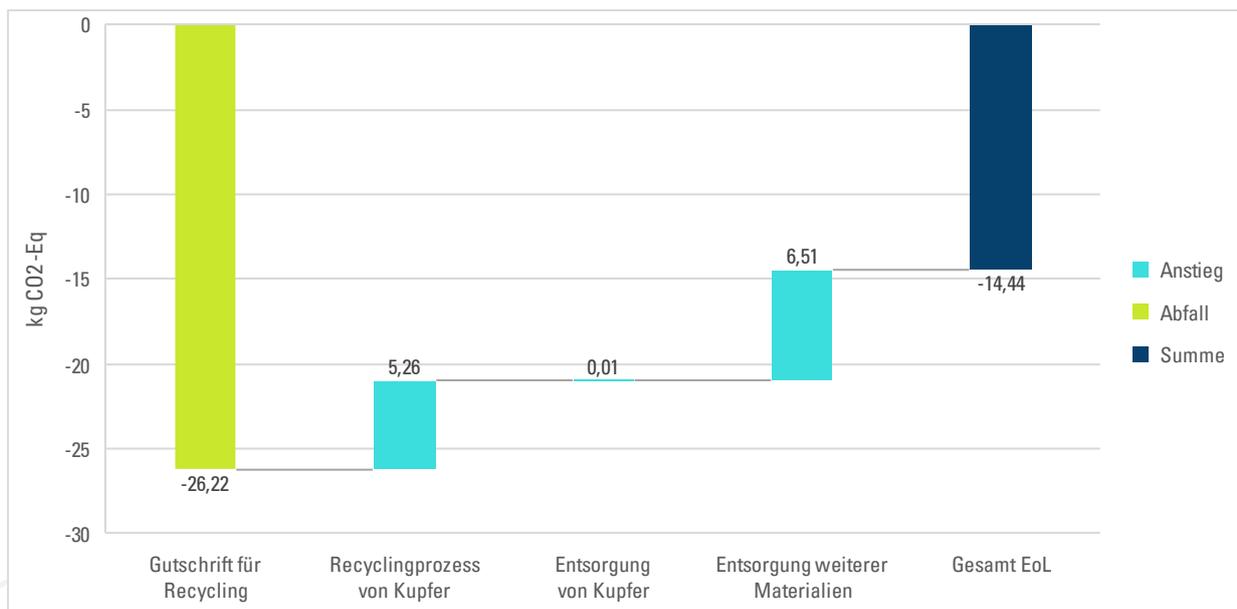


Abbildung 15: Ergebnisse des Treibhausgaspotentials aus dem EoL des BEV-Leitungssatzes

Nach Abbildung 15 setzen sich die THG-Emissionen im End-of-Life zu mehr als 99% aus den Auswirkungen des Recyclingprozesses von Kupfer sowie der Entsorgung weiterer Materialien zusammen. Die Entsorgung des Anteils von 10% Kupferkabeln hat nur einen sehr geringen Einfluss. Aus der Wiederverwendung des rezyklierten Kupfers für die Herstellung von Kupferkabeln ergibt sich eine Gutschrift von etwa 26,2 kg CO<sub>2</sub>-Eq. Unter Berücksichtigung der Emissionen ergibt sich somit als Gesamtergebnis des End-of-Life eine Einsparung von 14,4 kg CO<sub>2</sub>-Eq. Voraussetzung für eine derartige Einsparung in dieser und allen anderen Wirkungskategorien ist, dass die Kupferkabel der Leitungssätze im EoL tatsächlich einem fachgerechten Recycling zugeführt werden.

### 4.3.2. Ottomotor-Leitungssatz

#### 4.3.2.1. Gesamtergebnis

Abbildung 16 führt die Ergebnisse in der Wirkungskategorie Treibhausgaspotential für den Ottomotor-Leitungssatz auf. Auch hier haben die Fertigung sowie alle Transporte nur einen geringen Einfluss auf das Gesamtergebnis, machen jedoch in Relation zur Werkstoffherstellung einen höheren Anteil aus (etwa 17%). Das Recycling von Kupferkabeln führt insgesamt zu einer Einsparung von THG-Emissionen.



Abbildung 16: Ergebnis des Treibhausgaspotentials des Ottomotor-Leitungssatzes über den gesamten Lebenszyklus

#### 4.3.2.2. Werkstoffherstellung

Abbildung 17 zeigt die Ergebnisse für die Werkstoffherstellung des Ottomotor-Leitungssatzes. Metalle weisen mit 63% erneut den höchsten Anteil und Kunststoffe mit 31% den zweithöchsten Anteil auf. Im Vergleich zum BEV-Leitungssatz machen Klebstoffe, Farben und weitere Werkstoffe mit 6% einen geringfügig höheren Anteil aus. Wie in Abbildung 18 dargestellt, handelt es sich bei diesen sonstigen Materialien hauptsächlich um Textilien, wobei die Stoffe aus PA und PES hier den größten Anteil ausmachen (Vgl. Abschnitt 3.1). Im Gegensatz zu dem anderen Kabelsatz sind in diesem Produkt ungefüllte Thermoplaste mit 19% der größte Emissionstreiber nach Kupferkabeln mit 59%. Gefüllte Thermoplaste sind für 10% des Treibhausgaspotentials verantwortlich. In Abbildung 19 sind Gold und Silber mit den höchsten spezifischen THG-Wirkungen abgebildet. Mit einem Massenanteil von etwa 0,002% ist deren Anteil an den Gesamtemissionen erneut sehr gering.

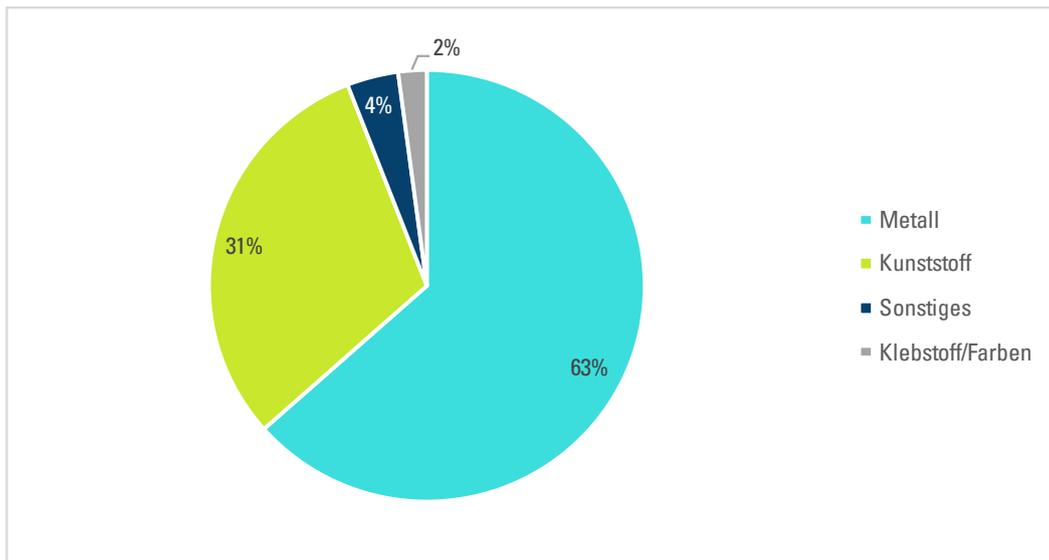


Abbildung 17: Ergebnis der Anteile des Treibhausgaspotentials der Werkstoffherstellung des Ottomotor-Leitungssatzes nach Materialkategorien

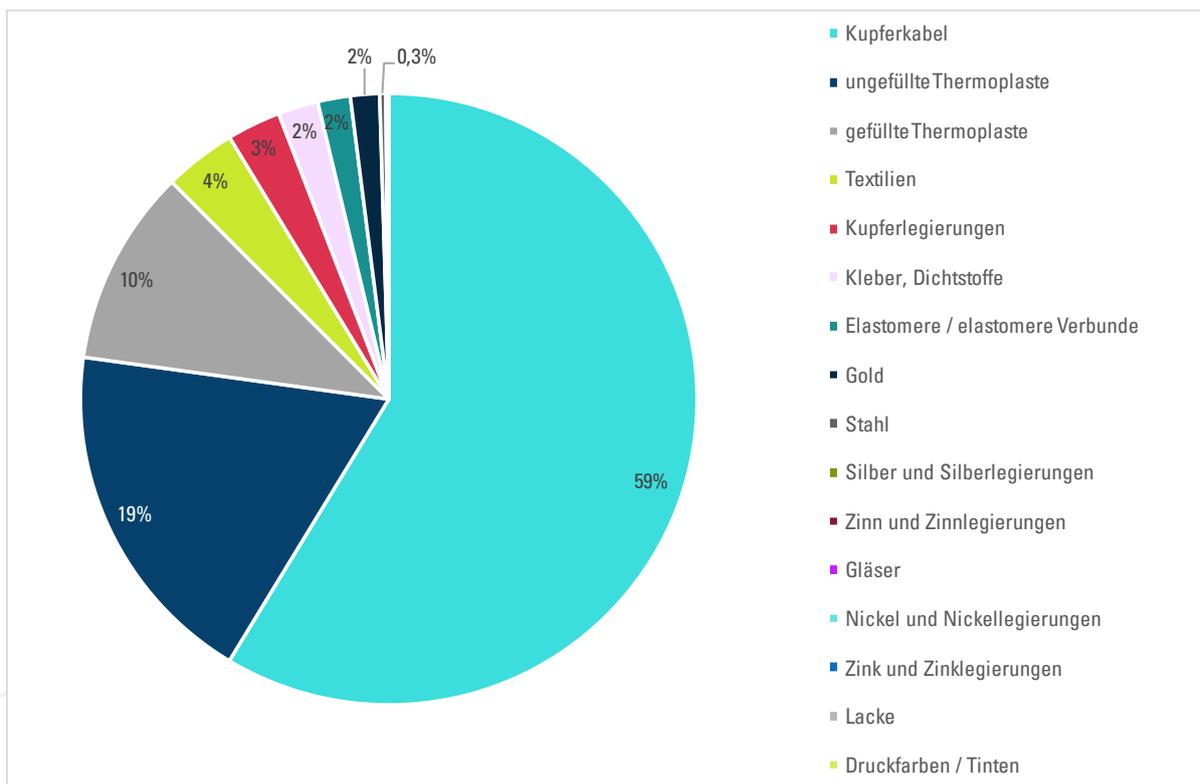


Abbildung 18: Ergebnis der Anteile des Treibhausgaspotentials der Werkstoffherstellung des Ottomotor-Leitungssatzes nach Materialgruppen (detailliert)

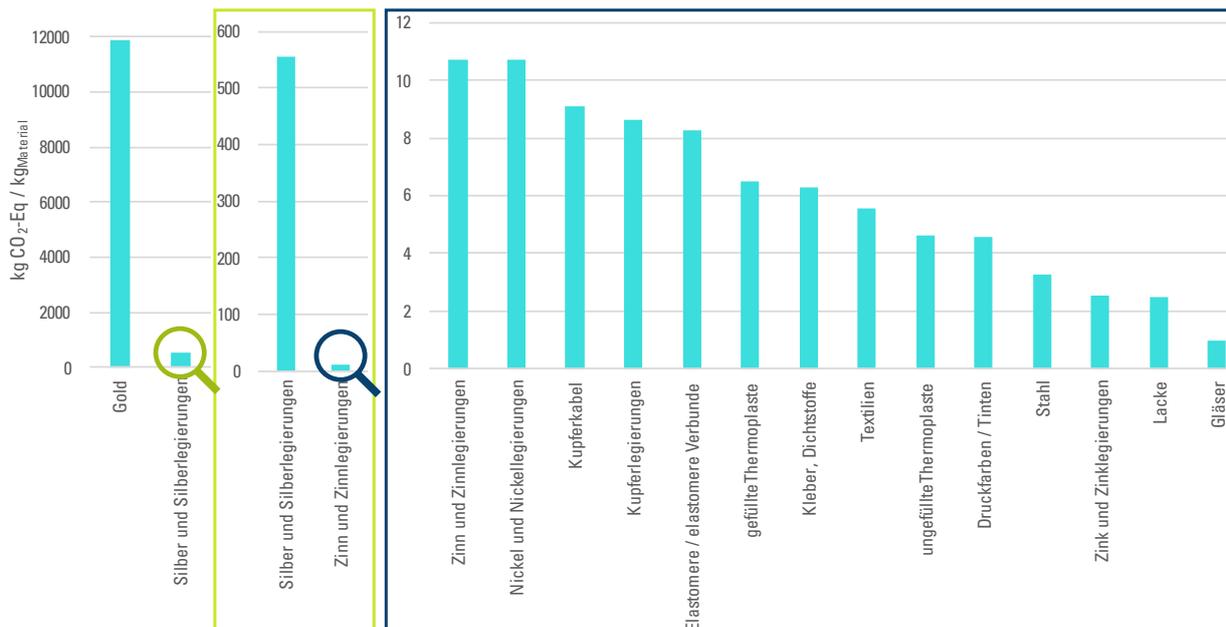


Abbildung 19: Spezifisches Treibhausgaspotential der Materialien im Ottomotor-Leitungssatz (kg CO<sub>2</sub>-Eq / kg Material)

### 4.3.2.3. End-of-Life

Für das End-of-Life des Ottomotor-Kabelsatzes ergibt sich eine analoge Verteilung der Emissionen und Gutschriften wie beim BEV-Leitungssatz (Vgl. Abbildung 20). In Summe wird eine Einsparung von etwa 3,6 kg CO<sub>2</sub>-Eq berechnet.

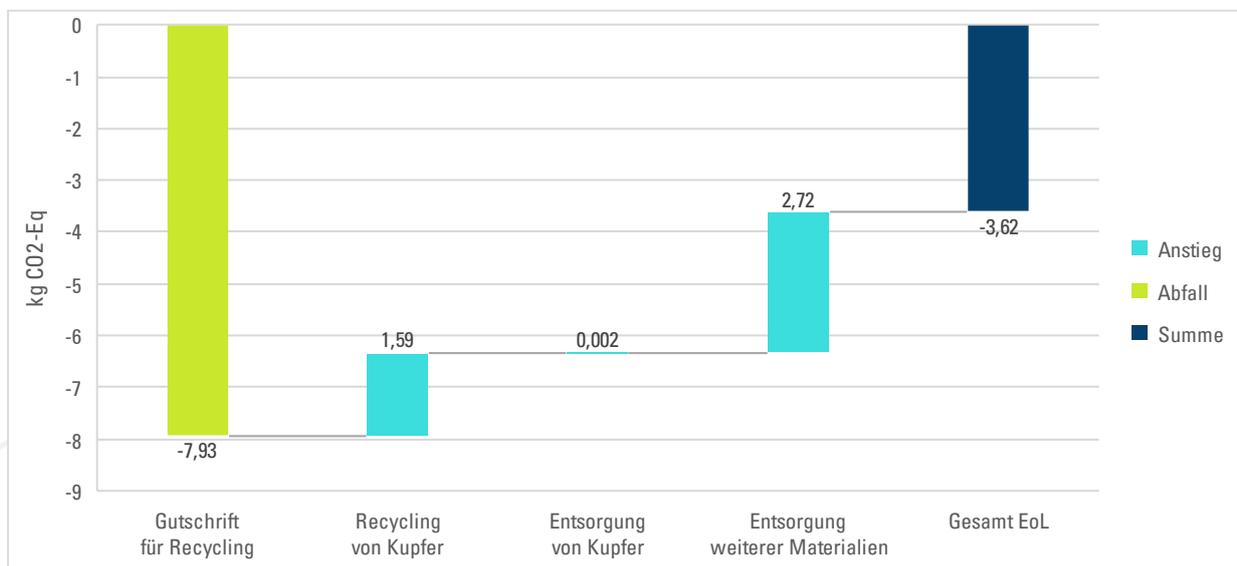


Abbildung 20: Ergebnisse des Treibhausgaspotentials aus dem EoL des Ottomotors

### 4.3.3. Vergleich der GWP-Ergebnisse für Kupfer mit Literaturwerten

In Abbildung 21 werden die vorliegenden Ergebnisse der Wirkungsabschätzung des Treibhausgaspotentials der Kupferherstellung den Werten aus der Literaturlauswertung von [Sanjuan-Delmás et al. 2022] gegenübergestellt. Dabei wird sowohl Kupfer der pyrometallurgischen Route als auch aus der Herstellung mit dem hydrometallurgischen Verfahren sowie Sekundärkupfer abgebildet. Es gilt weiterhin zu beachten, dass teilweise unterschiedliche Systemgrenzen betrachtet werden.

Auffällig ist, dass die Ergebnisse der vorliegenden Studie (Referenzwert) im Vergleich zu den Literaturdaten am höchsten ausfallen. Dies liegt darin begründet, dass für die Modellierung der Kabelsätze wie in Abschnitt 3.1.1 als konservative Annahme ein globaler ecoinvent-Datensatz für die pyrometallurgische Route verwendet worden ist. Bei der Wirkungsabschätzung für Europa haben [Sanjuan-Delmás et al. 2022] den ecoinvent-Prozess „treatment of copper scrap by electrolytic refining | copper, cathode | Cutoff, U – RER“ verwendet, welcher die Sekundärkupferherstellung in Europa abbildet und somit zu dem geringsten Treibhausgaspotential (82% geringer als der Referenzwert) führt. Bei der Modellierung mit ecoinvent für Schweden wird von den Autoren der Prozess „gold mine operation and refining | copper, cathode | Cutoff, U – SE“ verwendet, bei dem Kupfer als ein Nebenprodukt der Goldgewinnung und -raffination aufgeführt ist. Das Treibhausgaspotential ist in diesem Fall um 48% geringer als der Referenzwert. Bei der Dokumentation in ecoinvent ist für diese Art der Kupferherstellung in Schweden angegeben, dass die Datenqualität für Emissionen gering ist. Entsprechend kann der in der vorliegenden Studie modellierte Prozess als der für den Untersuchungsrahmen geeignetste Datensatz aus der ecoinvent-Datenbank gesehen werden.

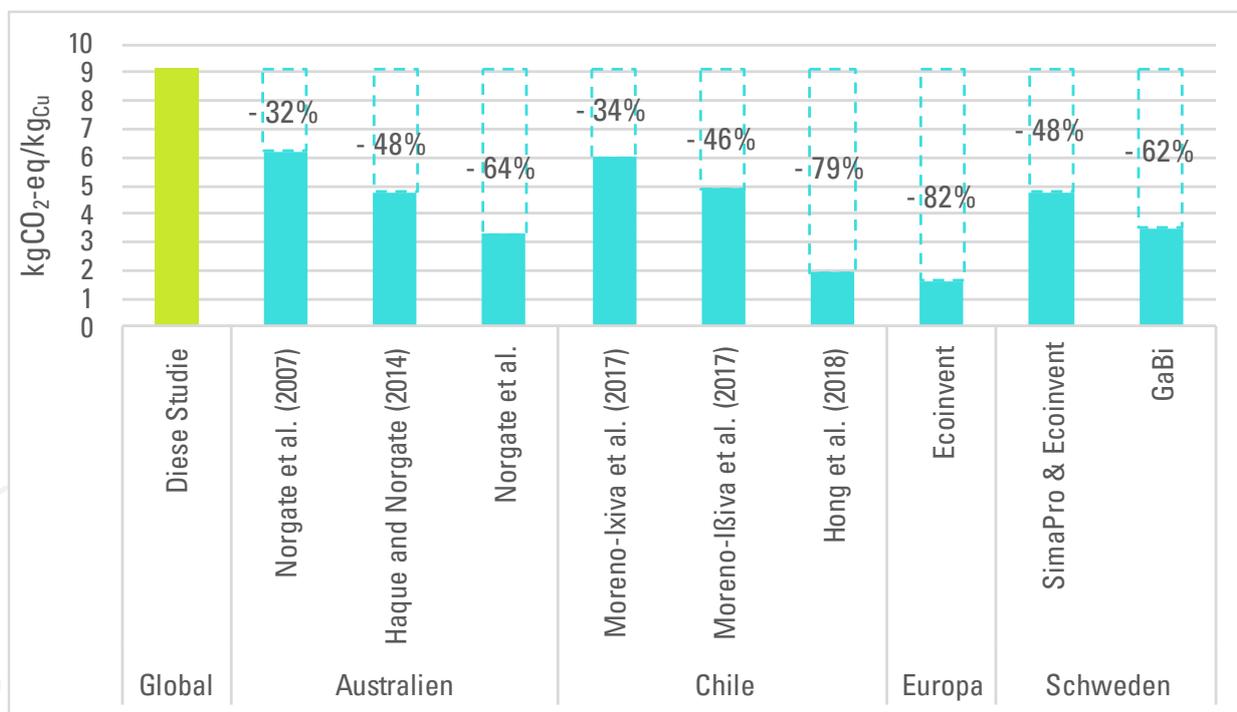


Abbildung 21: Vergleich der GWP-Ergebnisse für Kupfer mit den Ergebnissen der Literaturlauswertung nach [Sanjuan-Delmás et al. 2022] (kg CO<sub>2</sub>-Eq / kg Material)

## 4.4. Versauerungspotential

### 4.4.1. BEV-Leitungssatz

#### 4.4.1.1. Gesamtergebnis

In Abbildung 22 sind die Ergebnisse für das Versauerungspotential aller Lebenszyklusphasen des BEV-Leitungssatzes dargestellt. Auch hier führen Fertigung und Transporte im Vergleich zu anderen Lebenszyklusphasen nur zu sehr geringen Emissionen. Im End-of-Life ergibt sich aus dem Recycling von Kupferkabeln eine vergleichsweise hohe Gutschrift.

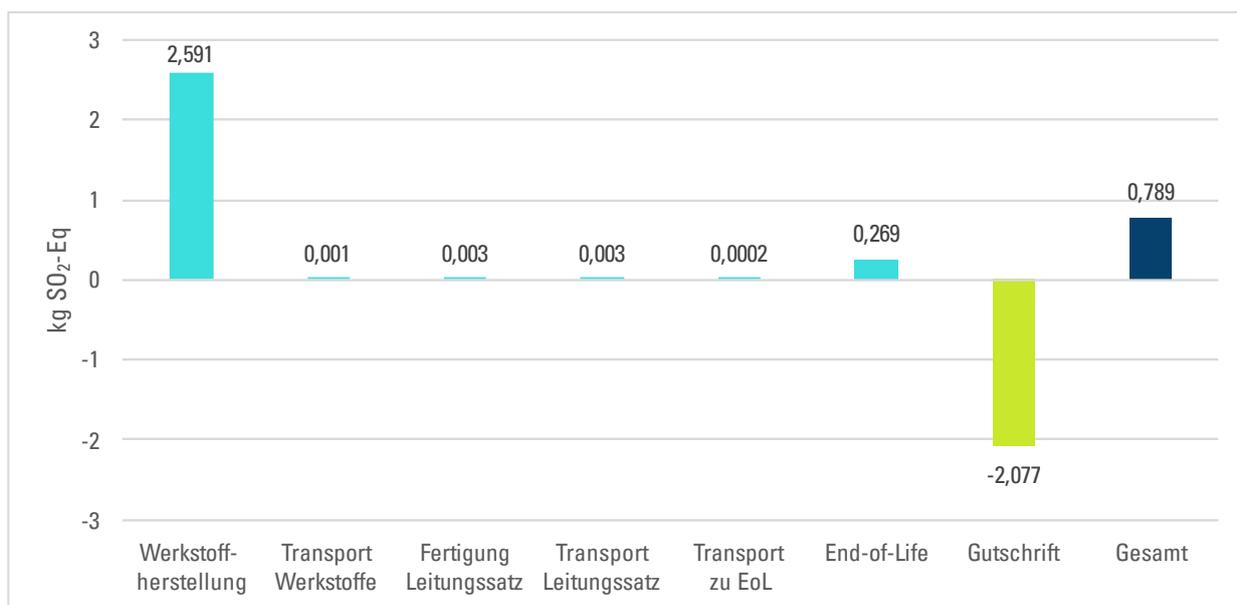


Abbildung 22: Ergebnis des Versauerungspotentials des BEV-Leitungssatzes über den gesamten Lebenszyklus

#### 4.4.1.2. Werkstoffherstellung

Wie in Abbildung 23 dargestellt, sind Metalle mit etwa 98% für den Hauptteil der Versauerungswirkung in der Werkstoffherstellung verantwortlich. Kunststoffe haben einen Einfluss von knapp 2% auf das Gesamtergebnis und andere Materialgruppen tragen zu etwa 0,2% bei. Aufgeschlüsselt nach Werkstoffgruppen zeigt Abbildung 24, dass Kupferkabel zu 92% des Versauerungspotentials beitragen und Kupferlegierungen zu 6%. Dies liegt darin begründet, dass Kupfer eine deutlich höhere spezifische Versauerungswirkung aufweist als Kunststoffe, wie in Abbildung 25 dargestellt. Platin, Gold, Silber und Nickel weisen noch höhere spezifische Versauerungswerte auf, stellen zusammen aber nur etwa 0,02% der Gesamtmasse und damit einen sehr geringen Teil der gesamten Versauerungswirkung dar.

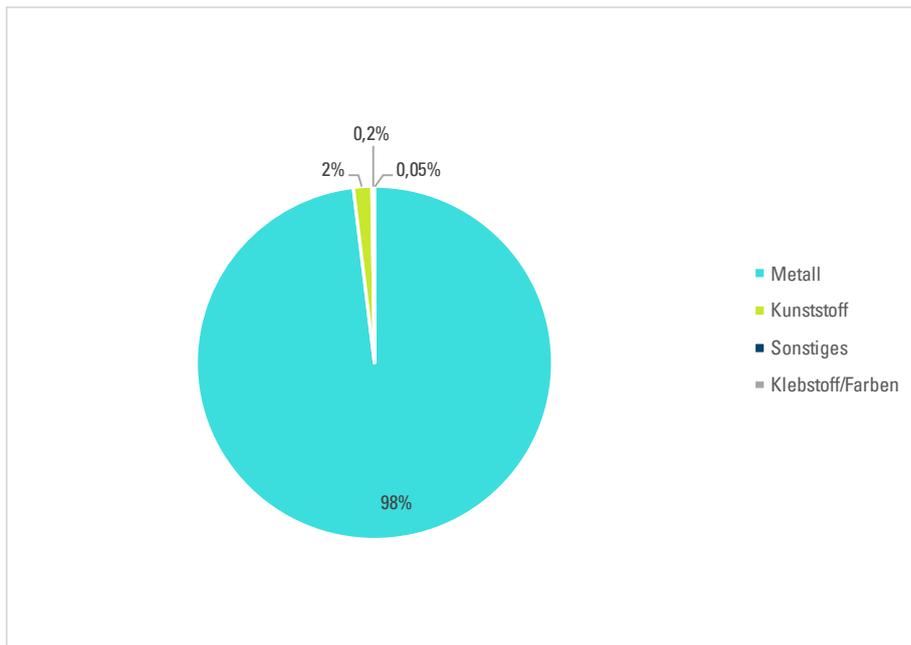


Abbildung 23: Ergebnis der Anteile des Versauerungspotentials der Werkstoffherstellung des BEV-Leitungssatzes nach Materialkategorie

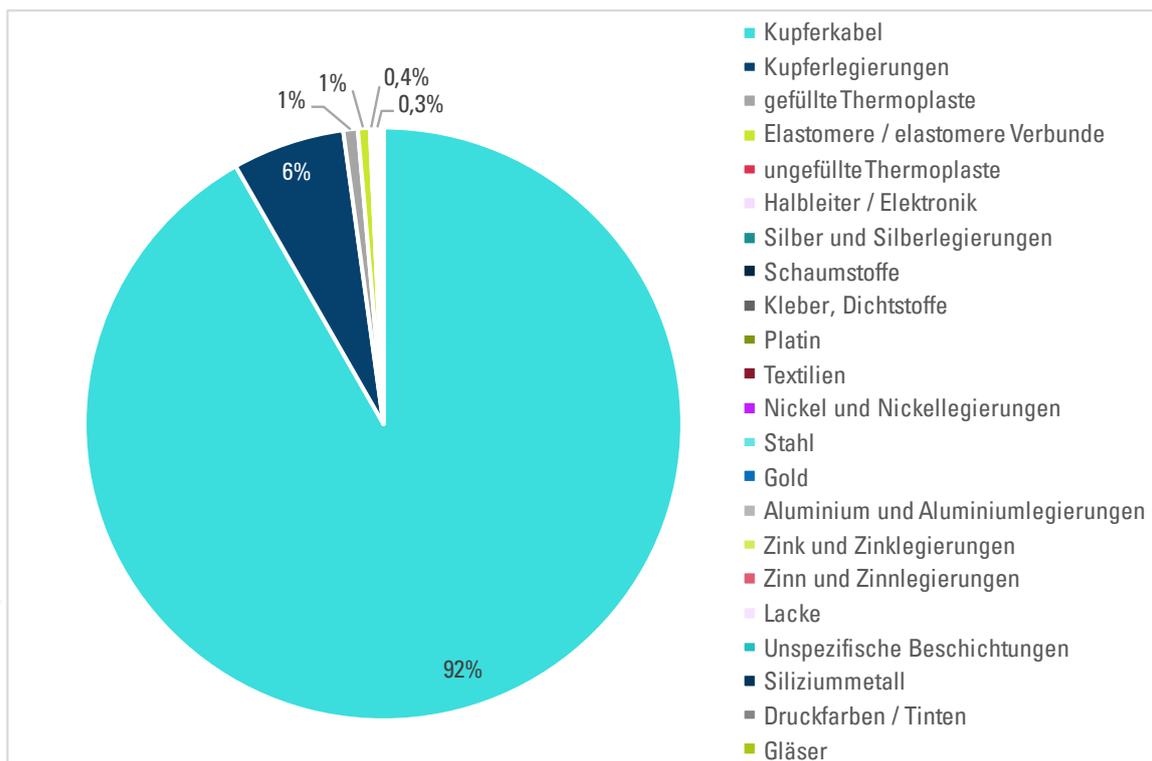


Abbildung 24: Ergebnis der Anteile des Versauerungspotentials der Werkstoffherstellung des BEV-Leitungssatzes nach Materialgruppe (detailliert)

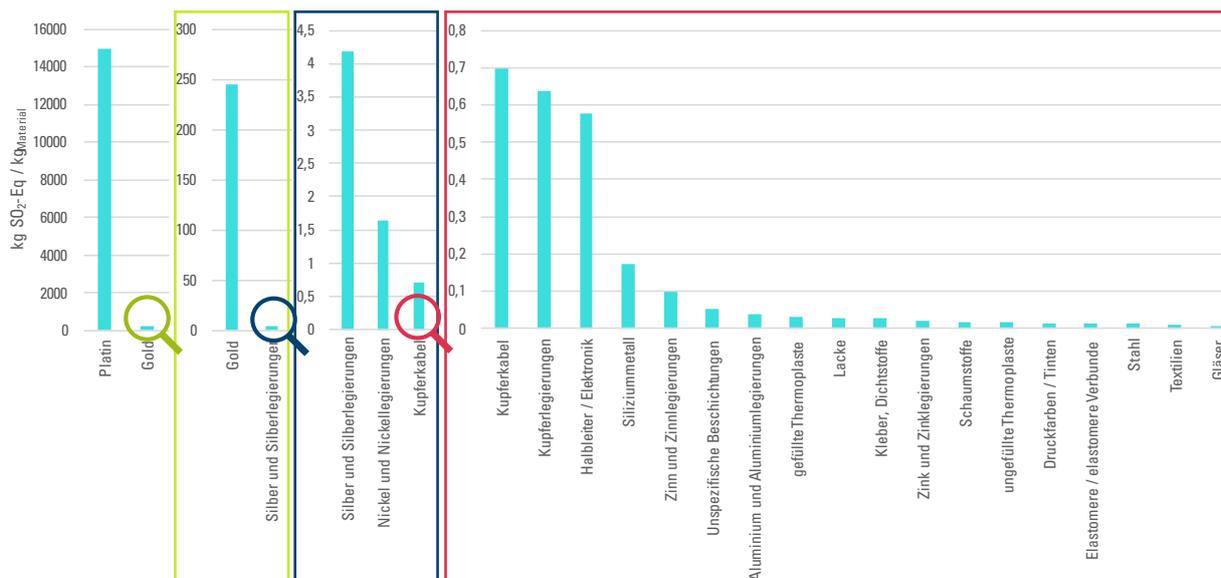


Abbildung 25: Spezifisches Versauerungspotential der Materialien im BEV-Leitungssatz (kg SO<sub>2</sub>-Eq / kg Material)

### 4.4.1.3. End-of-Life

Abbildung 26 stellt die Emissionen und Gutschriften im End-of-Life des BEV-Leitungssatzes dar. Im Vergleich zu der Wirkungskategorie Treibhausgaspotential ergeben sich deutlich höhere Einsparungen, da die Versauerungswirkung des Recyclings und der Entsorgungsprozesse signifikant geringer ist als die der Herstellung von Primärkupfer, welches hier durch das rezyklierte Kupfer substituiert wird. Insgesamt ergibt sich für das End-of-Life eine Reduktion des Versauerungspotentials um etwa 1,8 kg SO<sub>2</sub>-Eq.

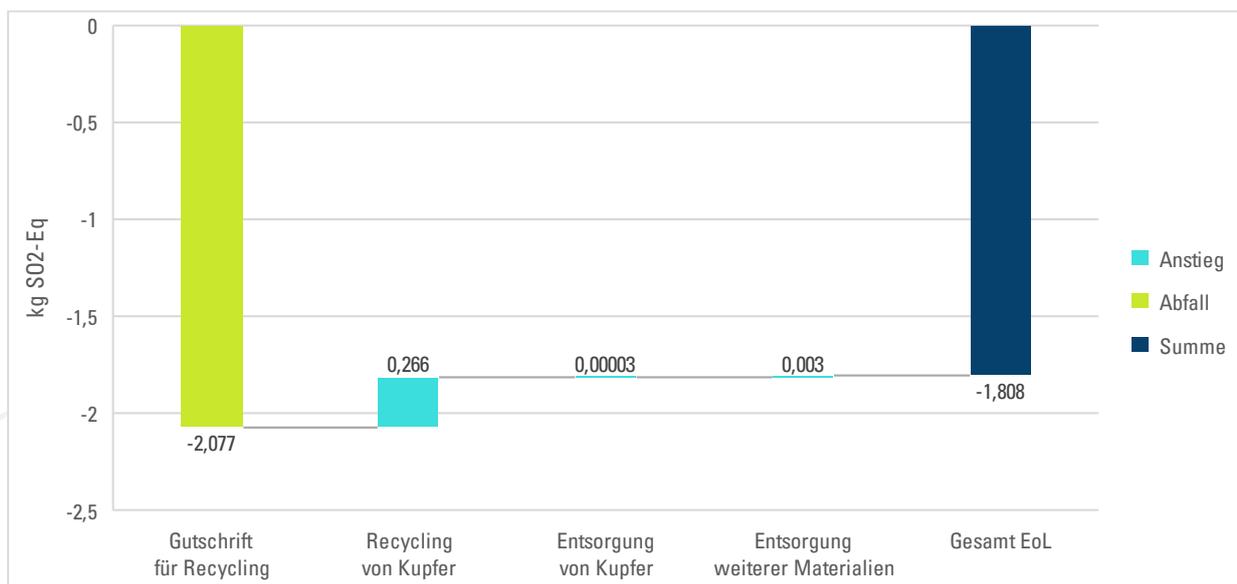


Abbildung 26: Ergebnisse des Versauerungspotentials aus dem EoL des BEV-Leitungssatzes

#### 4.4.2. Ottomotor-Leitungssatz

##### 4.4.2.1. Gesamtergebnis

Die Verteilung der Treiber des Versauerungspotentials im Ottomotor-Kabelsatz ist vergleichbar zum BEV-Leitungssatz (Vgl. Abbildung 27). Fertigung und Transporte haben nahezu keinen Einfluss auf das Gesamtergebnis.

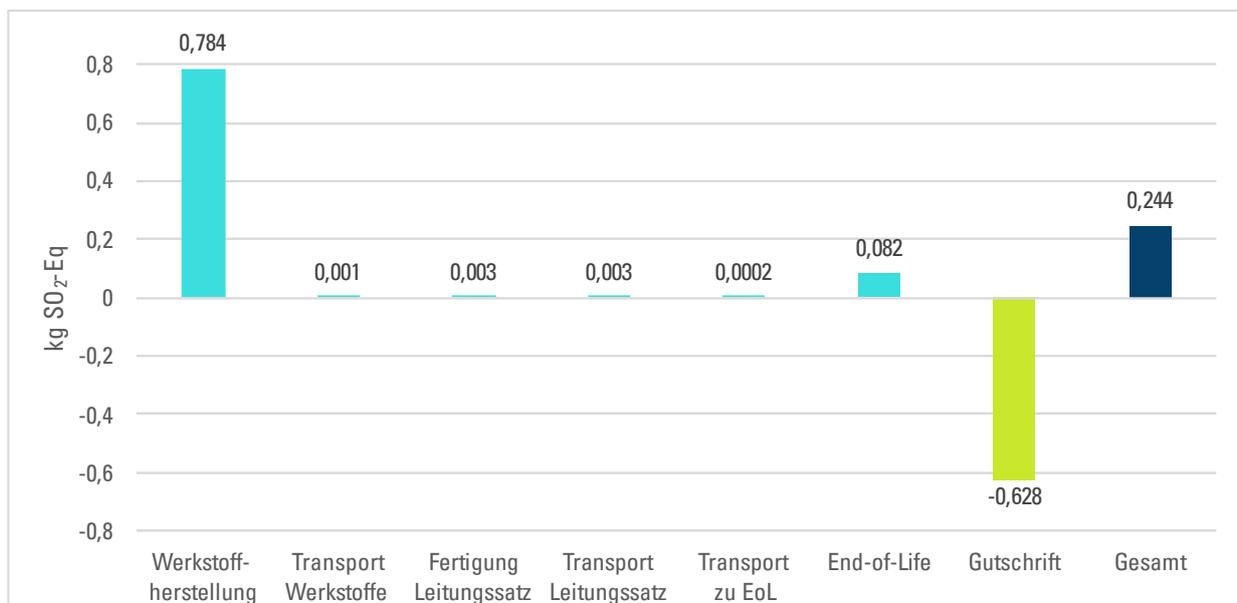


Abbildung 27: Ergebnis des Versauerungspotentials des Ottomotor-Leitungssatzes über den gesamten Lebenszyklus

##### 4.4.2.2. Werkstoffherstellung

Abbildung 28 stellt Metalle mit einem Anteil von etwa 97% ebenfalls als Haupttreiber des Versauerungspotentials der Werkstoffherstellung da, während Kunststoffe zu etwa 3% und sonstige Materialien zu 0,5% beitragen. Aus Abbildung 29 wird ersichtlich, dass ähnlich wie beim BEV-Leitungssatz Kupferkabel zu 92% des Versauerungspotentials beitragen und Kupferlegierungen zu 5%. Dies lässt sich erneut auf das hohe spezifische Versauerungspotential von Kupfer zurückführen. In Abbildung 30 ist dieses den Werten der anderen Werkstoffgruppen im Ottomotor-Leitungssatz gegenübergestellt. Gold hat mit etwa 250 kg SO<sub>2</sub>-Eq pro kg Material das höchste spezifische Versauerungspotential, ist im Kabelsatz aber nur mit knapp 0,001 Gewichts-% enthalten.

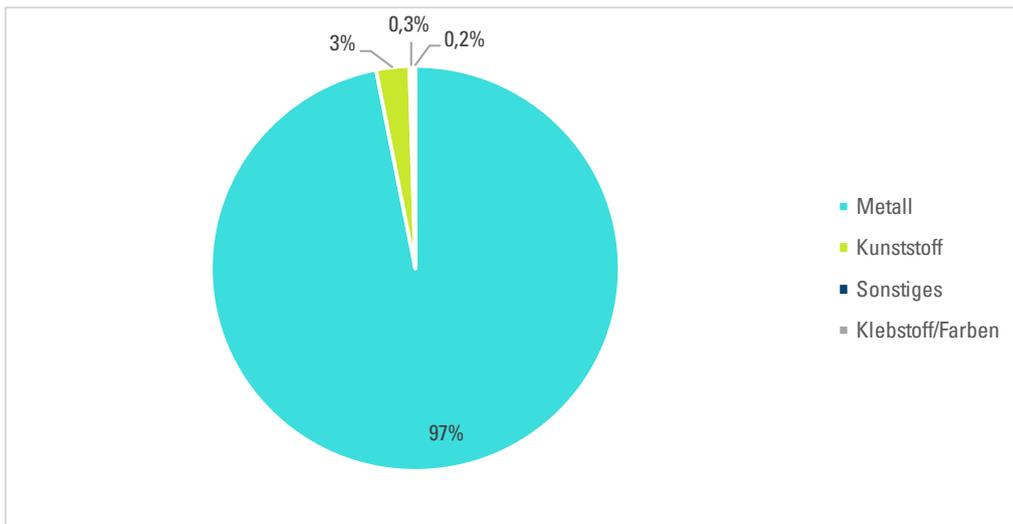


Abbildung 28: Ergebnis der Anteile des Versauerungspotentials der Werkstoffherstellung des Ottomotor-Leitungssatzes nach Materialkategorie

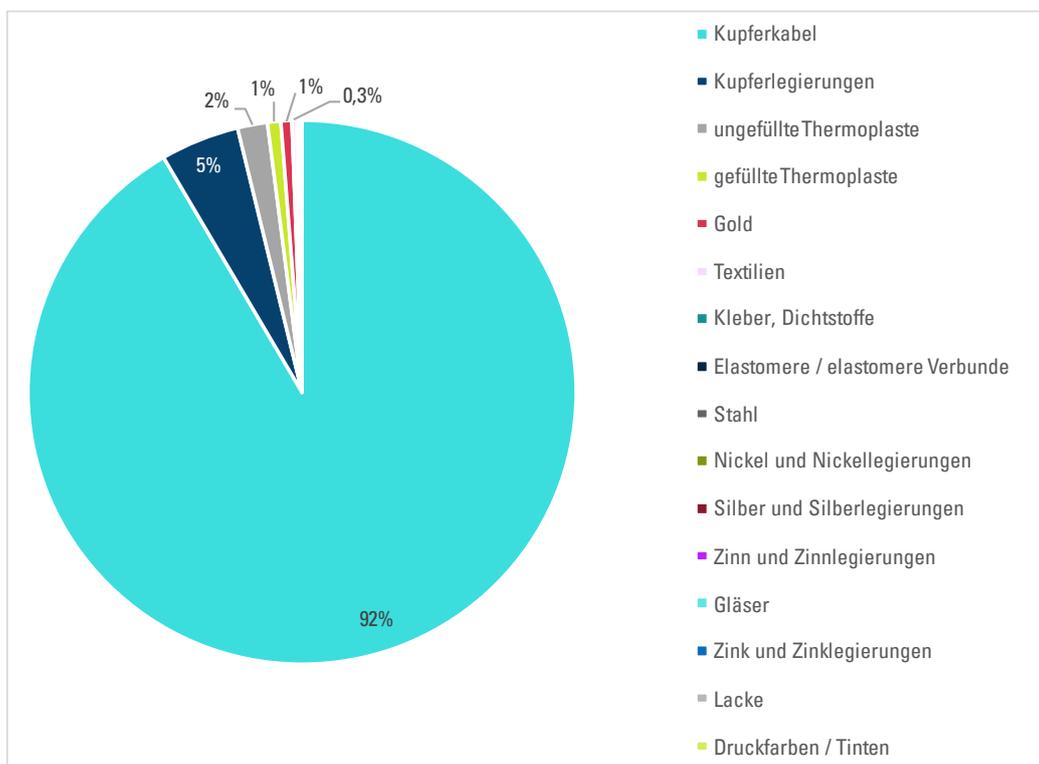


Abbildung 29: Ergebnis der Anteile des Versauerungspotentials der Werkstoffherstellung des Ottomotor-Leitungssatzes nach Materialgruppe (detailliert)

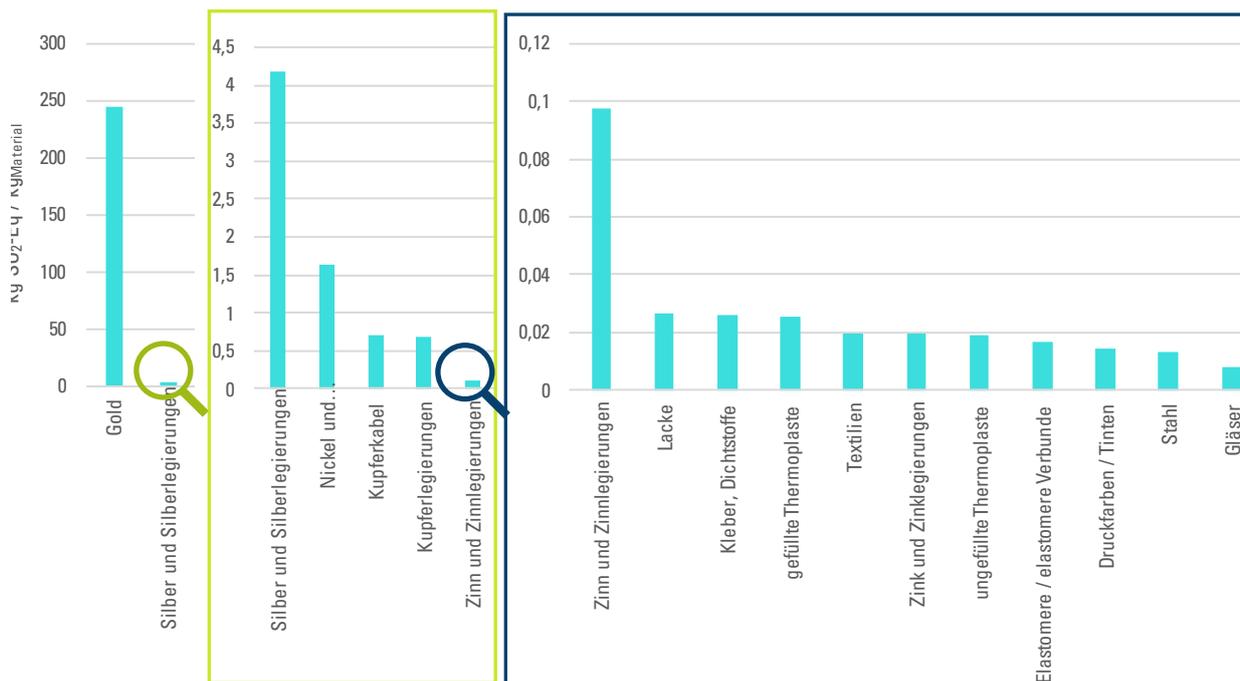


Abbildung 30: Spezifisches Versauerungspotential der Materialien im Ottomotor-Leitungssatz (kg SO<sub>2</sub>-Eq / kg Material)

#### 4.4.2.3. End-of-Life

Die in Abbildung 31 illustrierte Verteilung der Versauerungswirkungen im End-of-Life des Ottomotor-Leitungssatzes ist analog zum anderen betrachteten Produktsystem. In Summe ergeben sich Einsparungen um etwa 0,5 kg SO<sub>2</sub>-Eq.

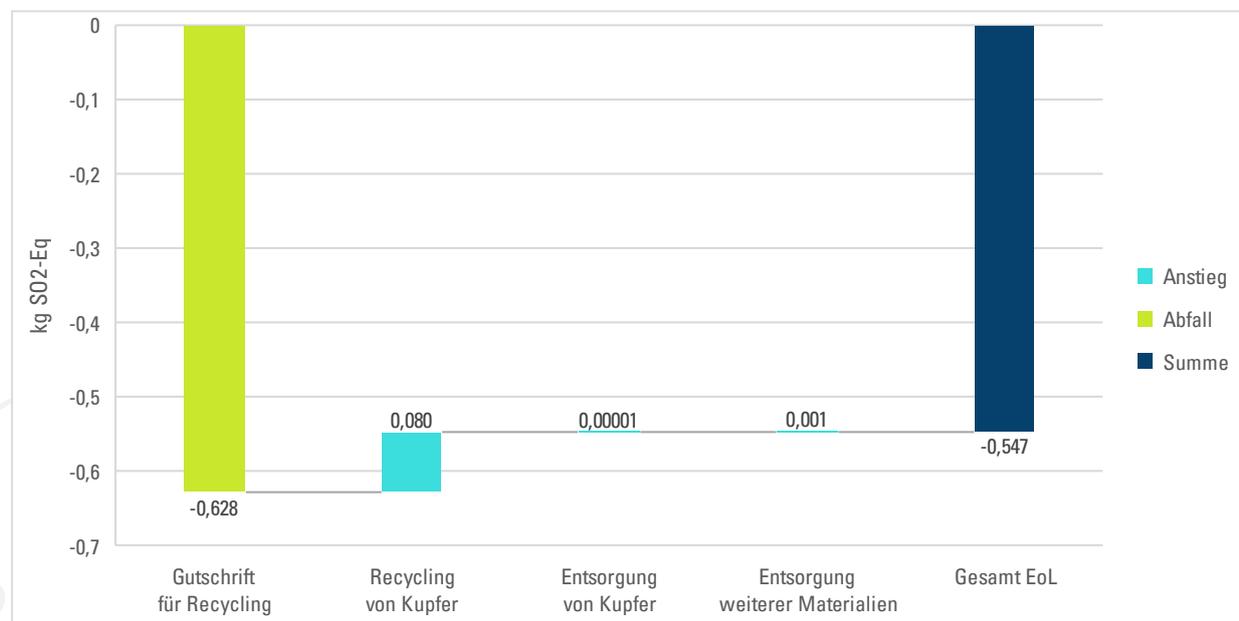


Abbildung 31: Ergebnisse des Versauerungspotentials aus dem EoL des Ottomotor-Leitungssatzes

#### 4.4.3. Vergleich der AP-Ergebnisse für Kupfer mit Literaturwerten

Abbildung 32 stellt die AP-Ergebnisse für die Kupferherstellung mehreren Literaturwerten gegenüber. Erneut ist auffällig, dass die vorliegende Studie den höchsten Emissionswert aufweist. [Dong et al. 2020] berechnen für die Kupferherstellung nach der pyrometallurgischen Route in China 49% geringere Emissionen als der Referenzwert. Der AP-Emissionswert der [International Copper Association 2021] setzt sich aus der jährlichen Kupferherstellung aus allen Herstellungsrouten (inklusive Sekundärkupfer) zusammen und ist um 91% geringer als die Ergebnisse der vorliegenden Studie. Die Wirkungsabschätzungsergebnisse von [Sanjuan-Delmás et al. 2022] beziehen sich, wie in Abschnitt 4.3.3 erläutert, auf Kupfer als Nebenprodukt der Goldgewinnung in Schweden und stellen mit -95% den geringsten Literaturwert in diesem Vergleich dar.

Insgesamt lässt sich feststellen, dass das Versauerungspotential der Kupferherstellung eine noch größere Bandbreite aufweist als das Treibhausgaspotential. In einer Zeitreihenanalyse von Umweltauswirkungen der Kupferherstellung in Australien zwischen 1940 und 2008 geben [Memary et al. 2012] für den Hersteller Mount Isa eine Reduktion des Versauerungspotentials von etwa 2,5 kg SO<sub>2</sub>-Eq pro kg Kupfer zu unter 0,1 kg SO<sub>2</sub>-Eq durch Technologieverbesserungen an. Dies lässt sich primär auf die Abscheidung von Schwefeldioxidemissionen bei der Kupferschmelze zurückführen.

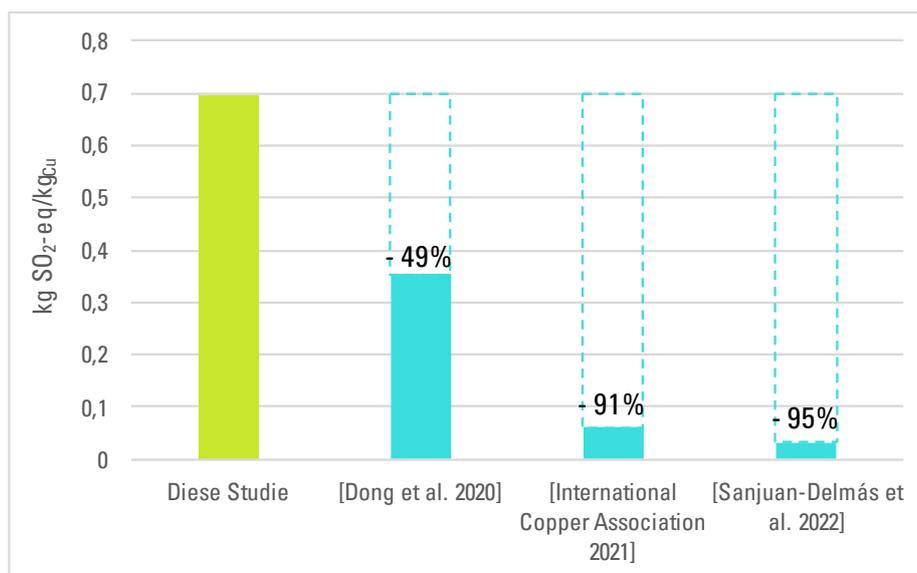


Abbildung 32: Vergleich der AP-Ergebnisse für Kupfer mit Literaturwerten nach [Dong et al. 2020], [International Copper Association 2021] und [Sanjuan-Delmás et al. 2022] (kg SO<sub>2</sub>-Eq / kg Material)

## 4.5. Erneuerbarer Primärenergieverbrauch (CED – renewable)

### 4.5.1. BEV-Leitungssatz

#### 4.5.1.1. Gesamtergebnis

Im Vergleich zum Versauerungspotential lässt sich für das Gesamtergebnis des BEV-Kabelsatzes erkennen, dass die Fertigung und das End-of-Life mit etwas höheren erneuerbaren Primärenergiebedarfen verbunden sind (Vgl. Abbildung 33). In Relation zur Werkstoffherstellung und zur Gutschrift durch das Recycling ist dieser Wert dennoch gering.



Abbildung 33: Ergebnis des Erneuerbaren Primärenergieverbrauchs des BEV-Leitungssatzes über den gesamten Lebenszyklus

#### 4.5.1.2. Werkstoffherstellung

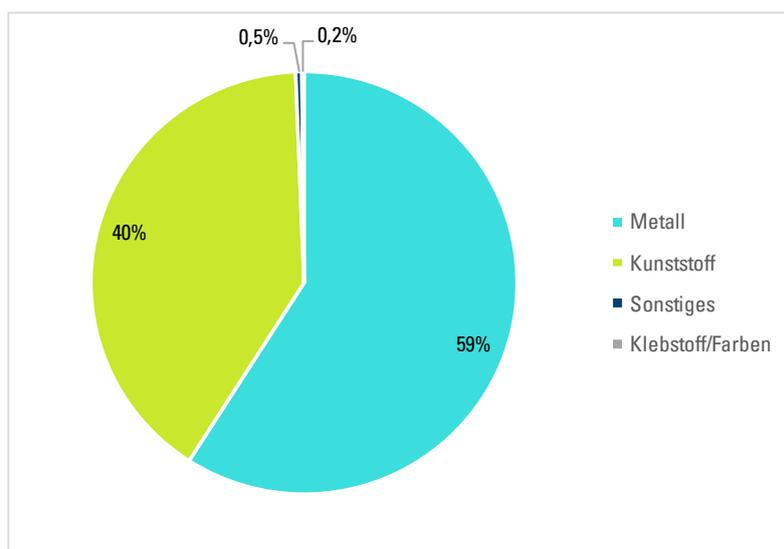


Abbildung 34: Ergebnis der Anteile des Erneuerbaren Primärenergieverbrauchs der Werkstoffherstellung des BEV-Leitungssatzes nach Materialkategorie

Abbildung 34 stellt den Anteil der Werkstoffgruppen am erneuerbaren Primärenergiebedarf der Werkstoffherstellung dar. Ähnlich zum Treibhausgaspotential sind Metalle für den Hauptteil der Umweltwirkung verantwortlich, gefolgt von Kunststoffen. Weitere Stoffe haben mit insgesamt 0,7% einen sehr geringen Einfluss auf das Ergebnis. In Abbildung 35 sind die Auswirkungen weiter nach Werkstoffgruppen unterteilt. 59% des Primärenergieverbrauchs der Werkstoffherstellung entsteht durch Kupferkabel und 40% durch Elastomere bzw. Elastomerverbunde. Thermoplaste haben im Vergleich hierzu einen geringen Einfluss auf das Ergebnis, was sich auf die niedrigen erneuerbaren Anteile am Primärenergiebedarf bei den verwendeten ecoinvent-Datensätzen zurückführen lässt, während der Ökobaudat-Datensatz für Silikonkautschuks einen höheren erneuerbaren Anteil aufweist (Vgl. Abschnitt

3.1.2). Wie auch bei den THG-Emissionen weisen Platin, Gold, Silber und Silizium die höchsten materialspezifischen Primärenergiebedarfe auf (Vgl. Abbildung 36), was sich aufgrund der sehr geringen Mengen kaum auf das Gesamtergebnis auswirkt.

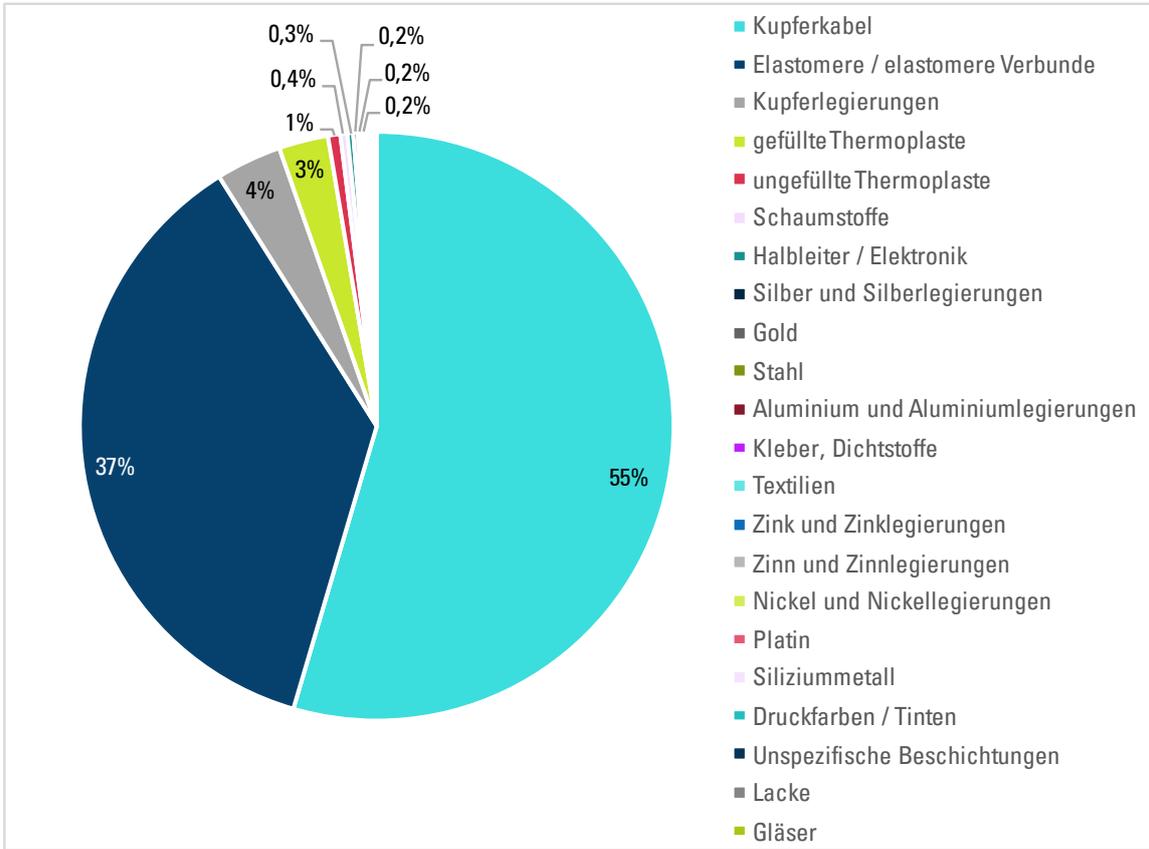


Abbildung 35: Ergebnis der Anteile des Erneuerbaren Primärenergieverbrauchs der Werkstoffherstellung des BEV-Leitungssatzes nach Materialgruppe (detailliert)

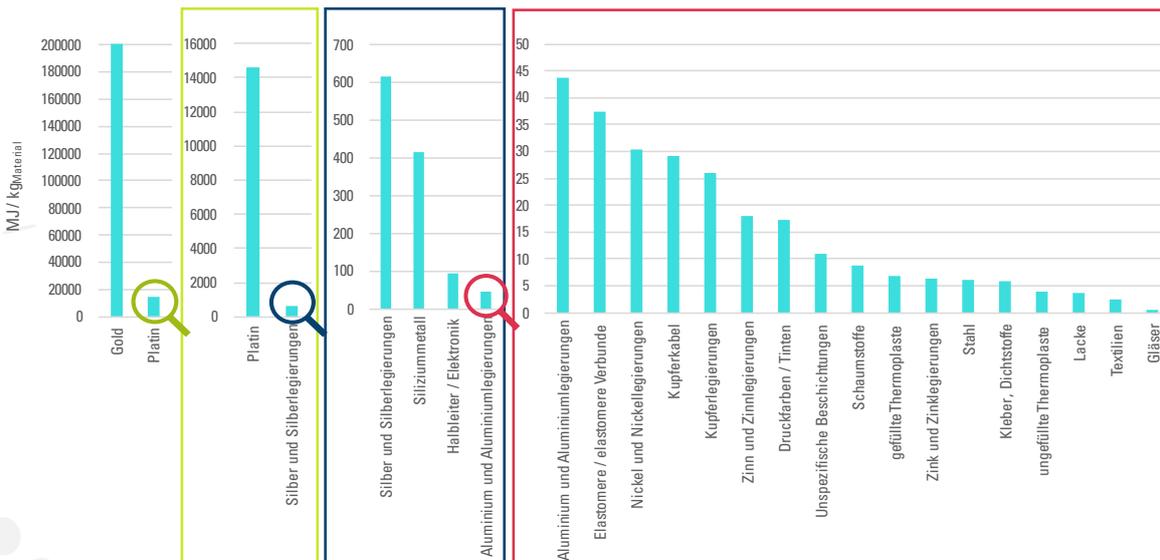


Abbildung 36: Spezifischer erneuerbarer Primärenergieverbrauch der Materialien im BEV-Leitungssatz (MJ / kg Material)

### 4.5.1.3. End-of-Life

Für den erneuerbaren Primärenergiebedarf führt Abbildung 37 auf, dass die Entsorgungsprozesse im End-of-Life im Vergleich zur Auswertung des Treibhausgaspotentials einen sehr geringen Einfluss auf das Ergebnis haben. Die insgesamt Gutschrift wird nur geringfügig durch den Energiebedarf des Recyclings von Kupferkabeln reduziert und beträgt knapp 64,6 MJ.

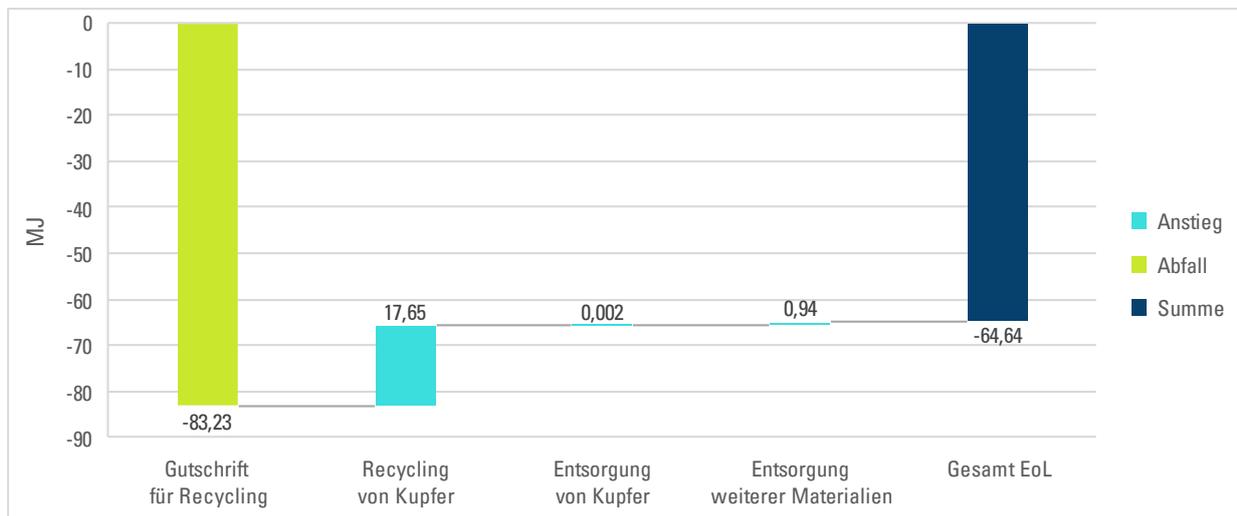


Abbildung 37: Ergebnis des Erneuerbaren Primärenergieverbrauchs aus dem EoL des BEV-Leitungssatz

### 4.5.2. Ottomotor-Leitungssatz

#### 4.5.2.1. Gesamtergebnis



Abbildung 38: Ergebnis des Erneuerbaren Primärenergieverbrauchs des Ottomotor-Leitungssatzes über den gesamten Lebenszyklus

Für den Ottomotor-Kabelsatz ist der erneuerbare Primärenergieverbrauch nach Abbildung 38 über den Lebenszyklus ähnlich verteilt wie beim BEV-Leitungssatz. Auffällig ist, dass die Fertigung mit höheren Auswirkungen einhergeht als das End-of-Life.

#### 4.5.2.2. Werkstoffherstellung

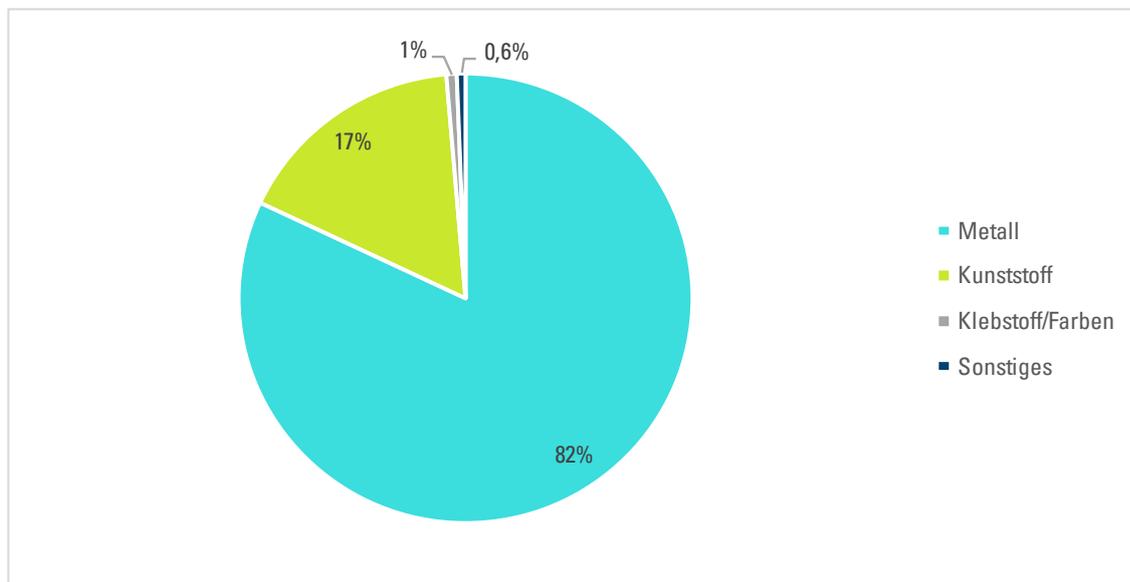


Abbildung 39: Ergebnis der Anteile des Erneuerbaren Primärenergieverbrauchs der Werkstoffherstellung des Ottomotor-Leitungssatzes nach Materialkategorie

In Abbildung 39 ist der relative erneuerbare Primärenergiebedarf der Werkstoffherstellung des Ottomotor-Leitungssatzes abgebildet. Im Vergleich zu den Ergebnissen des anderen Kabelsatzes haben Kunststoffe hier mit 17% einen signifikant geringeren Einfluss. Dies lässt sich dadurch begründen, dass Elastomere im vorliegenden Leitungssatz nur einen Anteil von etwa 1,6% an der Gesamtmasse aufweisen und somit weniger zum Gesamtergebnis beitragen als beim BEV-Kabelsatz. Nach Kupferkabeln ist Gold trotz dem sehr geringen Massenanteil von 0,001% der größte Treiber für den erneuerbaren Primärenergiebedarf (Vgl. Abbildung 40). Die materialspezifischen Werte sind in Abbildung 41 aufgeführt.

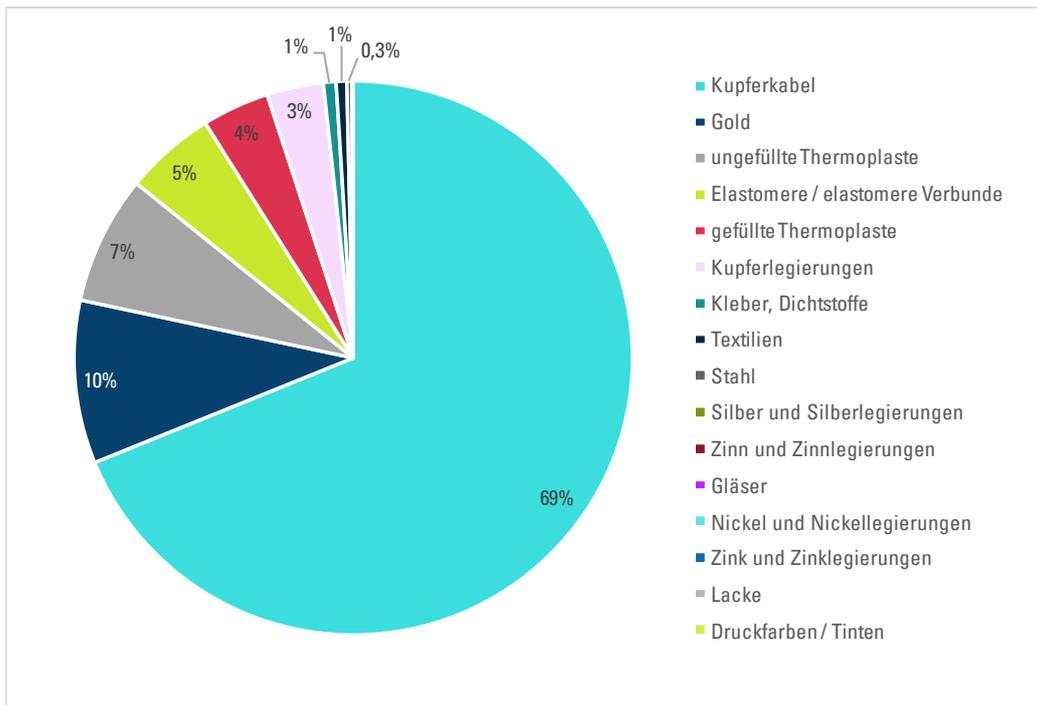


Abbildung 40: Ergebnis der Anteile des Erneuerbaren Primärenergieverbrauchs der Werkstoffherstellung des Ottomotor-Leitungssatzes nach Materialgruppe (detailliert)

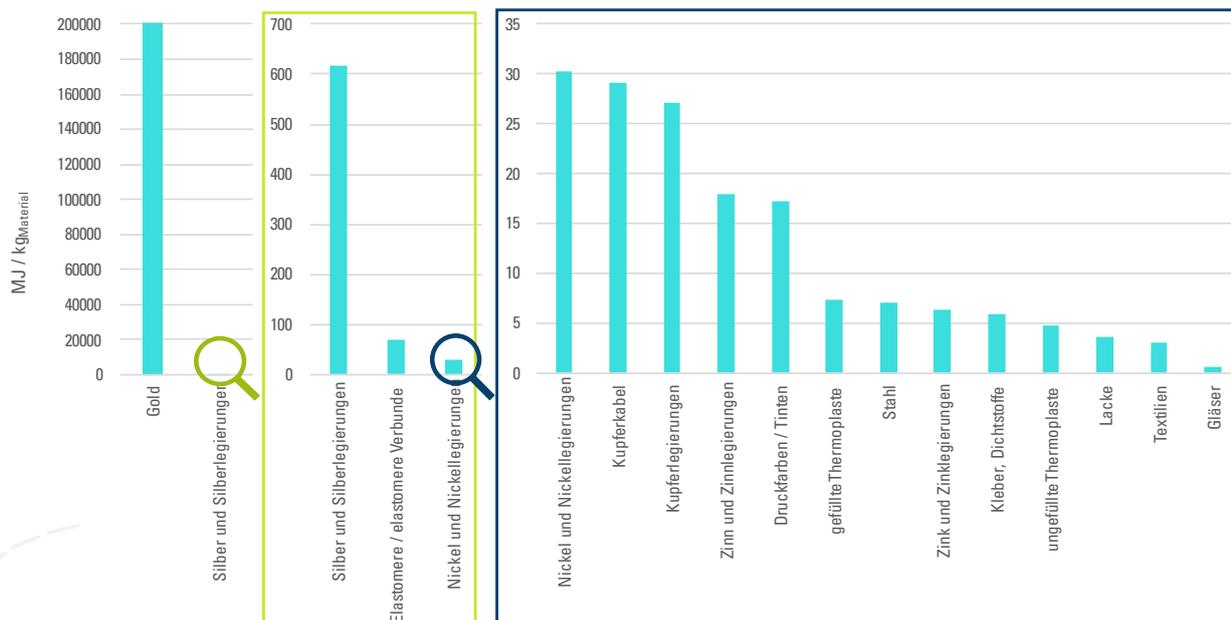


Abbildung 41: Spezifischer erneuerbarer Primärenergieverbrauch der Materialien im Ottomotor-Leitungssatz (MJ / kg Material)

### 4.5.2.3. End-of-Life

Die Verteilung der erneuerbaren Primärenergieverbräuche für den Ottomotor-Leitungssatz ist im End-of-Life analog zum BEV-Leitungssatz (Vgl. Abbildung 42). Insgesamt resultieren das Recycling sowie die Entsorgungsprozesse in einer Gutschrift von etwa 19,5 MJ.

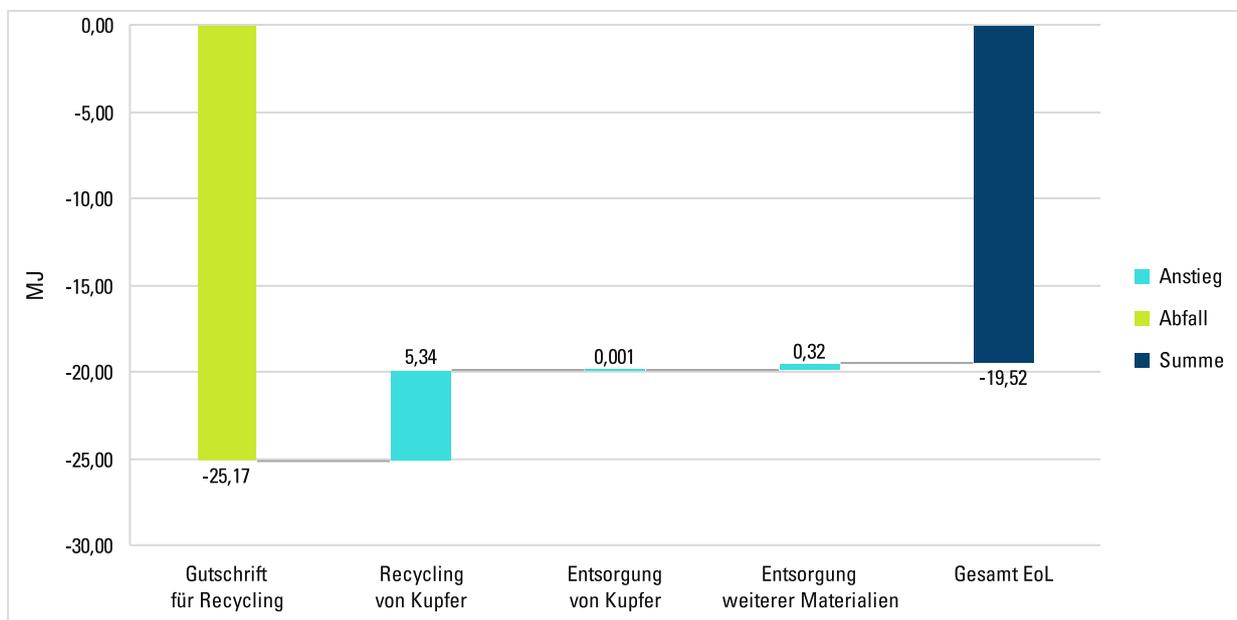


Abbildung 42: Ergebnis des Erneuerbaren Primärenergieverbrauchs aus dem EoL des Ottomotor-Leitungssatzes

## 4.6. Nicht-Erneuerbarer Primärenergieverbrauch (CED – fossil)

### 4.6.1. BEV-Leitungssatz

#### 4.6.1.1. Gesamtergebnis

In Abbildung 43 sind die Ergebnisse für die Auswertung des nicht-erneuerbaren Primärenergiebedarfs über den Lebenszyklus des BEV-Leitungssatzes aufgeführt. Die relativen Einflüsse der verschiedenen Lebenszyklusphasen sind sehr ähnlich zum erneuerbaren Anteil in Abschnitt 4.5.1.1.



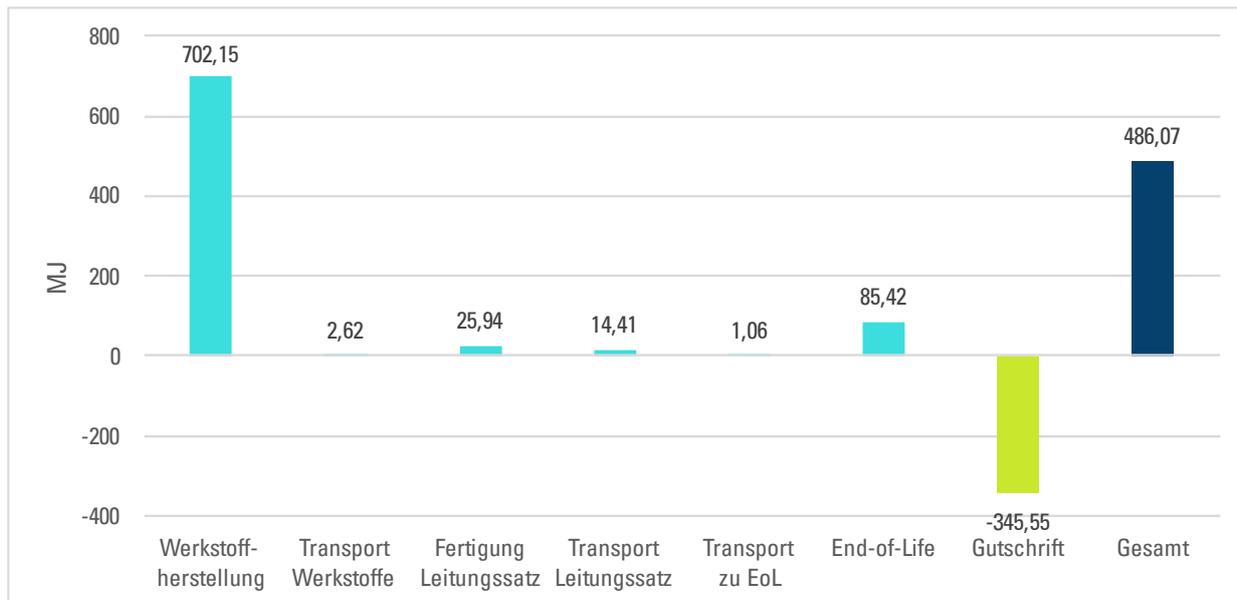


Abbildung 43: Ergebnis des Nicht-Erneuerbaren Primärenergieverbrauchs des BEV-Leitungssatzes über den gesamten Lebenszyklus

#### 4.6.1.2. Werkstoffherstellung

In Abbildung 44 ist der Anteil der Materialgruppen am nicht-erneuerbaren Primärenergiebedarf der Werkstoffherstellung dargestellt. Metalle tragen hier zu 64% und Kunststoffe zu 33% bei. Die Aufschlüsselung nach Werkstoffgruppen in Abbildung 45 zeigt eine ähnliche Verteilung wie für das Treibhausgaspotential des BEV-Leitungssatzes. Kupferkabel haben einen Einfluss von 59%, Elastomere bzw. Elastomerverbunde von 16% und gefüllte Thermoplaste von 12%. Wie in Abbildung 46 aufgeführt, weisen Gold, Platin, Silber und Silizium die höchsten materialspezifischen Primärenergiebedarfe auf, wirken sich durch ihre geringen Massenanteile aber kaum auf das Gesamtergebnis aus.

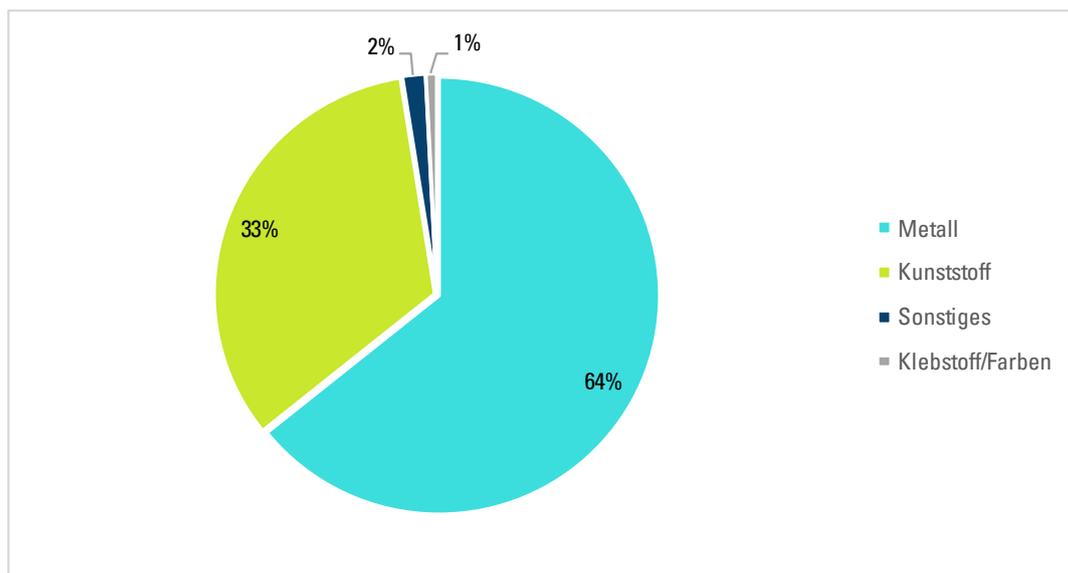


Abbildung 44: Ergebnis der Anteile des Nicht-Erneuerbaren Primärenergieverbrauchs der Werkstoffherstellung des BEV-Leitungssatzes nach Materialkategorie

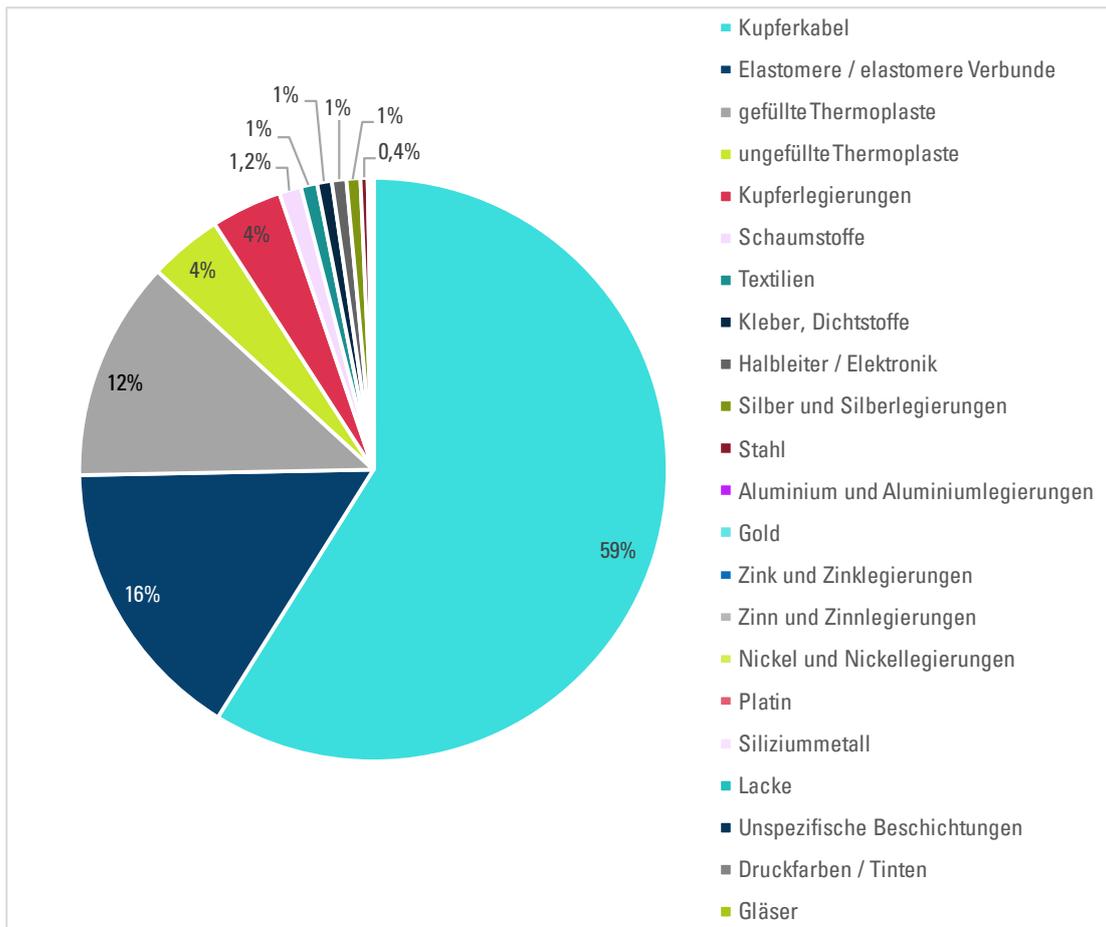


Abbildung 45: Ergebnis der Anteile des Nicht-Erneuerbaren Primärenergieverbrauchs der Werkstoffherstellung des BEV-Leitungssatzes nach Materialgruppe

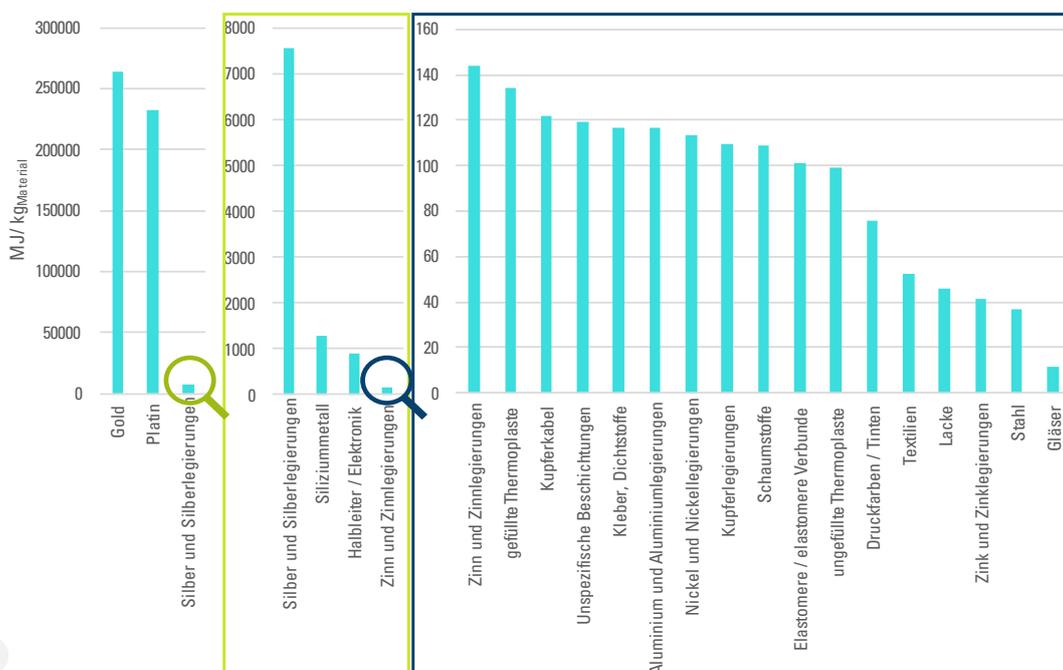


Abbildung 46: Spezifischer nicht-erneuerbarer Primärenergieverbrauchs der Materialien im BEV-Leitungssatz (MJ / kg Material)

### 4.6.1.3. End-of-Life

Für den nicht-erneuerbaren Primärenergiebedarf lässt sich eine ähnliche Verteilung der verschiedenen Anteile erkennen wie zuvor bei den Ergebnissen des erneuerbaren Primärenergieverbrauchs (Vgl. Abbildung 47). In Summe ergibt sich eine Einsparung von 260,1 MJ.

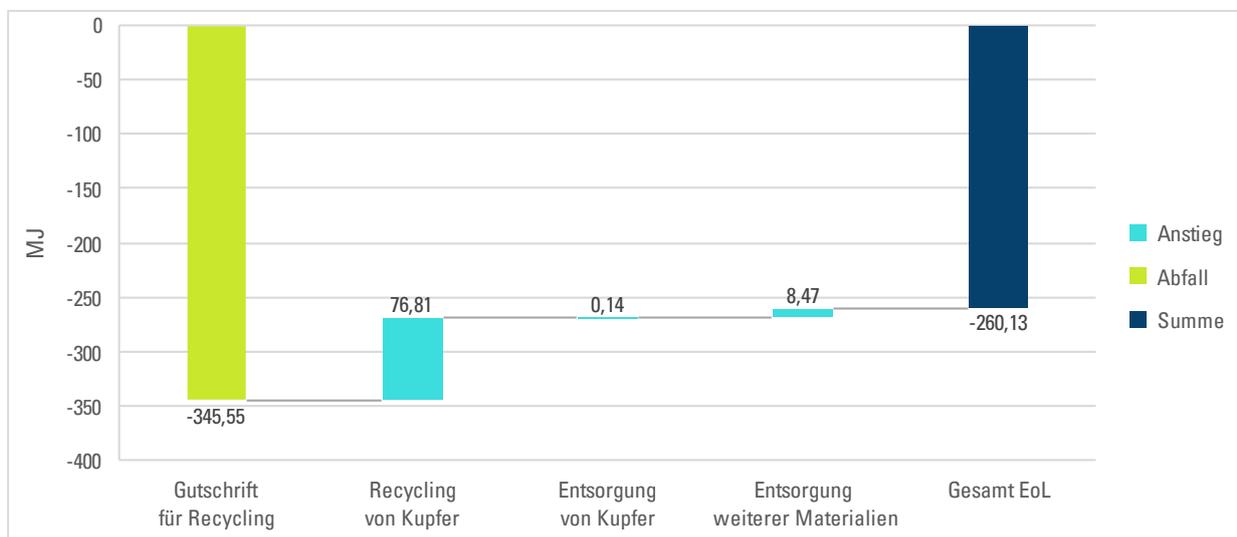


Abbildung 47: Ergebnis des Nicht-Erneuerbaren Primärenergieverbrauchs aus dem EoL des BEV-Leitungssatz

### 4.6.2. Ottomotor-Leitungssatz

#### 4.6.2.1. Gesamtergebnis

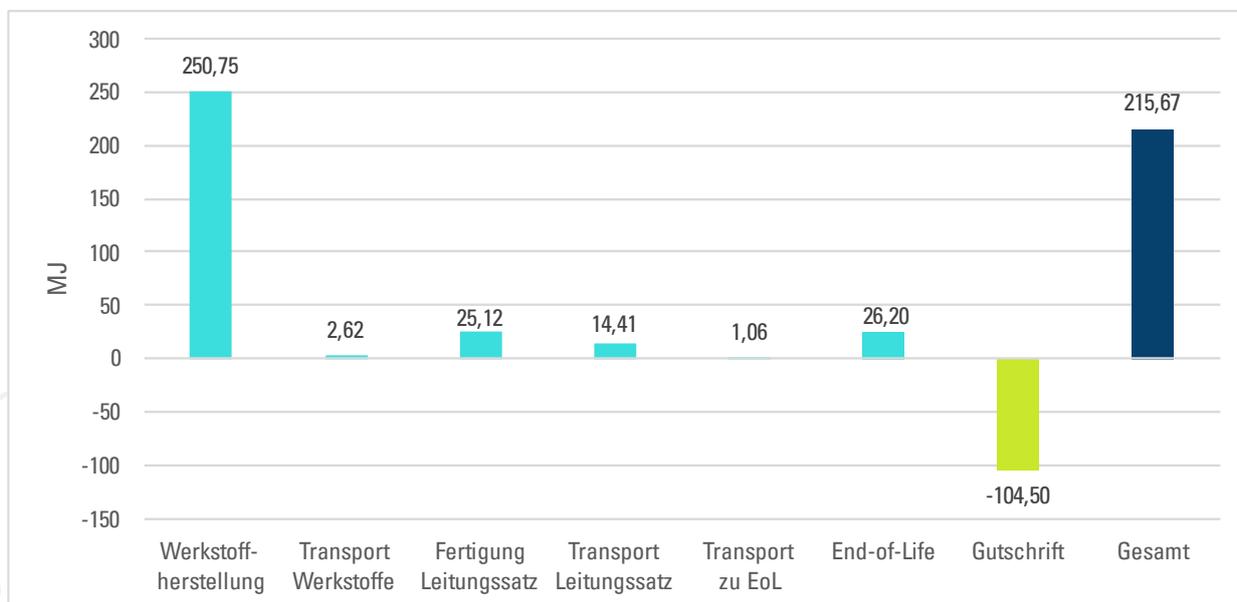


Abbildung 48: Ergebnis des Nicht-Erneuerbaren Primärenergieverbrauchs des Ottomotor-Leitungssatzes über den gesamten Lebenszyklus

Die nicht-erneuerbaren Primärenergieverbräuche des Ottomotor-Leitungssatzes in Abbildung 48 weisen eine sehr ähnliche Verteilung zu dem Ergebnis für die Auswertung des erneuerbaren Anteils in Abschnitt

4.5.2.1 auf. Auch hier hat die Fertigung des Kabelsatzes nahezu die gleichen Auswirkungen wie die Energiebedarfe des End-of-Life.

#### 4.6.2.2. Werkstoffherstellung

Abbildung 49 zeigt die Ergebnisse für die Werkstoffherstellung des Ottomotor-Leitungssatzes. Der Anteil der Metalle beträgt hier 54%, während Kunststoffe 39% ausmachen. Der Rest des nicht-erneuerbaren Primärenergieverbrauchs lässt sich zu 3% auf Klebstoffe und Farben, sowie zu 4% hauptsächlich auf Textilien zurückführen (Vgl. Abbildung 50). Entsprechend ihrem höheren Massenanteil im Produkt haben ungefüllte Thermoplaste mit 26% einen höheren Einfluss als gefüllte Thermoplaste mit 12%. Wie Abbildung 51 illustriert, sind Gold und Silber die Materialien mit den höchsten spezifischen Primärenergiebedarfen. Dies führt bei Gold zu einem Anteil von 2% an den Ergebnissen der Werkstoffherstellung.

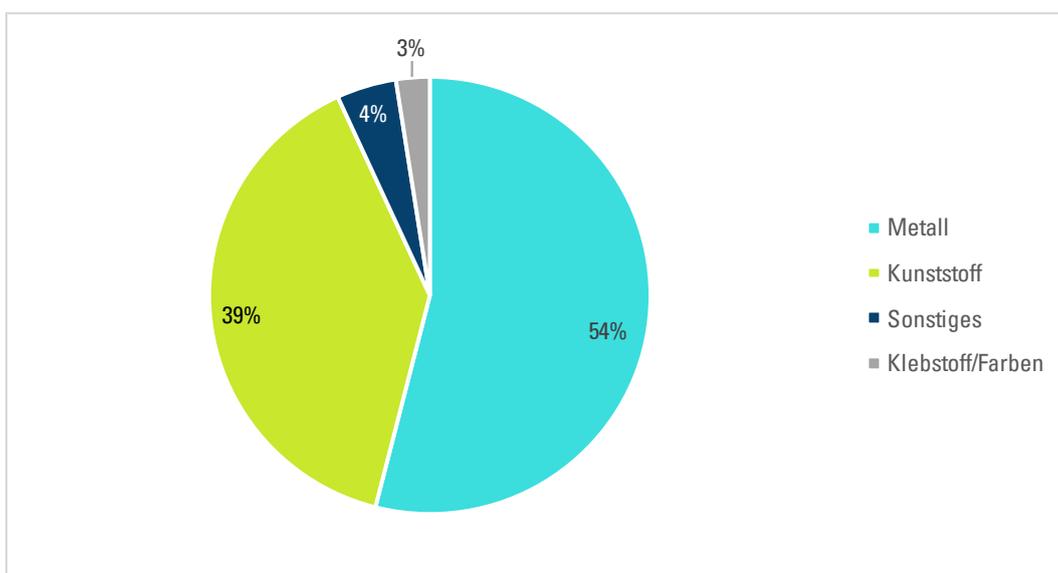


Abbildung 49: Ergebnis der Anteile des Nicht-Erneuerbaren Primärenergieverbrauchs der Werkstoffherstellung des Ottomotor-Leitungssatzes nach Materialkategorie

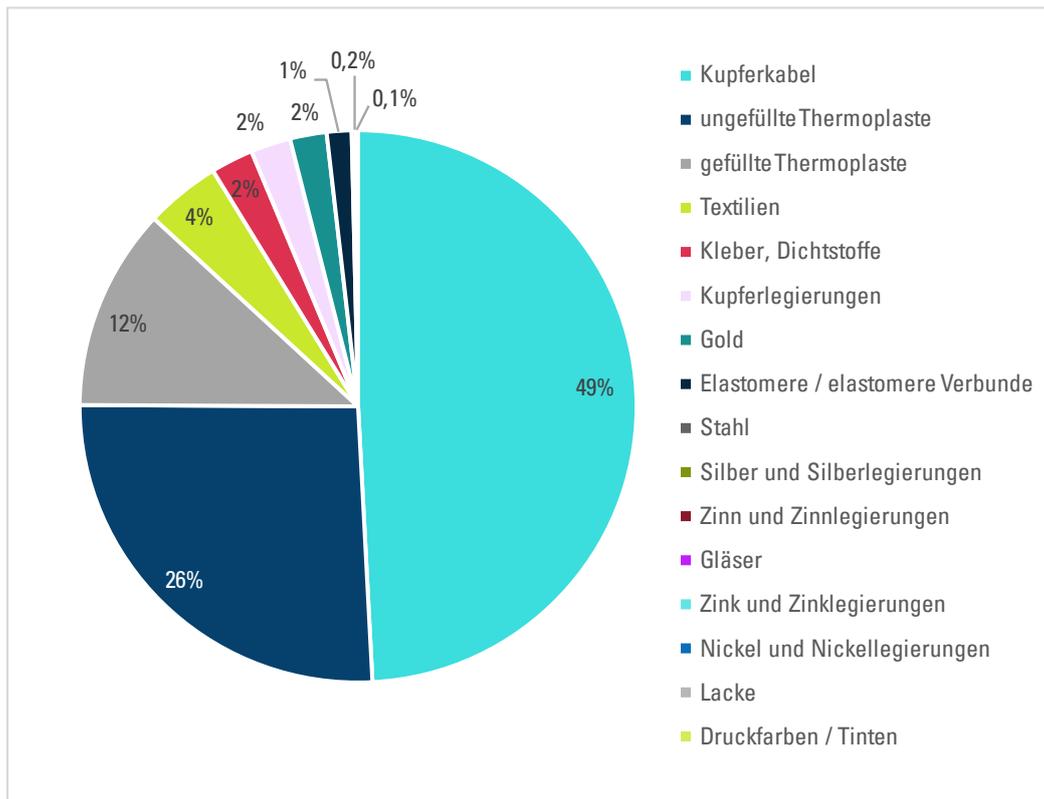


Abbildung 50: Ergebnis der Anteile des Nicht-Erneuerbaren Primärenergieverbrauchs der Werkstoffherstellung des Ottomotor-Leitungssatzes nach Materialgruppe

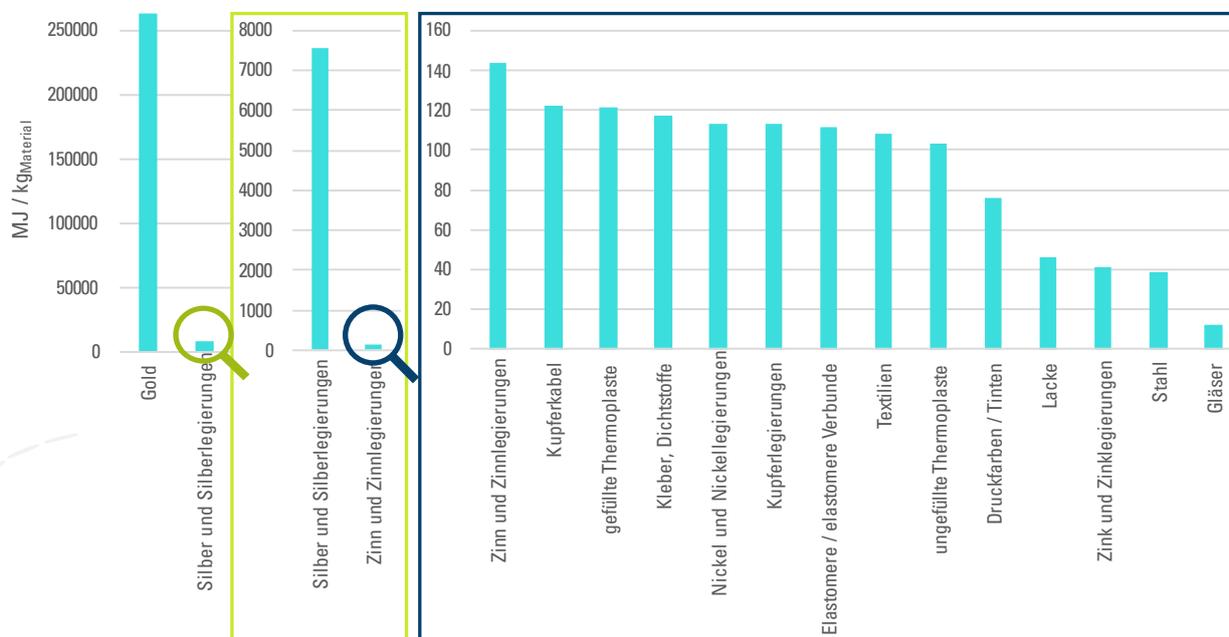


Abbildung 51: Spezifischer nicht-erneuerbarer Primärenergieverbrauch der Materialien im Ottomotor-Leitungssatz (MJ / kg Material)

#### 4.6.2.3. End-of-Life

Abbildung 52 zeigt, dass die Ergebnisse für den Ottomotor-Kabelsatz analog sind zum Leitungssatz des BEV. Als Summe der Auswirkungen der End-of-Life-Prozesse ergibt sich eine Gutschrift von 78,3 MJ.

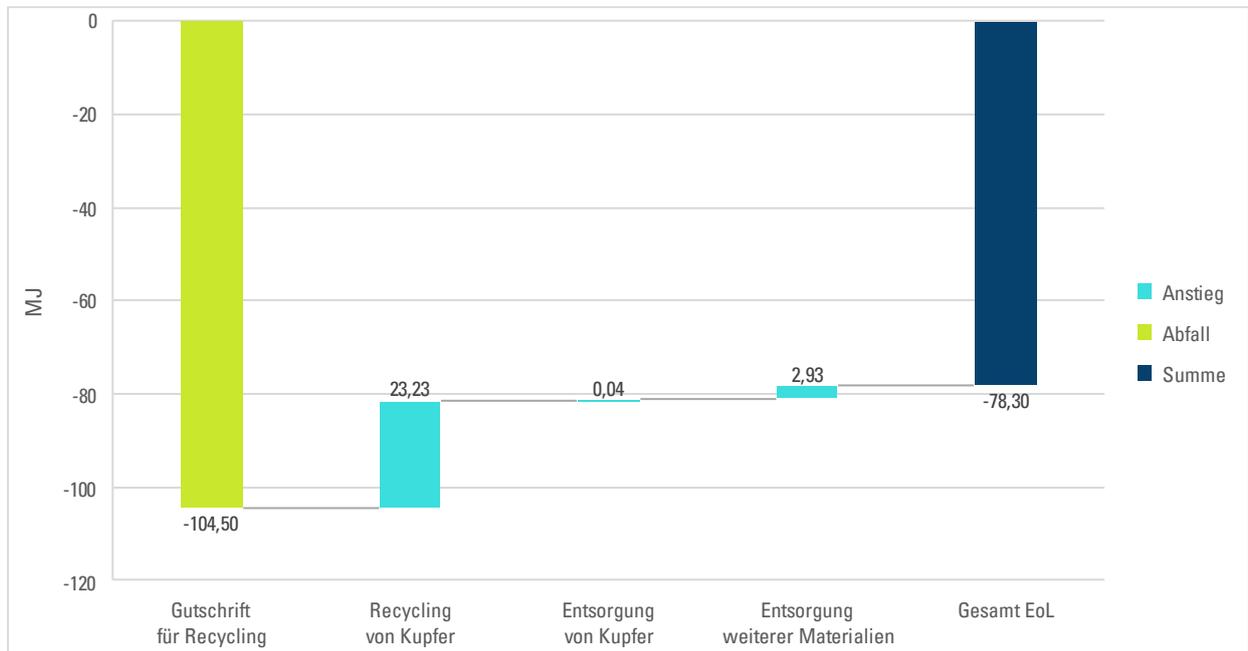


Abbildung 52: Ergebnis des Nicht-Erneuerbaren Primärenergieverbrauchs aus dem EoL des Ottomotor-Leitungssatzes

### 4.6.3. Vergleich der CED-Ergebnisse für Kupfer mit der Literatur (CED renewable + CED fossil)

Der Vergleich des Referenzwerts mit Ergebnissen der Literaturlauswertung von [Sanjuan-Delmás et al. 2022] in Abbildung 53 zeigt auch für die Wirkungskategorie Primärenergieverbrauch Unterschiede auf. Hier wird jeweils der gesamte Primärenergiebedarf ohne Aufteilung in einen erneuerbaren und nicht-erneuerbaren Anteil abgebildet.

Die Werte für Schweden beziehen sich auf die Kupferherstellung aus Erz mit einem Kupferanteil von 0,18% über die pyrometallurgische Route und weichen nur geringfügig von dem Ergebnis der vorliegenden Studie ab. Die Werte für Australien bilden unterschiedliche Kupferanteile im Erz bzw. andere Verarbeitungsprozesse ab. Der Emissionswert für Europa aus der ecoinvent-Datenbank bezieht sich auf Sekundärkupfer, was den geringen Primärenergieverbrauch erklärt.

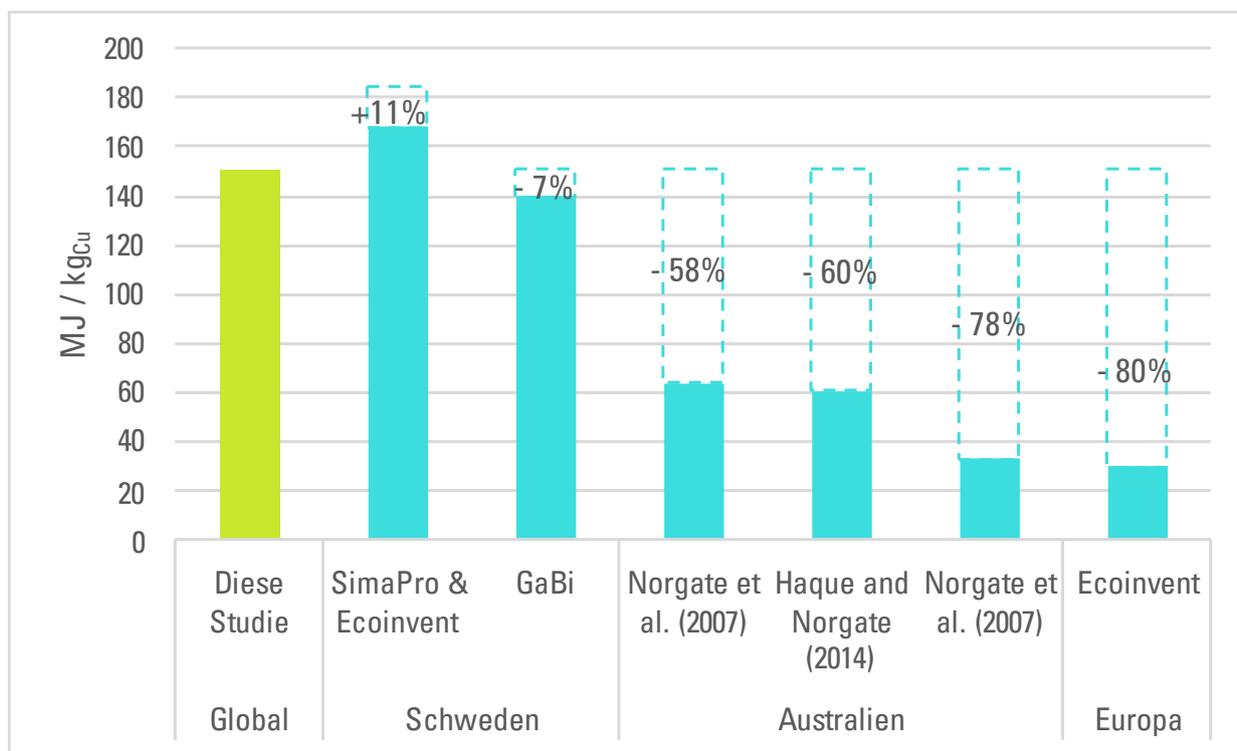


Abbildung 53: Vergleich der CED-Ergebnisse für Kupfer mit den Ergebnissen der Literaturlauswertung nach [Sanjuan-Delmás et al. 2022] (MJ / kg Material)



## 4.7. Sensitivitätsanalyse „Best-Case“

Aus den vorangegangenen Ergebnissen der Wirkungsabschätzung ist ersichtlich, dass Kupfer in allen Wirkungskategorien den höchsten Einfluss aufweist und die Umweltauswirkungen gleichzeitig mit hohen Unschärfen verbunden sind. Um die Abhängigkeit der Gesamtergebnisse von diesem wichtigen Parameter zu untersuchen, wird als erste Sensitivitätsanalyse eine Substitution des Primärkupfers bei der Kabelherstellung durch Sekundärkupfer betrachtet. Dadurch wird neben der konservativen Annahme im Basisszenario (pyrometallurgisches Kupfer aus der globalen Produktion) ein „Best-Case-Szenario“ dargestellt. Entsprechend den niedrigsten Literaturwerten nach [Sanjuan-Delmás et al. 2022] wird dabei der ecoinvent-Prozess „treatment of copper scrap by electrolytic refining | copper, cathode | Cutoff, U – RER“ verwendet (Vgl. Abschnitt 4.3.3, 4.4.3 und 4.6.3). Hierbei handelt es sich um den gleichen Prozess, der beim Recycling von Kupferkabeln modelliert wird (Vgl. Anhang A. 16). Mit Ausnahme des entsorgten Kupferkabelanteils von 10% im End-of-Life stellt dieses Szenario einen geschlossenen Kreislauf für Kupferkabel in Leitungssätzen dar.

### 4.7.1. BEV-Leitungssatz

Für den BEV-Leitungssatz führt der Einsatz von Sekundärkupfer in der Kategorie Treibhausgaspotential zu einer Einsparung von 47% bei der Werkstoffherstellung (Vgl. Abbildung 54). Die Emissionen der Fertigung und der Transporte verändern sich dadurch nicht. Nach dem End-of-Life ergibt sich durch die im Vergleich zu Primärkupfer geringeren THG-Emissionen von Sekundärkupfer auch eine deutlich geringere Gutschrift durch das Recycling und die Wiederverwendung. Insgesamt führt die Nutzung von Kupferkabeln aus recykliertem Kupfer somit zu einer Einsparung von 7% über den gesamten Produktlebenszyklus.

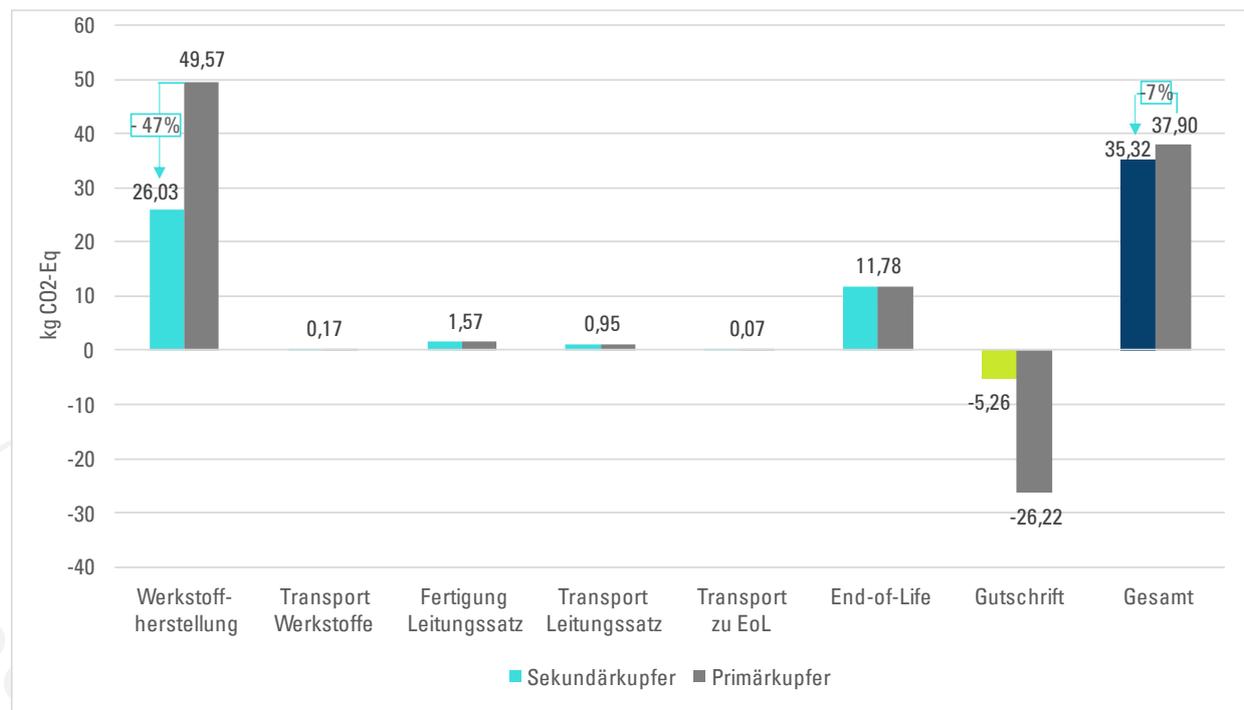


Abbildung 54: Ergebnis des Treibhausgaspotentials des BEV-Leitungssatzes mit Sekundärkupfer über den gesamten Lebenszyklus

In der Wirkungskategorie Versauerung führt dieses Szenario, wie in Abbildung 55 dargestellt, zu wesentlich höheren Einsparungen von 78% in der Werkstoffherstellung. Dies lässt sich auf die deutlich geringere Versauerungswirkung von Sekundärkupfer im Vergleich zu Primärkupfer zurückführen. Unter Berücksichtigung der Gutschrift durch das Recycling ergibt sich insgesamt eine Einsparung von 28%.

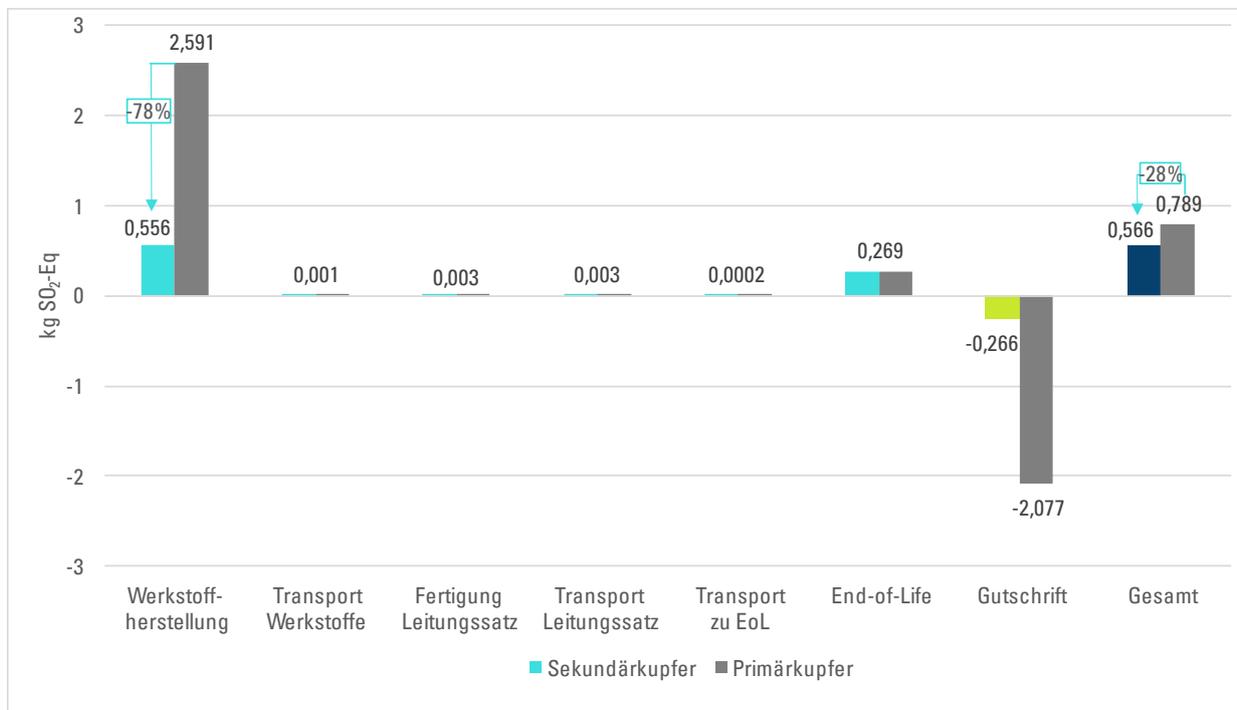


Abbildung 55: Ergebnis des Versauerungspotentials des BEV-Leitungssatzes mit Sekundärkupfer über den gesamten Lebenszyklus

Für den Primärenergieverbrauch werden ähnliche Ergebnisse berechnet. Der erneuerbare Anteil des Verbrauchs sinkt durch die Verwendung von Sekundärkupfer um 41% bei der Werkstoffherstellung und um 7% im Gesamtergebnis (Vgl. Abbildung 56). Der nicht-erneuerbare Primärenergiebedarf der Werkstoffherstellung nimmt um 43% ab und führt ebenfalls zu einer Einsparung von 7% über den gesamten Lebenszyklus (Vgl. Abbildung 57).



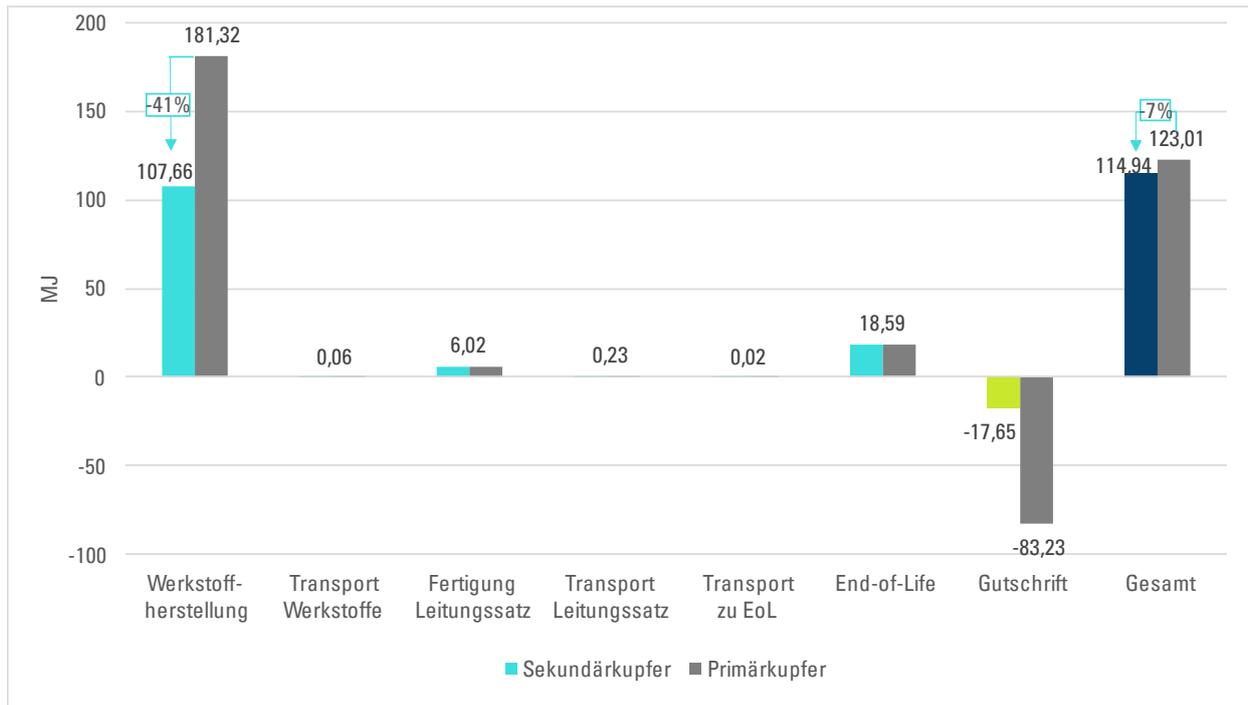


Abbildung 56: Ergebnis des Erneuerbaren Primärenergieverbrauchs des BEV-Leitungssatzes mit Sekundärkupfer über den gesamten Lebenszyklus

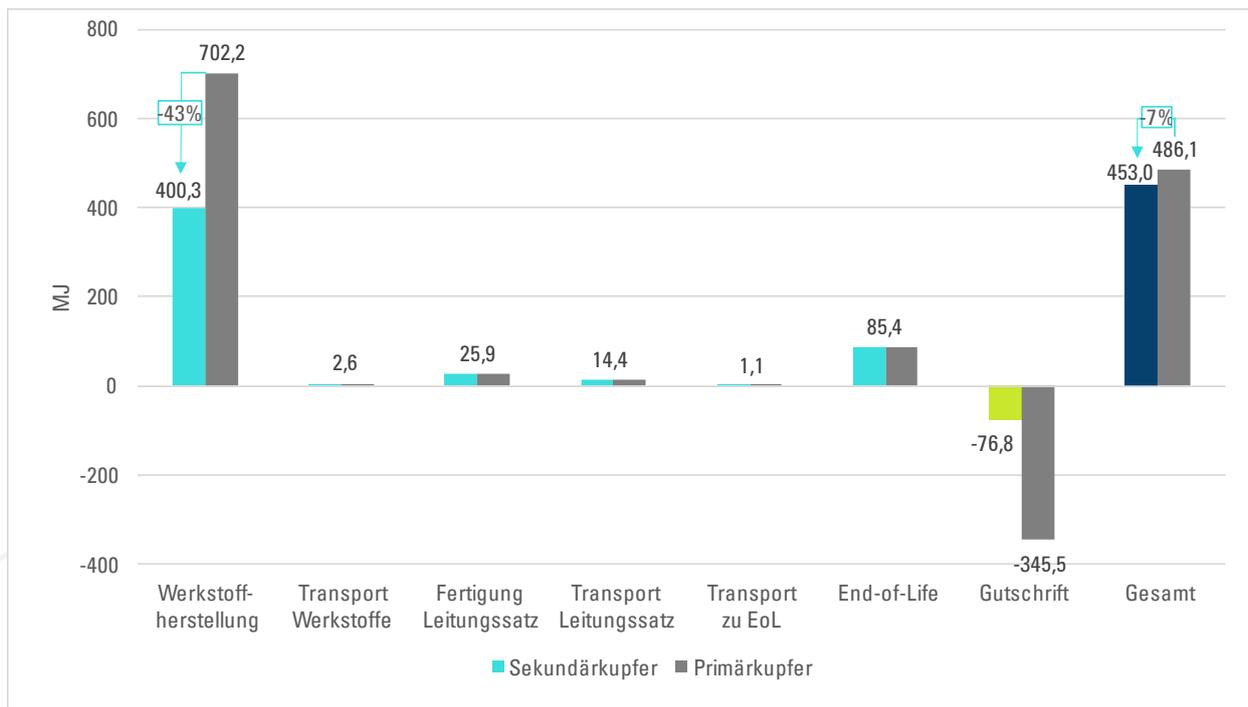


Abbildung 57: Ergebnis des Nicht-Erneuerbaren Primärenergieverbrauchs des BEV-Leitungssatzes mit Sekundärkupfer über den gesamten Lebenszyklus

### 4.7.2. Ottomotor-Leitungssatz

Bei der Werkstoffherstellung des Ottomotor-Leitungssatzes ergeben sich als Folge der Substitution von Primärkupfer durch Sekundärkupfer THG-Emissions-Einsparungen in Höhe von 45% (Vgl. Abbildung 58. Für den gesamten Lebenszyklus entspricht das unter Berücksichtigung der Recycling-Gutschrift insgesamt 5%.

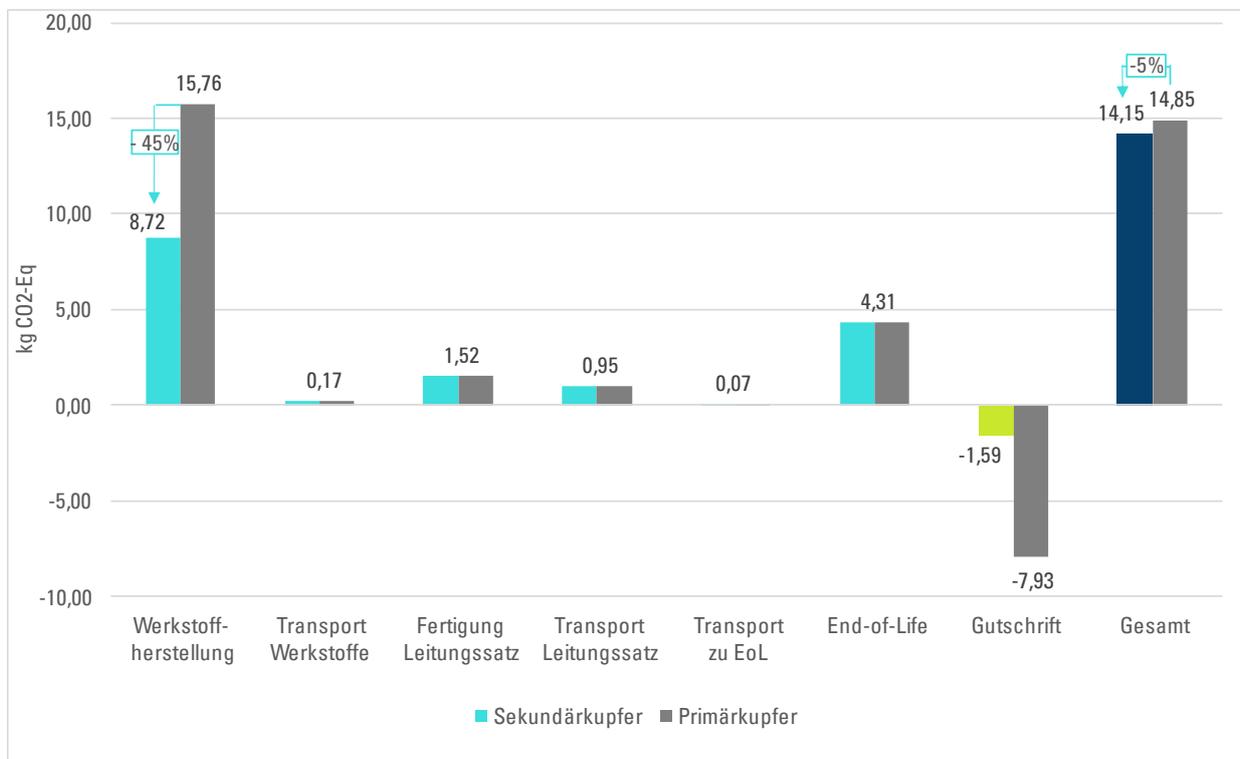


Abbildung 58: Ergebnis des Treibhausgaspotentials des Ottomotor-Leitungssatzes mit Sekundärkupfer über den gesamten Lebenszyklus

Wie auch für den BEV-Leitungssatz, sind die Reduktionen des Versauerungspotenzials in diesem Szenario mit 78% höher als in den anderen Wirkungskategorien (Vgl. Abbildung 59). Dies hat im Gesamtergebnis Einsparungen von 25% zur Folge.



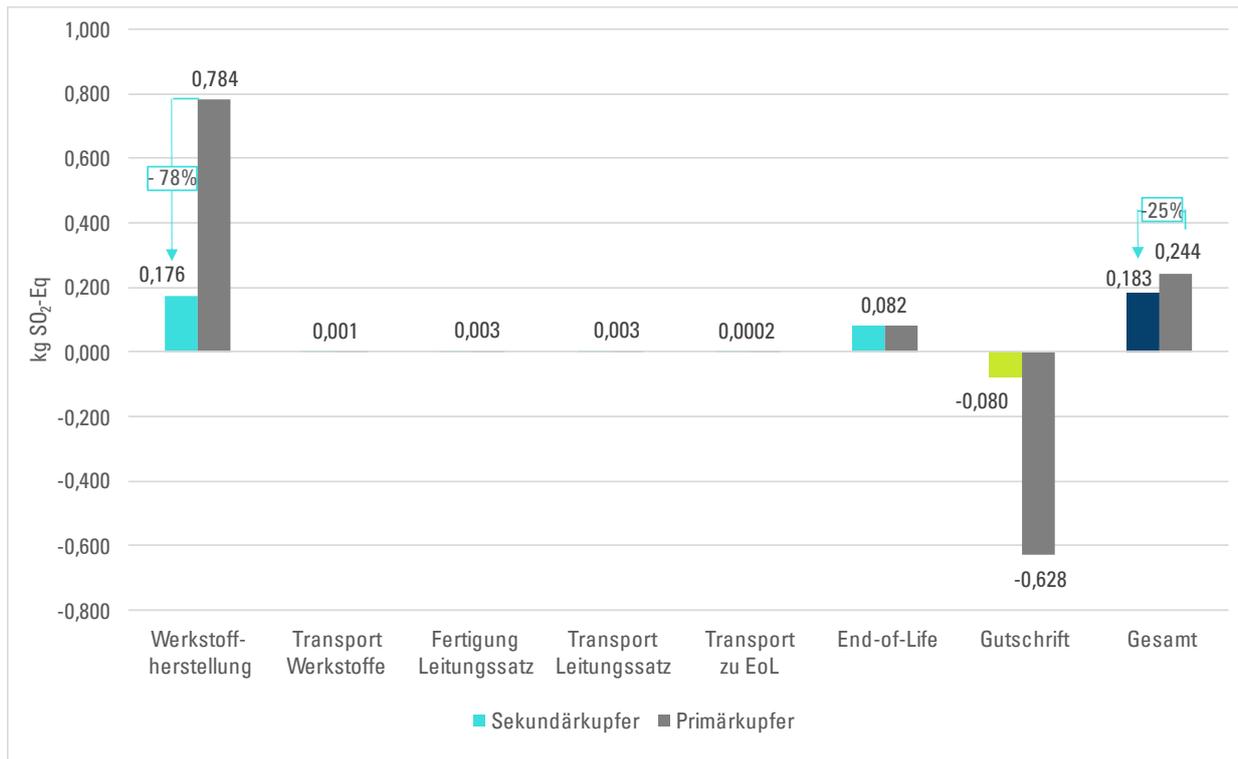


Abbildung 59: Ergebnis des Versauerungspotentials des Ottomotor-Leitungssatzes mit Sekundärkupfer über den gesamten Lebenszyklus

Abbildung 60 und Abbildung 61 illustrieren den erneuerbaren und nicht-erneuerbaren Primärenergiebedarf des Ottomotor-Leitungssatzes unter Einsatz von Sekundärkupfer. Für die Werkstoffherstellung sinken diese um 51% bzw. 36%. Im gesamten Lebenszyklus führt das zu einer Reduktion des erneuerbaren Primärenergieverbrauchs um 7% und einem Abfall des nicht-erneuerbaren Anteils um 4%.



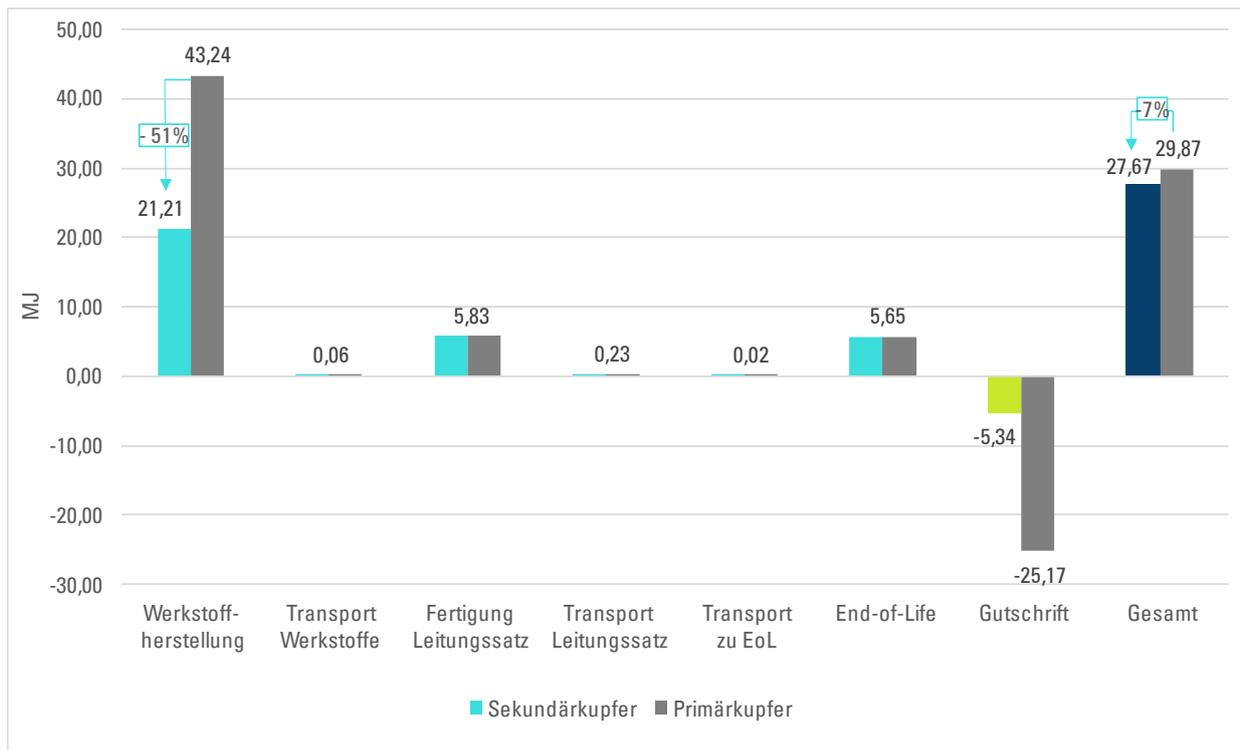


Abbildung 60: Ergebnis des Erneuerbaren Primärenergieverbrauchs des Ottomotor-Leitungssatzes mit Sekundärkupfer über den gesamten Lebenszyklus

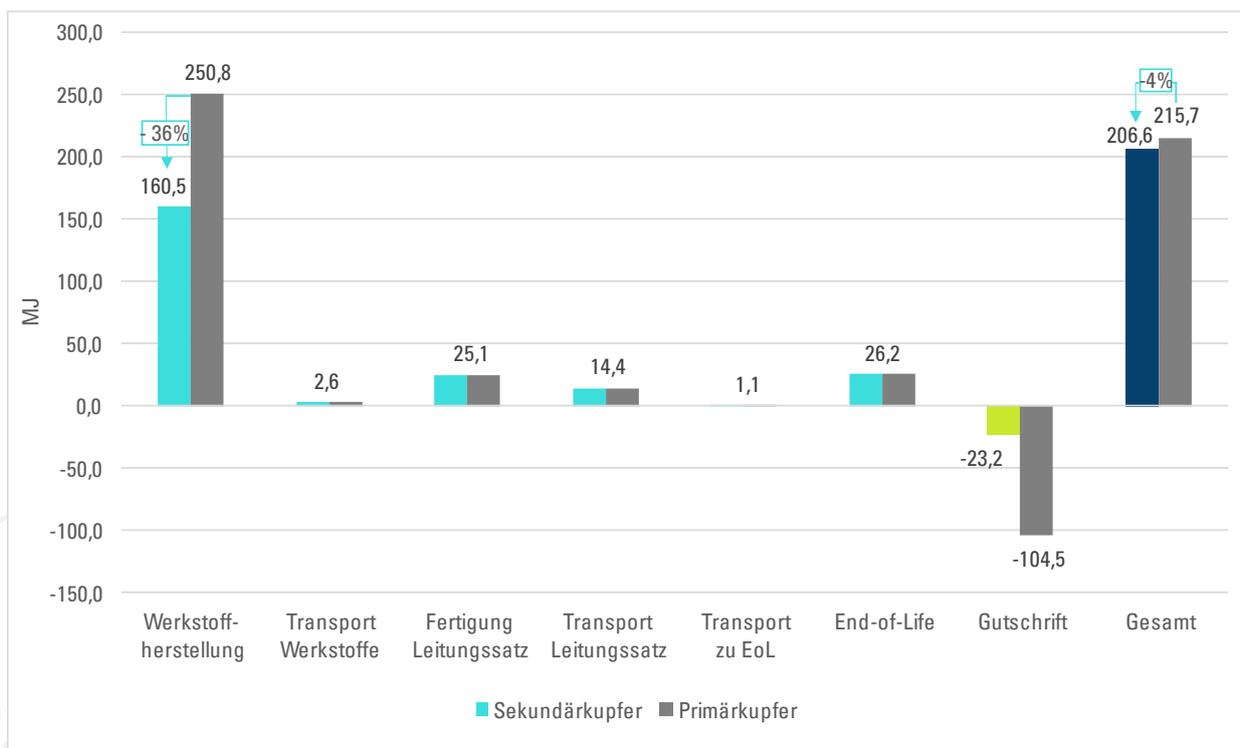


Abbildung 61: Ergebnis des Nicht-Erneuerbaren Primärenergieverbrauchs des Ottomotor-Leitungssatzes mit Sekundärkupfer über den gesamten Lebenszyklus

### 4.7.3. Interpretation der Sensitivitätsanalyse „Best Case“

Der Vergleich der Umweltauswirkungen von Kupfer mit Literaturdaten (Vgl. Abschnitt 4.3.3, 4.4.3 und 4.6.3) ließ erwarten, dass der Einsatz von Sekundärkupfer statt Primärkupfer zu signifikanten Reduktionen in allen Wirkungskategorien führt. Die Sensitivitätsanalyse bestätigt dies, nachdem es hier in der Werkstoffherstellung zu Einsparungen von -36% bis -78% kommt. Aufgrund der geringeren Umweltauswirkungen des Sekundärrohstoffs fällt die Gutschrift für das Recycling im End-of-Life entsprechend geringer aus. Über den gesamten Lebenszyklus heben sich diese Effekte für das Treibhausgaspotential und den Primärenergiebedarf nahezu auf und es ergeben sich für die beiden Leitungssätze lediglich Einsparungen von -5% bis -7% im Vergleich zum Basisszenario. Für das Versauerungspotential fällt diese Einsparung durch den sehr hohen Einfluss von Kupfer auf das Gesamtergebnis mit -25% bis -28% etwas höher aus.

Es lässt sich somit feststellen, dass die Ergebnisse der Werkstoffherstellung zwar wesentlich von den Annahmen für Kupfer abhängen, dies jedoch keinen signifikanten Einfluss auf den gesamten Lebenszyklus hat, sofern eine hohe Gutschrift für das Recycling angerechnet wird.

Zudem verdeutlichen die Ergebnisse dieser Sensitivitätsanalyse, wie der Einsatz von Sekundärkupfer bei der Leitungssatzherstellung Umweltauswirkungen erheblich reduzieren kann. Auch wenn die Einsparungen im Gesamtergebnis unter Berücksichtigung einer Gutschrift geringer ausfallen, sind aus Sicht eines Konfektionärs primär die Werkstoffherstellung, Kabelsatzfertigung und damit einhergehende Transporte relevant.

### 4.8. Sensitivitätsanalyse „Worst-Case“

Da neben den Umweltauswirkungen durch Kupferkabel v.a. die Gutschrift durch das Recycling einen hohen Einfluss auf das Gesamtergebnis der beiden Produkte hat, wird auch hierfür eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Wie in Abschnitt 3.4.2 erwähnt, wird ein Teil deutscher Gebrauchtwagen ins EU-Ausland verkauft und dort teilweise unfachgerecht entsorgt. Als „Worst-Case-Szenario“ wird ein End-of-Life der Kabelsätze in Ghana modelliert, bei dem Kupfer durch offene Verbrennung der Kabel zurückgewonnen wird. Eine entsprechende Gutschrift wird nicht angerechnet, da das Sekundärkupfer nicht mehr für die Herstellung neuer Kabel in Europa zur Verfügung steht.

Neben dem EoL-Transport mit LKW in Deutschland wird für den Transport nach Ghana ein Schiffstransport mit 7695,56 km Distanz angenommen [DP World 2025]. Hierbei wird der ecoinvent-Prozess „transport, freight, sea, container ship | transport, freight, sea, container ship | Cutoff, U – GLO“ verwendet. Für die Verbrennung der Kabel liegt mit „treatment of waste, electrical and electronic cables, open burning | waste, electrical and electronic cables | Cutoff, U – GH“ liegt ein für Ghana spezifischer Datensatz in ecoinvent vor. In der Dokumentation dieses Prozesses ist angegeben, dass dieser für die offene Kabelverbrennung in sämtlichen Ländern angenommen werden kann und von Kabeln mit einem Anteil von 62% Kupfer und 38% Isolierung ausgeht. Dies entspricht näherungsweise den Kupferkabel- und Kunststoffanteilen im BEV-Leitungssatz (58% Kupfer und 34% Kunststoffe) sowie im Ottomotor-Kabelsatz (50% Kupfer und 39% Kunststoffe). Für die Entnahme der Kabel aus dem Altfahrzeug und das Sortieren werden manuelle Prozesse angenommen, durch die keine Umweltauswirkungen entstehen.

### 4.8.1. BEV-Leitungssatz

Für die Ergebnisse aller Lebenszyklusphasen bis zur Nutzung ergeben sich in diesem Szenario keine Änderungen. Das Treibhausgaspotential des BEV-Leitungssatz-Transports zum EoL nach Ghana ist um etwa den Faktor 8 höher als beim reinen EoL-Transport mit LKW innerhalb Deutschlands. Dieser Wert ist jedoch nach wie vor sehr gering im Vergleich zu den Emissionen der Werkstoffherstellung. Durch die offene Kabelverbrennung treten weniger Treibhausgasemissionen auf als bei einer fachgerechten Verwertung des Leitungssatzes, nachdem die energieintensiven Prozesse Schreddern, Sortieren und Recycling nicht zum Einsatz kommen. Die fehlende Recycling-Gutschrift hat den höchsten Einfluss auf das Gesamtergebnis, das insgesamt zu einem 53% höheren Treibhausgaspotential führt als im Basisszenario (Vgl. Abbildung 62).

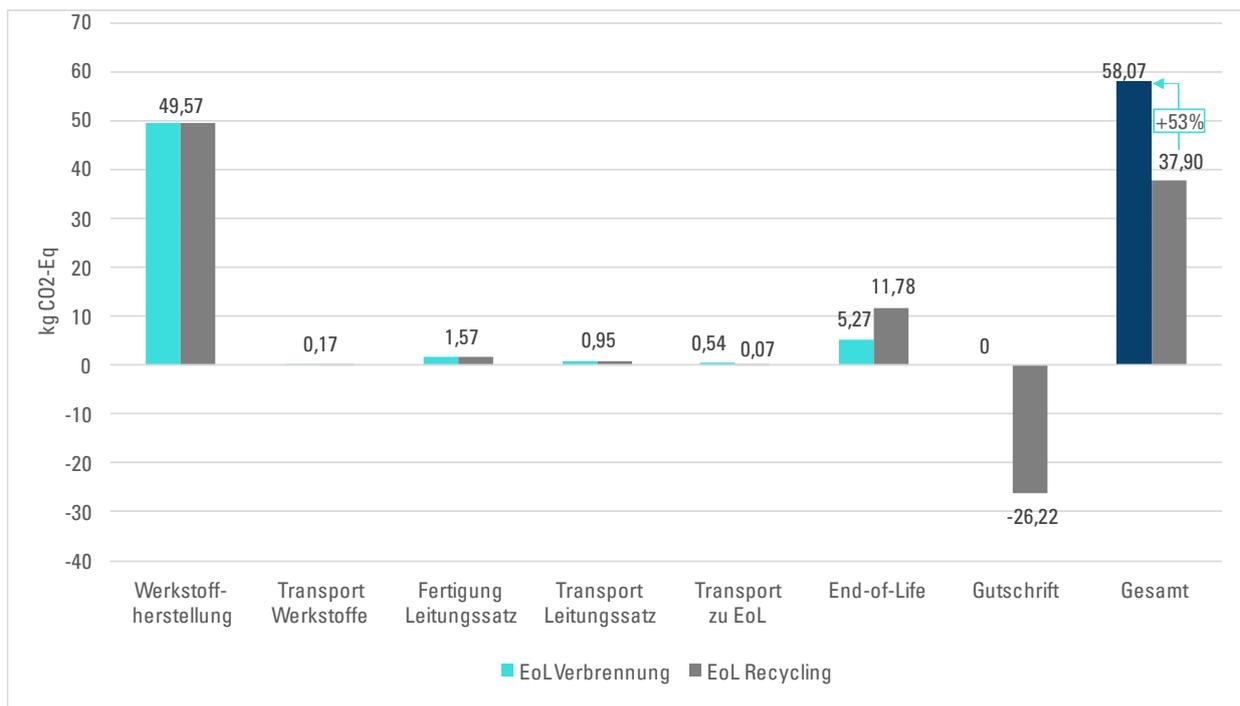


Abbildung 62: Ergebnis des Treibhausgaspotentials des BEV-Leitungssatzes ohne Recycling über den gesamten Lebenszyklus

Abbildung 63 zeigt, dass der Transport über das Meer und die Verbrennung im EoL auch beim Versauerungspotential nur einen sehr geringen Einfluss auf das Gesamtergebnis haben. Ohne eine Recycling-Gutschrift nehmen die Auswirkungen in dieser Wirkungskategorie um 231% zu.



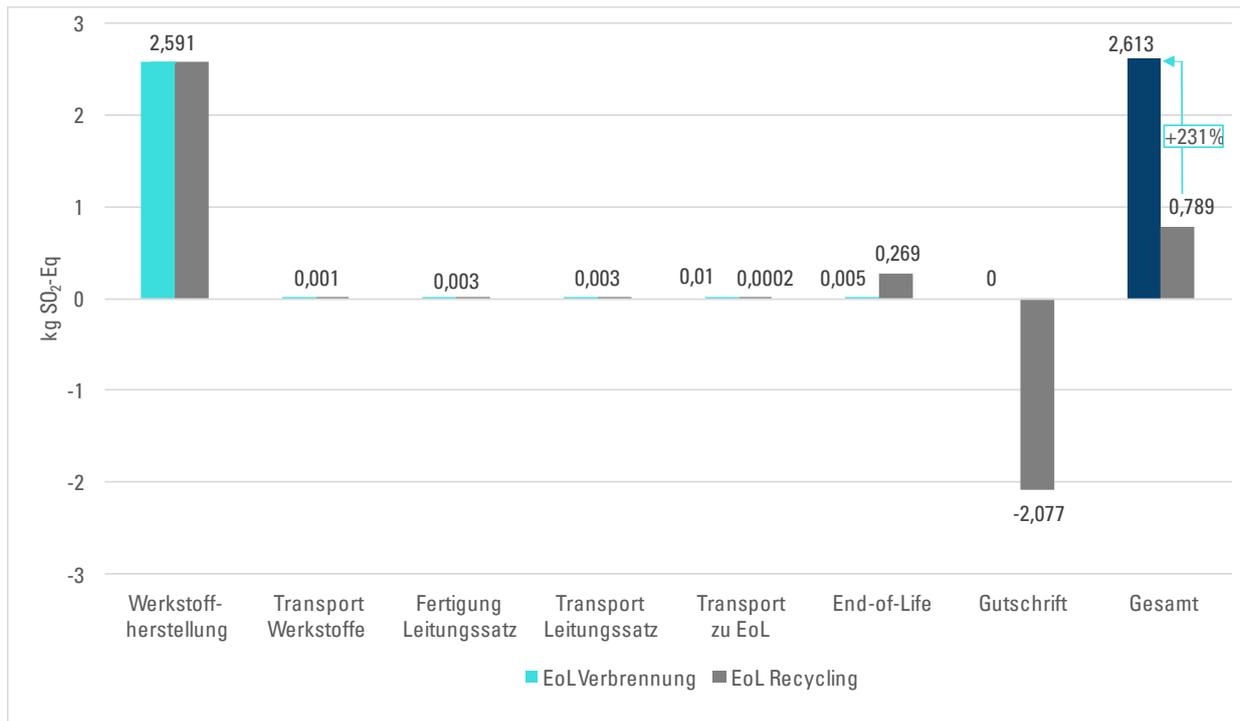


Abbildung 63: Ergebnis des Versauerungspotentials des BEV-Leitungssatzes ohne Recycling über den gesamten Lebenszyklus

Der erneuerbare und nicht-erneuerbare Primärenergieverbrauch des Schiffstransports ist ebenfalls vernachlässigbar gering. Im End-of-Life treten keinerlei Auswirkungen auf, da keine Energieträger für die Verwertung zum Einsatz kommen. Insgesamt nimmt der erneuerbare Primärenergiebedarf durch die fehlende Gutschrift um 53% zu (Vgl. Abbildung 64). Beim nicht-erneuerbaren Anteil beträgt die Zunahme 55% (Vgl. Abbildung 65).



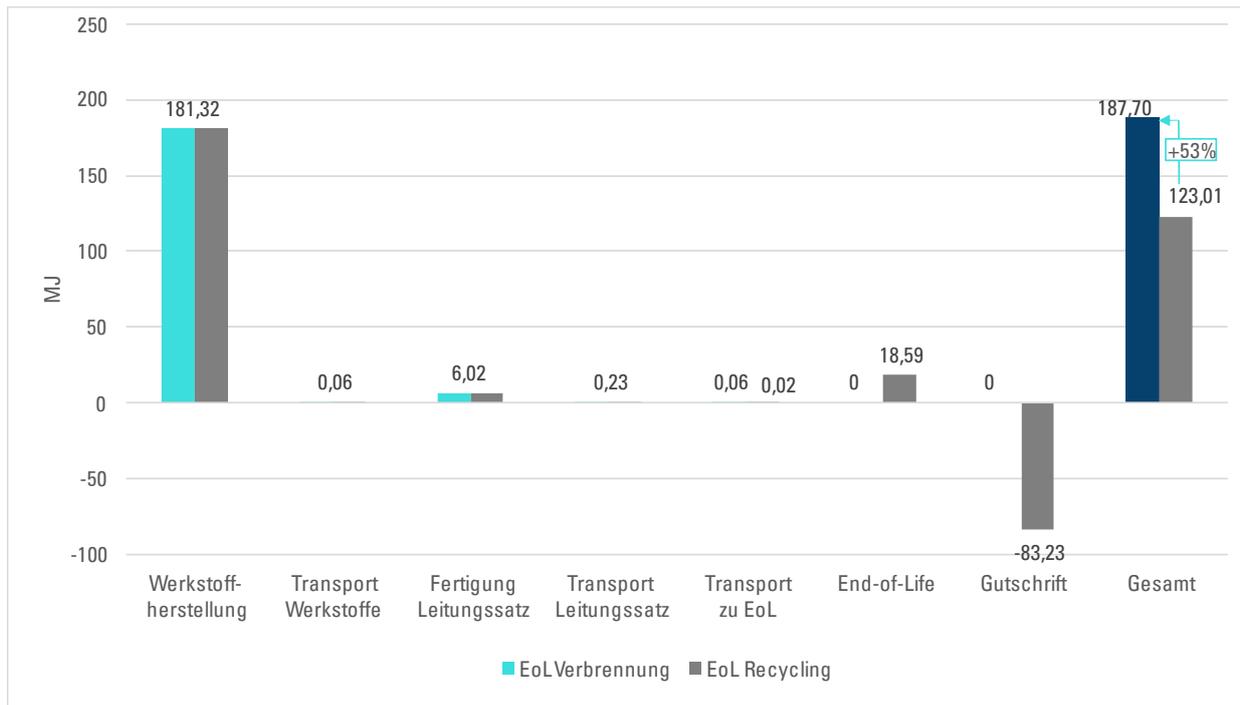


Abbildung 64: Ergebnis des Erneuerbaren Primärenergieverbrauchs des BEV-Leitungssatzes ohne Recycling über den gesamten Lebenszyklus

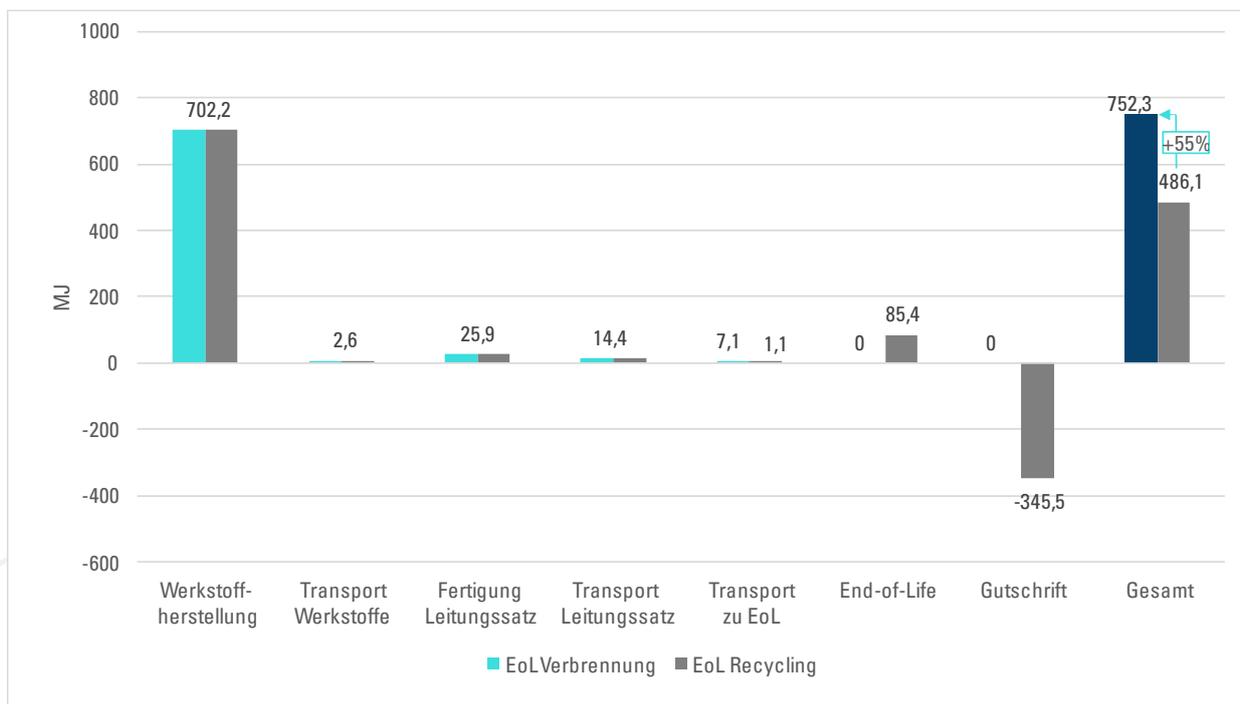


Abbildung 65: Ergebnis des Nicht-Erneuerbaren Primärenergieverbrauchs des BEV-Leitungssatzes ohne Recycling über den gesamten Lebenszyklus

#### 4.8.2. Ottomotor-Leitungssatz

Die Ergebnisse für den Ottomotor-Leitungssatz sind ähnlich zu denen des BEV-Kabelsatzes. Für das Treibhausgaspotential ergibt sich eine Zunahme um 38% zum Basiszenario (Vgl. Abbildung 66). Das Versauerungspotential steigt ohne Recycling um 226% an (Vgl. Abbildung 67). Der Primärenergieverbrauch

nimmt für den erneuerbaren Anteil um 65% (Vgl. Abbildung 68) und für den nicht-erneuerbaren Anteil um 37% zu (Vgl. Abbildung 69).

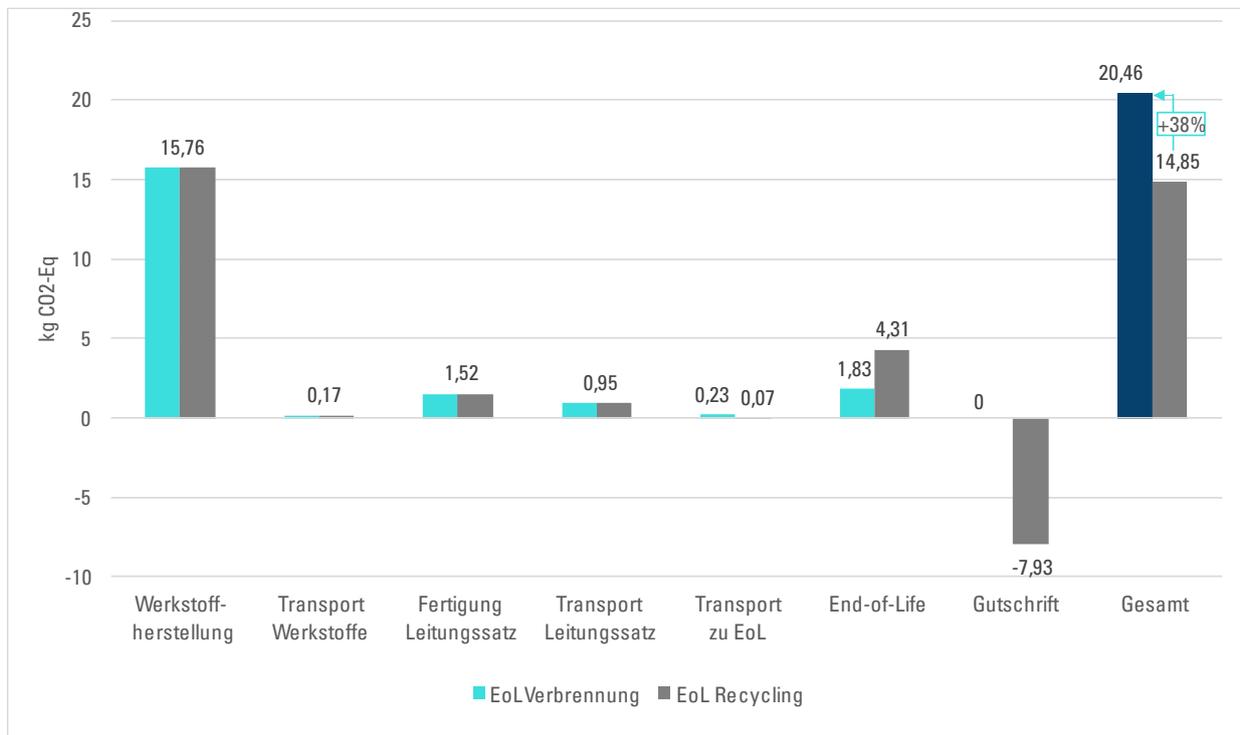


Abbildung 66: Ergebnis des Treibhausgaspotentials des Ottomotor-Leitungssatzes ohne Recycling über den gesamten Lebenszyklus



Abbildung 67: Ergebnis des Versauerungspotentials des Ottomotor-Leitungssatzes ohne Recycling über den gesamten Lebenszyklus

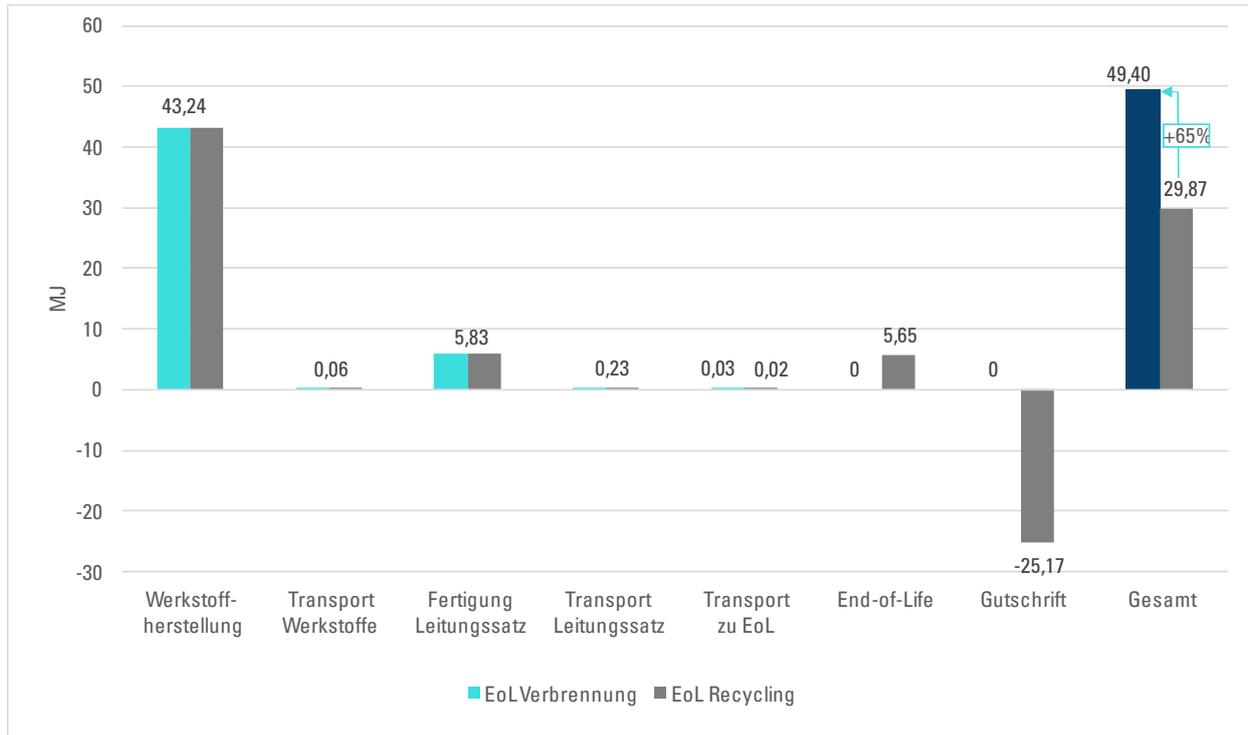


Abbildung 68: Ergebnis des Erneuerbaren Primärenergieverbrauchs des Ottomotor-Leitungssatzes ohne Recycling über den gesamten Lebenszyklus

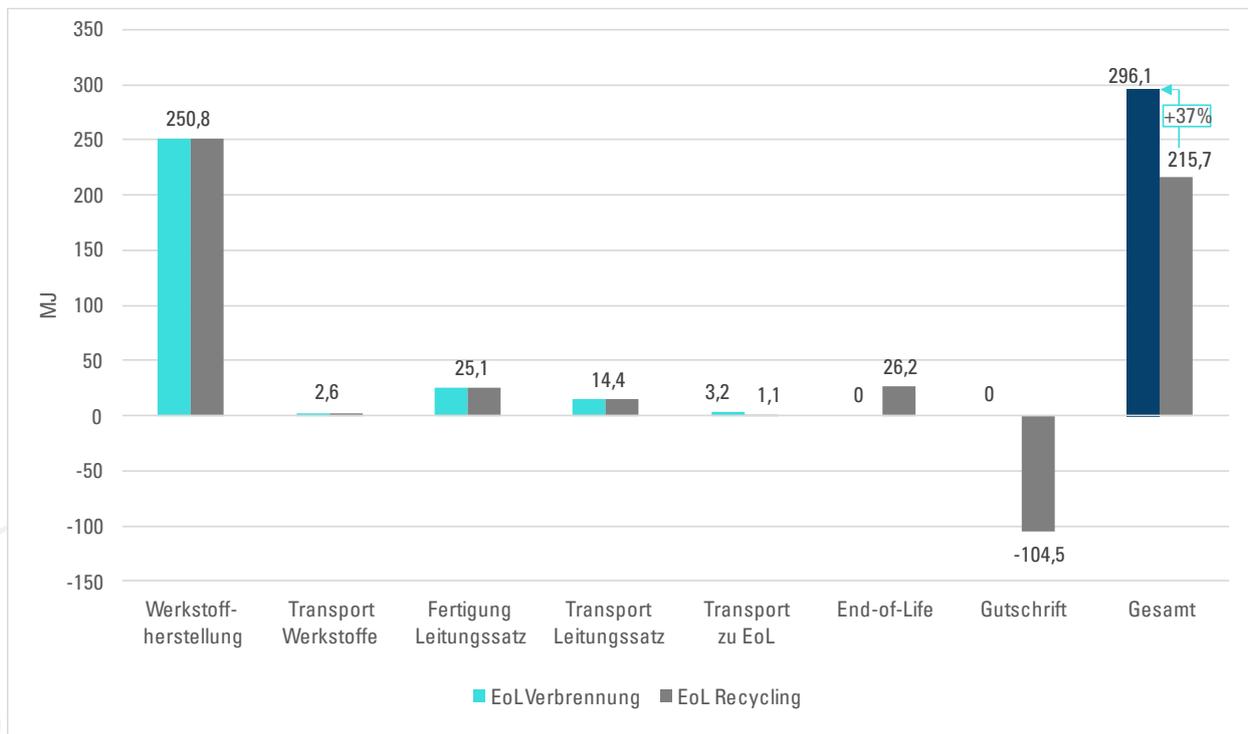


Abbildung 69: Ergebnis des Nicht-Erneuerbaren Primärenergieverbrauchs des Ottomotor-Leitungssatzes ohne Recycling über den gesamten Lebenszyklus

### 4.8.3. Interpretation der Sensitivitätsanalyse „Worst Case“

Für beide Leitungssätze lässt sich feststellen, dass der Transport nach Ghana nur zu sehr geringen Umweltauswirkungen in allen Wirkungskategorien führt. Auch die offene Kabelverbrennung hat nur einen geringen Einfluss auf die Gesamtergebnisse und es treten dabei geringere Treibhaus- und Versauerungswirkungen sowie Primärenergiebedarfe als bei einem energieintensiven fachgerechten EoL-Prozess in Europa auf. Hierbei bleibt jedoch unberücksichtigt, dass eine offene Verbrennung von Kunststoffen und anderen Bestandteilen der Kabelsätze u.a. zu Feinpartikelemissionen führt und neben Umweltauswirkungen auch erhebliche negative Auswirkungen auf die Gesundheit der lokalen Bevölkerung haben kann. Es ist somit von hoher Bedeutung, dass Fahrzeuge am Ende des Lebenszyklus möglichst fachgerecht verwertet werden.

Diese Sensitivitätsanalyse zeigt zudem, dass die Auswirkungen in allen Wirkungskategorien signifikant zunehmen, wenn keine Gutschrift durch ein Recycling von Kupferkabeln angerechnet wird, v.a. in der Wirkungskategorie Versauerung.

## 5. FAZIT

Die Untersuchung des Ressourcenverbrauchs hat ergeben, dass der BEV-Leitungssatz insgesamt einen höheren Anteil an Metallen und mehr strategische und kritische Rohstoffe als der Ottomotor-Kabelsatz enthält. Dafür besteht letzterer aus mehr Gold und ungefüllten Thermoplasten. Aluminium, Silizium, Platin und Schaumstoffe sind der Stückliste nach nicht im Ottomotor-Leitungssatz enthalten.

Aus den Ergebnissen der Wirkungsabschätzung der anderen Kategorien lässt sich schließen, dass die Umweltbelastungen der einzelnen Werkstoffe in den Wirkungskategorien Treibhausgaspotential und Primärenergiebedarf größtenteils proportional zu ihrem Massenanteil im Leitungssatz sind. Ausnahmen bilden Platin, Gold, Silber und Silizium mit jeweils sehr hohen spezifischen Umweltauswirkungen. Diese Metalle haben aufgrund ihrer geringen Anteile in den Produktsystemen jedoch nur einen sehr geringen Einfluss auf die Gesamtergebnisse. In der Wirkungskategorie Versauerung sind Kupferkabel und weitere Kupferbestandteile für 97-98% der Belastungen verantwortlich, obwohl sie nur etwa 50-60% der Gesamtmasse der jeweiligen Kabelsätze ausmachen. Kupfer ist somit der größte Treiber in allen Wirkungskategorien. Gleichzeitig stellen Emissions- und Energiebedarfswerte für Kupfer in dieser Studie die höchste Unschärfe bei den Umweltauswirkungen der Leitungssätze dar. Für produktspezifische LCA sollten deshalb möglichst Primärdaten zu THG-Emissionen, SO<sub>2</sub>-Emissionen und Primärenergiebedarfen des Kupferlieferanten verwendet werden. Durch die zunehmenden Berichtspflichten zu Nachhaltigkeitskennzahlen von Unternehmen werden entsprechende Daten in Zukunft voraussichtlich einfacher zugänglich sein [Südkupfer 2023].

Fertigung und Transport der Kabelsätze sind in allen Wirkungskategorien nur mit sehr geringen Umweltauswirkungen verbunden. Die Ergebnisse dieser Lebenszyklusphasen sind aufgrund der begrenzten Datenverfügbarkeit jedoch mit hohen Unsicherheiten verbunden. Für zukünftige LCA von Leitungssätzen ist deshalb zu empfehlen, dass detailliertere Primärdaten für die Fertigung von Kabelsätzen sowie für Transporte entlang der Wertschöpfungskette verwendet werden. Ebenso ist eine Berücksichtigung der Nutzungsphase anzustreben, beispielsweise durch Daten zu Reparatur und Austausch von (Teil-)Leitungssätzen.

Im End-of-Life verursachen Schredder-, Sortierungs- und Entsorgungs- bzw. Recyclingprozesse geringe Umweltauswirkungen, welche bei einer Recyclingquote von 90% für Kupferkabel durch eine Gutschrift mehr als ausgeglichen werden. Es ist hervorzuheben, dass die Anrechnung dieser Gutschrift im End-of-Life nur dann möglich ist, wenn die zugrunde liegenden Annahmen tatsächlich zutreffen. Also nur, wenn das Auto mit dem betrachteten Leitungssatz am Ende des Lebenszyklus in Deutschland verbleibt und einer fachgerechten Verwertung zugeführt wird. Sollte ein Konfektionär eine derartige Gutschrift für eine Bilanzierung der Umweltauswirkungen eigener Produkte (bspw. durch ein PCF) beanspruchen wollen, müsste dieser zudem sicherstellen, dass das rezyklierte Kupfer wieder für die Herstellung der eigenen Kabelsätze verwendet wird. Sonst könnte es zu einer mehrfachen Anrechnung von Recycling-Gutschriften kommen, wenn das Sekundärkupfer in einer anderen Industrie zum Einsatz kommt.

Aus der ersten durchgeführten Sensitivitätsanalyse zeigt sich, dass der Einsatz von Sekundärkupfer bei der Kabelherstellung und das Recycling von Kupfer am Ende des Lebenszyklus jeweils mit signifikanten Einsparungen in allen Wirkungskategorien verbunden sind. Es handelt sich demnach um sinnvolle Maßnahmen, um die Umweltbelastung von Kabelsätzen zu reduzieren und Rohstoffe zu sparen. Die zweite

Sensitivitätsanalyse verdeutlicht, dass eine unsachgerechte Verwertung in Form einer offenen Verbrennung der Produkte im EU-Ausland vermieden werden sollte.

Zur weiteren Reduzierung der Umweltauswirkungen im End-of-Life ist eine Verringerung des Aufwands für Recycling- und Entsorgungsprozesse anzustreben. Dies lässt sich beispielsweise durch eine verpflichtende Demontage von Leitungssätzen vor dem Schreddern von Altfahrzeugen erreichen, wie es teilweise bereits gefordert wird [Umweltbundesamt 2020].

Entlang des Lebenszyklus von Kfz bieten sich zusammenfassend mehrere Potentiale zur Einsparung von Emissionen, Energie und Rohstoffbedarfen, die praktisch umsetzbar sind und zur Reduktion der Umweltauswirkungen der Automobilindustrie und des Verkehrssektors beitragen können.



## Literaturverzeichnis

- [Abouljalil & Amrani 2020] Abouljalil, H.; Amrani, M.: Life cycle assessment of manufacturing processes of a cable harness in Morocco. IOSR Journal of Environmental Scienc, Band 13, Ausgabe 11, 2020, S. 19-27. Verfügbar unter <https://www.iosrjournals.org/iosr-jestft/papers/Vol14-Issue11/Series-2/C1411021927.pdf>
- [Abouljalil & Amrani 2022] Abouljalil, H.; Amrani, M.: Life Cycle Assessment: Comparative Analysis of an Electric Wiring Harness Using Different Impact Methods. International Journal of Science and Research (IJSR), Band 11, Ausgabe 1, 2022, S. 923-933. Verfügbar unter <https://www.ijsr.net/archive/v11i1/SR22115183619.pdf>
- [Albis 2024] Albis: Ultramid® A3Z PA66-I . 2024. Verfügbar unter <https://www.albis.com/de/products/download/doc/de/SI/basf/UltramidA3Z.pdf> (zuletzt abgerufen am 12. Dezember 2024)
- [Ardlon 2024] Ardlon: PA66 5% Impact Modified. 2024. Verfügbar unter [https://www.nylon.com.tw/en/Products/pa66\\_impact\\_modified\\_5](https://www.nylon.com.tw/en/Products/pa66_impact_modified_5) (zuletzt abgerufen am 12. Dezember 2024)
- [Autohaus 2022] Autohaus: Neues Netzwerk Catena-X: Autoindustrie will mit Datenaustausch nachhaltiger werden. 20. Juni 2022. Verfügbar unter <https://www.autohaus.de/nachrichten/autohersteller/neues-netzwerk-catena-x-autoindustrie-will-mit-datenaustausch-nachhaltiger-werden-3190928> (zuletzt abgerufen am 19. Dezember 2024)
- [Bayerischer Rundfunk 2023] Bayerischer Rundfunk: Autoschrott in Afrika: Was deutsche Gebrauchtwagen anrichten. 2023. Verfügbar unter <https://www.br.de/nachrichten/deutschland-welt/was-deutsche-gebrauchtwagen-in-afrika-anrichten,T17bFBv> (zuletzt abgerufen am 12. März 2025)
- [Boustead 2005] Boustead, I. im Auftrag von Plastics Europe: Eco-profiles of the European Plastics Industry: POLYBUTADIENE. 2005. Verfügbar unter <https://plasticseurope.org/sustainability/circularity/life-cycle-thinking/eco-profiles-set/> (zuletzt abgerufen am 11. Dezember 2024)
- [Ciroth 2007] Giroth, A: ICT for environment in life cycle applications openLCA — A new open source software for life cycle assessment. The International Journal of Life Cycle Assessment, Band 12(4), 2007, S. 209-210, doi: 10.1065/lca2007.06.337
- [COOP 2024] COOP: Kabelkonfektion. Verfügbar unter <https://www.c-o-o-p.de/de/produkte/kabelkonfektion/> (zuletzt abgerufen am 19. Dezember 2024)
- [Deutsches Kupferinstitut 2019] Deutsches Kupferinstitut: Cu-ETP. 2019. Verfügbar unter <https://kupfer.de/wp-content/uploads/2019/11/Cu-ETP.pdf> (zuletzt abgerufen am 10. Dezember 2024)

- [Dong et al. 2020] Dong, D.; van Oers, L.; Tukker, A.; van der Voet, E.: Assessing the future environmental impacts of copper production in China: Implications of the energy transition. Journal of Cleaner Production, Band 274, 2020, S. 122825, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122825>
- [DP World 2025] DP World: Searates by DP World. Distance & Transit Time Calculator.. 2025. Verfügbar unter <https://www.searates.com/de/distance-time/> (zuletzt abgerufen am 12. März 2025)
- [Entec 2024] Entec: Ethylene Ethyl Acrylate Copolymer (EEA). 2024. Verfügbar unter <https://www.entecpolymers.com/products/resin-types/ethylene-ethyl-acrylate-copolymer-eea> (zuletzt abgerufen am 12. Dezember 2024)
- [EU 2024] EU: Verordnung (EU) 2024/1252 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 11. April 2024 zur Schaffung eines Rahmens zur Gewährleistung einer sicheren und nachhaltigen Versorgung mit kritischen Rohstoffen [...]. 3. Mai 2024. Verfügbar unter [https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=OJ:L\\_202401252](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=OJ:L_202401252)
- [European Copper Institute 2023] European Copper Institute: Copper - The Pathway to Net Zero. 2023. Verfügbar unter [https://internationalcopper.org/wp-content/uploads/2023/03/Copper\\_The-Pathway-to-Net-Zero\\_Focus-on-Europe\\_final.pdf](https://internationalcopper.org/wp-content/uploads/2023/03/Copper_The-Pathway-to-Net-Zero_Focus-on-Europe_final.pdf) (zuletzt abgerufen am 10. Dezember 2024)
- [Frischknecht 2010] Frischknecht, Rolf: LCI Modelling approaches applied on recycling of materials in view of environmental sustainability, risk perception and eco-efficiency. The International Journal of Life Cycle Assessment, Band 15, August 2010, S. 666-671, doi: 10.1007/s11367-010-0201-6
- [International Copper Association 2021] International Copper Association: Copper Environmental Profile. 2021. Verfügbar unter <https://internationalcopper.org/wp-content/uploads/2021/08/ICA-EnvironmentalProfileHESD-201803-FINAL-LOWRES-1.pdf> (zuletzt abgerufen am 10. Dezember 2024)
- [IPCC 2021] IPCC im Auftrag von Intergovernmental Panel on Climate Change: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2391 pp., 2021
- [ISO 14040 : 2006] ISO 14040 :: Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework. Juli 2006, 2006. Verfügbar unter <https://www.iso.org/standard/37456.html>
- [ISO 14044 : 2006] ISO 14044 :: Environmental management – Life cycle assessment – Requirements and guidelines. Juli 2006, 2006. Verfügbar unter <https://www.iso.org/standard/38498.html>
- [Joliet et al. 2016] Joliet, O.; Saadé-Sbeih, M.; Shaked, S.; Jolliet, A.; Crettaz, P.: Environmental Life Cycle Assessment. CRC Press, 2016

- [Kunststoffrohrverband e.V. 2007] Kunststoffrohrverband e.V.: Vernetztes Polyethylen: PE-X. 2007. Verfügbar unter <https://www.krv.de/artikel/vernetztes-polyethylen-pe-x> (zuletzt abgerufen am 12. Dezember 2024)
- [Kupferverband e.V. 2024] Kupferverband e.V.: Gewinnung. 2024. Verfügbar unter <https://kupfer.de/kupferwerkstoffe/kupfer/produktionsprozesse/gewinnung/> (zuletzt abgerufen am 10. Dezember 2024)
- [Lumitos 2024] Lumitos: Flammschutzmittel. 2024. Verfügbar unter <https://www.chemie.de/lexikon/Flammschutzmittel.html> (zuletzt abgerufen am 12. Dezember 2024)
- [Lumitos 2025] Lumitos, : Weichmacher. 2025. Verfügbar unter <https://www.chemie.de/lexikon/Weichmacher.html> (zuletzt abgerufen am 15. Januar 2025)
- [Maga et al. 2024] Maga, D.; Aryan, V.; Beard, A.: Toward Sustainable Fire Safety: Life Cycle Assessment of Phosphinate-Based and Brominated Flame Retardants in E-Mobility and Electronic Devices. ACS Sustainable Chemistry & Engineering , Band 12(9), 2024, S. 3652-3658 , doi: 10.1021/acssuschemeng.3c07096
- [Memaury et al. 2012] Memaury, R.; Giurco, D.; Mudd, G.; Mason, L.: Life cycle assessment: a time-series analysis of copper. Journal of Cleaner Production, Band 33 , 2012, S. 97-108, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.04.025>
- [Netzsch 2024] Netzsch: PVC-P: Polyvinylchloride (with plasticizer). 2024. Verfügbar unter <https://analyzing-testing.netzsch.com/en/polymers-netzsch-com/commodity-thermoplastics/pvc-p-polyvinylchloride-with-plasticizer> (zuletzt abgerufen am 12. Dezember 2024)
- [Northern Engineering Sheffield 2019] Northern Engineering Sheffield: . 2019. Verfügbar unter <https://www.nes-ips.com/mq-vmq-pmq-fvmq-what-does-it-all-mean/> (zuletzt abgerufen am 12. Dezember 2024)
- [OHLF 2024] OHLF: Transformations-Hub Leitungssatz. Verfügbar unter <https://open-hybrid-labfactory.de/forschung-projekte/projekteverbund/trafo-hub-ls> (zuletzt abgerufen am 19. Dezember 2024)
- [Ökobaumat 2023] Ökobaumat: Prozess-Datensatz: Elastomer Fugenbänder, Silikonkautschuk (de). 2023. Verfügbar unter <https://www.oekobaumat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=4ff98099-91cf-44da-8b19-1dcc8b77baa9&version=20.24.070> (zuletzt abgerufen am 12. Dezember 2024)
- [Open Hybrid LabFactory e.V. 2022] Open Hybrid LabFactory e.V. : Transformations-Hub Leitungssatz. 2022. Verfügbar unter <https://open-hybrid-labfactory.de/forschung-projekte/projekteverbund/trafo-hub-ls> (zuletzt abgerufen am 18. Dezember 2024)

- [Redaktionsnetzwerk Deutschland 2022] Redaktionsnetzwerk Deutschland: Recyclen bis zum Kabelbaum: Wie BMW nachhaltiger werden will. 2022. Verfügbar unter <https://www.rnd.de/wirtschaft/bmw-und-die-nachhaltigkeit-wie-der-autobauer-auf-recycling-setzen-will-MQRHHJXZHFUEUMXT55UXD7WIIY4.html> (zuletzt abgerufen am 9. Dezember 2024)
- [Rehau 2021] Rehau: PP ist nicht. 2021. Verfügbar unter <https://www.rehau.com/downloads/1031934/pp-ist-nicht-gleich-pp-whitepaper.pdf> (zuletzt abgerufen am 12. Dezember 2024)
- [Sanjuan-Delmás et al. 2022] Sanjuan-Delmás, D.; Alvarenga, R.A.F.; Lindblom, M.; Kampmann, T.C.; Oers, L.F.C.M. van: Environmental assessment of copper production in Europe: an LCA case study from Sweden conducted using two conventional software-database setups. International Journal Of Life Cycle Assessment, Band 27(2), 2022, S. 255-266, doi: 10.1007/s11367-021-02018-5
- [Sprovieri 2014] Sprovieri, J.: Wire Harness Recycling. 1. Juli 2014. Verfügbar unter <https://www.assemblymag.com/articles/92263-wire-harness-recycling> (zuletzt abgerufen am 19. Dezember 2024)
- [Südkupfer 2023] Südkupfer: Der Kupfermarkt im Wandel. 2023. Verfügbar unter <https://www.suedkupfer.de/der-kupfermarkt-im-wandel/> (zuletzt abgerufen am 17. Januar 2025)
- [TER Chemicals 2024] TER Chemicals: Phosphorsäureester - multifunktional & hochwirksam. 2024. Verfügbar unter [https://www.terchemicals.com/produktdetail/phosphorsaureester?gclid=Cj0KCQiAst2BBhDJARIsAGo2IdVI\\_U9WvRNSTXgrUUawb9\\_hE6Y2tB\\_yDModACgfa5pif\\_Q\\_gaUewpBQaAoVLEALw\\_wcB](https://www.terchemicals.com/produktdetail/phosphorsaureester?gclid=Cj0KCQiAst2BBhDJARIsAGo2IdVI_U9WvRNSTXgrUUawb9_hE6Y2tB_yDModACgfa5pif_Q_gaUewpBQaAoVLEALw_wcB) (zuletzt abgerufen am 19. Dezember 2024)
- [Umweltbundesamt 2020] Umweltbundesamt: Evaluierung und Fortschreibung der Methodik zur Ermittlung der Altfahrzeugverwertungsquoten durch Schredderversuche unter der EG-Altfahrzeugrichtlinie 2000/53/EG. 2020. Verfügbar unter [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2020-01-20\\_texte\\_15-2020\\_altfahrzeugemonitoring.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2020-01-20_texte_15-2020_altfahrzeugemonitoring.pdf) (zuletzt abgerufen am 10. Dezember 2024)
- [Umweltbundesamt 2022] Umweltbundesamt: Altauto fachgerecht entsorgen oder verkaufen. 2022. Verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/umwelttipps-fuer-den-alltag/mobilitaet/altauto-altautoverwertung#was-sie-beim-verkauf-ihres-altautos-beachten-sollten> (zuletzt abgerufen am 9. Dezember 2024)
- [Umweltbundesamt 2024] Umweltbundesamt: Altfahrzeugverwertung und Fahrzeugverbleib. 2024. Verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/daten/ressourcen-abfall/verwertung-entsorgung-ausgewaehlter-abfallarten/altfahrzeugverwertung-fahrzeugverbleib> (zuletzt abgerufen am 9. Dezember 2024)

- [Universiteit Leiden 2016] Universiteit Leiden: CML-IA Characterisation Factors. 2016. Verfügbar unter <https://www.universiteitleiden.nl/en/research/research-output/science/cml-ia-characterisation-factors> (zuletzt abgerufen am 17. Dezember 2024)
- [VDI 2012] VDI: VDI 4600: Cumulative energy demand (KEA) - Terms, definitions, methods of calculation. Energie und Umwelt , 2012
- [Villanueva-Rey et al. 2018] Villanueva-Rey, P; Belo, S.; Quinteiro, P.; Arroja, L.; Dias, A.C.: Wiring in the automobile industry: Life cycle assessment of an innovative cable solution. Journal of Cleaner Production, Band 204, 2018, S. 237-246, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.09.017>
- [Wernet et al. 2016] Wernet, G; Bauer, C.; Steubing, B.; Reinhard, J.: The ecoinvent database version 3 (Part I): Overview and methodology. The International Journal of Life Cycle Assessment, Band 21, Ausgabe 9, September 2016. Verfügbar unter <https://www.researchgate.net/publication/301561039> The ecoinvent database version 3 Part I Overview and methodology (zuletzt abgerufen am 30. Oktober 2024)
- [Xiamen Keyuan Plastic 2024] Xiamen Keyuan Plastic: Mit Talk gefüllte PP Td-20 Talkum-Polypropylen-Kunststoffpartikel. 2024. Verfügbar unter <https://de.ky-plastics.com/polypropyle/talc-filled-pp-td-20-talcum-polypropylene.html> (zuletzt abgerufen am 12. Dezember 2024)

## Anhang

### A. 1. Materialzusammensetzung der Hauptwerkstoffe im BEV-Leitungssatz

Werkstoff	Material 1	Anteil 1	Material 2	Anteil 2	Material 3	Anteil 3
Cu-ETP1	Copper	100%	-	-	-	-
MQ	Silicone rubber	100%	-	-	-	-
PA6-GF30 (FR30)	Polyamide 6	50%	Glass Fiber	30%	Flame Retardant	20%
PET	PET	100%	-	-	-	-
CuPb1P	Copper	99%	Lead	1%	-	-
PUR Flexible Integral Foam	PUR flexible foam	100%	-	-	-	-
PBT GF20	Polybutylene Terephthalate	80%	Glass Fiber	20%	-	-
PVC-P-KD25	Polyvinyl Chloride	75%	Plasticizer	25%	-	-
CuZn37Pb2	Copper	61%	Zinc	37%	Lead	2%
PA66-GF30	Polyamide 66	70%	Glass Fiber	30%	-	-
PES cloth 1	Nonwoven polyester textile	100%	-	-	-	-
PA6-(GF10+GB20)	Polyamide 6	70%	Glass Fiber	10%	Glass Beads	20%
PA6-I-GF15	Polyamide 6	85%	Glass Fiber	15%	-	-
Cu-ETP	Copper	100%	-	-	-	-
65 (Hot rolled carbon steel strips)	Steel 65	100%	-	-	-	-
Pressure sensitive adhesive 3	Polyurethane adhesive	100%	-	-	-	-
PVC-P-KD20	Polyvinyl Chloride	80%	Plasticizer	20%	-	-
PVC-KD20 P	Polyvinyl Chloride	80%	Plasticizer	20%	-	-
PA6-GF15	Polyamide 6	85%	Glass Fiber	15%	-	-
High Copper Alloy	Copper	100%	-	-	-	-
PA66-I GF25 FR(52)	Polyamide 66	55%	Glass Fiber	25%	Flame Retardant	20%
PA66-I	Polyamide 66	100%	-	-	-	-

PA66	Polyamide 66	100%	-	-	-	-
PA66-GF20	Polyamide 66	80%	Glass Fiber	20%	-	-
Cu-PHC	Copper	100%	-	-	-	-

## A. 2. Materialzusammensetzung der Hauptwerkstoffe im Ottomotor-Leitungssatz

Werkstoff	Material 1	Anteil 1	Material 2	Anteil 2	Material 3	Anteil 3
Cu-ETP1	Copper	100%	-	-	-	-
>PA66-I<	Polyamide 66	100%	-	-	-	-
HDPE FR(60)	High density polyethylene	80%	Flame retardant	20%	-	-
PE	Polyethylene	100%	-	-	-	-
PE-HD FR(61)	High density polyethylene	80%	Flame retardant	20%	-	-
PA Cloth	Nonwoven polyester textile	100%	-	-	-	-
PES cloth 1	Nonwoven polyester textile	100%	-	-	-	-
PA66-GF30	Polyamide 66	70%	Glass Fiber	30%	-	-
PE-X-MD40-FR(61)	Polyethylene	40%	Gypsum	40%	Flame retardant	20%
PBT	Polybutylene Terephthalate	100%	-	-	-	-
HDPE FR(61)	High density polyethylene	80%	Flame retardant	20%	-	-
PAK Adhesive	Polyurethane adhesive	100%	-	-	-	-
Pressure sensitive adhesive 3	Polyurethane adhesive	100%	-	-	-	-
PA66 GF30	Polyamide 66	70%	Glass Fiber	30%	-	-
PA46	Polyamide 46	100%	-	-	-	-
PA66-GF50	Polyamide 66	50%	Glass Fiber	50%	-	-
PE-HD-TD5-FR(61)	High density polyethylene	80%	Flame retardant	20%	-	-
CuSn0,15	Copper	99,85%	Tin	0,15%	-	-
PA66-I	Polyamide 66	100%	-	-	-	-
PA6-I-GF15	Polyamide 6	85%	Glass Fiber	15%	-	-
X10CrNi18-8	Chromium steel	100%	-	-	-	-
PBT-GF30	Polybutylene Terephthalate	70%	Glass Fiber	30%	-	-

Copper Nickel	Copper	90%	Nickel	10%	-	-
PE-HD- MD40-FR(61)	High density polyethylene	40%	Gypsum	40%	Flame retardant	20%
PE-LD- X+EEAK-X	Polyethylene	100%	-	-	-	-
CuSn6	Copper	94%	Tin	6%	-	-
PA66	Polyamide 66	100%	-	-	-	-
VMQ	Silicone rubber	100%	-	-	-	-
PET Fabric	Nonwoven polyester textile	100%	-	-	-	-
PA66-GF15	Polyamide 66	85%	Glass Fiber	15%	-	-
Copper Alloy	Copper	100%	-	-	-	-
High Copper Alloy	Copper	100%	-	-	-	-
C75S	Unalloyed steel	100%	-	-	-	-
PVC	Polyvinylchloride	100%	-	-	-	-

### A. 3. Verwendete Datensätze zur detaillierten Modellierung der Hauptwerkstoffe (jeweils 1 kg) im BEV-Leitungssatz

Werkstoff	Material / Verarbeitungsprozess	Menge	Einheit	Ecoinvent-Datensatz
Cu-ETP1	Copper	1	kg	electrorefining of copper, anode   copper, cathode   Cutoff, U - GLO
	Drahtziehen	1	kg	wire drawing, copper   wire drawing, copper   Cutoff, U - RER
MQ	Silicone rubber	1	kg	silicone rubber
	Extrusion	1	kg	extrusion, plastic pipes   extrusion, plastic pipes   Cutoff, U - RER
PA6-GF30 (FR30)	Polyamide 6	0,5	kg	nylon 6 production   nylon 6   Cutoff, U - RER
	Glass Fiber	0,3	kg	glass fibre production   glass fibre   Cutoff, U - RER
	Flame Retardant	0,2	kg	phosphorus production, white, liquid   phosphorus, white, liquid   Cutoff, U - RER
	Spritzguss	1	kg	injection moulding   injection moulding   Cutoff, U - RER
PET	PET	1	kg	polyethylene terephthalate production, granulate, amorphous   polyethylene terephthalate, granulate, amorphous   Cutoff, U - RER
	Extrusion	1	kg	extrusion, plastic pipes   extrusion, plastic pipes   Cutoff, U - RER
CuPb1P	Copper	0,99	kg	electrorefining of copper, anode   copper, cathode   Cutoff, U - GLO
	Lead	0,01	kg	primary lead production from concentrate   lead   Cutoff, U - GLO
PUR Flexible Integral Foam	PUR flexible foam	1	kg	polyurethane production, flexible foam, TDI-based, low density   polyurethane, flexible foam   Cutoff, U - RER
PBT GF20	Polybutylene Terephthalate	0,8	kg	polybutylene terephthalate
	Glass Fiber	0,2	kg	glass fibre production   glass fibre   Cutoff, U - RER
	Spritzguss	1	kg	injection moulding   injection moulding   Cutoff, U - RER
PVC-P-KD25	Polyvinyl Chloride	0,75	kg	polyvinylchloride production, bulk polymerisation   polyvinylchloride, bulk polymerised   Cutoff, U - RER
	Plasticizer	0,25	kg	dioctyl terephthalate production   dioctyl terephthalate   Cutoff, U - GLO
	Extrusion	1	kg	extrusion, plastic pipes   extrusion, plastic pipes   Cutoff, U - RER
CuZn37Pb2	Copper	0,61	kg	electrorefining of copper, anode   copper, cathode   Cutoff, U - GLO
	Zinc	0,37	kg	primary zinc production from concentrate   zinc   Cutoff, U - RoW
	Lead	0,02	kg	primary lead production from concentrate   lead   Cutoff, U - GLO

PA66-GF30	Polyamide 66	0,7	kg	nylon 6-6 production   nylon 6-6   Cutoff, U - RER
	Glass Fiber	0,3	kg	glass fibre production   glass fibre   Cutoff, U - RER
	Spritzguss	1	kg	injection moulding   injection moulding   Cutoff, U - RER
PES cloth 1	Nonwoven polyester textile	1	kg	textile production, nonwoven polyester, needle-punched   textile, nonwoven polyester   Cutoff, U – RoW*
PA6-(GF10+GB20)	Polyamide 6	0,7	kg	nylon 6 production   nylon 6   Cutoff, U - RER
	Glass Fiber	0,1	kg	glass fibre production   glass fibre   Cutoff, U - RER
	Glass Beads	0,2	kg	glass fibre production   glass fibre   Cutoff, U – RER*
	Spritzguss	1	kg	injection moulding   injection moulding   Cutoff, U - RER
PA6-I-GF15	Polyamide 6	0,85	kg	nylon 6 production   nylon 6   Cutoff, U - RER
	Glass Fiber	0,15	kg	glass fibre production   glass fibre   Cutoff, U - RER
	Spritzguss	1	kg	injection moulding   injection moulding   Cutoff, U - RER
Cu-ETP	Copper	1	kg	electrorefining of copper, anode   copper, cathode   Cutoff, U - GLO
	Drahtziehen	1	kg	wire drawing, copper   wire drawing, copper   Cutoff, U - RER
65 (Hot rolled carbon steel strips)	Steel 65	1	kg	steel production, low-alloyed, hot rolled   steel, low-alloyed, hot rolled   Cutoff, U - RER
Pressure sensitive adhesive 3	Polyurethane adhesive	1	kg	polyurethane adhesive production   polyurethane adhesive   Cutoff, U – GLO*
PVC-P-KD20	Polyvinyl Chloride	0,8	kg	polyvinylchloride production, bulk polymerisation   polyvinylchloride, bulk polymerised   Cutoff, U - RER
	Plasticizer	0,2	kg	phosphorus production, white, liquid   phosphorus, white, liquid   Cutoff, U - RER
	Extrusion	1	kg	extrusion, plastic pipes   extrusion, plastic pipes   Cutoff, U - RER
PVC-KD20 P	Polyvinyl Chloride	0,8	kg	polyvinylchloride production, bulk polymerisation   polyvinylchloride, bulk polymerised   Cutoff, U - RER
	Plasticizer	0,2	kg	phosphorus production, white, liquid   phosphorus, white, liquid   Cutoff, U - RER
	Extrusion	1	kg	extrusion, plastic pipes   extrusion, plastic pipes   Cutoff, U - RER
PA6-GF15	Polyamide 6	0,85	kg	nylon 6 production   nylon 6   Cutoff, U - RER
	Glass Fiber	0,15	kg	glass fibre production   glass fibre   Cutoff, U - RER
	Spritzguss	1	kg	injection moulding   injection moulding   Cutoff, U - RER
High Copper Alloy	Copper	1	kg	electrorefining of copper, anode   copper, cathode   Cutoff, U - GLO
PA66-I GF25 FR(52)	Polyamide 66	0,55	kg	nylon 6-6 production   nylon 6-6   Cutoff, U - RER
	Glass Fiber	0,25	kg	glass fibre production   glass fibre   Cutoff, U - RER

	Flame Retardant	0,2	kg	phosphorus production, white, liquid   phosphorus, white, liquid   Cutoff, U - RER
	Spritzguss	1	kg	injection moulding   injection moulding   Cutoff, U - RER
PA66-I	Polyamide 66	1	kg	nylon 6-6 production   nylon 6-6   Cutoff, U - RER
	Extrusion	1	kg	extrusion, plastic pipes   extrusion, plastic pipes   Cutoff, U - RER
PA66	Polyamide 66	1	kg	nylon 6-6 production   nylon 6-6   Cutoff, U - RER
	Extrusion	1	kg	extrusion, plastic pipes   extrusion, plastic pipes   Cutoff, U - RER
PA66-GF20	Polyamide 66	0,8	kg	nylon 6-6 production   nylon 6-6   Cutoff, U - RER
	Glass Fiber	0,2	kg	glass fibre production   glass fibre   Cutoff, U - RER
	Spritzguss	1	kg	injection moulding   injection moulding   Cutoff, U - RER
Cu-PHC	Copper	1	kg	electrorefining of copper, anode   copper, cathode   Cutoff, U - GLO
X5CrNi18-10	Chromium steel	1	kg	steel production, electric, chromium steel 18/8   steel, chromium steel 18/8   Cutoff, U - RER

\*Proxy

#### A. 4. Verwendete Datensätze zur detaillierten Modellierung der Hauptwerkstoffe (jeweils 1 kg) im Ottomotor-Leitungssatz

Werkstoff	Material / Verarbeitungsprozess	Menge	Einheit	Ecoinvent-Datensatz
Cu-ETP1	Copper	1	kg	electrorefining of copper, anode   copper, cathode   Cutoff, U - GLO
	Drahtziehen	1	kg	wire drawing, copper   wire drawing, copper   Cutoff, U - RER
>PA66-I<	Polyamide 66	1	kg	nylon 6-6 production   nylon 6-6   Cutoff, U - RER*
	Extrusion	1	kg	extrusion, plastic pipes   extrusion, plastic pipes   Cutoff, U - RER
HDPE FR(60)	High density polyethylene	0,8	kg	polyethylene production, high density, granulate   polyethylene, high density, granulate   Cutoff, U - RER
	Flame retardant	0,2	kg	phosphorus production, white, liquid   phosphorus, white, liquid   Cutoff, U - RER
	Extrusion	1	kg	extrusion, plastic pipes   extrusion, plastic pipes   Cutoff, U - RER
PE	Polyethylene	1	kg	polyethylene production, low density, granulate   polyethylene, low density, granulate   Cutoff, U - RER
	Extrusion	1	kg	extrusion, plastic pipes   extrusion, plastic pipes   Cutoff, U - RER

PE-HD FR(61)	High density polyethylene	0,8	kg	polyethylene production, high density, granulate   polyethylene, high density, granulate   Cutoff, U - RER
	Flame retardant	0,2	kg	phosphorus production, white, liquid   phosphorus, white, liquid   Cutoff, U - RER
	Extrusion	1	kg	extrusion, plastic pipes   extrusion, plastic pipes   Cutoff, U - RER
PA Cloth	Nonwoven polyester textile	1	kg	textile production, nonwoven polyester, needle-punched   textile, nonwoven polyester   Cutoff, U – RoW*
PES cloth 1	Nonwoven polyester textile	1	kg	textile production, nonwoven polyester, needle-punched   textile, nonwoven polyester   Cutoff, U – RoW*
PA66-GF30	Polyamide 66	0,7	kg	nylon 6-6 production   nylon 6-6   Cutoff, U - RER
	Glass Fiber	0,3	kg	glass fibre production   glass fibre   Cutoff, U - RER
	Spritzguss	1	kg	injection moulding   injection moulding   Cutoff, U - RER
PE-X-MD40-FR(61)	Polyethylene	0,4	kg	polyethylene production, low density, granulate   polyethylene, low density, granulate   Cutoff, U – RER*
	Gypsum	0,4	kg	gypsum quarry operation   gypsum, mineral   Cutoff, U - CH
	Flame retardant	0,2	kg	phosphorus production, white, liquid   phosphorus, white, liquid   Cutoff, U - RER
	Spritzguss	1	kg	injection moulding   injection moulding   Cutoff, U - RER
PBT	Polybutylene Terephthalate	1	kg	polybutylene terephthalate
	Extrusion	1	kg	extrusion, plastic pipes   extrusion, plastic pipes   Cutoff, U - RER
HDPE FR(61)	High density polyethylene	0,8	kg	polyethylene production, high density, granulate   polyethylene, high density, granulate   Cutoff, U - RER
	Flame retardant	0,2	kg	phosphorus production, white, liquid   phosphorus, white, liquid   Cutoff, U - RER
	Extrusion	1	kg	extrusion, plastic pipes   extrusion, plastic pipes   Cutoff, U - RER
PAK Adhesive	Polyurethane adhesive	1	kg	polyurethane adhesive production   polyurethane adhesive   Cutoff, U – GLO*
	Extrusion	1	kg	extrusion, plastic pipes   extrusion, plastic pipes   Cutoff, U - RER
Pressure sensitive adhesive 3	Polyurethane adhesive	1	kg	polyurethane adhesive production   polyurethane adhesive   Cutoff, U – GLO*
PA66 GF30	Polyamide 66	0,7	kg	nylon 6-6 production   nylon 6-6   Cutoff, U - RER
	Glass Fiber	0,3	kg	glass fibre production   glass fibre   Cutoff, U - RER
	Spritzguss	1	kg	injection moulding   injection moulding   Cutoff, U - RER
PA46	Polyamide 46	1	kg	nylon 6-6 production   nylon 6-6   Cutoff, U – RER*

	Extrusion	1	kg	extrusion, plastic pipes   extrusion, plastic pipes   Cutoff, U - RER
PA66-GF50	Polyamide 66	0,5	kg	nylon 6-6 production   nylon 6-6   Cutoff, U - RER
	Glass Fiber	0,5	kg	glass fibre production   glass fibre   Cutoff, U - RER
	Spritzguss	1	kg	injection moulding   injection moulding   Cutoff, U - RER
PE-HD-TD5-FR(61)	High density polyethylene	0,8	kg	polyethylene production, high density, granulate   polyethylene, high density, granulate   Cutoff, U - RER
	Flame retardant	0,2	kg	phosphorus production, white, liquid   phosphorus, white, liquid   Cutoff, U - RER
	Spritzguss	1	kg	injection moulding   injection moulding   Cutoff, U - RER
CuSn0,15	Copper	0,9985	kg	electrorefining of copper, anode   copper, cathode   Cutoff, U - GLO
	Tin	0,0015	kg	tin production   tin   Cutoff, U - RoW
PA66-I	Polyamide 66	1	kg	nylon 6-6 production   nylon 6-6   Cutoff, U - RER
	Extrusion	1	kg	extrusion, plastic pipes   extrusion, plastic pipes   Cutoff, U - RER
PA6-I-GF15	Polyamide 6	0,85	kg	nylon 6 production   nylon 6   Cutoff, U - RER
	Glass Fiber	0,15	kg	glass fibre production   glass fibre   Cutoff, U - RER
	Spritzguss	1	kg	injection moulding   injection moulding   Cutoff, U - RER
X10CrNi18-8	Chromium steel	1	kg	steel production, electric, chromium steel 18/8   steel, chromium steel 18/8   Cutoff, U - RER
PBT-GF30	Polybutylene Terephthalate	0,7	kg	polybutylene terephthalate**
	Glass Fiber	0,3	kg	glass fibre production   glass fibre   Cutoff, U - RER
	Spritzguss	1	kg	injection moulding   injection moulding   Cutoff, U - RER
Copper Nickel	Copper	0,9	kg	electrorefining of copper, anode   copper, cathode   Cutoff, U - GLO
	Nickel	0,1	kg	smelting and refining of nickel concentrate, 16% Ni   nickel, class 1   Cutoff, U - GLO
PE-HD-MD40-FR(61)	High density polyethylene	0,4	kg	polyethylene production, high density, granulate   polyethylene, high density, granulate   Cutoff, U - RER
	Gypsum	0,4	kg	gypsum quarry operation   gypsum, mineral   Cutoff, U - CH
	Flame retardant	0,2	kg	phosphorus production, white, liquid   phosphorus, white, liquid   Cutoff, U - RER
	Spritzguss	1	kg	injection moulding   injection moulding   Cutoff, U - RER
PE-LD-X+EEAK-X	Polyethylene	1	kg	polyethylene production, low density, granulate   polyethylene, low density, granulate   Cutoff, U - RER*
	Extrusion	1	kg	extrusion, plastic pipes   extrusion, plastic pipes   Cutoff, U - RER

CuSn6	Copper	0,94	kg	electrorefining of copper, anode   copper, cathode   Cutoff, U - GLO
	Tin	0,06	kg	tin production   tin   Cutoff, U - RoW
PA66	Polyamide 66	1	kg	nylon 6-6 production   nylon 6-6   Cutoff, U - RER
	Extrusion	1	kg	extrusion, plastic pipes   extrusion, plastic pipes   Cutoff, U - RER
VMQ	Silicone rubber	1	kg	silicone rubber**
	Extrusion	1	kg	extrusion, plastic pipes   extrusion, plastic pipes   Cutoff, U - RER
PET Fabric	Nonwoven polyester textile	1	kg	textile production, nonwoven polyester, needle-punched   textile, nonwoven polyester   Cutoff, U – RoW*
PA66-GF15	Polyamide 66	0,85	kg	nylon 6-6 production   nylon 6-6   Cutoff, U - RER
	Glass Fiber	0,15	kg	glass fibre production   glass fibre   Cutoff, U - RER
	Spritzguss	1	kg	injection moulding   injection moulding   Cutoff, U - RER
Copper Alloy	Copper	1	kg	electrorefining of copper, anode   copper, cathode   Cutoff, U - GLO
High Copper Alloy	Copper	1	kg	electrorefining of copper, anode   copper, cathode   Cutoff, U - GLO
C75S	Unalloyed steel	1	kg	steel production, converter, unalloyed   steel, unalloyed   Cutoff, U - RER
PVC	Polyvinylchloride	1	kg	polyvinylchloride production, bulk polymerisation   polyvinylchloride, bulk polymerised   Cutoff, U - RER
	Extrusion	1	kg	extrusion, plastic pipes   extrusion, plastic pipes   Cutoff, U - RER

\*Proxy

\*\* Modelliert nach [Ökobaudat 2023] und [Boustead 2005]

### A. 5. Verwendete Datensätze zur Modellierung von Silikonkautschuk und PBT (jeweils 1 kg)

Werkstoff	Wirkungskategorie	Menge	Einheit	Ecoinvent-Datensatz
silicone rubber	Erneuerbare Primärenergie	69,01	MJ	Energy, gross calorific value, in biomass
	Nicht-erneuerbare Primärenergie	111,3	MJ	Energy, gross calorific value, in biomass, primary forest
	Treibhausgas-potential	8,263	kg	Carbon dioxide, fossil
	Versauerungs-potential	0,014	kg	Sulfur dioxide
polybutylene terephthalate	Erneuerbare Primärenergie	0,31	MJ	Energy, gross calorific value, in biomass
	Nicht-erneuerbare Primärenergie	102,05	MJ	Energy, gross calorific value, in biomass, primary forest

Treibhausgas-potential	3,9	kg	Carbon dioxide, fossil
Versauerungs-potential (nur Ammoniak)	0,000001	kg	Ammonia
Versauerungs-potential (nur Stickoxide)	0,077	kg	Nitrogen oxides
Versauerungs-potential (nur Schwefeloxide)	0,013	kg	Sulfur dioxide
Versauerungs-potential (nur Schwefelsäure)	0,000001	kg	Sulfuric acid

### A. 6. Verwendete Datensätze zur generischen Modellierung von Werkstoffgruppen im BEV-Leitungssatz

Werkstoffgruppe	Material / Verarbeitungsprozess	Menge	Einheit	Ecoinvent-Datensatz
Elastomere / elastomere Verbunde	synthetic rubber	1	kg	synthetic rubber production   synthetic rubber   Cutoff, U - RER
	extrusion, plastic pipes	1	kg	extrusion, plastic pipes   extrusion, plastic pipes   Cutoff, U - RER
gefüllte Thermoplaste	glass fibre reinforced plastic, polyamide, injection moulded	1	kg	glass fibre reinforced plastic production, polyamide, injection moulded   glass fibre reinforced plastic, polyamide, injection moulded   Cutoff, U - RER
	injection moulding	1	kg	injection moulding   injection moulding   Cutoff, U - RER
ungefüllte Thermoplaste	polyethylene, high density, granulate	1	kg	polyethylene production, high density, granulate   polyethylene, high density, granulate   Cutoff, U - RER
	extrusion, plastic pipes	1	kg	extrusion, plastic pipes   extrusion, plastic pipes   Cutoff, U - RER
Kupferlegierungen	copper, cathode	1	kg	electrorefining of copper, anode   copper, cathode   Cutoff, U - GLO
Stahl	steel, low-alloyed, hot rolled	1	kg	steel production, low-alloyed, hot rolled   steel, low-alloyed, hot rolled   Cutoff, U - RER
Schaumstoffe	polyurethane, flexible foam, flame retardant	1	kg	polyurethane production, flexible foam, TDI-based, flame retardant   polyurethane, flexible foam, flame retardant   Cutoff, U - RER
Textilien	cellulose fibre	1	kg	cellulose fibre production   cellulose fibre   Cutoff, U - CH
Kleber, Dichtstoffe	polyurethane adhesive	1	kg	polyurethane adhesive production   polyurethane adhesive   Cutoff, U - GLO
Zink und Zinklegierungen	zinc	1	kg	primary zinc production from concentrate   zinc   Cutoff, U - RoW

Aluminium und Aluminium-legierungen	aluminium, primary, ingot	1	kg	aluminium production, primary, ingot   aluminium, primary, ingot   Cutoff, U - IAI Area, EU27 & EFTA
Halbleiter / Elektronik	electronic component, passive, unspecified	1	kg	electronic component production, passive, unspecified   electronic component, passive, unspecified   Cutoff, U - GLO
Zinn und Zinnlegierungen	tin	1	kg	tin production   tin   Cutoff, U - RoW
Silber und Silberlegierungen	silver	1	kg	silver-gold mine operation with refinery   silver   Cutoff, U - RoW
Nickel und Nickellegierungen	nickel, class 1	1	kg	smelting and refining of nickel concentrate, 16% Ni   nickel, class 1   Cutoff, U - GLO
Lacke	acrylic varnish, with water, in 53% solution state	1	kg	acrylic varnish production, with water, in 53% solution state   acrylic varnish, with water, in 53% solution state   Cutoff, U - RER
Unspezifische Beschichtungen	coating powder	1	kg	coating powder production   coating powder   Cutoff, U - RER
Druckfarben / Tinten	printing ink, rotogravure, without solvent, in 55% toluene solution state	1	kg	printing ink production, rotogravure, product in 55% toluene solution state   printing ink, rotogravure, without solvent, in 55% toluene solution state   Cutoff, U - RER
Gold	gold	1	kg	gold mine operation and refining   gold   Cutoff, U - SE
Siliziummetall	silicon, electronics grade	1	kg	silicon production, electronics grade   silicon, electronics grade   Cutoff, U - DE
Gläser	flat glass, uncoated	1	kg	flat glass production, uncoated   flat glass, uncoated   Cutoff, U - RER
Platin	platinum	1	kg	platinum group metal mine operation, ore with high palladium content   platinum   Cutoff, U - RU

### A. 7. Verwendete Datensätze zur generischen Modellierung von Werkstoffgruppen im Ottomotor-Leitungssatz

Werkstoffgruppe	Material / Verarbeitungsprozess	Menge	Einheit	Ecoinvent-Datensatz
ungefüllte Thermoplaste	polyethylene, high density, granulate	1	kg	polyethylene production, high density, granulate   polyethylene, high density, granulate   Cutoff, U - RER
	extrusion, plastic pipes	1	kg	extrusion, plastic pipes   extrusion, plastic pipes   Cutoff, U - RER
gefüllte Thermoplaste	glass fibre reinforced plastic, polyamide, injection moulded	1	kg	glass fibre reinforced plastic production, polyamide, injection moulded   glass fibre reinforced plastic, polyamide, injection moulded   Cutoff, U - RER
	injection moulding	1	kg	injection moulding   injection moulding   Cutoff, U - RER
Textilien	cellulose fibre	1	kg	cellulose fibre production   cellulose fibre   Cutoff, U - CH
Kleber, Dichtstoffe	polyurethane adhesive	1	kg	polyurethane adhesive production   polyurethane adhesive   Cutoff, U - GLO

Kupferlegierungen	copper, cathode	1	kg	electrorefining of copper, anode   copper, cathode   Cutoff, U - GLO
Elastomere / elastomere Verbunde	synthetic rubber	1	kg	synthetic rubber production   synthetic rubber   Cutoff, U - RER
	extrusion, plastic pipes	1	kg	extrusion, plastic pipes   extrusion, plastic pipes   Cutoff, U - RER
Stahl	steel, low-alloyed, hot rolled	1	kg	steel production, low-alloyed, hot rolled   steel, low-alloyed, hot rolled   Cutoff, U - RER
Gläser	flat glass, uncoated	1	kg	flat glass production, uncoated   flat glass, uncoated   Cutoff, U - RER
Zinn und Zinnlegierungen	tin	1	kg	tin production   tin   Cutoff, U - RoW
Zink und Zinklegierungen	zinc	1	kg	primary zinc production from concentrate   zinc   Cutoff, U - RoW
Nickel und Nickellegierungen	nickel, class 1	1	kg	smelting and refining of nickel concentrate, 16% Ni   nickel, class 1   Cutoff, U - GLO
Silber und Silberlegierungen	silver	1	kg	silver-gold mine operation with refinery   silver   Cutoff, U - RoW
Lacke	acrylic varnish, with water, in 53% solution state	1	kg	acrylic varnish production, with water, in 53% solution state   acrylic varnish, with water, in 53% solution state   Cutoff, U - RER
Gold	gold	1	kg	gold mine operation and refining   gold   Cutoff, U - SE
Druckfarben / Tinten	printing ink, rotogravure, without solvent, in 55% toluene solution state	1	kg	printing ink production, rotogravure, product in 55% toluene solution state   printing ink, rotogravure, without solvent, in 55% toluene solution state   Cutoff, U - RER

### A. 8. Verwendete Datensätze zur Modellierung des Transports der Werkstoffe zur Fertigung des BEV-Leitungssatzes

Transportmodus	Menge	Einheit	Ecoinvent-Datensatz
Zugtransport Europa	0,259	t*km	market group for transport, freight train   transport, freight train   Cutoff, U - RER
Schiffstransport Europa	0,130	t*km	market for transport, freight, inland waterways, barge   transport, freight, inland waterways, barge   Cutoff, U - RER
Straßentransport Europa	1,013	t*km	market for transport, freight, lorry, unspecified   transport, freight, lorry, unspecified   Cutoff, U - RER

### A. 9. Verwendete Datensätze zur Modellierung des Transports der Werkstoffe zur Fertigung des Ottomotor-Leitungssatzes

Transportmodus	Menge	Einheit	Ecoinvent-Datensatz
Zugtransport Europa	0,090	t*km	market group for transport, freight train   transport, freight train   Cutoff, U - RER

Schiffstransport Europa	0,045	t*km	market for transport, freight, inland waterways, barge   transport, freight, inland waterways, barge   Cutoff, U - RER
Straßentransport Europa	0,351	t*km	market for transport, freight, lorry, unspecified   transport, freight, lorry, unspecified   Cutoff, U – RER

## A. 10. Verwendete Datensätze zur Modellierung der Fertigung des BEV-Leitungssatzes

Strommix	Menge	Einheit	Ecoinvent-Datensatz
Strommix Deutschland	3.731	kWh	market for electricity, medium voltage   electricity, medium voltage   Cutoff, U - DE

## A. 11. Verwendete Datensätze zur Modellierung der Fertigung des Ottomotor-Leitungssatzes

Strommix	Menge	Einheit	Ecoinvent-Datensatz
Strommix Deutschland	3.612	kWh	market for electricity, medium voltage   electricity, medium voltage   Cutoff, U - DE

## A. 12. Verwendete Datensätze zur Modellierung des Transports des BEV-Leitungssatzes zur Installation

Transportmodus	Menge	Einheit	Ecoinvent-Datensatz
Straßentransport Europa	6,197	t*km	market for transport, freight, lorry, unspecified   transport, freight, lorry, unspecified   Cutoff, U - RER

## A. 13. Verwendete Datensätze zur Modellierung des Transports des Ottomotor-Leitungssatzes zur Installation

Transportmodus	Menge	Einheit	Ecoinvent-Datensatz
Straßentransport	5,454	t*km	market for transport, freight, lorry, unspecified   transport, freight, lorry, unspecified   Cutoff, U - RER

## A. 14. Verwendete Datensätze zur Modellierung des Transports des BEV-Leitungssatzes zum End-of-Life

Transportmodus	Menge	Einheit	Ecoinvent-Datensatz
Straßentransport	0,456	t*km	market for transport, freight, lorry, unspecified   transport, freight, lorry, unspecified   Cutoff, U - RER

## A. 15. Verwendete Datensätze zur Modellierung des Transports des Ottomotor-Leitungssatzes zum End-of-Life

Transportmodus	Menge	Einheit	Ecoinvent-Datensatz
Straßentransport	0,158	t*km	market for transport, freight, lorry, unspecified   transport, freight, lorry, unspecified   Cutoff, U - RER

## A. 16. Verwendete Datensätze zur Modellierung der angenommenen Entsorgungsprozesse (jeweils für 1 kg Material)

Werkstoffgruppe	Entsorgtes Material	Menge	Einheit	Ecoinvent-Datensatz
Schreddern von Leitungssatz	waste electric and electronic equipment	1	kg	treatment of waste electric and electronic equipment, shredding   waste electric and electronic equipment   Cutoff, U - GLO
Sortieren von Schredderfraktionen	iron scrap, sorted, pressed	1	kg	treatment of metal scrap, mixed, for recycling, unsorted, sorting   iron scrap, sorted, pressed   Cutoff, U - Europe without Switzerland
EoL von Kupferkabeln	scrap copper	0,1	kg	treatment of scrap copper, municipal incineration   scrap copper   Cutoff, U - Europe without Switzerland
	copper, cathode	0,9	kg	treatment of copper scrap by electrolytic refining   copper, cathode   Cutoff, U - RER
	copper, cathode	-0,9	kg	electrorefining of copper, anode   copper, cathode   Cutoff, U - GLO
EoL von Elastomeren / elastomeren Verbunden	waste rubber, unspecified	1	kg	treatment of waste rubber, unspecified, municipal incineration   waste rubber, unspecified   Cutoff, U - Europe without Switzerland
EoL von gefüllten Thermoplasten	waste wire plastic	1	kg	treatment of waste wire plastic, municipal incineration FAE   waste wire plastic   Cutoff, U - CH
EoL von ungefüllten Thermoplasten	waste polyethylene	1	kg	treatment of waste polyethylene, municipal incineration FAE   waste polyethylene   Cutoff, U - CH
EoL von Kupferlegierungen	scrap copper	1	kg	treatment of scrap copper, municipal incineration   scrap copper   Cutoff, U - Europe without Switzerland
EoL von Stahl	steel in car shredder residue	1	kg	treatment of steel in car shredder residue, municipal incineration FAE   steel in car shredder residue   Cutoff, U - CH
EoL von Schaumstoffen	waste polyurethane foam	1	kg	treatment of waste polyurethane foam, collection for final disposal   waste polyurethane foam   Cutoff, U - CH
EoL von Textilien	waste textile, soiled	1	kg	treatment of waste textile, soiled, municipal incineration FAE   waste textile, soiled   Cutoff, U - CH

EoL von Kleber, Dichtstoffen	waste polyurethane	1	kg	treatment of zinc in car shredder residue, municipal incineration FAE   zinc in car shredder residue   Cutoff, U - CH
EoL von Zink und Zinklegierungen	zinc in car shredder residue	1	kg	treatment of zinc in car shredder residue, municipal incineration FAE   zinc in car shredder residue   Cutoff, U - CH
EoL von Aluminium und Aluminiumlegierungen	aluminium in car shredder residue	1	kg	treatment of aluminium in car shredder residue, municipal incineration FAE   aluminium in car shredder residue   Cutoff, U - CH
EoL von Halbleitern / Elektronik	electronics scrap from control units	1	kg	treatment of electronics scrap from control units   electronics scrap from control units   Cutoff, U - RER
EoL von Zinn und Zinnlegierungen	scrap tin sheet	1	kg	treatment of scrap tin sheet, municipal incineration FAE   scrap tin sheet   Cutoff, U - CH
EoL von Silber und Silberlegierungen	silver	1	kg	treatment of precious metal from electronics scrap, in anode slime, precious metal extraction   silver   Cutoff, U - SE
EoL von Nickel und Nickellegierungen	nickel, class 1	1	kg	treatment of metal part of electronics scrap, in copper, anode, by electrolytic refining   nickel, class 1   Cutoff, U - SE
EoL von Lacken	waste paint	1	kg	treatment of waste paint, municipal incineration   waste paint   Cutoff, U - Europe without Switzerland
EoL von unspezifischen Beschichtungen	coating from waste cathode ray tube display	1	kg	treatment of coating from waste cathode ray tube display, municipal incineration FAE   coating from waste cathode ray tube display   Cutoff, U
EoL von Druckfarben / Tinten	waste paint	1	kg	treatment of waste paint, municipal incineration   waste paint   Cutoff, U - Europe without Switzerland
EoL von Gold	precious metal from electronics scrap, in anode slime	1	kg	treatment of metal part of electronics scrap, in copper, anode, by electrolytic refining   precious metal from electronics scrap, in anode slime   Cutoff, U - SE
EoL von Siliziummetall	electronics scrap from control units	1	kg	treatment of electronics scrap from control units   electronics scrap from control units   Cutoff, U - RER
EoL von Gläsern	waste glass	1	kg	treatment of waste glass, municipal incineration FAE   waste glass   Cutoff, U - CH
EoL von Platin	precious metal from electronics scrap, in anode slime	1	kg	treatment of metal part of electronics scrap, in copper, anode, by electrolytic refining   precious metal from electronics scrap, in anode slime   Cutoff, U - SE



Ludwig Bolkow Systemtechnik

LUDWIG-BÖLKOW-SYSTEMTECHNIK GMBH (LBST)  
DAIMLERSTR. 15 | 85521 OTTOBRUNN | GERMANY  
WWW.LBST.DE



## 1 Überprüfungsumfang und Zielsetzung

Die TÜV SÜD Energietechnik GmbH Baden-Württemberg wurde von Open Hybrid LabFactory (OHLF) e.V. beauftragt, eine unabhängige Kritische Prüfung gemäß ISO 14071:2024 durchzuführen.

### Beschreibung des Überprüfungsprozesses:

- Die Überprüfung wurde gemäß ISO 14044 6.2 durchgeführt;
- Die Überprüfung wurde am Ende der Studie durchgeführt;
- Die Überprüfung umfasste eine Bewertung des LCI- und LCIA-Modells und der Berechnung;
- Die Überprüfung umfasste eine Analyse einzelner Datensätze;
- Die Kommentare der Prüfer wurden durch einen kritischen Überprüfungsbericht bereitgestellt und diskutiert. Die Umsetzung wurde vom Prüfer gründlich überprüft.

## 2 Details zum Umfang der kritischen Überprüfung

### 2.1 Bewertete Produkte

Die LCA-Ergebnisse wurden für die funktionale Einheit der genannten Produkte berechnet.

Der entsprechende Referenzfluss ist: ein (Teil)-Leitungssatz eines Pkw

### 2.2 Einrichtungen, physische Infrastruktur, Aktivitäten, Technologien und Prozesse

Die Lebenszyklusanalyse umfasst die Produktion der Rohmaterialien, deren Verarbeitung und Transport zum Hersteller des Kfz-Leitungssatzes, den Transport zum Fahrzeughersteller sowie Entsorgung und Recycling. Die Nutzung im Kfz wird nicht betrachtet. Es handelt sich um eine Cradle-to-cradle-Analyse, bei der über den Lebenszyklus eines Produkts hinaus eine Gutschrift durch das Recycling modelliert wird. Im Vergleich dazu würde eine Cradle-to-gate-Analyse nur die Umweltauswirkungen bis zum Ende der Produktfertigung betrachten und eine Cradle-to-grave-Analyse bis zum End-of-Life ohne Berücksichtigung einer Gutschrift durch das Recycling. Da keine Daten zu den Umweltauswirkungen während der Nutzung vorliegen, wird diese Phase nicht aufgeführt.

Der größte Anteil der Emissionen stammt von der Produktion von Metallen (Kupferkabel und Kupferlegierungen) und Kunststoffe (ungefüllte Thermoplaste und gefüllte Thermoplaste sowie Elastomere).

### 2.3 Wirkungskategorien

- Klimawandel: GWP100 (IPCC 2021)
- Versauerung: CML v.4.8 2016
- Kumulierter Energieaufwand: VDI 2012
- Ressourcenverbrauch: Verordnung (EU) 2024/1252 [EU 2024].

### 2.4 Angewandte Standards und zusätzliche Anforderungen

Die LCA-Studie wurde gemäß ISO 14040:2006+Amd 1:2020, ISO 14044:2006+Amd 1:2017+Amd 2:2020 durchgeführt.



### **3 Einschränkungen**

Geringe Unschärfen bei der Modellierung der Werkstoffherstellung ergeben sich durch die Aggregation aller Werkstoffe zu Werkstoffgruppen, die nicht als Hauptwerkstoffe definiert sind. Weitere geringfügige Unsicherheiten ergeben sich bei der Modellierung von Materialzusammensetzungen für das Mapping, welche auf Literaturrecherchen beruht. Unschärfen durch generische Sekundärdaten haben einen höheren Einfluss auf die Berechnungsergebnisse. Die Annahme einer Recyclingquote von 90% für Kupferkabel hat signifikante Auswirkungen auf die Wirkungsabschätzung.

### **4 Fazit**

Basierend auf dem kritischen Überprüfungsbericht kommt der Prüfer der TÜV SÜD Energietechnik GmbH Baden-Württemberg zu dem Schluss, dass die Studie den Anforderungen der ISO 14040 und ISO 14044 entspricht. Der kritische Prüfer bewertete die Gesamtqualität des Berichts als hoch, seine Methoden als wissenschaftlich und technisch gültig und die verwendeten Daten als angemessen und vernünftig. Der Studienbericht ist transparent und konsistent, und die Interpretation der Ergebnisse spiegelt das Ziel und die identifizierten Einschränkungen der Studie wider.

### **5 Unabhängigkeit**

Der Auftraggeber ist verantwortlich für die Sammlung und faire Darstellung der präsentierten Informationen. Der Prüfer der TÜV SÜD Energietechnik GmbH Baden-Württemberg ist nicht an der Herstellung von Produkten, der Berechnung potenzieller Umweltauswirkungen und der Erstellung von LCA-Ansprüchen beteiligt. Die Überprüfungsaktivitäten sind unabhängig vom Auftraggeber und dem Praktiker.

Critical Review Life Cycle Assessment according to DIN-EN-ISO-14040 and 14044



Dokumentation der Auditfeststellungen					
Unternehmen		Open-Hybrid LabFactory e.V.			
		38440 Wolfsburg			
		0			
Datum des Audits		27.02.2025 bis 27.02.2025			
Auditgrundlage / Standard		DIN EN ISO 14040 DIN EN ISO 14044 ISO 14071			
Leitende/r Prüfer/in		Espinosa			
weitere Prüfer/innen		Engelhardt			
Nr.	Auditergebnis / Feststellung / nachzureichende Unterlagen (Befund vom Reviewer und Handlungsempfehlung)	Datum	Einordnung	Geplante / durchgeführte Korrekturmaßnahme (vom Kunden auszufüllen) --> Antwort vom LCA Auftraggeber/Ersteller	Beurteilung der durchgeführten Maßnahmen durch TÜV SÜD (Erfüllung und Wirksamkeit)
1	Auftraggeber und Ersteller müssen deutlich bei der Einleitung erwähnt werden, nicht nur in dem Disclaimer.	05.05.2025	M	Abschnitt 1: Die vorliegende Studie stellt eine Lebenszyklusanalyse (LCA) für automobiler Leitungssätze dar, welche von der Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH (LBST) im Auftrag von OHLF erstellt worden ist.	<b>Befund abgeschlossen:</b> In Kapitel 1 Einleitung, Seite 11 aufgenommen
2	Zielgruppe im Abs. 2.1 bitte genauer beschreiben. Sind es nationale (in Deutschland) oder globale Produzenten die Anwender der Ergebnisse?	05.05.2025	M	Abschnitt 2.1: Die Zielgruppe sind hierbei deutsche Unternehmen aus der Leitungssatz-Industrie (Automobilhersteller, Zulieferer der Automobilbranche, Leitungssatzkonfektionierer, Material- und Komponentenproduzenten der Branche).	<b>Befund abgeschlossen:</b> In Kapitel 2.1 Untersuchungsziel, Seite 12 aufgenommen
3	Eine Abbildung /Foto/Scheme im Abschn. 2.2.1 mit der Darstellung von beiden Produkten wäre sehr hilfreich für die Verständlichkeit der Referenzprodukte.	05.05.2025	M	Abschnitt 2.2.1: Abbildungen 1 & 2	<b>Befund abgeschlossen:</b> In Kapitel 2.2. 1 Produktsysteme und Funktionen, Seite 13 aufgenommen
4	Die funktionelle Einheit in Kapitel 2.2.2 ist nicht richtig beschrieben. Vor allem fehlen Informationen die die "use phase" betreffen. Es fehlen Angaben zu Lebensdauer, Qualitätsmerkmale, Leistung, die von den Produkten zu erbringen ist (was sind typische, messbare Leistungsmerkmale von KFZ-Bäume?). Auch zum Thema "use phase", fehlen Angaben über mögliche Instandhaltung Maßnahmen, die während dieser Phase nötig wären, um die Leistung so zu erbringen die in der funktionalen Einheit definiert. Fehlt diese Information, kann die Studie nicht die use phase richtig repräsentieren und das müsste deutlich im Bericht stehen als Einschränkung, bzw. als Auslassung vom Lebenswegabschnitt.	05.05.2025	NC	Abschnitt 2.2.2: Da es sich bei den beiden betrachteten Produkten jeweils um Teilleitungssätze und nicht um die vollständigen Steck- und Kabelverbindungen eines Kfz handelt, lässt sich ihre Funktion nicht genau quantifizieren (z.B. in gefahrenen Kilometern eines Pkw). Zu Qualitäts- bzw. Leistungsunterschieden der Produkte liegen keine Informationen vor. Eine Wartung oder ein Austausch von Kabelbäumen findet während der Nutzung von Fahrzeugen nur in Ausnahmefällen statt, weshalb angenommen wird, dass nur jeweils ein Leitungssatz während der Lebensdauer eines Kfz zum Einsatz kommt. Entsprechend wird der Referenzfluss „ein (Teil)-Leitungssatz eines Pkw“ als funktionelle Einheit definiert. Dies ermöglicht die Durchführung der LCA für beide betrachteten Produkte, wenngleich diese nicht direkt miteinander vergleichbar sind. Eine Betrachtung der Nutzungsphase ist ausgeschlossen.  Abschnitt 2.2.3: Zu Umweltauswirkungen des verbauten Leitungssatzes im Kfz während der Nutzung liegen keine Daten vor, weshalb diese Lebenszyklusphase im Folgenden <b>nicht</b> aufgeführt wird.	<b>Befund abgeschlossen:</b> Begründet und angenommen in Kapitel 2.2.2, Seite 14. Begründet als Annahme, nicht als Einschränkung

Nr.	Auditergebnis / Feststellung / nachzureichende Unterlagen (Befund vom Reviewer und Handlungsempfehlung)	Datum	Einordnung	Geplante / durchgeführte Korrekturmaßnahme (vom Kunden auszufüllen) --> Antwort vom LCA Auftraggeber/Ersteller	Beurteilung der durchgeführten Maßnahmen durch TÜV SÜD (Erfüllung und Wirksamkeit)
5	<p>Um den Untersuchungsrahmen der Studie vollständig zu beschreiben, ergänzen Sie bitte den Bericht in Kapitel. 2 mit folgenden Informationen:</p> <p>-Warum wurden die 4 Wirkungskategorien ausgewählt und nicht andere? welche Übereinstimmung mit dem Ziel der Studie haben diese 4 Wirkungskategorien? (bitte wie beim Audit erklärt, noch im Bericht ergänzen)</p> <p>-Angaben über die Wirkungsabschätzungsmethoden für Ressourcenverbrauch fehlen (Erwähnung der "Impact assessment method")</p>	05.05.2025	M	<p>Abschnitt 2: Für die Auswahl der Kategorien liegen vor dem Hintergrund der Zielsetzung und der Zielgruppe (siehe Abschnitt 2.1) drei Gründe vor. Erstens ist das Treibhausgaspotential von Produkten für die Treibhausgasminderungsziele Deutschlands und Europas sowie für entsprechende Berichtspflichten von Unternehmen von hoher Relevanz. Zweitens wird für die betrachteten Produkte, welche jeweils einen hohen Anteil an Kupfer enthalten, im Vergleich zu anderen Umweltauswirkungen eine besonders hohe Versauerungswirkung erwartet. Drittens ermöglicht eine Analyse des Primärenergie- und Ressourcenbedarfs ein besseres Verständnis der Produktzusammensetzung und Prozessketten. Dadurch wird auch eine Identifikation von Ineffizienzen und Risiken entlang der Wertschöpfungskette ermöglicht, wie z.B. dem Einsatz von kritischen und strategischen Rohstoffen nach Verordnung (EU) 2024/1252 [EU 2024].</p> <p>Abschnitt 2.2.5: Für den Ressourcenverbrauch wird keine Wirkungsabschätzung mit einer spezifischen Methode und Charakterisierungsfaktoren durchgeführt, sondern stattdessen eine Materialbilanz aufgestellt.</p>	<p><b>Befund abgeschlossen</b> Kapitel 2 angepasst</p>
6	<p>Um den Untersuchungsrahmen der Studie vollständig zu beschreiben, sind folgende Verbesserungen nötig:</p> <p>- In Kapitel 2.2.3 Stellen Sie sicher, dass die Vordergrund und der Hintergrundprozesse im Bericht klar sind, indem Sie Abb. 1 verbessern oder eine neue Abbildung mit den Prozessen im Vordergrund und Hintergrund sowie den Inputs and Outputs hinzufügen (sie können gruppiert werden)</p> <p>Auch bitte eine einfache Abbildung der Fertigungsprozesse einfügen, am besten unter 3.2, wie im Audit diskutiert.</p>	05.05.2025	M	<p>Abschnitt 2.2.3: Da in der Datenbank ecoinvent nur generische Prozesse für die Herstellung und das End-of-Life von Kabelprodukten zur Verfügung stehen, ist eine eigene Modellierung der Werkstoffherstellung aus den Rohstoffen, der Fertigung der Leitungssätze sowie des End-of-Life im Rahmen dieser Studie notwendig. Abbildung 4 stellt eine Übersicht der Vordergrundprozesse, also aller selbst modellierten Prozesse auf Basis von Primär- und Sekundärdaten dar.</p> <p>Abschnitt 3.2: Abbildung 5 stellt die Inputs, Outputs sowie einzelne Teilprozesse der Fertigung von Teilleitungssätzen nach [Aboujlal &amp; Amrani 2020] dar. Zunächst werden Werkstoffe miteinander verbunden (Spleißen) und Kabel montiert (Konfektionierung). Anschließend werden alle Steckverbindungen hergestellt und Kabel weiter isoliert (Taping). Zuletzt erfolgt eine Nachbearbeitung.</p>	<p><b>Befund abgeschlossen, mit ergänzende Empfehlung:</b> Es wurde eine neue Abbildung hinzugefügt mit den Vordergrundprozesse und ergänzende Erklärungen dazu sind im Bericht enthalten.</p> <p>Ergänzende Empfehlung: Abbildung 4 auf Seite 15 zeigt lediglich die Vordergrundprozesse, während die Hintergrundprozesse nicht sichtbar sind. Die Abbildung könnte verbessert werden, indem die Systemgrenzen, Hilfsmaterialien und Outputs (z.B. Emissionen, Abfälle, Abwasser) ebenfalls dargestellt werden.</p>
7	<p>Da dieser Studie für eine Schulung eingesetzt wird, nutzen Sie den Anhang, um die wichtigsten Prozesse der Werkstoffherstellung und EoL darzustellen, z.B. mit Screenshots der Prozessdiagramme von OpenLCA. Oder mit einfachen Box Diagrammen, wo Inputs/Outputs ersichtlich werden und auch die Kriterien für die Auswahl der Input dato, und die Auswahl vom Ecolnvent benutzte Datensätze. Damit der Nutzer sich das vorstellen kann, und es leichter reproduzieren kann</p>	05.05.2025	Re		<p><b>Befund abgeschlossen:</b> keine Maßnahmen erforderlich aufgrund der Empfehlungskategorie.</p>

Nr.	Auditergebnis / Feststellung / nachzureichende Unterlagen (Befund vom Reviewer und Handlungsempfehlung)	Datum	Einordnung	Geplante / durchgeführte Korrekturmaßnahme (vom Kunden auszufüllen) --> Antwort vom LCA Auftraggeber/Ersteller	Beurteilung der durchgeführten Maßnahmen durch TÜV SÜD (Erfüllung und Wirksamkeit)
8	<p>Folgende Information müsste im Bericht ergänzt werden (siehe Kapitel 4.2.3. der ISO 14044)</p> <p>-Welche Anforderungen werden an die Datenqualität gestellt? Bitte trennen Sie die Anforderungen von der tatsächlichen Verfügbarkeit und Qualität.</p> <p>Hierzu fehlt noch auch eine kurze Erklärung über dem Einsatz von "Proxy" Daten. d.h. der Prozess der Mapping im Tab "Materialzusammensetzung" (Materials Zuordnung zu Datensätze, bzw. Proxys). Das muss im Bericht erwähnt werden</p> <p>-Alle Einschränkungen, die in Abschn. 2.2.6 sind, bitte separat vom Datenanforderungen beschreiben (z.B. neues Unterkapitel, nach 2.2.6).</p>	05.05.2025	M	<p>Abschnitt 2.2.6: Da es ein Ziel der Studie ist, ein Verständnis über die Zusammensetzung und Prozessketten der beiden betrachteten Produkte aufzubauen, sind hier vor allem möglichst repräsentative Sachbilanzdaten für die enthaltenen Materialien sowie für die Verarbeitungsschritte vor der Nutzung erforderlich. Entsprechende Primärdaten sollten möglichst aktuell sein. Nachdem die Zielgruppe deutsche Unternehmen umfasst, sind zudem v.a. deutschland- bzw. europaspezifische Daten zu verwenden.</p> <p>Abschnitt 2.2.7: Detaillierte Literaturdaten zu dem Lebenszyklus von Kfz-Kabelbäumen liegen nicht vor. Auf Basis von öffentlich verfügbaren Daten wurde jedoch die Materialzusammensetzung der Werkstoffe aus der Stückliste des Herstellers erarbeitet (Vgl. Anhang A. 5 und A. 6). Die daraus resultierende Materialbilanz wurde in Microsoft Excel entsprechenden Prozessbezeichnungen aus der Datenbankecoinvent zugeordnet („Mapping“) und daraufhin in openLCA eingefügt. Für die Fälle, in denen keine passenden Datensätze verfügbar waren, sind möglichst verwandte Prozesse („Proxys“) ausgewählt worden. Daraus ergeben sich teilweise Unschärfen. Im folgenden Abschnitt wird im Detail auf die Einschränkungen und Unsicherheiten der Modellierung der Sachbilanz eingegangen.</p> <p>Abschnitt 2.2.8</p>	<p><b>Befund abgeschlossen</b>, mit ergänzende Empfehlung: In Kapitel 2.2.6, S. 16 wurde ein Abschnitt über die Anforderungen an die Datenqualität hinzugefügt, jedoch könnten diese Aspekte für ein Training berücksichtigt und erwähnt werden (Empfehlung):</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>-Zeitbezogenheit: Der Zeitraum der Daten fehlt (z. B. 6 Monate, 1 Jahr, 1-2 Chargen).</li> <li>-Hintergrundprozesse: Es wird keine technologische Erfassung der Hintergrundprozesse angegeben.</li> <li>-Vollständigkeit: Der prozentuale Anteil des gemessenen oder geschätzten Flusses fehlt.</li> <li>-Konsistenz: Es fehlt eine Einschätzung zur einheitlichen Anwendung der Methodik.</li> <li>-Vergleichspräzision: Es wird keine Einschätzung zur Reproduzierbarkeit der Ergebnisse gegeben.</li> </ul> <p>Erklärung zur Verwendung von "Proxy"-Daten wurde in Kapitel 2.2.7 und 2.2.8, S. 17 und S. 18 aufgenommen. Einschränkungen wurden in Kapitel 2.2.8, S. 17 und S. 18 aufgenommen</p>
9	<p>Die Beschriftungen + Beschreibungen von Tabelle 3 und 4 bitte ergänzen, damit es klar wird, dass die restliche % der Masse, zwar nicht in der Tabelle aufgeführt ist (weil da ja nur die Hauptwerkstoffe erscheinen, die die LBST selbst modelliert hat), aber es ist direkt als Inputs mit generic Data mitgerechnet wurden. Das, um klarzustellen, dass keine Abschneidung von Stoffströme stattgefunden hat.</p>	05.05.2025	M	<p>Beschriftungen von beiden Tabellen ergänzt und zwei weitere Tabellen mit restlichen Materialmengen pro Werkstoffgruppe hinzugefügt.</p>	<p><b>Befund abgeschlossen:</b> Die Tabellen 3, 4, 5 und 6 wurden ergänzt. S.20-23</p>
10	<p>-Abschnitt 2.2.7 zur kritischen Prüfung nach Vorgaben von ISO14044 Abschn. 5.2(g) so ergänzen: KP nach ISO14071, Reviewer ist Dr.Espinosa, TÜV SÜD. KP Bericht mit Stellungnahmen als Anhang am Ende des LCA Bericht miterfassen, wenn fertig.</p>	05.05.2025	M	<p>Abschnitt 2.2.10: Für die Veröffentlichung der LCA ist nach ISO 14044 ein vorangehendes Critical Review durch eine Drittpartei notwendig. Dieses wurde von Februar bis März 2025 durch Frau Dr. Espinosa von TÜV SÜD nach ISO 14071 durchgeführt.</p>	<p><b>Befund abgeschlossen:</b> Der Satz wurde ergänzt in Kapitel 2.2.10, S18</p>

Nr.	Auditergebnis / Feststellung / nachzureichende Unterlagen (Befund vom Reviewer und Handlungsempfehlung)	Datum	Einordnung	Geplante / durchgeführte Korrekturmaßnahme (vom Kunden auszufüllen) --> Antwort vom LCA Auftraggeber/Ersteller	Beurteilung der durchgeführten Maßnahmen durch TÜV SÜD (Erfüllung und Wirksamkeit)
11	Zur Vervollständigung der Datenerhebungsverfahren auf Kapitel 2 und 3: Definition des Konfektionärs und detaillierte Angaben zur Herkunft der Primärdaten (z.B. in Kap 3.2, wie und wann (Zeitspanne) wurden die Daten erhoben?	05.05.2025	M	<p>Abschnitt 2.2.7: Primärdaten eines europäischen Leitungssatz-Konfektionärs, welche für firmeninterne Analysen im Jahr 2023 erhoben worden sind, liegen in Form von Stücklisten für die Bestandteile (Werkstoffe) der beiden Leitungssätze vor. Diese sind sehr genau, umfangreich, aktuell und spezifisch für diesen Hersteller. Die meisten Werkstoffe bzw. Materialien der Stücklisten werden von Zulieferern aus Europa bezogen. Nachdem diese Daten sowohl für die Sachbilanz der Werkstoffherstellung als auch des End-of-Life verwendet werden, ist der Detailgrad dieser beiden Lebenszyklusphasen sehr hoch.</p> <p>Für die Fertigung und den Transport des Leitungssatzes liegen dem Konfektionär Emissionswerte vor, die im Jahr 2023 für einen nicht veröffentlichten Product Carbon Footprint (PCF) erhoben worden sind. Aus Vertraulichkeitsgründen wurden vom Hersteller nur aggregierte Emissionswerte als kg CO<sub>2</sub>eq pro Teilleitungssatz für die Erstellung der vorliegenden Studie zur Verfügung gestellt. Entsprechend sind die Daten zwar aktuell und spezifisch für den Kabelsatz-Konfektionär, ermöglichen jedoch nur eine oberflächliche Analyse dieser Lebenszyklusphasen. Nachdem auch die Emissionsquellen bzw. verwendeten Energieträger der einzelnen Fertigungsschritte nicht bekannt sind, wurde Strom aus dem deutschen Strommix als alleinige Quelle angenommen (Vgl. Abschnitt 3.2.1). Es wird nicht erwartet, dass bei den Konfektionierungsprozessen weitere Emissionsquellen auftreten. Unterstützende Prozesse wie etwaige Instandhaltungsmaßnahmen von Maschinen der Produktion, Verpackung und Lagerung der Produkte sowie die Behandlung von Abfällen werden nicht berücksichtigt.</p>	<b>Befund abgeschlossen:</b> In Kapitel 2.2.7 Datenverfügbarkeit und Datenqualität, Seite 16-17 aufgenommen
12	Es muss als Einschränkung erwähnt werden, dass die tatsächlichen Emissionsquellen von dem Fertigungsprozess nicht bekannt sind. Angenommen wurde also die Nutzung von Strom (wie bereits im Abs. 3.2.1 erwähnt), als Quelle der kommunizierten Footprint, und keine weiteren Energieträger und auch keine weitere Emissionsquellen sind bekannt. Erkläre im Bericht, ob es in der Realität auch keine direkte weitere Emission Quellen erwartet sind, und dass es nur den Energiebedarf der Fertigungsprozess berücksichtigt wurde. Weitere Prozesse der Fertigungsprozess, die für einen kompletten Cradle-to-Cradle Berechnung im Frage kommen sind nicht berücksichtigt, wie z.B. Behandlung von Abfall, die bei der Produktion entsteht, Instandhaltung der Maschinen bei der Produktion, Verpackung und Lagerung der Produkte.	05.05.2025	M	siehe oben (Nr. 11)	<b>Befund abgeschlossen,</b> mit ergänzende Empfehlung: In Kapitel 2.2.7 Datenverfügbarkeit und Datenqualität, Seite 16-17 aufgenommen, jedoch könnten diese Aspekte für ein Training berücksichtigt und erwähnt werden: In Kapitel 2.2.3 sollte klar gestellt werden, dass „Cradle to Cradle“ nur für Kupfer gilt und nicht für das gesamte Produkt (Leitungssätze), da es auf über 200 Materialien basiert, die unterschiedlich bei der EoL in Deutschland bewertet werden. Die EoL des Produkts endet mit der EoL eines PKW, basierend auf den Annahmen in Kapitel 2.2.2 und der Beschreibung in Kapitel 3.4.2.

Nr.	Auditergebnis / Feststellung / nachzureichende Unterlagen (Befund vom Reviewer und Handlungsempfehlung)	Datum	Einordnung	Geplante / durchgeführte Korrekturmaßnahme (vom Kunden auszufüllen) --> Antwort vom LCA Auftraggeber/Ersteller	Beurteilung der durchgeführten Maßnahmen durch TÜV SÜD (Erfüllung und Wirksamkeit)
13	<p>Ist der Konfektionär von BEV oder Ottomotor Leitungssätze? Bitte erklären Sie im Abschn. 3.2.2 ob diese Distanzen zum Automanufaktur repräsentativ für beide Produkte sind .Es kann ja sein, dass je nach Produkt, den Markt ganz unterschiedlich ist und die Distanzen wären auch sehr unterschiedlich.</p> <p>Sie müssen in dem Bericht angeben, dass es sich um eine generische Darstellung der Produktion der Werkstoff/Materialien in der EU handelt, und dass eine realistische Modellierung mit tatsächlichen Lieferkettendaten (Herkunft der Rohstoffe, Produktion von Vorprodukten für den KFZ-Leitsatz, etc.) die nicht nur aus der EU stammen müssten, einen wichtigen Effekt auf die Umweltauswirkungen haben kann.</p>	05.05.2025	M	<p>Abschnitt 1: Dabei werden sowohl ein Leitungssatz eines konventionell betriebenen sowie eines elektrisch angetriebenen Pkw betrachtet. Hierfür wurden Primärdaten eines europäischen Leitungssatz-Konfektionärs herangezogen, welcher beide Produkte herstellt.</p> <p>Abschnitt 3.1.3: Nachdem es sich hierbei um eine generische Darstellung der Produktion der Werkstoffe bzw. Materialien in Europa handelt, können die Transportdistanzen nicht als repräsentativ für beide Produkte im Allgemeinen gesehen werden. Tatsächliche Entfernungen hängen von den Standorten der Zulieferer und der Konfektionäre ab. Transporte in internationalen Lieferketten gehen in den meisten Fällen mit höheren Emissionen einher.</p> <p>Abschnitt 3.2.2: Diese Transportdistanzen können nicht als repräsentativ für BEV- und Ottomotor-Kabelsätze allgemein gesehen werden. Tatsächliche Entfernungen hängen von den Standorten der Konfektionäre und der Kunden ab.</p>	<p><b>Befund abgeschlossen:</b> In Kapitel 1, 3.1.3 und 3.2.2 aufgenommen</p>
14	<p>Die Lebensphase "Nutzung" muss als Auslassung deklariert werden, da keine vollständige Beschreibung dieser Lebensphase oder konkrete Angaben über die Nutzung gibt (schon oben beschrieben)</p>	05.05.2025	NC	<p>Abschnitt 3.3: Die Nutzung der Teilleitungssätze wird wie bereits in Abschnitt 2.2.3 erläutert nicht betrachtet.</p>	<p><b>Befund abgeschlossen</b> Bericht konsistent angepasst</p>

Nr.	Auditergebnis / Feststellung / nachzureichende Unterlagen (Befund vom Reviewer und Handlungsempfehlung)	Datum	Einordnung	Geplante / durchgeführte Korrekturmaßnahme (vom Kunden auszufüllen) --> Antwort vom LCA Auftraggeber/Ersteller	Beurteilung der durchgeführten Maßnahmen durch TÜV SÜD (Erfüllung und Wirksamkeit)
15	<p>Für den EoL-Prozess in 3.3.2 erwähnen, dass die manuelle Entnahme (removal) des KFZ-Leitungssatzes stattfindet und dass diese manuelle Entnahme bei der Modellierung nicht berücksichtigt wurde, sondern nur die Wiederverwertung des Teils nach der Entnahme (Datensatz "Behandlung von Elektro- und Elektronikaltgeräten")</p> <p>Die Nutzung von Gutschriften zur rechnerischen Verbesserung der Umweltauswirkungen muss deutlicher in der Auswertung und in dem Fazit diskutiert werden. Die Anrechnung der positiven Auswirkungen des End-of-Life (EoL) ist nur gewährt, wenn die zugrunde liegenden Annahmen tatsächlich zutreffen. Das bedeutet, nur wenn                      (1) das Auto bleibt in Deutschland, und                      (2) das Auto geht zu einem Wertstoffhof/Recyclinganlage am Ende der Nutzung, beide Annahmen müssen wahr sein.</p> <p>Auch muss es sichergestellt werden, dass keine andere Organisation (Industrie, Nutzer) das Recht hat, die nachhaltigen Eigenschaften des recycelten Produkts zu deklarieren. Das trifft zu, wenn das zurückgewonnenen Kupfer in einer andere Industrie eingesetzt wird, was sehr möglich der Fall sein kann.</p> <p>Der Fokus soll daran liegen, dass die positive Effekte in einer Lieferkette nur dann gesichert werden können (und bei Footprints angerechnet werden können), wenn die Prozesse/Materialien innerhalb der Berichterstattende Organisation sind, bzw. wenn die Rechte dafür erworben hat (physisch beim Einkauf von Materialien, oder abgekoppelt, als unbundled Garantie of Origin)</p>	05.05.2025	M	<p>Abschnitt 3.4.2: Die vorangehende Entnahme des Kabelsatzes aus dem Fahrzeug wird nicht berücksichtigt.</p> <p>Hier ist anzumerken, dass diese Gutschrift nur unter den Annahmen angerechnet werden kann, dass ein Auto am Ende des Lebenszyklus wirklich in Deutschland verbleibt und einen fachgerechten Verwertungsprozess durchläuft. Für das End-of-Life in anderen Ländern, insbesondere im EU-Ausland, sind andere Annahmen zu treffen.</p> <p>Abschnitt 5: Im End-of-Life verursachen Schredder-, Sortierungs- und Entsorgungs- bzw. Recyclingprozesse geringe Umweltauswirkungen, welche bei einer Recyclingquote von 90% für Kupferkabel durch eine Gutschrift mehr als ausgeglichen werden. Es ist hervorzuheben, dass die Anrechnung dieser Gutschrift im EoL nur dann möglich ist, wenn die zugrunde liegenden Annahmen tatsächlich zutreffen. Also nur, wenn das Auto mit dem betrachteten Leitungssatz am Ende des Lebenszyklus in Deutschland verbleibt und einer fachgerechten Verwertung zugeführt wird. Sollte ein Konfektionär eine derartige Gutschrift für eine Bilanzierung der Umweltauswirkungen eigener Produkte (bspw. durch ein PCF) beanspruchen wollen, müsste dieser zudem sicherstellen, dass das recycelte Kupfer wieder für die Herstellung der eigenen Kabelsätze verwendet wird. Sonst könnte es zu einer mehrfachen Anrechnung von Recycling-Gutschriften kommen, wenn das Sekundärkupfer in einer anderen Industrie zum Einsatz kommt.</p>	<p>Befund abgeschlossen.</p> <p>Text wurde im Kapitel 3.4.2 und Kapitel 5 angepasst</p>
16	<p>-Die Auswahl der Datensätze wurde überprüft und kommt zu dem Schluss, dass diese sorgfältig und auf wissenschaftlicher Basis ausgewählt wurden.</p> <p>-Für die Produktion der Materialzusammensetzung wurden Datensätze aus dem Ecoinvent-Datensatz für Europa in konsistenter Weise ausgewählt und erstellt.</p> <p>-Für den Rohstoff Kupfer wurde der globale Datensatz Market in konsistenter Weise ausgewählt.</p>	05.05.2025	P	-	<p><b>Befund abgeschlossen</b> (positive Anmerkung)</p>

Nr.	Auditergebnis / Feststellung / nachzureichende Unterlagen (Befund vom Reviewer und Handlungsempfehlung)	Datum	Einordnung	Geplante / durchgeführte Korrekturmaßnahme (vom Kunden auszufüllen) --> Antwort vom LCA Auftraggeber/Ersteller	Beurteilung der durchgeführten Maßnahmen durch TÜV SÜD (Erfüllung und Wirksamkeit)
17	<p>a. Für BEV Leitungssatz_Sachbilanz_ Excel-Datei gibt es eine Werkstoffgruppe mit 16 Gruppen dargestellt und Materialzusammensetzung von 203 Materialien. In OpenLCA aber 47 Materialien bei Werkstoffe gibt. Können Sie bitte diese Gruppierung von Excel auf OpenLca erklären?</p> <p>b. Für Ottomotor_Sachbilanz_ Excel Datei gibt es eine Werkstoffgruppe mit 22 Gruppen dargestellt und Materialzusammensetzung von 86 Materialien aber nur 34 wurden mit Materialien gemappt aber 47 Materialien erscheinen in Open LCA unter Werkstoff. Können Sie diese Gruppierung von Excel auf OpenLca erklären?</p>	05.05.2025	M	<p>In openLCA sind für BEV (Prozess: "ZB EL.LTG.SATZ mit Ladedose ECE X5 Werkstoffe") 47 Inputs und für Ottomotor (Prozess: "LTGS.MOTRVORVERKA EVO4 LK1 Werkstoffe") 46 Inputs. Dies lässt sich folgendermaßen erklären:</p> <p>Insgesamt gibt es 22 verschiedene Werkstoffgruppen (siehe Tabelle 2 im Bericht), von denen 16 im Ottomotor-Leitungssatz vorkommen. Aus diesen Gruppen wurden für den BEV 26 Werkstoffe (von 203) als Hauptwerkstoffe (&gt; 95%) definiert und für den Ottomotor 34 Werkstoffe (von 86).</p> <p>Die restlichen 177 Werkstoffe für BEV und 52 Werkstoffe für Ottomotor (&lt; 5%) wurden jeweils aggregiert und als generische Werkstoffgruppen modelliert. Daraus ergeben sich 21 weitere Einträge für BEV (ohne Werkstoffgruppe "Kupferkabel", da alle Kabel innerhalb der &gt; 95% sind). Für Ottomotor ergeben sich 12 weitere Einträge (ohne Kupferkabel, Textilien, Elastomere &amp; Stahl, da diese innerhalb &gt; 95% sind).</p> <p>BEV: 26 + 21 = 47 ; Ottomotor: 34 + 12 = 46</p> <p>Zum besseren Verständnis haben wir die Stücklisten aggregierter Werkstoffe (&lt; 5%) als Tabelle 4 und Tabelle 6 ergänzt.</p>	<p><b>Befund abgeschlossen</b> Zur Verdeutlichung wurden die Tabellen 3, 4, 5 und 6 ergänzt.</p>
18	<p>In den Anhängen könnte der Hinweis aus Kapitel 3 nochmal aus den Hinweisen Auswahl der Anzahl und Rohstoffe in den Anhängen hinzugefügt werden, um dies für den Leser zu vereinfachen</p>	05.05.2025	Re	-	<p><b>Befund abgeschlossen</b> (Vorschlag nicht in Anspruch genommen)</p>
19	<p>Für Zinn und Zink wurde bei einigen Rohstoffen das falsche Material gemappt. Da der Anteil sehr gering ist, empfehlen wir nur eine Anpassung des Materials für Zinn und Zink.</p>	05.05.2025	Re	<p>Die Korrektur hat lediglich einen Einfluss von geringer als 0,1% auf die Ergebnisse aller Wirkungskategorien, weshalb diese nicht in den Bericht eingearbeitet wird.</p>	<p><b>Befund abgeschlossen</b> Begründet, nicht angepasst</p>
20	<p>in Kap.3: Zur Vervollständigung der Prozess zur Datenvalidierung: Erwähnung über Verfahren zur Datenvalidierung, Plausibilisierung, Quality Assurance, und oder Iterationen.</p> <p>(die interne Qualitätssicherung muss erwähnt werden. Insbesondere der Prozess der Datenvalidierung; einschließlich Bewertung der Datenqualität und Behandlung fehlender Daten; z.B. Massen- und Energiebilanzen die angewendet wurden und das System/Daten zu validieren (siehe Kapitel 4.3.3.2 der ISO 14044))</p>	05.05.2025	M	<p>Abschnitt 2.2.9: Eine Qualitätssicherung der Sachbilanz und der Wirkungsabschätzungsergebnisse wurde durch eine Überprüfung der Massenbilanz (Masse aller Inputs entspricht Masse aller Outputs) sowie durch ein internes Review des Berichts durch einen weiteren Mitarbeiter der LBST („4-Augen-Prinzip“) durchgeführt.</p>	<p><b>Befund abgeschlossen</b> In Kapitel 2.2.9 Datenvalidierung aufgenommen</p>
21	<p>Da Ihr Modell den 'Gutschriften', die außerhalb der Kontrolle des Herstellers entstehen, so viel Bedeutung beimisst, bitte ich Sie, für den Abschnitt Sensitivitätsanalyse ein Szenario zu berechnen, das eine realistische Rückgewinnung der Kupferanteile von Autos auf dem Weltmarkt darstellt (da nicht alle Autos in Deutschland bleiben). Verwenden Sie Daten aus der Literatur oder treffen Sie eine Annahme und beschreiben Sie diese. Ergänzen Sie dann den Bericht mit den Ergebnissen.</p> <p>Dies soll zeigen, wie wichtig es ist, Maßnahmen zur Reduktion der Umweltauswirkungen in der eigene Lieferkette (vorgelagerte Prozesse) zu ergreifen.</p>	05.05.2025	M	<p>siehe Abschnitt 4.8.</p> <p>Da uns keine Daten zu einer realistischen Rückgewinnung der Kupferanteile von Autos auf dem Weltmarkt vorliegt, haben wir stattdessen ein "Worst-Case-Szenario" mit dem Export von Autos ins EU-Ausland und der Kabelverbrennung im EoL in Ghana angenommen.</p>	<p><b>Befund abgeschlossen</b> In Kapitel 4.8 aufgenommen</p>

Nr.	Auditergebnis / Feststellung / nachzureichende Unterlagen (Befund vom Reviewer und Handlungsempfehlung)	Datum	Einordnung	Geplante / durchgeführte Korrekturmaßnahme (vom Kunden auszufüllen) --> Antwort vom LCA Auftraggeber/Ersteller	Beurteilung der durchgeführten Maßnahmen durch TÜV SÜD (Erfüllung und Wirksamkeit)
22	<p>Klären Sie in der Sensitivitätsanalyse, wie den Vergleich der Ergebnisse der LCA-Studie mit den Literaturwerten (e.g. Abb. 14, Abb.25, usw.) die Sensitivität vom System zu Herkunft der Rohstoffe, Produktion von Werkstoffen für den KFZ-Leitsatz, etc. widerspiegelt.</p> <p>Am besten, bitte den Vergleich mit Literaturwerten in die Sensitivitätsanalyse verschieben und auch in diesen Sinnen abhandeln, um das Nutzen diesem Vergleich klarzustellen.</p>	05.05.2025	M	<p>Abschnitt 4.7: Um die Abhängigkeit der Gesamtergebnisse von diesem wichtigen Parameter zu untersuchen, wird als erste Sensitivitätsanalyse eine Substitution des Primärkupfers bei der Kabelherstellung durch Sekundärkupfer betrachtet. Dadurch wird neben der konservativen Annahme im Basisszenario (pyrometallurgisches Kupfer aus der globalen Produktion) ein „Best-Case-Szenario“ dargestellt. Entsprechend den niedrigsten Literaturwerten nach [Sanjuan-Delmás et al. 2022] wird dabei der ecoinvent-Prozess „treatment of copper scrap by electrolytic refining   copper, cathode   Cutoff, U – RER“ verwendet (Vgl. Abschnitt 4.2.3, 4.3.3 und 4.5.3).</p> <p>Eine Interpretation dieser Sensitivität mit Bezug auf die Literaturwerte haben wir in Abschnitt 4.7.3 ergänzt.</p> <p>Wir möchten die Literaturwerte jedoch in Abschnitt 4.2.3, 4.3.3 und 4.5.3 belassen, damit unsere Berechnungsergebnisse hier sofort in Kontext gesetzt werden (manche Leser überfliegen nur die Grafiken und so stolpern sie unter den Ergebnissen direkt über den Vergleich mit der Literatur).</p>	<p><b>Befund abgeschlossen</b> Änderungen wie beschrieben vorgenommen. Literaturwerte im Abschnitt 4.2.3, 4.3.3 und 4.5.3 belassen, mit dokumentierte Begründung.</p>
23	<p>Darüber hinaus können Sie in dem Fazit das Thema diskutieren, wie wichtig eine globale Regelung für die Wiedergewinnung von Rohmaterialien aus den Produkten am Ende des Lebenszyklus ist, und wie wichtig auch das Ecodesign ist, um die einfache Wiedergewinnung von den Materialien ((Trennung, Demontage, usw.) aus den Produkten am EoL ist.</p>	05.05.2025	Re	-	<p><b>Befund abgeschlossen</b> (Vorschlag nicht in Anspruch genommen)</p>
24	<p>Bitte klären Sie im Bericht, zum Thema Allokation, dass alle Umweltauswirkungen zum Hauptprodukt zugewiesen werden (es gibt keine Nebenprodukte) und keine Allokation im LCA-Model angewendet wurde.</p>	05.05.2025	M	<p>Abschnitt 2.2.4: In den Vordergrundprozessen werden alle Umweltauswirkungen dem Hauptprodukt zugewiesen, nachdem es keine Nebenprodukte gibt. Entsprechend wurde keine Allokation durchgeführt. Bei Hintergrund-prozessen mit mehreren Produkten erfolgt die Allokation gemäß der ecoinvent-Datensätze.</p> <p>Die Allokation des End-of-Life (EoL) erfolgt entsprechend dem ecoinvent-Modell mit Cut-off (Umweltauswirkungen durch Recycling werden dem Nachfolgeprodukt zugeordnet) mit Ausnahme von Recycling von Kupferkabeln, bei denen eine Gutschrift für dieses Produkt berücksichtigt wird.</p>	<p><b>Befund abgeschlossen</b> In Kapitel 2.2. 4 aufgenommen</p>

Nr.	Auditergebnis / Feststellung / nachzureichende Unterlagen (Befund vom Reviewer und Handlungsempfehlung)	Datum	Einordnung	Geplante / durchgeführte Korrekturmaßnahme (vom Kunden auszufüllen) --> Antwort vom LCA Auftraggeber/Ersteller	Beurteilung der durchgeführten Maßnahmen durch TÜV SÜD (Erfüllung und Wirksamkeit)
25	<p>Im Bericht soll im Abschn. 2.2.5 erwähnt werden, dass "Ressourcenverbrauch" keine Wirkungsabschätzung ist, es dient nur die Darstellung welche Materialien, als kritisch nach EU 2024/1252 eingestuft werden. Die Methodologie (Abgleich mit Verordnung) muss kurz erwähnt werden, um Missverständnisse zu vermeiden.</p> <p>Bitte auch im Abschnitt 4.6 Ressourcenverbrauch und auch im Fazit dazu kommentieren, warum wurde das gemacht, und was sind die Auswirkungen oder Erwartete Lerneffekt aus dieser Auswertung.</p>	05.05.2025	M	<p>Abschnitt 2.2.5: Für den Ressourcenverbrauch wird keine Wirkungsabschätzung mit einer spezifischen Methode und Charakterisierungsfaktoren durchgeführt, sondern stattdessen eine Materialbilanz aufgestellt. Dies ermöglicht eine Übersicht über die Materialzusammensetzung der Produkte und eine Identifizierung kritischer und strategischer Rohstoffe nach Verordnung (EU) 2024/1252 [EU 2024].</p> <p>Wir haben das Kapitel nun zur besseren Strukturierung den anderen Ergebniskapiteln vorangestellt.</p> <p>Abschnitt 4.2: Für den Ressourcenverbrauch ist im Folgenden eine Materialbilanz statt eine Wirkungsabschätzung dargestellt. Hierdurch lässt sich ein besseres Verständnis über die Materialzusammensetzung der beiden Produkte und über enthaltene strategische und kritische Rohstoffe gewinnen.</p> <p>Abschnitt 5: Die Untersuchung des Ressourcenverbrauchs hat ergeben, dass der BEV-Leitungssatz insgesamt einen höheren Anteil an Metallen und mehr strategische und kritische Rohstoffe als der Ottomotor-Kabelsatz enthält. Dafür besteht letzterer aus mehr Gold und ungefüllten Thermoplasten. Aluminium, Silizium, Platin und Schaumstoffe sind der Stückliste nach nicht im Ottomotor-Leitungssatz enthalten.</p>	<p><b>Befund abgeschlossen</b> In Kapitel 2.2.5, 4.2 und 5 aufgenommen</p>
26	<p>Im Bericht, Kapitel 4 fehlt den Hinweis, dass "die Wirkungsabschätzungsergebnisse relative Aussagen sind und keine Voraussagen über Auswirkungen auf die Wirkungsendpunkte, Schwellenwertüberschreitungen, Sicherheitsspannen oder Risiken machen". Anforderung von ISO14044 Abschn. 5.2e(8). Bitte gleich am Anfang des Kapitels aufnehmen.</p>	05.05.2025	NC	<p>Abschnitt 4.1: Es ist anzumerken, dass die Wirkungsabschätzungsergebnisse relative Aussagen sind und daraus keine Voraussagen über Auswirkungen auf die Wirkungsendpunkte, Schwellenwertüberschreitungen, Sicherheitsspannen oder Risiken getroffen werden können.</p>	<p><b>Befund abgeschlossen</b> In Kapitel 4.1 aufgenommen</p>
27	<p>Kapitel 4 vom Bericht enthält bereits die Auswertung (Interpretation) von den Ergebnissen der Wirkungsabschätzung. Empfohlen wäre es zuerst die reinen Ergebnisse der Wirkungsabschätzung, und danach getrennt, die Auswertung und Interpretation zu handeln. Ansonsten wird es empfohlen genau diese Situation gleich am Anfang des Kapitels 4 zu erwähnen (dass Kap. 4 sowohl die Ergebnisse als auch die Interpretation enthält) und eine kurze Begründung, warum das vom Vorteil für die Nutzer des Berichts ist.</p>	05.05.2025	Re	-	Nicht in Anspruch genommen
28	<p>Tabelle und Abbildungen in Abschn. 4.1. Alle Beschriftungen müssen ergänzt werden, damit es klar wird, dass diese sich nur auf die Life Phase "Werkstoffherstellung" beziehen.</p>	05.05.2025	M	Beschriftungen wurden aktualisiert	<p><b>Befund abgeschlossen</b> Kapitel 4.1 Beschriftung angepasst</p>
29	<p>Abbildungen in 4.2 (pie charts) müssen deutlicher gekennzeichnet werden. Sind diese Werte mit oder ohne Betrachtung der Gutschrift für Kupfer?</p>	05.05.2025	M	<p>Abschnitt 4.1: In den Ergebnissen für die Werkstoffherstellung ist keine Gutschrift durch das Recycling der Kupferkabel enthalten, da diese der Lebenszyklusphase End-of-Life angerechnet wird.</p> <p>Abschnitt 4.3.1: Die Gutschrift für das Recycling von Kupferkabeln wird in der Grafik zur besseren Übersicht als separater Balken dargestellt, auch wenn sie Teil des End-of-Life ist. In Summe ergibt sich aus EoL-Emissionen und Gutschrift eine Einsparung.</p> <p>"Ergebnis der Anteile des ... <b>der Werkstoffherstellung</b> des ..." bei der Beschriftung aller pie charts ergänzt</p>	<p><b>Befund abgeschlossen</b> Zur Verdeutlichung wurden in Kapitel 4.1 und 4.3.1 ergänzt.</p>

Nr.	Auditergebnis / Feststellung / nachzureichende Unterlagen (Befund vom Reviewer und Handlungsempfehlung)	Datum	Einordnung	Geplante / durchgeführte Korrekturmaßnahme (vom Kunden auszufüllen) --> Antwort vom LCA Auftraggeber/Ersteller	Beurteilung der durchgeführten Maßnahmen durch TÜV SÜD (Erfüllung und Wirksamkeit)
30	In den Kapiteln 4 und 5 ist die Auswertung unter Betrachtung der Annahmen und Einschränkungen bzw. Unschärfen oder Unsicherheiten der Daten näher zu erläutern. Insbesondere da, wo die Ergebnisse für Entscheidungsprozesse relevant sein könnten. In anderen Worten, Sie müssen für die Interpretation die Einschränkungen und Annahmen noch berücksichtigen.	05.05.2025	M	<p>Abschnitt 4.3.1: Aufgrund der mangelnden Primärdaten und der oberflächlichen Modellierung der Transporte und der Fertigung sind die Ergebnisse für Fertigung und Transport in dieser und allen anderen Wirkungskategorien jedoch mit hohen Unsicherheiten verbunden (Vgl. Abschnitt 2.2.8, 3.1.3, 3.2 und 3.4.1).</p> <p>Voraussetzung für eine derartige Einsparung in dieser und allen anderen Wirkungskategorien ist, dass die Kupferkabel der Leitungssätze im EoL tatsächlich einem fachgerechten Recycling zugeführt werden.</p> <p>Abschnitt 5: . Gleichzeitig stellen Emissions- und Energiebedarfswerte für Kupfer in dieser Studie die höchste Unschärfe bei den Umweltauswirkungen der Leitungssätze dar. Für produktspezifische LCA sollten deshalb möglichst Primärdaten zu THG-Emissionen, SO2-Emissionen und Primärenergiebedarfen des Kupferlieferanten verwendet werden.</p> <p>Fertigung und Transport der Kabelsätze sind in allen Wirkungskategorien nur mit geringen Umweltauswirkungen verbunden. Die Ergebnisse dieser Lebenszyklusphasen sind aufgrund der begrenzten Datenverfügbarkeit jedoch mit hohen Unsicherheiten verbunden. Für zukünftige LCA von Leitungssätzen ist deshalb zu empfehlen, dass detailliertere Primärdaten für die Fertigung von Kabelsätzen sowie für Transporte entlang der Wertschöpfungskette verwendet werden. Ebenso ist eine Berücksichtigung der Nutzungsphase anzustreben, beispielsweise durch Daten zu Reparatur und Austausch von (Teil-</p>	<b>Befund abgeschlossen</b> Zur Verdeutlichung wurden in Kapitel 4.3.1 und 5 ergänzt.
31	Die Ergebnisse/Fazit sollte folgendes noch erwähnen (Vorschlag): bei der Anwendung der Studie auf die eigene Organisation, sollte jeder Konfektionär (Hersteller) das LCA mit eigenen Primärdaten und unter Berücksichtigung die eigenen Materialien und Prozesse berechnen (Auswahl der Werkstoffe und Lieferanten, Energieverbräuche, Produktionszahlen/Effizienz, Qualität, Lieferketten, Transport zum Kunden, usw.)	05.05.2025	Re	siehe oben (Nr. 30)	<b>Befund abgeschlossen</b> Zur Verdeutlichung wurde in Kapitel 5 ergänzt.
32	Weitere Positive Merkmale: Die LCA-Studie und der Studienbericht sind sehr umfangreich und gut strukturiert. Sie wurden konsistent verfasst, und die Informationsquellen für die Modellierung sind gut dokumentiert und transparent im Bericht dargestellt. Ebenso sind die Erklärungen zur Vorgehensweise klar und nachvollziehbar	05.05.2025	P	-	<b>Befund abgeschlossen</b> (positive Anmerkung)

Einordnung	NC	Nichtkonformität / Abweichung, weil Anforderung nicht erfüllt
	M	Fehler, Falschdarstellung, Unterlassung
	Re	Empfehlung für Verbesserung (Vorschlag der Prüfstelle)
	Docu	Anmerkung zur Dokumentation (z.B. fehlendes Dokument)
	Note	Hinweis (ergänzend und nicht Verifizierungsbericht enthalten)
	P	Positive Anmerkung

Bewertung	Datum	Bewertungsstand	Name der Bewerter
	27.03.2025	finale Bewertung	Espinosa

LCA-Studie zur Untersuchung der Umweltauswirkungen  
von Kfz-Leitungssätzen konventioneller und  
elektrischer Fahrzeuge

Y. S. Astono, S. Solms-Baruth, W. Weindorf, P. Schmidt  
G. Espinosa, M. Engelhardt  
N. Langmaack

April 2025

# LCA-Studie zur Untersuchung der Umweltauswirkungen von Kfz-Leitungssätzen konventioneller und elektrischer Fahrzeuge

Y. S. Astono, S. Solms-Baruth, W. Weindorf, P. Schmidt – LBST GmbH  
G. Espinosa, M. Engelhardt – TÜV SÜD  
N. Langmaack – OHLF e.V. & TU Braunschweig

## Vorwort

Liebe Leserin, lieber Leser,

die vorliegende Studie wurde im Rahmen des Projektes „Transformations-Hub Leitungssatz“ vom Open Hybrid LabFactory (OHLF) e.V. beauftragt, von der Ludwig-Bölkow-Systemtechnik (LBST) GmbH bearbeitet und angefertigt und durch die TÜV SÜD Energietechnik GmbH Baden-Württemberg (TÜV SÜD) einem Critical Review unterzogen. Die vorliegende Veröffentlichung setzt sich zusammen aus dem LCA-Bericht selbst und dem Prüfbericht des Reviews.

Inhaltliches Ziel der Untersuchung ist es, für die Leitungssatz-Branche anhand von zwei unterschiedlichen, beispielhaften Teilleitungssätzen Stellschrauben für zukünftige Reduktionen der Umweltauswirkungen aufzuzeigen. Insbesondere soll die Studie identifizieren, welche Prozessschritte und Ausgangsmaterialien jeweils die größten Auswirkungen auf unterschiedliche Wirkungskategorien im Sinne des Life-Cycle-Assessments haben. Hierzu wird zunächst ein genaues Verständnis über die Produktzusammensetzung und die Prozesskette aufgebaut. Datenlücken in der Modellierung werden erkannt und benannt. Zuletzt werden anhand der in der Analyse identifizierten Hotspots erste Handlungsempfehlungen abgeleitet.

Übergeordnetes Ziel der Studie und ihrer Veröffentlichung ist zudem, die Schritte und Methoden der LCA zu vermitteln. Sie soll als Grundlage und Anwendungsbeispiel für eine Reihe von Schulungen dienen, die im Rahmen des Leitungssatz-Hubs in 2025 angeboten werden. Aus diesem Grund ist der Bericht konsequent entlang der Schritte einer LCA nach ISO 14040/44 gegliedert und wurde für die Veröffentlichung einer unabhängigen, kritischen Prüfung unterzogen.

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

Niklas Langmaack

Wolfsburg im April 2025

## Beiträge der Autoren

Y. S. Astono: Recherche, Datenverarbeitung, Analyse, Berichtsentwurf

S. Solms-Baruth: Datenverarbeitung, Visualisierung, internes Review

W. Weindorf: Recherche, internes Review

P. Schmidt: Projektmanagement

G. Espinosa: unabhängige kritische Prüfung

M. Engelhardt: unabhängige kritische Prüfung

N. Langmaack: Beauftragung, Projektleitung, Vorwort, Herausgeber

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Veröffentlicht unter der Creative-Commons-Lizenz CC BY-SA 4.0



# LCA Kfz-Leitungssätze

Untersuchung der Umweltauswirkungen konventioneller und elektrischer Fahrzeuge für den Open Hybrid LabFactory e.V.

Bericht

27. März 2025

---

**Patrick Schmidt**

Patrick.Schmidt@LBST.de

**Yanni Astono**

**Sandra Solms-Baruth**

**Werner Weindorf**

## Disclaimer

Das Team der Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH hat diesen Bericht erstellt.

Die Sichtweisen und Schlüsse, die in diesem Bericht ausgedrückt werden, sind jene der Mitarbeitenden der Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH. Alle Angaben und Daten sind sorgfältig recherchiert. Allerdings gibt weder die Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH noch irgendeiner ihrer Mitarbeitenden, Vertragspartner oder Unterauftragnehmer irgendeine ausdrückliche oder implizierte Garantie oder übernimmt irgendeine rechtliche oder sonstige Verantwortung für die Korrektheit, Vollständigkeit oder Nutzbarkeit irgendeiner Information, eines Produktes oder eines enthaltenen Prozesses.

Diese Studie wurde in Auftrag gegeben vom Open Hybrid LabFactory (OHLF) e.V. im Rahmen des Projektes „Transformations-Hub Leitungssatz“, unter dem Förderkennzeichen 16THB0003C gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des deutschen Bundestages.

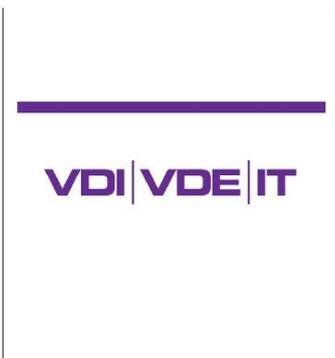




**Transformations-Hub**  
**LEITUNGSSATZ**



**OHLF** OPEN HYBRID  
LABFACTORY



VDI|VDE|IT

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

## Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung .....	11
2. Ziel und Untersuchungsrahmen .....	12
2.1. Untersuchungsziel.....	12
2.2. Untersuchungsrahmen.....	13
2.2.1. Produktsysteme und Funktionen .....	13
2.2.2. Funktionelle Einheit .....	14
2.2.3. Systemgrenzen.....	14
2.2.4. Allokationsverfahren.....	15
2.2.5. Wirkungsabschätzungsmethoden .....	16
2.2.6. Anforderungen an die Datenqualität .....	16
2.2.7. Datenverfügbarkeit und Datenqualität.....	16
2.2.8. Einschränkungen und Unsicherheiten .....	17
2.2.9. Datenvalidierung.....	18
2.2.10. Critical Review .....	18
3. Sachbilanz .....	19
3.1. Werkstoffherstellung.....	19
3.1.1. Kupferkabel und Kupferlegierungen.....	23
3.1.2. Kunststoffe .....	24
3.1.3. Transport der Werkstoffe zur Fertigung.....	25
3.2. Fertigung Leitungssatz .....	25
3.2.1. Strombedarf für Fertigung .....	26
3.2.2. Transport der Leitungssätze.....	26
3.3. Nutzung .....	27
3.4. End-of-Life.....	27
3.4.1. Transport zu EoL .....	27
3.4.2. Entsorgung und Recycling von Leitungssatzbestandteilen .....	27
4. Ergebnisse der Wirkungsabschätzung.....	29
4.1. Gesamtergebnisse für Werkstoffherstellung .....	29
4.1.1. BEV-Leitungssatz.....	29
4.1.2. Ottomotor-Leitungssatz .....	30
4.2. Ressourcenverbrauch.....	32
4.2.1. BEV-Leitungssatz.....	34
4.2.2. Ottomotor-Leitungssatz .....	35
4.3. Treibhausgaspotential.....	35
4.3.1. BEV-Leitungssatz.....	35
4.3.2. Ottomotor-Leitungssatz .....	39
4.3.3. Vergleich der GWP-Ergebnisse für Kupfer mit Literaturwerten .....	42
4.4. Versauerungspotential.....	43

4.4.1.	BEV-Leitungssatz.....	43
4.4.2.	Ottomotor-Leitungssatz .....	46
4.4.3.	Vergleich der AP-Ergebnisse für Kupfer mit Literaturwerten .....	49
4.5.	Erneuerbarer Primärenergieverbrauch (CED – renewable).....	49
4.5.1.	BEV-Leitungssatz.....	49
4.5.2.	Ottomotor-Leitungssatz .....	52
4.6.	Nicht-Erneuerbarer Primärenergieverbrauch (CED – fossil) .....	55
4.6.1.	BEV-Leitungssatz.....	55
4.6.2.	Ottomotor-Leitungssatz .....	58
4.6.3.	Vergleich der CED-Ergebnisse für Kupfer mit der Literatur (CED renewable + CED fossil) 62	
4.7.	Sensitivitätsanalyse „Best-Case“ .....	63
4.7.1.	BEV-Leitungssatz.....	63
4.7.2.	Ottomotor-Leitungssatz .....	66
4.7.3.	Interpretation der Sensitivitätsanalyse „Best Case“ .....	69
4.8.	Sensitivitätsanalyse „Worst-Case“ .....	69
4.8.1.	BEV-Leitungssatz.....	70
4.8.2.	Ottomotor-Leitungssatz .....	72
4.8.3.	Interpretation der Sensitivitätsanalyse „Worst Case“ .....	75
5.	Fazit.....	76
	Literaturverzeichnis.....	78
	Anhang.....	83



## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Wirkungsfaktoren für die Treibhausgaswirksamkeit (GWP-100) für ausgewählte Treibhausgase nach [IPCC 2021].....	16
Tabelle 2: Definierte Werkstoffgruppen und übergeordnete Materialgruppen .....	19
Tabelle 3: Stückliste der Hauptwerkstoffe (Gesamtmasse > 95%) im BEV-Leitungssatz .....	20
Tabelle 4: Stückliste aggregierter Werkstoffe (Gesamtmasse < 5%) im BEV-Leitungssatz.....	21
Tabelle 5: Stückliste der Hauptwerkstoffe (Gesamtmasse > 95%) im Ottomotor-Leitungssatz .....	22
Tabelle 6: Stückliste aggregierter Werkstoffe (Gesamtmasse < 5%) im Ottomotor-Leitungssatz.....	23
Tabelle 7: Absolute Ergebnisse der Werkstoffherstellung aller Wirkungskategorien des BEV-Leitungssatzes .....	29
Tabelle 8: Absolute Ergebnisse der Werkstoffherstellung aller Wirkungskategorien des Ottomotor-Leitungssatzes .....	31
Tabelle 9: Absoluter Materialbedarf für den BEV-Leitungssatz und den Ottomotor-Leitungssatz.....	33



## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Beispielhafter Hochvolt-Teilleitungssatz mit Ladebuchse im Neuzustand (Foto: N. Langmaack).....	13
Abbildung 2: Beispielhafter Niedervolt-Teilleitungssatz eines Motorkabelbaums am End-of-Life (Foto: N. Langmaack).....	14
Abbildung 3: Lebenszyklusphasen von Kfz-Leitungssätzen (Cradle-to-cradle).....	15
Abbildung 4: Übersicht von Vordergrundprozessen in allen Lebenszyklusphasen .....	15
Abbildung 5: Fertigungsprozess von Kabelbäumen nach [Abouljalil & Amrani 2020] .....	26
Abbildung 6: Relative Ergebnisse der Werkstoffherstellung aller Wirkungskategorien des BEV-Leitungssatzes .....	30
Abbildung 7: Relative Ergebnisse der Werkstoffherstellung aller Wirkungskategorien des Ottomotor-Leitungssatzes .....	32
Abbildung 8: Relativer Materialbedarf für den BEV-Leitungssatz und Ottomotor-Leitungssatz (gesamt) ....	34
Abbildung 9: Relativer Materialbedarf für den BEV-Leitungssatz (nach Materialgruppe).....	34
Abbildung 10: Relativer Materialbedarf für den Ottomotor-Leitungssatz (nach Materialgruppe).....	35
Abbildung 11: Ergebnis des Treibhausgaspotentials des BEV-Leitungssatzes über den gesamten Lebenszyklus .....	36
Abbildung 12: Ergebnis Anteile des Treibhausgaspotentials der Werkstoffherstellung des BEV-Leitungssatzes nach Materialkategorien.....	37
Abbildung 13: Ergebnis der Anteile des Treibhausgaspotentials der Werkstoffherstellung des BEV-Leitungssatzes nach Materialgruppen (detailliert) .....	37
Abbildung 14: Spezifisches Treibhausgaspotential der Materialien im BEV-Leitungssatz (kg CO <sub>2</sub> -Eq / kg Material).....	38
Abbildung 15: Ergebnisse des Treibhausgaspotentials aus dem EoL des BEV-Leitungssatzes .....	38
Abbildung 16: Ergebnis des Treibhausgaspotentials des Ottomotor-Leitungssatzes über den gesamten Lebenszyklus .....	39
Abbildung 17: Ergebnis der Anteile des Treibhausgaspotentials der Werkstoffherstellung des Ottomotor-Leitungssatzes nach Materialkategorien.....	40
Abbildung 18: Ergebnis der Anteile des Treibhausgaspotentials der Werkstoffherstellung des Ottomotor-Leitungssatzes nach Materialgruppen (detailliert) .....	40
Abbildung 19: Spezifisches Treibhausgaspotential der Materialien im Ottomotor-Leitungssatz (kg CO <sub>2</sub> -Eq / kg Material) .....	41
Abbildung 20: Ergebnisse des Treibhausgaspotentials aus dem EoL des Ottomotors .....	41
Abbildung 21: Vergleich der GWP-Ergebnisse für Kupfer mit den Ergebnissen der Literaturlauswertung nach [Sanjuan-Delmás et al. 2022] (kg CO <sub>2</sub> -Eq / kg Material).....	42
Abbildung 22: Ergebnis des Versauerungspotentials des BEV-Leitungssatzes über den gesamten Lebenszyklus .....	43
Abbildung 23: Ergebnis der Anteile des Versauerungspotentials der Werkstoffherstellung des BEV-Leitungssatzes nach Materialkategorie .....	44

Abbildung 24: Ergebnis der Anteile des Versauerungspotentials der Werkstoffherstellung des BEV-Leitungssatzes nach Materialgruppe (detailliert)..... 44

Abbildung 25: Spezifisches Versauerungspotential der Materialien im BEV-Leitungssatz (kg SO<sub>2</sub>-Eq / kg Material)..... 45

Abbildung 26: Ergebnisse des Versauerungspotentials aus dem EoL des BEV-Leitungssatzes..... 45

Abbildung 27: Ergebnis des Versauerungspotentials des Ottomotor-Leitungssatzes über den gesamten Lebenszyklus..... 46

Abbildung 28: Ergebnis der Anteile des Versauerungspotentials der Werkstoffherstellung des Ottomotor-Leitungssatzes nach Materialkategorie ..... 47

Abbildung 29: Ergebnis der Anteile des Versauerungspotentials der Werkstoffherstellung des Ottomotor-Leitungssatzes nach Materialgruppe (detailliert)..... 47

Abbildung 30: Spezifisches Versauerungspotential der Materialien im Ottomotor-Leitungssatz (kg SO<sub>2</sub>-Eq / kg Material) ..... 48

Abbildung 31: Ergebnisse des Versauerungspotentials aus dem EoL des Ottomotor-Leitungssatzes ..... 48

Abbildung 32: Vergleich der AP-Ergebnisse für Kupfer mit Literaturwerten nach [Dong et al. 2020], [International Copper Association 2021] und [Sanjuan-Delmás et al. 2022] (kg SO<sub>2</sub>-Eq / kg Material) ..... 49

Abbildung 33: Ergebnis des Erneuerbaren Primärenergieverbrauchs des BEV-Leitungssatzes über den gesamten Lebenszyklus..... 50

Abbildung 34: Ergebnis der Anteile des Erneuerbaren Primärenergieverbrauchs der Werkstoffherstellung des BEV-Leitungssatzes nach Materialkategorie ..... 50

Abbildung 35: Ergebnis der Anteile des Erneuerbaren Primärenergieverbrauchs der Werkstoffherstellung des BEV-Leitungssatzes nach Materialgruppe (detailliert)..... 51

Abbildung 36: Spezifischer erneuerbarer Primärenergieverbrauch der Materialien im BEV-Leitungssatz (MJ / kg Material)..... 51

Abbildung 37: Ergebnis des Erneuerbaren Primärenergieverbrauchs aus dem EoL des BEV-Leitungssatz 52

Abbildung 38: Ergebnis des Erneuerbaren Primärenergieverbrauchs des Ottomotor-Leitungssatzes über den gesamten Lebenszyklus..... 52

Abbildung 39: Ergebnis der Anteile des Erneuerbaren Primärenergieverbrauchs der Werkstoffherstellung des Ottomotor-Leitungssatzes nach Materialkategorie..... 53

Abbildung 40: Ergebnis der Anteile des Erneuerbaren Primärenergieverbrauchs der Werkstoffherstellung des Ottomotor-Leitungssatzes nach Materialgruppe (detailliert) ..... 54

Abbildung 41: Spezifischer erneuerbarer Primärenergieverbrauch der Materialien im Ottomotor-Leitungssatz (MJ / kg Material)..... 54

Abbildung 42: Ergebnis des Erneuerbaren Primärenergieverbrauchs aus dem EoL des Ottomotor-Leitungssatzes ..... 55

Abbildung 43: Ergebnis des Nicht-Erneuerbaren Primärenergieverbrauchs des BEV-Leitungssatzes über den gesamten Lebenszyklus..... 56

Abbildung 44: Ergebnis der Anteile des Nicht-Erneuerbaren Primärenergieverbrauchs der Werkstoffherstellung des BEV-Leitungssatzes nach Materialkategorie..... 56

Abbildung 45: Ergebnis der Anteile des Nicht-Erneuerbaren Primärenergieverbrauchs der Werkstoffherstellung des BEV-Leitungssatzes nach Materialgruppe ..... 57

Abbildung 46: Spezifischer nicht-erneuerbarer Primärenergieverbrauchs der Materialien im BEV-Leitungssatz (MJ / kg Material)..... 57

Abbildung 47: Ergebnis des Nicht-Erneuerbaren Primärenergieverbrauchs aus dem EoL des BEV-Leitungssatz ..... 58

Abbildung 48: Ergebnis des Nicht-Erneuerbaren Primärenergieverbrauchs des Ottomotor-Leitungssatzes über den gesamten Lebenszyklus..... 58

Abbildung 49: Ergebnis der Anteile des Nicht-Erneuerbaren Primärenergieverbrauchs der Werkstoffherstellung des Ottomotor-Leitungssatzes nach Materialkategorie ..... 59

Abbildung 50: Ergebnis der Anteile des Nicht-Erneuerbaren Primärenergieverbrauchs der Werkstoffherstellung des Ottomotor-Leitungssatzes nach Materialgruppe ..... 60

Abbildung 51: Spezifischer nicht-erneuerbarer Primärenergieverbrauchs der Materialien im Ottomotor-Leitungssatz (MJ / kg Material)..... 60

Abbildung 52: Ergebnis des Nicht-Erneuerbaren Primärenergieverbrauchs aus dem EoL des Ottomotor-Leitungssatzes ..... 61

Abbildung 53: Vergleich der CED-Ergebnisse für Kupfer mit den Ergebnissen der Literaturlauswertung nach [Sanjuan-Delmás et al. 2022] (MJ / kg Material) ..... 62

Abbildung 54: Ergebnis des Treibhausgaspotentials des BEV-Leitungssatzes mit Sekundärkupfer über den gesamten Lebenszyklus..... 63

Abbildung 55: Ergebnis des Versauerungspotentials des BEV-Leitungssatzes mit Sekundärkupfer über den gesamten Lebenszyklus..... 64

Abbildung 56: Ergebnis des Erneuerbaren Primärenergieverbrauchs des BEV-Leitungssatzes mit Sekundärkupfer über den gesamten Lebenszyklus ..... 65

Abbildung 57: Ergebnis des Nicht-Erneuerbaren Primärenergieverbrauchs des BEV-Leitungssatzes mit Sekundärkupfer über den gesamten Lebenszyklus ..... 65

Abbildung 58: Ergebnis des Treibhausgaspotentials des Ottomotor-Leitungssatzes mit Sekundärkupfer über den gesamten Lebenszyklus..... 66

Abbildung 59: Ergebnis des Versauerungspotentials des Ottomotor-Leitungssatzes mit Sekundärkupfer über den gesamten Lebenszyklus..... 67

Abbildung 60: Ergebnis des Erneuerbaren Primärenergieverbrauchs des Ottomotor-Leitungssatzes mit Sekundärkupfer über den gesamten Lebenszyklus ..... 68

Abbildung 61: Ergebnis des Nicht-Erneuerbaren Primärenergieverbrauchs des Ottomotor-Leitungssatzes mit Sekundärkupfer über den gesamten Lebenszyklus..... 68

Abbildung 62: Ergebnis des Treibhausgaspotentials des BEV-Leitungssatzes ohne Recycling über den gesamten Lebenszyklus..... 70

Abbildung 63: Ergebnis des Versauerungspotentials des BEV-Leitungssatzes ohne Recycling über den gesamten Lebenszyklus..... 71

Abbildung 64: Ergebnis des Erneuerbaren Primärenergieverbrauchs des BEV-Leitungssatzes ohne Recycling über den gesamten Lebenszyklus ..... 72

Abbildung 65: Ergebnis des Nicht-Erneuerbaren Primärenergieverbrauchs des BEV-Leitungssatzes ohne Recycling über den gesamten Lebenszyklus ..... 72

Abbildung 66: Ergebnis des Treibhausgaspotentials des Ottomotor-Leitungssatzes ohne Recycling über den gesamten Lebenszyklus ..... 73

Abbildung 67: Ergebnis des Versauerungspotentials des Ottomotor-Leitungssatzes ohne Recycling über den gesamten Lebenszyklus ..... 73

Abbildung 68: Ergebnis des Erneuerbaren Primärenergieverbrauchs des Ottomotor-Leitungssatzes ohne Recycling über den gesamten Lebenszyklus ..... 74

Abbildung 69: Ergebnis des Nicht-Erneuerbaren Primärenergieverbrauchs des Ottomotor-Leitungssatzes ohne Recycling über den gesamten Lebenszyklus ..... 74



## Abkürzungsverzeichnis

AC	Alternating Current (Wechselstrom)
AP	Acidification Potential (Versauerungspotential)
BEV	Battery Electric Vehicle (batterie-elektrisches Fahrzeug)
CED	Cumulative Energy Demand (kumulierter Energieaufwand)
DC	Direct Current (Gleichstrom)
EEA	Ethylen-Ethyl-Acrylat
EoL	End of Life
EPDM	Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk
GLO	Global (ecoinvent code)
GWP	Global warming potential (Treibhausgaspotential)
HDPE	High-Density-Polyethylen
HHV	Higher heating value
ICEV	Internal Combustion Engine Vehicle (Fahrzeug mit Verbrennungsmotor)
Kfz	Kraftfahrzeug
LBST	Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH
LCA	Life Cycle Analysis (Lebenszyklusanalyse)
OHLF	Open Hybrid LabFactory e.V.
PA	Polyamid
PBT	Polybutadien
PCF	Product Carbon Footprint
PE	Polyethylen
PES	Polyester
PET	Polyethylenterephthalat
Pkw	Personenkraftwagen
PVC	Polyvinylchlorid
RER	Europe (ecoinvent code)
THG	Treibhausgas

## 1. EINLEITUNG

Der Verkehrssektor trägt sowohl in Deutschland als auch global maßgeblich zu ökologischen Belastungen bei. Eine zunehmende Elektrifizierung von Kraftfahrzeugen (Kfz) führt zu einer Reduktion von Emissionen durch fossile Brennstoffe, geht jedoch auch mit einem hohen Rohstoffbedarf und entsprechenden Umweltauswirkungen einher. Um den ökologischen Fußabdruck von Verkehrsmitteln weiter zu reduzieren, müssen auch deren Wertstoffketten untersucht und Einsparungspotentiale identifiziert werden. Eine der zu untersuchenden Komponenten ist der Leitungssatz von Automobilen, welcher neben verschiedenen Kunststofffraktionen und weiteren Materialien einen hohen Anteil von Kupfer enthält.

Nach einigen Schätzungen reichen die weltweiten Kupfer-Reserven bei gleichbleibender Förderung etwa 40 Jahre. Gleichzeitig steigt der weltweite Bedarf an Kupfer an, zum Teil auch angetrieben durch den Zubau an Stromverteilungs-Infrastruktur. Kupfer wird darüber hinaus benötigt für Kupferkabel und Elektromotoren in Hybrid-Fahrzeugen, deren Marktdurchdringung steigt [Sprovieri 2014]. Dazu kommt inzwischen auch der Kupferbedarf rein batterie-elektrischer Fahrzeuge sowie der zunehmende Kupferbedarf für die Einbindung von Komfort-Einrichtungen (z.B. elektrisch verstellbare Sitze) und IT-Komponenten in Fahrzeugen sowohl mit Verbrennungsmotor als auch mit Elektromotor.

Eine Literaturrecherche ergab, dass in den letzten sieben Jahren drei LCA-Studien zu Kfz-Leitungssätzen veröffentlicht wurden, darunter eine LCA-Studie [Abouljalil & Amrani 2020], die sich mit der Fertigung von Kfz-Kabelsätzen in Marokko befasste. Eine weitere Studie [Abouljalil & Amrani 2022] hatte einen Vergleich verschiedener Wirkungsabschätzungsmethoden bei der Erstellung von Lebenszyklusanalysen für Kfz-Leitungssätzen zum Inhalt und eine weitere LCA [Villanueva-Rey et al. 2018] betrachtete eine innovativen Kabellösung für Kfz-Leitungssätze.

Keine der oben genannten LCA-Studien hat bisher den gesamten Lebenszyklus eines Kfz-Leitungssatzes umfassend betrachtet und keine LCA-Studie hat Kabelsätze für batterieelektrisch betriebene Fahrzeuge (BEV) und Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren (ICEV) gegenübergestellt.

Im Rahmen des Projekts „Transformations-Hub Leitungssatz“ soll die Leitungssatzbranche bei Transformationsprozessen unterstützt werden. Das Projektkonsortium besteht aus ARENA2026, Bayern-Innovativ und dem Open Hybrid LabFactory e.V. (OHLF) [OHLF 2024].

Die vorliegende Studie stellt eine Lebenszyklusanalyse (LCA) für automobiler Leitungssätze dar, welche von der Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH (LBST) im Auftrag von OHLF erstellt worden ist. Dabei werden sowohl ein Leitungssatz eines konventionell betriebenen sowie eines elektrisch angetriebenen Pkw betrachtet. Hierfür wurden Primärdaten eines europäischen Leitungssatz-Konfektionärs herangezogen, welcher beide Produkte herstellt.

## 2. ZIEL UND UNTERSUCHUNGSRAHMEN

Die Lebenszyklusanalyse (Life Cycle Analysis – LCA) erfolgt nach dem in [ISO 14040 : 2006] und [ISO 14044 : 2006] beschriebenen Vorgehen und besteht aus vier Phasen:

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

Die Datenerhebung für die Sachbilanz erfolgt auf Basis von Daten des Konfektionärs und aus Literaturrechen. Die Modellierung und Berechnung der LCA erfolgt mit der Software openLCA 2.2 [Ciroth 2007] und der Datenbank ecoinvent v.3.10 [Wernet et al. 2016].

Es werden die Wirkungskategorien Ressourcenverbrauch, Treibhauseffekt, Versauerung, Primärenergieverbrauch und betrachtet. Für die Auswahl der Kategorien liegen vor dem Hintergrund der Zielsetzung und der Zielgruppe (siehe Abschnitt 2.1) drei Gründe vor. Erstens ist das Treibhausgaspotential von Produkten für die Treibhausgasminderungsziele Deutschlands und Europas sowie für entsprechende Berichtspflichten von Unternehmen von hoher Relevanz. Zweitens wird für die betrachteten Produkte, welche jeweils einen hohen Anteil an Kupfer enthalten, im Vergleich zu anderen Umweltauswirkungen eine besonders hohe Versauerungswirkung erwartet. Drittens ermöglicht eine Analyse des Primärenergie- und Ressourcenbedarfs ein besseres Verständnis der Produktzusammensetzung und Prozessketten. Dadurch wird auch eine Identifikation von Ineffizienzen und Risiken entlang der Wertschöpfungskette ermöglicht, wie z.B. dem Einsatz von kritischen und strategischen Rohstoffen nach Verordnung (EU) 2024/1252 [EU 2024].

### 2.1. Untersuchungsziel

Die Studie verfolgt folgende Ziele:

- Erstellung einer LCA nach ISO 14040/44 für zwei Kfz-Leitungssätze mit Wirkungsabschätzung der Kategorien Ressourcenbedarf, Treibhauspotential, Versauerung und Primärenergieverbrauch
- Aufbau eines Verständnisses über die Produktzusammensetzung und Prozessketten basierend auf Projektdaten von Konfektionär und einer Literaturrecherche
- Die Identifikation von Datenlücken
- Die Identifikation von ökologischen Hotspots (bei Komponenten und Prozessen) und die Ableitung von Handlungsempfehlungen

Die Zielgruppe sind hierbei deutsche Unternehmen aus der Leitungssatz-Industrie (Automobilhersteller, Zulieferer der Automobilbranche, Leitungssatz-Konfektionäre, Material- und Komponentenproduzenten der Branche). Es ist eine Veröffentlichung vorgesehen, welche als Basis für Schulungen zum Vermitteln des Vorgehens bei der Erstellung einer Lebenszyklusanalyse dient. Die Ergebnisse der LCA können allerdings nicht für vergleichende Analysen verwendet werden, da sich beide vorliegenden Datensätze auf Teilleitungssätze beziehen, die nicht die gesamte Verkabelung eines Fahrzeugs abbilden.

## 2.2. Untersuchungsrahmen

### 2.2.1. Produktsysteme und Funktionen

Leitungssätze, oft auch als „Kabelbäume“ oder „Kabelsätze“ bezeichnet, verbinden alle elektrischen und elektronischen Komponenten in einem Fahrzeug [Open Hybrid LabFactory e.V. 2022].

Als typischer Teilleitungssatz für ein Elektrofahrzeug wird der Abschnitt von der Ladebuchse zur Hochvoltbatterie und dem Ladegerät betrachtet. Dieser Kabelbaum umfasst die Ladebuchse selbst, zwei Hochvoltleitungen mit großem Querschnitt für die DC-Schnellladung, eine mehradrige Hochvoltleitung für die AC-Versorgung des Ladegerätes, diverse Steuerleitungen mit geringeren Querschnitten sowie unterschiedliche Hoch- und Niedervoltsteckverbinder (Vgl. Abbildung 1). Das Gesamtgewicht der Baugruppe beträgt knapp 6 kg. Dieses Produkt wird in dieser LCA „BEV-Leitungssatz“ genannt.



Abbildung 1: Beispielhafter Hochvolt-Teilleitungssatz mit Ladebuchse im Neuzustand (Foto: N. Langmaack)

Zweiter Betrachtungsgegenstand der Studie ist der Motorkabelbaum eines Ottomotors. Dieser umfasst eine Vielzahl an Niedervoltsteuerleitungen und ist nahezu vollständig mit Klebebändern umwickelt. Hinzu kommen diverse Steckverbinder, Kabelschuhe sowie einige kleine Kabelkanäle und Schutzschläuche (Vgl. Abbildung 2). Sein Gesamtgewicht beträgt etwa 2 kg. Der Teilleitungssatz des Motorkabelbaums wird in dieser LCA „Ottomotor-Leitungssatz“ genannt.

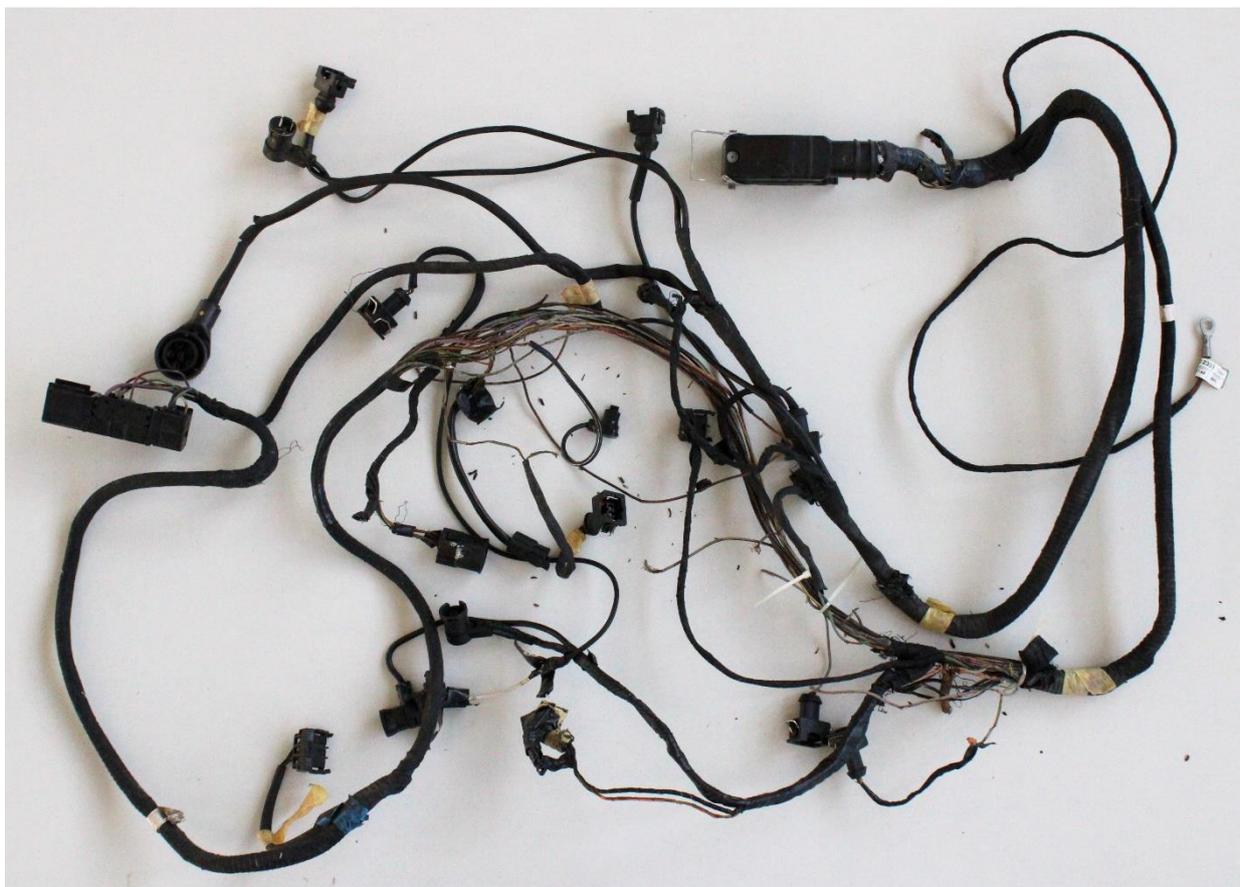


Abbildung 2: Beispielhafter Niedervolt-Teilungssatz eines Motorkabelbaums am End-of-Life (Foto: N. Langmaack)

### 2.2.2. Funktionelle Einheit

Da es sich bei den beiden betrachteten Produkten jeweils um Teilleitungssätze und nicht um die vollständigen Steck- und Kabelverbindungen eines Kfz handelt, lässt sich ihre Funktion nicht genau quantifizieren (z.B. in gefahrenen Kilometern eines Pkw). Zu Qualitäts- bzw. Leistungsunterschieden der Produkte liegen keine Informationen vor. Eine Wartung oder ein Austausch von Kabelbäumen findet während der Nutzung von Fahrzeugen nur in Ausnahmefällen statt, weshalb angenommen wird, dass nur jeweils ein Leitungssatz während der Lebensdauer eines Kfz zum Einsatz kommt. Entsprechend wird der Referenzfluss „ein (Teil)-Leitungssatz eines Pkw“ als funktionelle Einheit definiert. Dies ermöglicht die Durchführung der LCA für beide betrachteten Produkte, wenngleich diese nicht direkt miteinander vergleichbar sind. Eine Betrachtung der Nutzungsphase ist ausgeschlossen.

### 2.2.3. Systemgrenzen

Die Lebenszyklusanalyse umfasst die Produktion der Rohmaterialien, deren Verarbeitung und Transport zum Hersteller des Kfz-Leitungssatz, den Transport zum Fahrzeughersteller sowie Entsorgung und Recycling (Abbildung 3). Die Nutzung im Kfz (Pkw) wird nicht betrachtet. Es handelt sich um eine Analyse nach den Systemgrenzen Cradle-to-cradle, bei der über den Lebenszyklus eines einzelnen Produkts hinaus eine Gutschrift durch das Recycling modelliert wird. Es wird also angenommen, dass rezyklierte Materialien wieder für die Werkstoffherstellung eines Neuprodukts verwendet werden. Im Vergleich hierzu würde ein Analyse nach Cradle-to-gate nur die Umweltauswirkungen bis zum Ende der Produktfertigung

betrachten und nach Cradle-to-grave bis zum End-of-Life, ohne Berücksichtigung einer Gutschrift durch das Recycling.

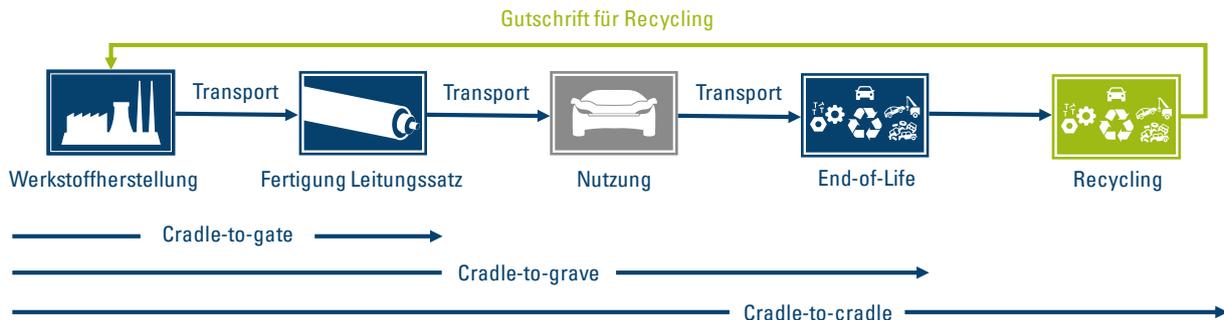


Abbildung 3: Lebenszyklusphasen von Kfz-Leitungssätzen (Cradle-to-cradle)

Zu Umweltauswirkungen des verbauten Leitungssatzes im Kfz während der Nutzung liegen keine Daten vor, weshalb diese Lebenszyklusphase im Folgenden nicht aufgeführt wird.

Es werden keine Abschneidekriterien definiert, mit Ausnahme der Aufteilung aller Werkstoffe in Hauptwerkstoffe und zu Werkstoffgruppen aggregierte Produktbestandteile, abhängig vom Massenanteil in den jeweiligen Kabelsätzen.

Da in der Datenbank ecoinvent nur generische Prozesse für die Herstellung und das End-of-Life von Kabelprodukten zur Verfügung stehen, ist eine eigene Modellierung der Werkstoffherstellung aus den Rohstoffen, der Fertigung der Leitungssätze sowie des End-of-Life im Rahmen dieser Studie notwendig. Abbildung 4 stellt eine Übersicht der Vordergrundprozesse, also aller selbst modellierten Prozesse auf Basis von Primär- und Sekundärdaten dar.

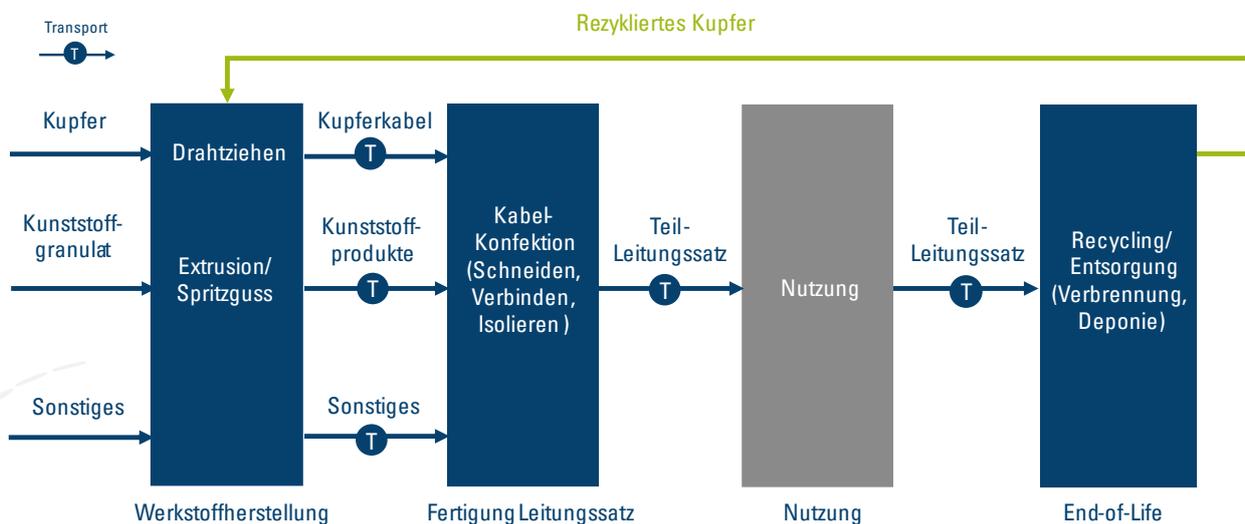


Abbildung 4: Übersicht von Vordergrundprozessen in allen Lebenszyklusphasen

### 2.2.4. Allokationsverfahren

In den Vordergrundprozessen werden alle Umweltauswirkungen dem Hauptprodukt zugewiesen, nachdem es keine Nebenprodukte gibt. Entsprechend wurde keine Allokation durchgeführt. Bei Hintergrundprozessen mit mehreren Produkten erfolgt die Allokation gemäß der ecoinvent-Datensätze. Die Allokation des End-of-Life (EoL) erfolgt entsprechend dem ecoinvent-Modell mit Cut-off

(Umweltauswirkungen durch Recycling werden dem Nachfolgeprodukt zugeordnet) mit Ausnahme von Recycling von Kupferkabeln, bei denen eine Gutschrift für dieses Produkt berücksichtigt wird.

### 2.2.5. Wirkungsabschätzungsmethoden

Für die Berechnung des Treibhausgaspotentials der verschiedenen Treibhausgase (THG) werden die Emissionswerte des Sixth Assessment Report des IPCC [IPCC 2021] für einen Betrachtungszeitraum von 100 Jahren (GWP 100) herangezogen (Tabelle 1).

Tabelle 1: Wirkungsfaktoren für die Treibhausgaswirksamkeit (GWP-100) für ausgewählte Treibhausgase nach [IPCC 2021]

Treibhausgas	GWP (g CO <sub>2</sub> -Eq/g)
CO <sub>2</sub>	1
CH <sub>4</sub>	27*
N <sub>2</sub> O	273
SF <sub>6</sub>	24300

\*Ohne Berücksichtigung des im Methan gebundenen Kohlenstoffs, um zwischen fossilem und nicht-fossilem Methan unterscheiden zu können

Die Versauerung wird nach der in [Universität Leiden 2016] beschriebenen Methode CML v.4.8 2016 berechnet und in SO<sub>2</sub>-Äquivalent angegeben. Diese bezieht sich auf das durchschnittliche Versauerungspotential in Europa.

Der kumulierte Energieaufwand (Cumulated Energy Demand – CED) bezieht sich auf den oberen Heizwert (H<sub>s</sub>) nach [VDI 2012].

Für den Ressourcenverbrauch wird keine Wirkungsabschätzung mit einer spezifischen Methode und Charakterisierungsfaktoren durchgeführt, sondern stattdessen eine Materialbilanz aufgestellt. Dies ermöglicht eine Übersicht über die Materialzusammensetzung der Produkte und eine Identifizierung kritischer und strategischer Rohstoffe nach Verordnung (EU) 2024/1252 [EU 2024].

Die Ergebnisse und deren Auswertung werden in Abschnitt 4 dargestellt und beschrieben.

### 2.2.6. Anforderungen an die Datenqualität

Da es ein Ziel der Studie ist, ein Verständnis über die Zusammensetzung und Prozessketten der beiden betrachteten Produkte aufzubauen, sind hier vor allem möglichst repräsentative Sachbilanzdaten für die enthaltenen Materialien sowie für die Verarbeitungsschritte vor der Nutzung erforderlich. Entsprechende Primärdaten sollten möglichst aktuell sein. Nachdem die Zielgruppe deutsche Unternehmen umfasst, sind zudem v.a. deutschland- bzw. europaspezifische Daten zu verwenden.

### 2.2.7. Datenverfügbarkeit und Datenqualität

Primärdaten eines europäischen Leitungssatz-Konfektionärs, welche für firmeninterne Analysen im Jahr 2023 erhoben worden sind, liegen in Form von Stücklisten für die Bestandteile (Werkstoffe) der beiden Leitungssätze vor. Diese sind sehr genau, umfangreich, aktuell und spezifisch für diesen Hersteller. Die meisten Werkstoffe bzw. Materialien der Stücklisten werden von Zulieferern aus Europa bezogen.

Nachdem diese Daten sowohl für die Sachbilanz der Werkstoffherstellung als auch des End-of-Life verwendet werden, ist der Detailgrad dieser beiden Lebenszyklusphasen sehr hoch.

Für die Fertigung und den Transport des Leitungssatzes liegen dem Konfektionär Emissionswerte vor, die im Jahr 2023 für einen nicht veröffentlichten Product Carbon Footprint (PCF) erhoben worden sind. Aus Vertraulichkeitsgründen wurden vom Hersteller nur aggregierte Emissionswerte als kg CO<sub>2eq</sub> pro Teilleitungssatz für die Erstellung der vorliegenden Studie zur Verfügung gestellt. Entsprechend sind die Daten zwar aktuell und spezifisch für den Kabelsatz-Konfektionär, ermöglichen jedoch nur eine oberflächliche Analyse dieser Lebenszyklusphasen. Nachdem auch die Emissionsquellen bzw. verwendeten Energieträger der einzelnen Fertigungsschritte nicht bekannt sind, wurde Strom aus dem deutschen Strommix als alleinige Quelle angenommen (Vgl. Abschnitt 3.2.1). Es wird nicht erwartet, dass bei den Konfektionierungsprozessen weitere Emissionsquellen auftreten. Unterstützende Prozesse wie etwaige Instandhaltungsmaßnahmen von Maschinen der Produktion, Verpackung und Lagerung der Produkte sowie die Behandlung von Abfällen werden nicht berücksichtigt.

Detaillierte Literaturdaten zu dem Lebenszyklus von Kfz-Kabelbäumen liegen nicht vor. Auf Basis von öffentlich verfügbaren Daten wurde jedoch die Materialzusammensetzung der Werkstoffe aus der Stückliste des Herstellers erarbeitet (Vgl. Anhang A. 3 und A. 4). Die daraus resultierende Materialbilanz wurde in Microsoft Excel entsprechenden Prozessbezeichnungen aus der Datenbankecoinvent zugeordnet („Mapping“) und daraufhin in openLCA eingefügt. Für die Fälle, in denen keine passenden Datensätze verfügbar waren, sind möglichst verwandte Prozesse („Proxys“) ausgewählt worden. Daraus ergeben sich teilweise Unschärfen. Im folgenden Abschnitt wird im Detail auf die Einschränkungen und Unsicherheiten der Modellierung der Sachbilanz eingegangen.

### 2.2.8. Einschränkungen und Unsicherheiten

Geringe Unschärfen bei der Modellierung der Werkstoffherstellung ergeben sich durch die Aggregation aller Werkstoffe zu Werkstoffgruppen, die nicht als Hauptwerkstoffe definiert sind. Die hat nur einen geringfügigen Einfluss auf die Ergebnisse, da mit Platin und Gold die Materialien mit den höchsten Umweltauswirkungen in den betrachteten Kategorien trotz generischer Modellierung in vollem Umfang berücksichtigt werden. Weitere geringfügige Unsicherheiten in dieser Lebenszyklusphase ergeben sich bei der Modellierung von Materialzusammensetzungen für das Mapping, welche auf Literaturrecherchen beruht. Die dabei vorgenommenen Vereinfachungen, wie die Vernachlässigung sehr geringer Werkstoffbestandteile, lassen ebenfalls nur einen sehr geringen Einfluss auf die Wirkungsabschätzung erwarten, da Stoffe mit hoher Umweltauswirkung wie Blei z.B. bei CuPb1P<sup>1</sup> trotzdem berücksichtigt werden. Dasselbe gilt für die Vernachlässigung der Verarbeitung aller Werkstoffgruppen außer Kupferkabeln und Kunststoffen.

Unschärfen durch generische Sekundärdaten (z.B. Primärenergiebedarfe für Herstellung von Werkstoffen) haben einen höheren Einfluss auf die Berechnungsergebnisse. Für die Wirkungsabschätzung der Kupferherstellung zeigt eine Studie von [Sanjuan-Delmás et al. 2022] je nach verwendetem Datensatz und Berechnungssoftware Abweichungen von bis zu einem Faktor von 7,5 für bestimmte Wirkungskategorien. Dementsprechend wird für Kupfer, dem Hauptbestandteil der beiden Leitungssätze, in Abschnitt 4.7 eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Für die Sachbilanz des Silikonkautschuks ergeben sich Unsicherheiten

---

<sup>1</sup> Kupfer-Legierung mit einem Gehalt von 0,8-1,2% Blei (Pb) und 0,01-0,04% Phosphor (P)

vor allem durch den hohen Anteil an erneuerbarem Primärenergiebedarf für diesen Prozess (Vgl. Abschnitt 3.1.2).

Die Sachbilanz von Fertigung und Transport ist durch Umrechnung der vom Hersteller angegebenen Emissionswerte zu kWh und Tonnenkilometern basierend auf ecoinvent-Daten aufgestellt worden, was mit hohen Unsicherheiten verbunden ist. Der Einfluss auf die Gesamtergebnisse ist jedoch sehr gering (Vgl. Abschnitt 4).

Die vereinfachte Modellierung des EoL für Werkstoffgruppen statt für einzelne Werkstoffe und Unsicherheiten durch Annahmen zu Entsorgungsprozessen (Vgl. Abschnitt 3.4.2) lassen nur geringfügige Auswirkungen auf das Gesamtergebnis erwarten. Die Annahme einer Recyclingquote von 90% für Kupferkabel hat signifikante Auswirkungen auf die Wirkungsabschätzung, weshalb hierfür eine weitere Sensitivität in Abschnitt 4.8 betrachtet wird.

Auch bei der Wirkungsabschätzung treten methodenbedingte Unsicherheiten auf. Bei den verschiedenen Wirkungskategorien gibt es große Unterschiede bezüglich der Verfügbarkeit und der Qualität der Basisdaten.

Am zuverlässigsten ist die Wirkungsabschätzung von THG-Emissionen und Energieeinsatz (Unsicherheit  $\pm 10\%$ ). Die Emissionen von  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$  und Feinstaub hängen von den eingesetzten Brennstoffen, der Verbrennungstechnologie (z.B. Low- $\text{NO}_x$ -Brenner) und der Wirksamkeit der Abgasreinigung in den jeweiligen Produktionsprozessen ab (z.B. bei der Herstellung von Kupfer und Stahl). Daher ist die Datenbasis für die Berechnung von Versauerung und Eutrophierung weniger zuverlässig ( $\pm 30\%$ ) [Joliet et al. 2016]. Wenn die Region, aus der die eingesetzten Materialien (zum Beispiel Kupfer, Nickel, Stahl) bezogen wird, nicht bekannt ist, kann der Unterschied aufgrund unterschiedlicher Umweltstandards auch größer sein.

Es werden keine allgemeinen Abschneidekriterien für Prozesse festgelegt, die nur geringfügig zu Umweltauswirkungen beitragen, so lange Daten für diese Prozesse verfügbar sind.

### 2.2.9. Datenvalidierung

Eine Qualitätssicherung der Sachbilanz und der Wirkungsabschätzungsergebnisse wurde durch eine Überprüfung der Massenbilanz (Masse aller Inputs entspricht Masse aller Outputs) sowie durch ein internes Review des Berichts durch einen weiteren Mitarbeiter der LBST („4-Augen-Prinzip“) durchgeführt.

### 2.2.10. Critical Review

Der Bericht ist mit Microsoft Word geschrieben und Ergebnisse sind in Microsoft Excel dokumentiert und visualisiert. Für die Veröffentlichung der LCA ist nach ISO 14044 ein vorangehendes Critical Review durch eine Drittpartei notwendig. Dieses wurde von Februar bis März 2025 durch Frau Dr. Espinosa von TÜV SÜD nach ISO 14071 durchgeführt.

### 3. SACHBILANZ

#### 3.1. Werkstoffherstellung

Insgesamt sind im untersuchten BEV-Leitungssatz 203 und im Ottomotor-Leitungssatz 86 verschiedene Werkstoffe enthalten. Um den Aufwand für die Modellierung der Werkstoffherstellung zu begrenzen, sind die Hauptwerkstoffe mit dem höchsten Massenanteil im Detail modelliert, während die restlichen Bestandteile eines Kabelsatzes zu generischen Werkstoffgruppen zusammengefasst worden sind. Eine Übersicht aller definierten Werkstoffgruppen ist in Tabelle 2 aufgeführt.

Tabelle 2: Definierte Werkstoffgruppen und übergeordnete Materialgruppen

Materialgruppe	Werkstoffgruppe
Metall	Kupferkabel
	Kupferlegierungen
	Stahl
	Zink und Zinklegierungen
	Aluminium und Aluminiumlegierungen
	Zinn und Zinnlegierungen
	Silber und Silberlegierungen
	Nickel und Nickellegierungen
	Gold
	Siliziummetall
	Platin
Kunststoff	Elastomere / Elastomer-Verbunde
	gefüllte Thermoplaste
	ungefüllte Thermoplaste
	Schaumstoffe
Klebstoff/Farben	Kleber, Dichtstoffe
	Lacke
	Druckfarben / Tinten
Sonstiges	Textilien
	Gläser
	Halbleiter / Elektronik
	Unspezifische Beschichtungen

Als Hauptwerkstoffe für den BEV-Leitungssatz sind die ersten 26 Einträge der originalen Stückliste definiert, welche dort in absteigender Reihenfolge nach den höchsten Anteilen aufgeführt sind und in Summe etwa 95% der Gesamtmasse ausmachen. Für den Ottomotor-Leitungssatz sind es die ersten 34 Werkstoffe. Da manche Werkstoffe mit demselben Namen in der vom Kabelkonfektionär bereitgestellten Stückliste mehrmals aufgeführt sind, erfolgte eine anschließende Bereinigung der Liste, indem alle mehrfachen Einträge zusammengefasst und deren Gewichte addiert worden sind. Dementsprechend ergibt sich für die

Hauptwerkstoffe ein etwas höherer Anteil an der Gesamtmasse als 95%. Die bereinigten Stücklisten der Hauptwerkstoffe der Leitungssätze sind mit ihren zugeordneten Werkstoffgruppen in Tabelle 3 und Tabelle 5 abgebildet. Eine Übersicht der restlichen Materialmengen pro Werkstoffgruppe ist jeweils in Tabelle 4 und Tabelle 6 aufgeführt. Bei ein paar Einträgen wie PVC-P-KD20 und PVC-KD20 P handelt es sich um das gleiche Produkt, welches mit unterschiedlichen Bezeichnungen in der originalen Stückliste aufgeführt ist. Diese namensunterschiedlichen Einträge sind nicht zusammengefasst. Für die Verarbeitung der Werkstoffe werden Drahtziehen für Kupferkabel, Spritzguss für gefüllte Thermoplaste und Extrusion für gefüllte Thermoplaste und Elastomere angenommen. Die detaillierte Material-zusammensetzung alle Hauptwerkstoffe ist in den Anhängen A. 1 und A. 2 aufgeführt. Alle für die detaillierte Modellierung der Hauptwerkstoffe verwendeten ecoinvent-Datensätze sind in den Anhängen A. 3 und A. 4 angegeben.

Tabelle 3: Stückliste der Hauptwerkstoffe (Gesamtmasse > 95%) im BEV-Leitungssatz

Werkstoff	Werkstoffgruppe	Menge [g]	Anteil
Cu-ETP1	Kupferkabel	3403,6	57,53%
MQ	Elastomere / Elastomer-Verbunde	955,7	16,15%
PA6-GF30 (FR30)	gefüllte Thermoplaste	196,7	3,32%
PA66-GF30	gefüllte Thermoplaste	179,4	3,03%
PET	ungefüllte Thermoplaste	93,5	1,58%
CuPb1P	Kupferlegierungen	81,5	1,38%
PUR Flexible Integral Foam	Schaumstoffe	77,0	1,30%
PBT GF20	gefüllte Thermoplaste	75,9	1,28%
PVC-P-KD25	ungefüllte Thermoplaste	72,9	1,23%
CuZn37Pb2	Kupferlegierungen	72,2	1,22%
PES cloth 1	Textilien	62,1	1,05%
PA6-(GF10+GB20)	gefüllte Thermoplaste	58,7	0,99%
PA6-I-GF15	gefüllte Thermoplaste	38,2	0,64%
Cu-ETP	Kupferkabel	36,8	0,62%
High Copper Alloy	Kupferlegierungen	36,4	0,62%
65 (Hot rolled carbon steel strips)	Stahl	34,8	0,59%
Pressure sensitive adhesive 3	Kleber, Dichtstoffe	33,4	0,56%
PVC-P-KD20	ungefüllte Thermoplaste	31,4	0,53%
PVC-KD20 P	ungefüllte Thermoplaste	27,9	0,47%
PA6-GF15	gefüllte Thermoplaste	24,5	0,41%
PA66	ungefüllte Thermoplaste	20,0	0,34%
X5CrNi18-10	Stahl	18,4	0,31%
PA66-I	ungefüllte Thermoplaste	18,4	0,31%
PA66-I GF25 FR(52)	gefüllte Thermoplaste	17,4	0,29%
PA66-GF20	gefüllte Thermoplaste	16,1	0,27%
Cu-PHC	Kupferlegierungen	12,8	0,22%
<b>SUMME</b>			<b>96,26%</b>

Tabelle 4: Stückliste aggregierter Werkstoffe (Gesamtmasse &lt; 5%) im BEV-Leitungssatz

Werkstoff	Werkstoffgruppe	Menge [g]	Anteil
Weitere Elastomere / elastomere Verbunde	Elastomere / elastomere Verbunde	58,1	0,98%
Weitere gefüllte Thermoplaste	gefüllte Thermoplaste	48,3	0,82%
Weitere ungefüllte Thermoplaste	ungefüllte Thermoplaste	16,4	0,28%
Weitere Kupferlegierungen	Kupferlegierungen	20,1	0,34%
Weiterer Stahl	Stahl	30,4	0,51%
Weitere Schaumstoffe	Schaumstoffe	1,2	0,02%
Weitere Textilien	Textilien	4,8	0,08%
Weitere Kleber, Dichtstoffe	Kleber, Dichtstoffe	15,1	0,26%
Zink und Zinklegierungen	Zink und Zinklegierungen	9,1	0,15%
Aluminium und Aluminiumlegierungen	Aluminium und Aluminiumlegierungen	8,5	0,14%
Halbleiter / Elektronik	Halbleiter / Elektronik	6,2	0,10%
Zinn und Zinnlegierungen	Zinn und Zinnlegierungen	1,5	0,02%
Silber und Silberlegierungen	Silber und Silberlegierungen	0,7	0,01%
Nickel und Nickellegierungen	Nickel und Nickellegierungen	0,7	0,01%
Lacke	Lacke	0,02	0,0003%
Unspezifische Beschichtungen	Unspezifische Beschichtungen	0,01	0,0001%
Druckfarben / Tinten	Druckfarben / Tinten	0,01	0,0001%
Gold	Gold	0,002	0,00004%
Siliziummetall	Siliziummetall	0,001	0,00002%
Gläser	Gläser	0,001	0,00002%
Platin	Platin	0,0001	0,000001%
<b>SUMME</b>			<b>3,74%</b>

Tabelle 5: Stückliste der Hauptwerkstoffe (Gesamtmasse &gt; 95%) im Ottomotor-Leitungssatz

Werkstoff	Werkstoffgruppe	Menge [g]	Anteil
Cu-ETP1	Kupferkabel	1029,3	50,23%
HDPE FR(60)	ungefüllte Thermoplaste	154,8	7,55%
>PA66-I<	ungefüllte Thermoplaste	112,8	5,51%
PBT	ungefüllte Thermoplaste	92,8	4,53%
PA66-GF30	gefüllte Thermoplaste	54,0	2,63%
PE	ungefüllte Thermoplaste	52,3	2,55%
PE-HD FR(61)	ungefüllte Thermoplaste	48,9	2,39%
PA Cloth	Textilien	45,4	2,22%
PES cloth 1	Textilien	42,6	2,08%
PE-X-MD40-FR(61)	gefüllte Thermoplaste	35,3	1,72%
VMQ	Elastomere / Elastomer-Verbund	33,1	1,61%
PAK Adhesive	Kleber, Dichtstoffe	28,4	1,39%
PA66	ungefüllte Thermoplaste	27,4	1,34%
HDPE FR(61)	ungefüllte Thermoplaste	25,9	1,26%
Pressure sensitive adhesive 3	Kleber, Dichtstoffe	22,9	1,12%
PA46	ungefüllte Thermoplaste	22,7	1,11%
PA66-GF15	gefüllte Thermoplaste	21,8	1,06%
PA66 GF30	gefüllte Thermoplaste	18,9	0,92%
PA6-I-GF15	gefüllte Thermoplaste	15,0	0,73%
PA66-GF50	gefüllte Thermoplaste	13,9	0,68%
PE-HD-TD5-FR(61)	gefüllte Thermoplaste	12,8	0,63%
Copper Nickel	Kupferlegierungen	12,7	0,62%
CuSn0,15	Kupferlegierungen	11,6	0,57%
X10CrNi18-8	Stahl	9,3	0,45%
PA66-I	ungefüllte Thermoplaste	9,2	0,45%
PBT-GF30	gefüllte Thermoplaste	6,9	0,34%
PE-HD-MD40-FR(61)	gefüllte Thermoplaste	6,8	0,33%
PE-LD-X+EEAK-X	ungefüllte Thermoplaste	6,7	0,33%
CuSn6	Kupferlegierungen	6,6	0,32%
Copper Alloy	Kupferlegierungen	6,5	0,32%
PET Fabric	Textilien	6,0	0,29%
High Copper Alloy	Kupferlegierungen	5,1	0,25%
C75S	Stahl	4,0	0,19%
PVC	ungefüllte Thermoplaste	3,4	0,17%
<b>SUMME</b>			<b>97,89%</b>

Tabelle 6: Stückliste aggregierter Werkstoffe (Gesamtmasse &lt; 5%) im Ottomotor-Leitungssatz

Werkstoff	Werkstoffgruppe	Menge [g]	Anteil
Weitere ungefüllte Thermoplaste	ungefüllte Thermoplaste	4,1	0,20%
Weitere gefüllte Thermoplaste	gefüllte Thermoplaste	22,0	1,07%
Weitere Kleber, Dichtstoffe	Kleber, Dichtstoffe	2,5	0,12%
Weitere Kupferlegierungen	Kupferlegierungen	9,9	0,48%
Gläser	Gläser	4,0	0,20%
Zinn und Zinnlegierungen	Zinn und Zinnlegierungen	0,5	0,02%
Zink und Zinklegierungen	Zink und Zinklegierungen	0,2	0,01%
Nickel und Nickellegierungen	Nickel und Nickellegierungen	0,1	0,004%
Silber und Silberlegierungen	Silber und Silberlegierungen	0,03	0,001%
Lacke	Lacke	0,02	0,001%
Gold	Gold	0,02	0,001%
Druckfarben / Tinten	Druckfarben / Tinten	0,004	0,0002%
<b>SUMME</b>			<b>2,11%</b>

Die nicht als Hauptwerkstoffe definierten Bestandteile der Leitungssätze sind den zuvor definierten Werkstoffgruppen zugeordnet und anschließend als generische Werkstoffe modelliert. In den Anhängen A. 6 und A. 7 sind die hierbei verwendeten ecoinvent-Datensätze aufgeführt.

Die Modellierung der kupferhaltigen Hauptwerkstoffe und Kunststoffbestandteile der Leitungssätze wird im Folgenden näher dargestellt.

### 3.1.1. Kupferkabel und Kupferlegierungen

Kupfer wird in den beiden Kabelsätzen hauptsächlich für die Leitungskabel verwendet. Hierbei kommt vor allem der Werkstoff Cu-ETP<sup>2</sup> zum Einsatz, welcher einen Kupferanteil von 99,9 Massen-% hat. [Deutsches Kupferinstitut 2019].

Am Anfang des Lebenszyklus von Kupferprodukten wird zunächst kupferhaltiges Erz aus Lagerstätten gewonnen und zu Kupferkonzentraten angereichert. Bei der anschließenden Verhüttung werden diese pyrometallurgisch oder hydrometallurgisch verarbeitet. Das überwiegend angewendete Verfahren ist dabei das pyrometallurgische Verfahren für sulfidische Kupfererze [Kupferverband e.V. 2024]. Entsprechend wird für diese Studie die pyrometallurgische Verarbeitung von Kupferkonzentraten als Verfahren angenommen.

In der Datenbank ecoinvent liegt kein Prozess für die alleinige Kupferproduktion über die pyrometallurgische Route in Europa vor. Lediglich ein Datensatz zur Gewinnung von Kupfer neben Gold, Silber, Zink und Blei aus einer Mine in Schweden ist enthalten, bei der die Umweltauswirkungen zwischen den verschiedenen Produkten allokiert werden. Deshalb wird für diese Studie ein Datensatz für den globalen Herstellungsprozess verwendet, wobei es sich um eine konservative Annahme handelt.

<sup>2</sup> Durch elektrolytische Raffination hergestelltes Kupfer mit mindestens 99,9% Kupfer, maximal 0,0005 Bismut (Bi), maximal 0,04% Sauerstoff (O) und maximal 0,005% Blei (Pb)

Ein Literaturvergleich der Umweltauswirkungen von Kupfer wird für jede untersuchte Kategorien in Abschnitt 4 vorgenommen.

Für Cu-ETP, Cu-ETP1, Copper Alloy, High Copper Alloy und Cu-PHC wird jeweils 100% Kupfer modelliert. Zusätzliche Legierungsanteile werden aufgrund der sehr geringen Mengen vernachlässigt. Lediglich für CuSn0,15 wird aufgrund der genauen Angabe des Zinnanteils 0,15 Massen-% Zinn modelliert.

### 3.1.2. Kunststoffe

Für den Leitungssatz des batterieelektrisch betriebenen Fahrzeugs ist im vorliegenden Datensatz MQ nach Kupfer der Werkstoff mit dem größten Materialanteil. Bei den Werkstoffen MQ und VMQ handelt es sich um Silikonkautschuk [Northern Engineering Sheffield 2019]. Diese werden neben anderen Stoffen für die Isolierung der Kupferkabel verwendet. Nachdem es in der Datenbank ecoinvent mit „synthetic rubber production“ nur generische Prozesse für die Herstellung von synthetischem Kautschuk auf Basis von einer Sachbilanz für Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuke (EPDM) gibt, wird Silikonkautschuk eigens modelliert. Hierfür wird die Sachbilanz aus einem aktuellen Datensatz für Elastomer-Fugenbänder aus Silikonkautschuk verwendet [Ökobaudat 2023]. Dabei fällt auf, dass der erneuerbare Anteil am gesamten Primärenergieverbrauch im Vergleich zu Prozessen aus der ecoinvent-Datenbank hoch ist, was einen Einfluss auf die entsprechende Wirkungsabschätzung hat (Vgl. 4.1.1).

Die hierbei verwendeten ecoinvent-Datensätze werden in Anhang A. 5 aufgeführt.

In den beiden untersuchten Leitungssätzen kommen mehrere verschiedene Thermoplaste zum Einsatz. Polyamide (PA), Polyethylen (PE) und Polyvinylchlorid (PVC) kommen neben anderen Kunststofffraktionen als gefüllte und ungefüllte Thermoplaste vor und können Flammenschutzmittel und Weichmacher enthalten. Bei dem Werkstoff PA6-GF30 (FR30) handelt es sich beispielsweise um ein mit 30% Glasfaser gefülltes Polyamid 6 und bei dem Werkstoff HDPE FR(60) um High-Density-Polyethylen (HDPE) ohne Füllstoff. Die Kennzeichnung „FR“ beschreibt das enthaltene Flammenschutzmittel, das mit einer zweistelligen Codenummer klassifiziert wird. In beiden Fällen handelt es sich um nicht-halogenierte Flammenschutzmittel [Lumitos 2024]. Nicht-halogenierte Flammenschutzmittel haben eine insgesamt geringere Umweltauswirkung als halogenierte Alternativen und machen bei einem Massenanteil von etwa 20% bis zu 30% der Auswirkungen in den Kategorien Treibhausgaspotential, Versauerungspotential und Primärenergiebedarf eines flammgeschützten, glasfaserverstärkten Polyamid-Produkts aus [Maga et al. 2024]. Vereinfacht wird für alle modellierten flammgeschützten Werkstoffe Phosphor mit einem Massenanteil von 20% als Flammenschutzmittel angenommen.

Bei PE-HD-TD5-FR(61) handelt es sich um flammgeschütztes HDPE mit 5 Massen-% Talkfüllung [Xiamen Keyuan Plastic 2024]. Diese Füllung wird bei der Modellierung aufgrund der geringen Menge und Umweltwirkung vernachlässigt.

In PVC-P-KD25 ist ein Weichmacheranteil von 25% enthalten [Netzsch 2024]. Hierfür wird Dioctylterephthalat modelliert, welcher u.a. als Weichmacher für Kunststoffe Anwendung findet [Lumitos 2025].

Bei PA6-I und PA66-I handelt es sich um schlagzäh-modifizierte Polyamid-Komponenten [Albis 2024]. Hierbei kommt beispielsweise ein geringer Anteil an Elastomeren zum Einsatz [Ardlon 2024]. Da keine signifikanten Unterschiede der Umweltauswirkungen vorliegen, wird vereinfacht PA6 und PA66 modelliert.

Ebenso wird für PA46 vereinfacht der Prozess für PA66 im Modell verwendet, da es hierzu keinenecoinvent-Prozess gibt.

Bei PE-X-MD40-FR(61) handelt es sich um vernetztes PE mit 40 Massen-% mineralischen Additiven [Kunststoffrohrverband e.V 2007], [Rehau 2021]. Die Vernetzung des Kunststoffs wird vernachlässigt. Für die Füllung wird bei der Modellierung Kreide angenommen.

PE-LD-X+EEAK-X ist ein Werkstoff aus PE und einem Ethylen-Ethyl-Acrylat (EEA) Copolymer [Entec 2024]. Da zur genauen Zusammensetzung keine Daten verfügbar sind und auch für Ethylen-Ethyl-Acrylat kein Prozess in ecoinvent enthalten ist, wird hinsichtlich des geringen Anteils von 7 g im Leitungssatz des Ottomotor-PKW für diesen Werkstoff vereinfacht PE angenommen.

Zu Polybutadien (PBT) gibt es in der Datenbank ecoinvent ebenfalls keinen entsprechenden Prozess. Die Herstellung dieses Kunststoffs wird nach dem veröffentlichten Datenblatt von Plastics Europe zu PBT eigens modelliert [Boustead 2005]. Die Modellierung der Sachbilanz für PBT wird in Anhang A. 5 dargestellt.

### 3.1.3. Transport der Werkstoffe zur Fertigung

Für den Transport der Werkstoffe zu der Kabelsatzfertigung werden generische Transportdistanzen und Transportmodi für in Europa hergestellte Vorprodukte angenommen. Hierfür werden alle Transportprozesse aus dem ecoinvent-Datensatz "market for nylon 6 | nylon 6 | Cutoff, U - RER" übernommen. Die Transportdistanzen betragen hierbei etwa 44 km für Zugtransport, 22 km für inländischen Schifftransport und 171 km für den Straßentransport. Die Transportleistungen in Tonnenkilometern sind jeweils auf die Gesamtmasse der Werkstoffe für die Leitungssätze hochgerechnet. Die letztendlichen Transportleistungen sowie die für die Modellierung verwendeten Prozesse sind in den Anhängen A. 8 und A. 9 aufgeführt.

Nachdem es sich hierbei um eine generische Darstellung der Produktion der Werkstoffe bzw. Materialien in Europa handelt, können die Transportdistanzen nicht als repräsentativ für beide Produkte im Allgemeinen gesehen werden. Tatsächliche Entfernungen hängen von den Standorten der Zulieferer und der Konfektionäre ab. Transporte in internationalen Lieferketten gehen in den meisten Fällen mit höheren Emissionen einher.

## 3.2. Fertigung Leitungssatz

Abbildung 5 stellt die Inputs, Outputs sowie einzelne Teilprozesse der Fertigung von Teilleitungssätzen nach [Abouljalil & Amrani 2020] dar. Zunächst werden Werkstoffe miteinander verbunden (Spleißen) und Kabel montiert (Konfektionierung). Anschließend werden alle Steckverbindungen hergestellt und Kabel weiter isoliert (Taping). Zuletzt erfolgt eine Nachbearbeitung.

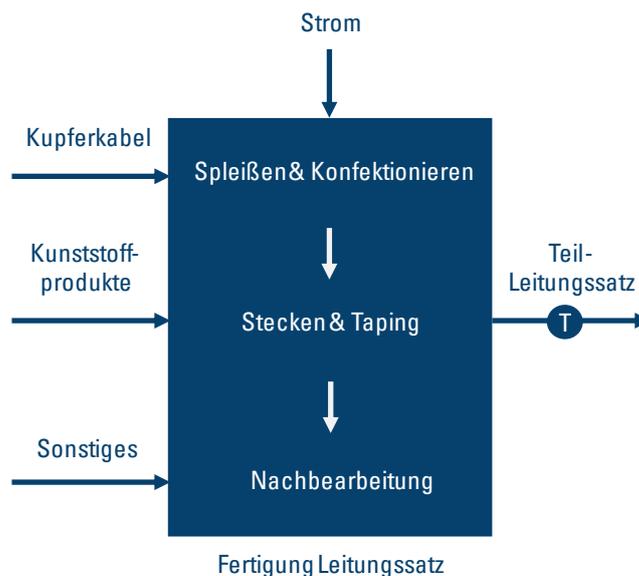


Abbildung 5: Fertigungsprozess von Kabelbäumen nach [Abouljalil & Amrani 2020]

### 3.2.1. Strombedarf für Fertigung

Bei der Serienfertigung von Kabelbäumen werden Kabelenden mit verschiedenen Verfahren miteinander verbunden oder für Anschlüsse vorbereitet [COOP 2024]. Für die Fertigung des BEV-Leitungssatzes teilt der Konfektionär einen Emissionswert von 1,5687 kg CO<sub>2</sub>-Eq mit und für den Ottomotor-Leitungssatzes einen Emissionswert von 1,5181 kg CO<sub>2</sub>-Eq. Zu den dabei zum Einsatz kommenden Energieträgern liegen keine Daten vor. Es wird deshalb angenommen, dass die Emissionen ausschließlich durch den Strombedarf für die Fertigung entstehen und hierbei der deutsche Strommix verwendet wird. Entsprechend dem ecoinvent-Prozess „market for electricity, medium voltage | electricity, medium voltage | Cutoff, U – DE“ ergibt sich daraus für Leitungssatz des BEV ein Strombedarf von etwa 3,7 kWh und für den Ottomotor-Leitungssatz 3,6 kWh (Vgl. Anhänge A. 10 und A. 11).

### 3.2.2. Transport der Leitungssätze

Für den Transport des fertigen BEV-Leitungssatzes zur Installation gibt der Konfektionär einen Emissionswert von 0,9487 kg CO<sub>2</sub>-Eq an und für den Kabelsatz des Ottomotors einen Emissionswert von 0,835 kg CO<sub>2</sub>-Eq. Für die Berechnung der Transportleistungen wird der generische ecoinvent-Prozess „market for transport, freight, lorry, unspecified - RER“ modelliert. Aus dem Dividieren der Transportemissionen des Herstellers durch den Emissionsfaktor pro Tonnenkilometer für den modellierten Prozess ergeben sich die Werte in den Anhängen A. 12 und A. 13. Für den BEV-Leitungssatz entspricht dies einer Transportdistanz von etwa 1047 km und für den Ottomotor-Leitungssatz einer Distanz von ungefähr 2662 km. Die signifikant höhere Transportstrecke für den Leitungssatz des konventionell betriebenen Kfz lässt sich auf den von Zentraleuropa weiter entfernt liegenden Herstellungsort zurückführen.

Diese Transportdistanzen können nicht als repräsentativ für BEV- und Ottomotor-Kabelsätze allgemein gesehen werden. Tatsächliche Entfernungen hängen von den Standorten der Konfektionäre und der Kunden ab.

Es wird angenommen, dass keine Umweltauswirkungen durch den Einbau der Kabelsätze in Fahrzeuge entstehen und dass die Nutzungsphase ebenfalls keinen Einfluss auf die Wirkungsabschätzung hat.

### 3.3. Nutzung

Die Nutzung der Teilleitungssätze wird wie bereits in Abschnitt 2.2.3 erläutert nicht betrachtet.

### 3.4. End-of-Life

#### 3.4.1. Transport zu EoL

Für den Transport der Leitungssätze nach der Nutzung wird der generische Transportmodus und die Transportleistung aus dem ecoinvent-Datensatz „market for scrap copper | scrap copper | Cutoff, U - Europe without Switzerland“ übernommen. Dieser gibt eine Distanz von 77 km bis zum Standort der Entsorgung bzw. des Recyclings an. Die entsprechenden Transportleistungen werden in den Anhängen A. 14 und A. 15 aufgeführt.

#### 3.4.2. Entsorgung und Recycling von Leitungssatzbestandteilen

Am Ende des Lebenszyklus von Fahrzeugen werden diese demontiert und anschließend geschreddert. Kabelbäume verbleiben dabei überwiegend in den Altfahrzeugen und werden geschreddert [Umweltbundesamt 2020]. Im Anschluss erfolgt die Wiedergewinnung einzelner Materialien aus den Schredderfraktionen. In Deutschland wurden im Jahr 2021 so insgesamt 97,5 % der Altfahrzeugmasse verwertet, davon 90,0 % stofflich [Umweltbundesamt 2024]. Als edles Metall bestehen bei Kupfer sehr gute Möglichkeiten der Abtrennung von Fremdstoffen und der Gewinnung von hochreinem Sekundärkupfer, jedoch kommt es auch zu geringen Verlusten [Umweltbundesamt 2020].

Der Schredderprozess wird in der vorliegenden Studie mit dem ecoinvent-Datensatz „treatment of waste electric and electronic equipment, shredding | waste electric and electronic equipment | Cutoff, U – GLO“ modelliert. Daraufhin folgt ein Sortieren der Schredderfraktionen mit dem Prozess „treatment of metal scrap, mixed, for recycling, unsorted, sorting | iron scrap, sorted, pressed | Cutoff, U - Europe without Switzerland“. Die vorangehende Entnahme des Kabelsatzes aus dem Fahrzeug wird nicht berücksichtigt.

Für Kupferkabel wird eine Recyclingquote von 90% angenommen und eine entsprechende Gutschrift durch die Substitution von Primärmaterial durch dieses Sekundärkupfer modelliert. Um einen geschlossenen Wertstoffkreislauf (Closed Loop) für Kupfer darzustellen, wird nach der „Avoided Burden“ Methode eine Gutschrift in Höhe der Materialmenge des rezyklierten Kupferanteils modelliert [Frischknecht 2010]. Es wird also angenommen, dass das durch elektrolytische Raffination im Recyclingprozess gewonnene Sekundärkupfer zu 100% als Sekundärmaterial für die Herstellung eines neuen Leitungssatzes verwendet wird. Hier ist anzumerken, dass diese Gutschrift nur unter den Annahmen angerechnet werden kann, dass ein Auto am Ende des Lebenszyklus wirklich in Deutschland verbleibt und einen fachgerechten Verwertungsprozess durchläuft. Für das End-of-Life in anderen Ländern, insbesondere im EU-Ausland, sind andere Annahmen zu treffen. Jährlich werden über eine halbe Million Gebrauchtwagen aus Deutschland ins Ausland verkauft und am Ende des Lebenszyklus belastet der Schrott in Ländern wie Ghana die Umwelt und die Gesundheit der Bevölkerung [Bayerischer Rundfunk 2023]. Entsprechend wird als Sensitivität in Abschnitt 4.8 eine unsachgerechte Verwertung der Leitungssätze in Ghana durch Kabelverbrennung, ohne eine Recycling-Gutschrift betrachtet.

Für Silber, Nickel, Gold und Platin wird ebenfalls ein Recyclingprozess modelliert, jedoch die Gutschrift vernachlässigt. Ein Recycling von Stahl und Aluminium im Kabelsatz ist technisch möglich, wird hier jedoch

wegen der sehr geringen Mengen nicht berücksichtigt. Ebenso wird angenommen, dass Legierungen nicht stofflich wiederverwertet werden. Für alle Kunststoffe wird angenommen, dass diese nach dem Schreddern zu 100% entsorgt werden.

Die Auswahl der Entsorgungsverfahren ist begrenzt durch die Verfügbarkeit an entsprechenden Prozessen in der ecoinvent-Datenbank. Für die Entsorgung der meisten Werkstoffgruppen wurde eine thermische Verwertung ohne Berücksichtigung der Energierückgewinnung modelliert. Eine Übersicht aller für die Modellierung des End-of-Life verwendeten ecoinvent-Datensätze ist im Anhang A. 16 abgebildet.

## 4. ERGEBNISSE DER WIRKUNGSABSCHÄTZUNG

### 4.1. Gesamtergebnisse für Werkstoffherstellung

Die Werkstoffherstellung ist für beide Leitungssätze und alle Wirkungskategorien mit den höchsten Umweltauswirkungen verbunden. Deshalb wird hier zunächst eine Übersicht der Ergebnisse für diese Lebenszyklusphase dargestellt. In den Ergebnissen für die Werkstoffherstellung ist keine Gutschrift durch das Recycling der Kupferkabel enthalten, da diese der Lebenszyklusphase End-of-Life angerechnet wird. In den darauffolgenden Abschnitten werden dann jeweils die Ergebnisse für den ganzen Lebenszyklus für die einzelnen Wirkungskategorien aufgeführt. Es ist anzumerken, dass die Wirkungsabschätzungsergebnisse relative Aussagen sind und daraus keine Voraussagen über Auswirkungen auf die Wirkungsendpunkte, Schwellenwertüberschreitungen, Sicherheitsspannen oder Risiken getroffen werden können.

#### 4.1.1. BEV-Leitungssatz

Tabelle 7 stellt die Ergebnisse aller Wirkungskategorien für die Werkstoffherstellung des BEV-Leitungssatzes dar. Entsprechend der hohen Materialanteile im Produkt stellen Kupferkabel und Elastomere in nahezu allen Wirkungskategorien die beiden Werkstoffgruppen mit den höchsten absoluten Umweltwirkungen dar. In Abbildung 6 sind die relativen Gesamtergebnisse aller Materialgruppen dar, wobei auffällig ist, dass Metalle mit etwa 98% den weitaus höchsten Anteil am Versauerungspotential des Leitungssatzes haben.

Tabelle 7: Absolute Ergebnisse der Werkstoffherstellung aller Wirkungskategorien des BEV-Leitungssatzes

	Resources	GWP 100	AP	CED Renewable	CED Fossil
Einheit	[kg]	[kg CO <sub>2</sub> -Eq]	[kg SO <sub>2</sub> -Eq]	[MJ]	[MJ]
Kupferkabel	3,404	31,057	2,378	98,877	415,134
Elastomere / Elastomer-Verbunde	1,014	8,079	0,017	66,294	111,636
gefüllte Thermoplaste	0,655	4,995	0,020	4,874	85,957
ungefüllte Thermoplaste	0,280	1,196	0,004	1,223	25,443
Kupferlegierungen	0,260	2,062	0,157	6,497	27,444
Stahl	0,084	0,239	0,001	0,396	2,772
Schaumstoffe	0,078	0,400	0,001	0,680	8,515
Textilien	0,067	0,312	0,001	0,274	6,348
Kleber, Dichtstoffe	0,049	0,304	0,001	0,288	5,678
Zink und Zinklegierungen	0,009	0,023	0,0002	0,058	0,375
Aluminium und Aluminiumlegierungen	0,008	0,062	0,0003	0,372	0,989
Halbleiter / Elektronik	0,006	0,396	0,004	0,580	5,622
Zinn und Zinnlegierungen	0,001	0,016	0,0001	0,026	0,212
Silber und Silberlegierungen	0,001	0,394	0,003	0,438	5,376
Nickel und Nickellegierungen	0,001	0,007	0,001	0,021	0,077

Lacke	0,00002	0,00004	0,0000005	0,0001	0,001
Unspezifische Beschichtungen	0,00001	0,00004	0,0000003	0,0001	0,001
Druckfarben / Tinten	0,00001	0,00002	0,0000001	0,0001	0,0004
Gold	0,000002	0,025	0,001	0,418	0,549
Siliziummetall	0,000001	0,0001	0,0000002	0,001	0,002
Gläser	0,000001	0,000001	0,00000001	0,000001	0,00001
Platin	0,0000001	0,001	0,001	0,001	0,019
<b>Total</b>	<b>5,916</b>	<b>49,569</b>	<b>2,591</b>	<b>181,317</b>	<b>702,150</b>

GWP: Global Warming Potential (Treibhauseffekt); AP: Acidification Potential (Versauerung); CED: Cumulative Energy Demand (kumulierter Energiebedarf)

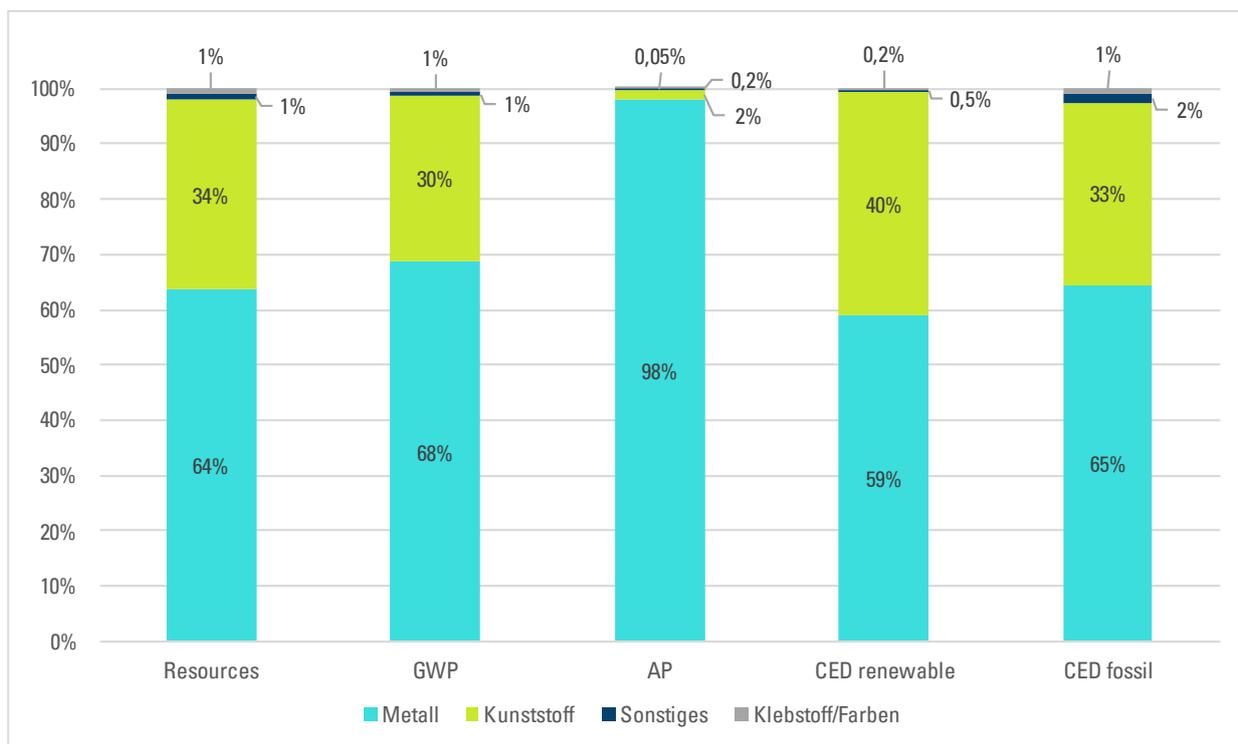


Abbildung 6: Relative Ergebnisse der Werkstoffherstellung aller Wirkungskategorien des BEV-Leitungssatzes

#### 4.1.2. Ottomotor-Leitungssatz

Eine Übersicht der Ergebnisse aller Wirkungskategorien für die Werkstoffherstellung des Ottomotor-Leitungssatzes ist in Tabelle 8 aufgeführt. Neben Kupferkabeln sind ungefüllte und gefüllte Thermoplaste die größten Verursacher von Umweltauswirkungen, was sich darauf zurückführen lässt, dass diese die drei Werkstoffgruppen mit den höchsten Materialanteilen im Kabelsatz ausmachen. Abbildung 7 zeigt ein ähnliches relatives Ergebnis wie für den BEV-Leitungssatz, wobei Metalle hier etwa 97% des Versauerungspotentials verursachen. In dem Vergleich fällt auch auf, dass Kunststoffe beim Leitungssatz des Ottomotors einen höheren Anteil an der Gesamtmasse ausmachen, was in den meisten Wirkungskategorien prozentual höhere Umweltauswirkungen durch diese Materialgruppe zur Folge hat.

Tabelle 8: Absolute Ergebnisse der Werkstoffherstellung aller Wirkungskategorien des Ottomotor-Leitungssatzes

	Resources	GWP 100	AP	CED Renewable	CED Fossil
Einheit	[kg]	[kg CO <sub>2</sub> -Eq]	[kg SO <sub>2</sub> -Eq]	[MJ]	[MJ]
Kupferkabel	1,029	9,392	0,719	29,901	125,540
ungefüllte Thermoplaste	0,876	2,969	0,014	3,256	66,119
gefüllte Thermoplaste	0,242	1,661	0,006	1,693	30,196
Textilien	0,094	0,607	0,002	0,267	11,154
Kleber, Dichtstoffe	0,052	0,452	0,036	1,423	5,920
Kupferlegierungen	0,054	0,338	0,001	0,319	6,301
Elastomere / elastomere Verbunde	0,033	0,273	0,001	2,283	3,683
Stahl	0,00002	0,244	0,005	4,136	5,430
Gläser	0,013	0,051	0,0002	0,128	0,611
Zinn und Zinnlegierungen	0,00003	0,014	0,0001	0,016	0,193
Zink und Zinklegierungen	0,0005	0,005	0,00005	0,009	0,069
Nickel und Nickellegierungen	0,004	0,004	0,00003	0,002	0,047
Silber und Silberlegierungen	0,0001	0,001	0,0001	0,002	0,009
Lacke	0,0002	0,001	0,000004	0,001	0,009
Gold	0,00002	0,0001	0,000001	0,000	0,001
Druckfarben / Tinten	0,000004	0,00002	0,0000001	0,0001	0,0003
<b>Grand Total</b>	<b>2,399</b>	<b>16,013</b>	<b>0,785</b>	<b>43,438</b>	<b>255,283</b>

GWP: Global Warming Potential (Treibhauseffekt); AP: Acidification Potential (Versauerung); CED: Cumulative Energy Demand (kumulierter Energiebedarf)

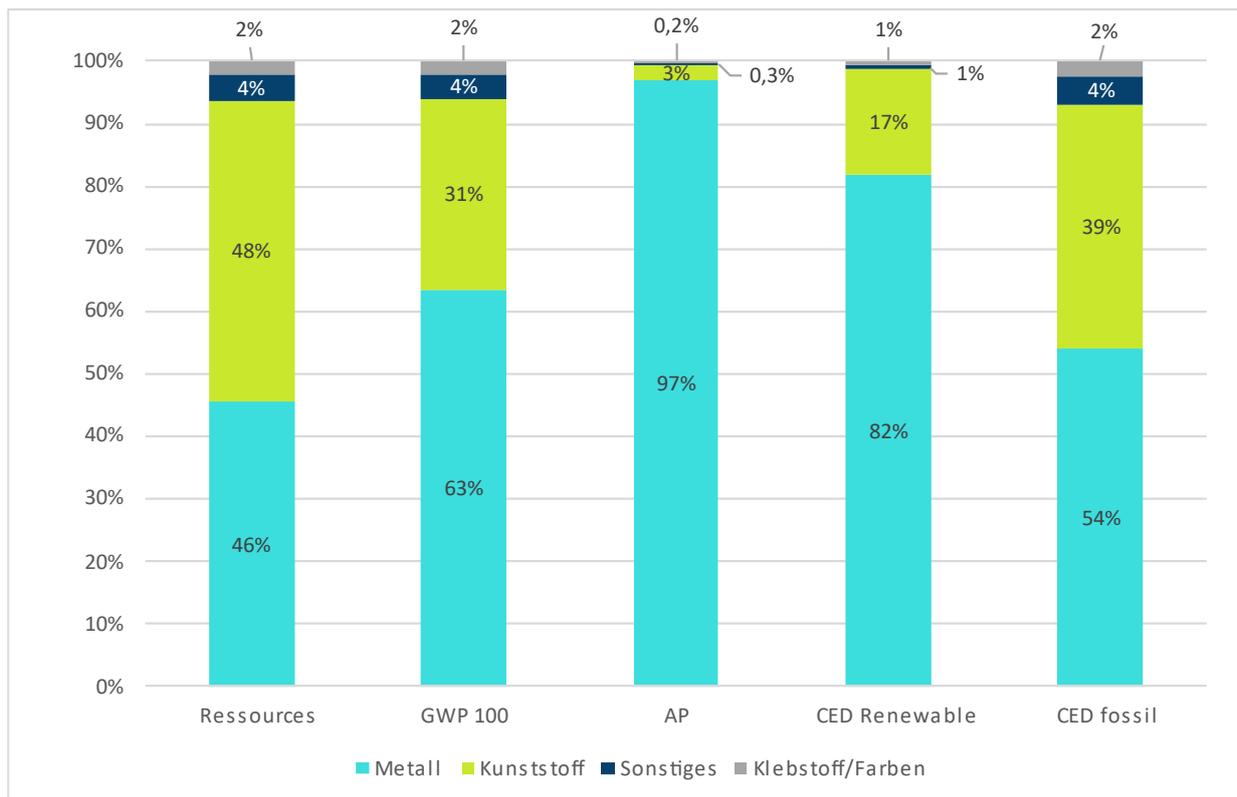


Abbildung 7: Relative Ergebnisse der Werkstoffherstellung aller Wirkungskategorien des Ottomotor-Leitungssatzes

## 4.2. Ressourcenverbrauch

Für den Ressourcenverbrauch ist im Folgenden eine Materialbilanz statt eine Wirkungsabschätzung dargestellt. Hierdurch lässt sich ein besseres Verständnis über die Materialzusammensetzung der beiden Produkte und über enthaltene strategische und kritische Rohstoffe gewinnen.

Die verwendeten Werkstoffe und Materialien für die Kabelsatz-Herstellung wurden zuvor in 3.1 aufgeführt. Tabelle 9 stellt die Mengen aller Werkstoffe der beiden betrachteten Leitungssätze gegenüber. Dabei ist anzumerken, dass durch Aggregation der Werkstoffe mit geringen Mengen zu Werkstoffgruppen nicht die exakten Materialmengen abgebildet werden.

Es fällt auf, dass der Leitungssatz des Ottomotors aufgrund des geringeren Gesamtgewichts geringere Mengen an Metallen und Kunststoffen enthält. Auf Werkstoffgruppen-Ebene stellen hier nur Gold und ungefüllte Thermoplaste eine Ausnahme dar, die in höheren Mengen als im BEV-Leitungssatz vorkommen. Aluminium und Aluminiumlegierungen, Siliziummetalle, Platin und Schaumstoffe sind der Stückliste nach nicht im Ottomotor-Kabelsatz enthalten.

Im Gegensatz hierzu weist der Kabelsatz des BEV jeweils geringere Mengen für die Materialgruppen Klebstoffe und Farben sowie Sonstiges auf. Dies lässt sich vor allem auf den mengenmäßig höheren Einsatz von Klebern, Dichtstoffen, Lacken, Textilien und Gläsern im Ottomotor-Leitungssatz zurückführen. Halbleiter, Elektronik und nicht spezifische Beschichtungen sind nicht im Ottomotor-Kabelsatz enthalten.

Insgesamt enthält der BEV-Leitungssatz mehr strategische und kritische Rohstoffe.

Tabelle 9: Absoluter Materialbedarf für den BEV-Leitungssatz und den Ottomotor-Leitungssatz

Materialgruppe	Werkstoffgruppe	Menge in BEV-Leitungssatz [g]	Menge in Ottomotor-Leitungssatz [g]
Metall	Kupferkabel*	3403.64	1029.29
	Kupferlegierungen*	259.63	52.36
	Stahl	83.60	13.26
	Zink und Zinklegierungen	9.07	0.22
	Aluminium und Aluminiumlegierungen	8.49	-
	Zinn und Zinnlegierungen	1.47	0.48
	Silber und Silberlegierungen	0.71	0.03
	Nickel und Nickellegierungen*	0.68	0.08
	Gold	0.0021	0.02
	Siliziummetall*	0.0013	-
	Platin*	0.00008	-
	<b>SUMME</b>	<b>3767.30</b>	<b>1095.73</b>
Kunststoff	Elastomere / Elastomer-Verbunde	1013.83	33.09
	gefüllte Thermoplaste	655.15	207.32
	ungefüllte Thermoplaste	280.34	560.98
	Schaumstoffe	78.24	-
	<b>SUMME</b>	<b>2027.56</b>	<b>801.39</b>
Klebstoff/Farben	Kleber, Dichtstoffe	48.51	53.83
	Lacke	0.017	0.022
	Druckfarben / Tinten	0.005	0.004
	<b>SUMME</b>	<b>48.53</b>	<b>53.86</b>
Sonstiges	Textilien	66.84	94.00
	Gläser	0.001	4.00
	Halbleiter / Elektronik*	6.21	-
	Unspezifische Beschichtungen	0.006	-
	<b>SUMME</b>	<b>73.06</b>	<b>97.99</b>

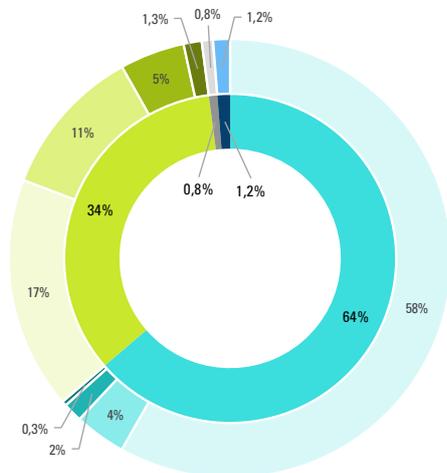
\* Kupfer, Nickel, Platingruppenmetalle sowie Siliziummetall und natürlicher Graphit (z.B. in Elektronik) sind strategische und kritische Rohstoffe nach Verordnung (EU) 2024/1252 [EU 2024]

Abbildung 8 stellt den relativen Materialbedarf der beiden Kabelsätze gegenüber. Auffällig ist, dass der BEV-Leitungssatz mit 64% insgesamt einen höheren Anteil an Metallen enthält, was sich aufschlüsseln lässt nach 58% Kupferkabeln, 4% Kupferlegierungen sowie etwa 2% Stahl und sonstigen Metallen. Im Vergleich hierzu weist der Ottomotor-Leitungssatz einen Metallanteil von 53% auf, der sich aus 50% Kupferkabeln, 2% Kupferlegierungen und 1% sonstigen Metallwerkstoffen zusammensetzt.

Der BEV-Kabelsatz enthält hingegen nur 34% Kunststoffe, davon Elastomere bzw. Elastomerverbunde mit einem Anteil von 17% an der Gesamtmasse, gefüllte Thermoplaste mit 11% und ungefüllte Thermoplaste

mit 5%. Im Ottomotor-Leitungssatz sind 39% Kunststoffe enthalten, wobei ungefüllte Thermoplaste hier mit 27% den größten Anteil ausmachen, gefolgt von gefüllten Thermoplasten mit 10% und Elastomeren sowie Schaumstoffen mit etwa 2%.

Ressourcenverbrauch BEV-Leitungssatz



Ressourcenverbrauch Ottomotor

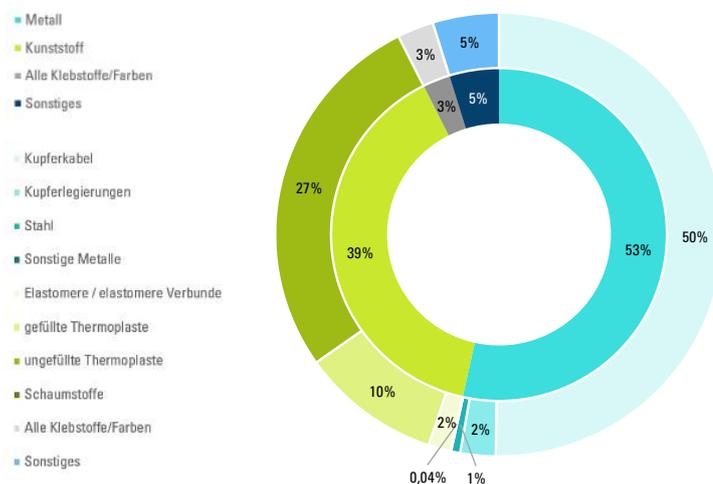


Abbildung 8: Relativer Materialbedarf für den BEV-Leitungssatz und Ottomotor-Leitungssatz (gesamt)

#### 4.2.1. BEV-Leitungssatz

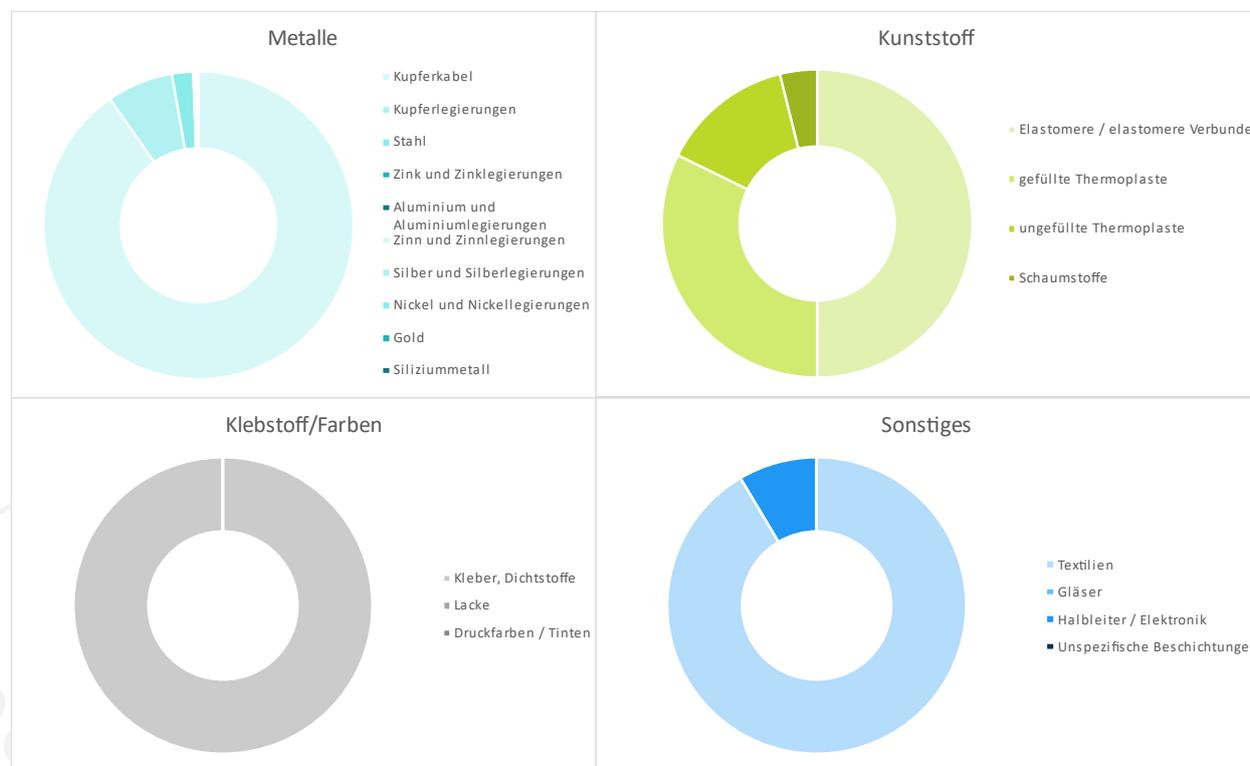


Abbildung 9: Relativer Materialbedarf für den BEV-Leitungssatz (nach Materialgruppe)

Innerhalb der Materialgruppen des BEV-Leitungssatzes lässt sich in Abbildung 9 erkennen, dass Zink, Aluminium, Zinn, Silber, Nickel, Gold und Silizium zusammen nur einen sehr geringen Anteil (etwa 1%) an

allen enthaltenen Metallen aufweisen. Schaumstoffe stellen unter allen Kunststoffen einen Massenanteil von knapp 4% dar. Innerhalb der Materialgruppe Klebstoffe und Farben machen letztere nur weniger als 0,0005% des Gewichts aus. Die Sonstigen Werkstoffe teilen sich zu 91% in Textilien, zu nahezu 9% in Halbleiter und Elektronik sowie ansonsten zu Gläsern und unspezifischen Beschichtungen auf.

#### 4.2.2. Ottomotor-Leitungssatz

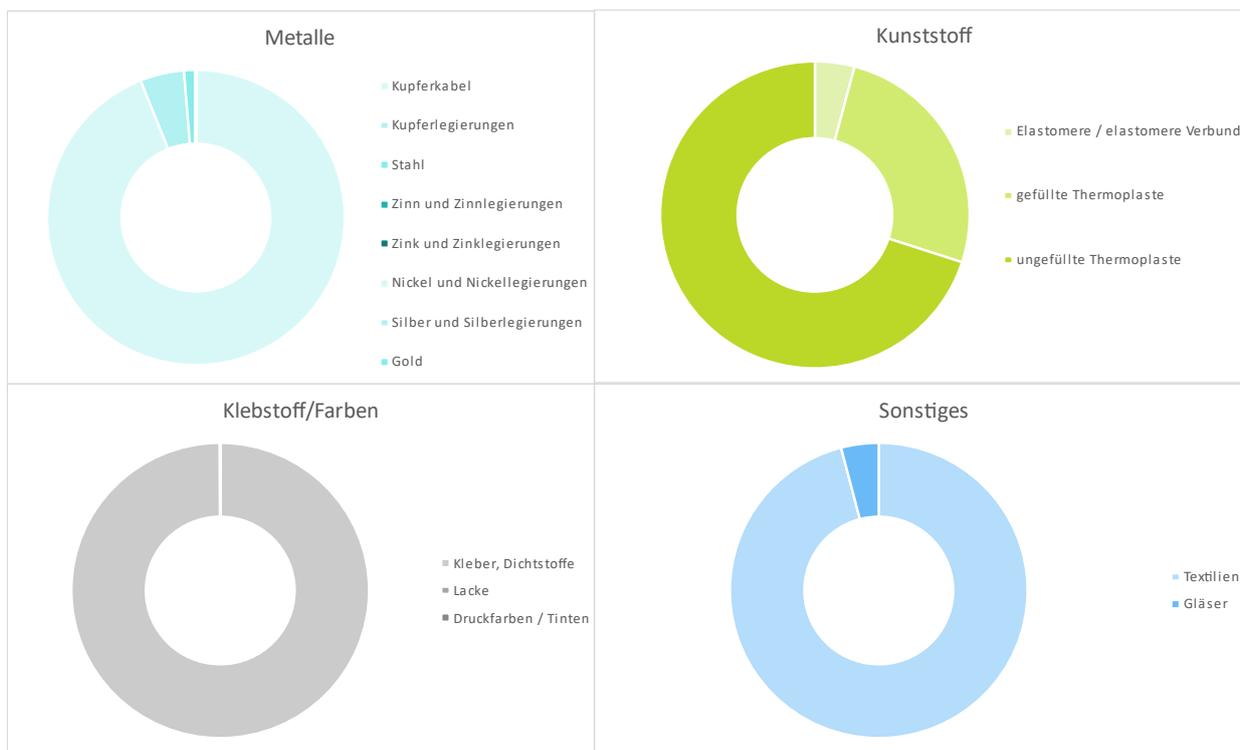


Abbildung 10: Relativer Materialbedarf für den Ottomotor-Leitungssatz (nach Materialgruppe)

Abbildung 10 stellt die Anteile der Werkstoffe des Ottomotor-Kabelsatzes innerhalb der Materialgruppen dar. Auch hier stellen Zinn, Zink, Nickel, Silber und Gold zusammen nur einen Anteil von etwa 1% dar. Kunststoffe lassen sich zu 70% ungefüllten Thermoplasten, 26% gefüllten Thermoplasten und 4% Elastomeren und Elastomerverbunden aufschlüsseln. Wie beim BEV-Leitungssatz machen Lacke, Druckfarben und Tinten in einer Gruppe mit Klebstoffen und Farben nur einen Anteil von etwa 0,0005% aus. Die Gruppe der sonstigen Bestandteile setzt sich zusammen aus 96% Textilien und 4% Gläsern.

### 4.3. Treibhausgaspotential

#### 4.3.1. BEV-Leitungssatz

##### 4.3.1.1. Gesamtergebnis

Abbildung 11 stellt das Treibhausgaspotential für alle Lebenszyklusphasen des BEV-Leitungssatzes dar. Es fällt auf, dass die Fertigung sowie alle Transporte im Vergleich zur Werkstoffherstellung nur mit sehr geringen Emissionen (< 6%) verbunden sind. Aufgrund der mangelnden Primärdaten und der oberflächlichen Modellierung der Transporte und der Fertigung sind die Ergebnisse für Fertigung und Transport in dieser und allen anderen Wirkungskategorien jedoch mit hohen Unsicherheiten verbunden

(Vgl. Abschnitt 2.2.8, 3.1.3, 3.2 und 3.4.1). Durch End-of-Life-Prozesse treten Emissionen in Höhe von 24% der Werkstoffherstellung auf. Die Gutschrift für das Recycling von Kupferkabeln wird in der Grafik zur besseren Übersicht als separater Balken dargestellt, auch wenn sie Teil des End-of-Life ist. In Summe ergibt sich aus EoL-Emissionen und Gutschrift eine Einsparung.

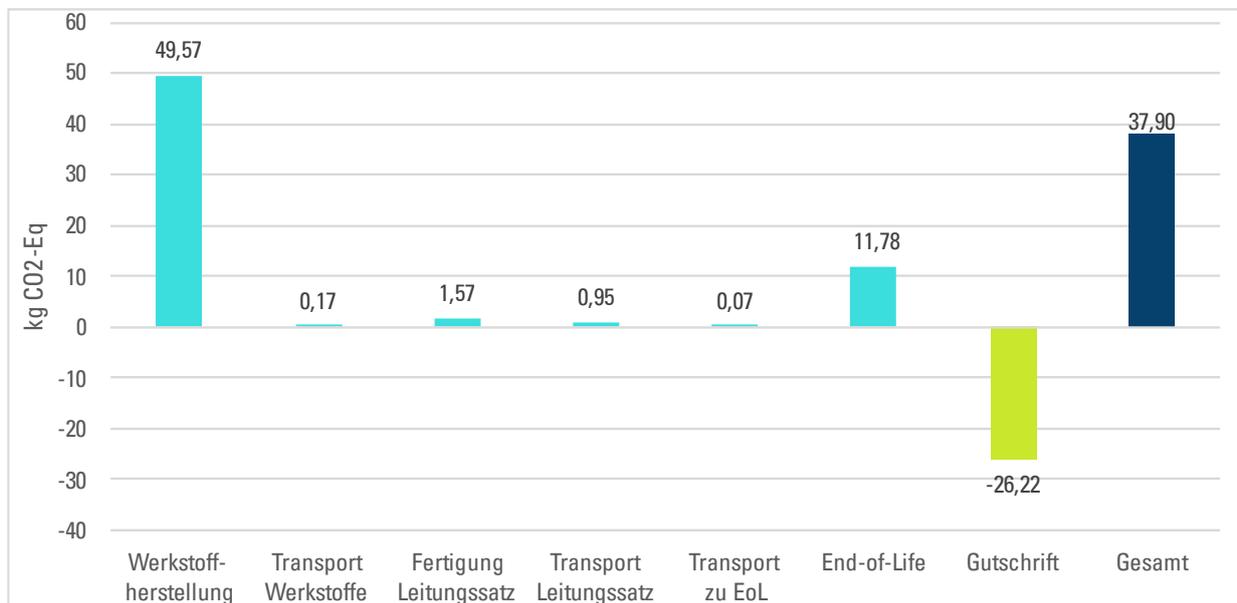


Abbildung 11: Ergebnis des Treibhausgaspotentials des BEV-Leitungssatzes über den gesamten Lebenszyklus

#### 4.3.1.2. Werkstoffherstellung

Abbildung 12 zeigt das relative Treibhausgaspotential der Materialgruppen des BEV-Kabelsatzes für die Werkstoffherstellung. Metalle haben den höchsten Einfluss auf diese Wirkungskategorie, gefolgt von Kunststoffen. Weitere Komponenten wie Klebstoffe und Farben machen etwa 2% des Ergebnisses aus. In Abbildung 13 werden die relativen Emissionen weiter nach Werkstoffkategorie unterteilt. 63% des Treibhausgaspotentials der Werkstoffherstellung entsteht durch Kupferkabel, während Elastomere bzw. Elastomerverbunde einen Anteil von 16% aufweisen. Bei Letzteren handelt es sich fast ausschließlich um die Kabelisolierung durch den Werkstoff MQ, welcher etwa 16% der Gesamtmasse ausmacht (Vgl. Abschnitt 3.1). Gefüllte und ungefüllte Thermoplaste machen zusammen etwa 12% der Emissionen aus. Kupferlegierungen tragen zu 4% bei und alle weiteren Werkstoffgruppen haben jeweils einen Anteil von etwa 1% oder geringer. Abbildung 14 illustriert die materialspezifischen Ergebnisse der Werkstoffgruppen in diesem Kabelsatz, wobei Platin und Gold jeweils Werte von über 10.000 kg CO<sub>2</sub>-Eq pro kg Material aufweisen. Die spezifischen Treibhausgaspotentiale von Silber und Silizium liegen mit etwa 550 und 80 kg CO<sub>2</sub>-Eq pro kg Material ebenfalls deutlich über den anderen Werkstoffgruppen. Diese vier Materialien machen zusammen aber nur etwa 0,01% der Leitungssatzmasse aus, weshalb ihr Einfluss auf das Gesamtergebnis sehr gering ist.

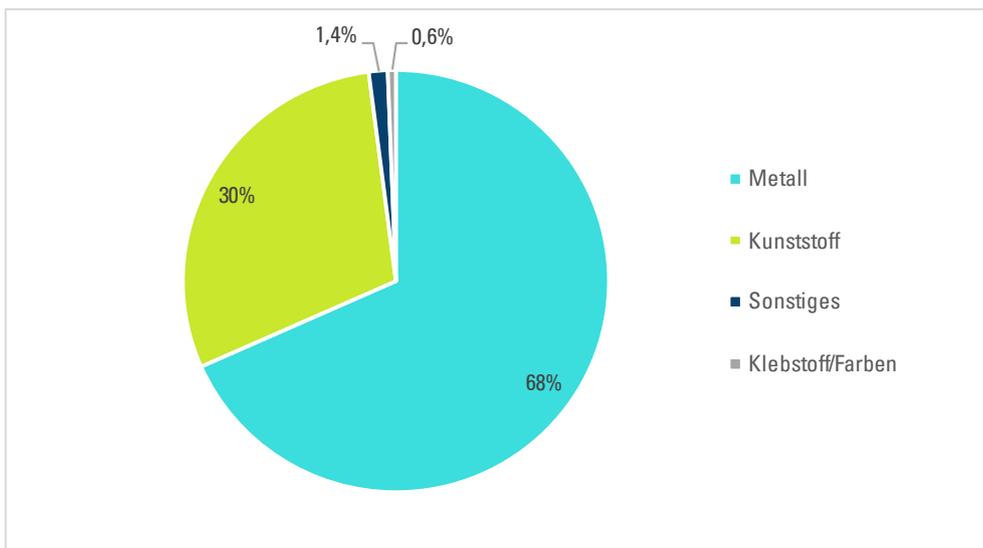


Abbildung 12: Ergebnis Anteile des Treibhausgaspotentials der Werkstoffherstellung des BEV-Leitungssatzes nach Materialkategorien

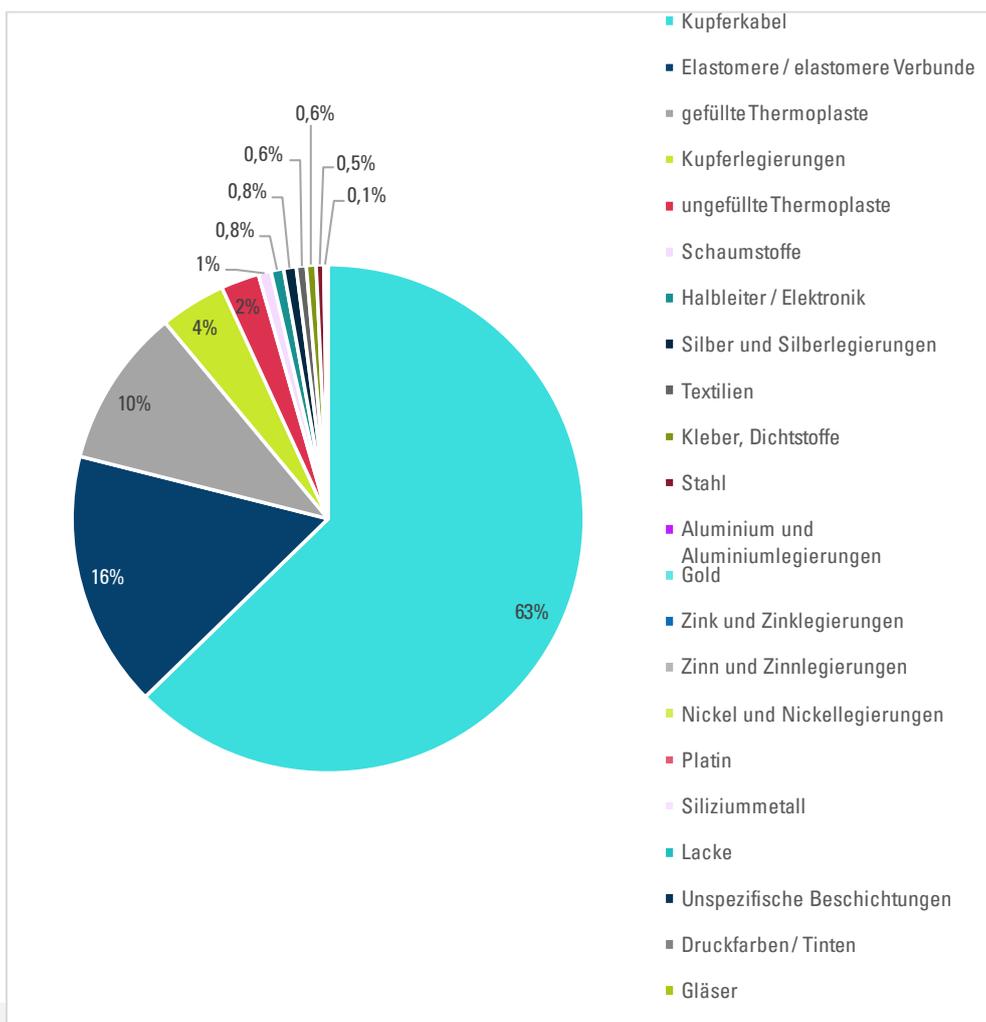


Abbildung 13: Ergebnis der Anteile des Treibhausgaspotentials der Werkstoffherstellung des BEV-Leitungssatzes nach Materialgruppen (detailliert)

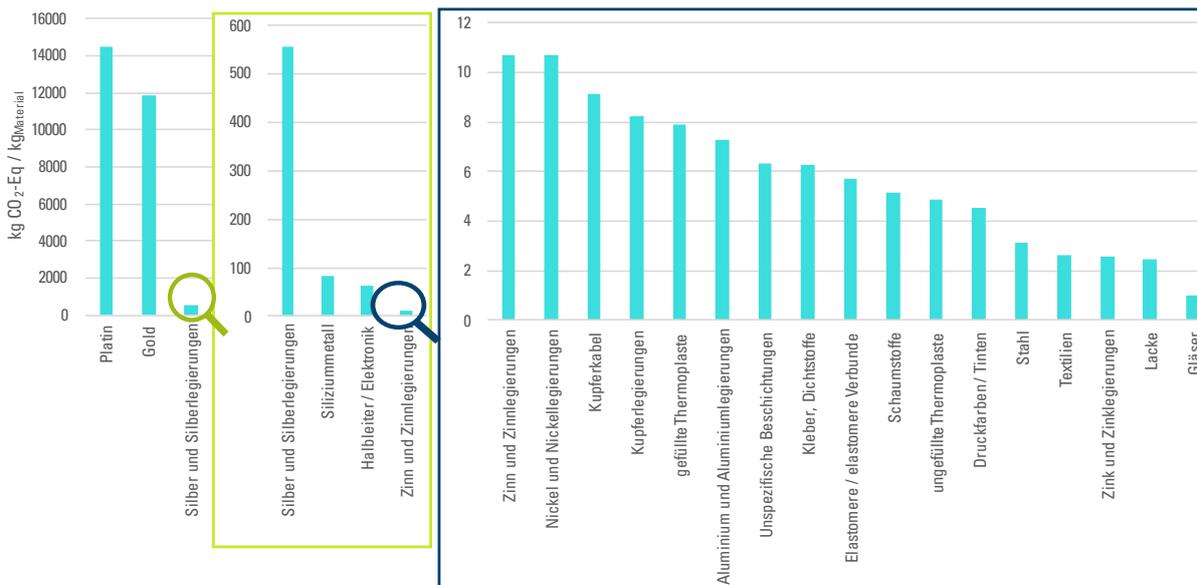


Abbildung 14: Spezifisches Treibhausgaspotential der Materialien im BEV-Leitungssatz (kg CO<sub>2</sub>-Eq / kg Material)

### 4.3.1.3. End-of-Life

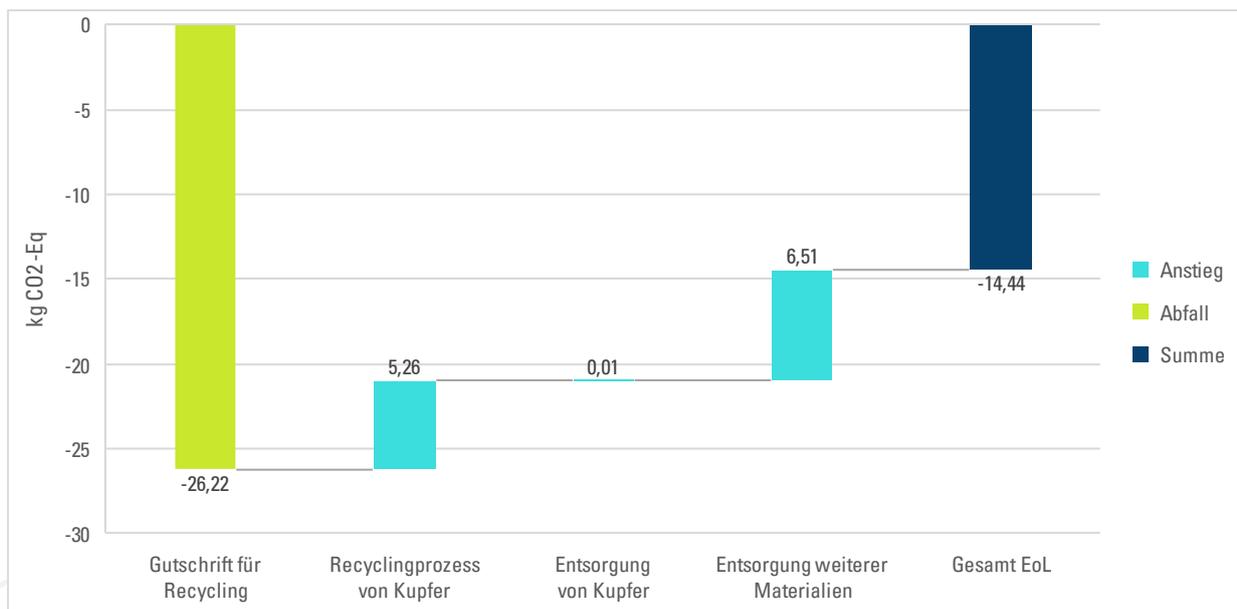


Abbildung 15: Ergebnisse des Treibhausgaspotentials aus dem EoL des BEV-Leitungssatzes

Nach Abbildung 15 setzen sich die THG-Emissionen im End-of-Life zu mehr als 99% aus den Auswirkungen des Recyclingprozesses von Kupfer sowie der Entsorgung weiterer Materialien zusammen. Die Entsorgung des Anteils von 10% Kupferkabeln hat nur einen sehr geringen Einfluss. Aus der Wiederverwendung des rezyklierten Kupfers für die Herstellung von Kupferkabeln ergibt sich eine Gutschrift von etwa 26,2 kg CO<sub>2</sub>-Eq. Unter Berücksichtigung der Emissionen ergibt sich somit als Gesamtergebnis des End-of-Life eine Einsparung von 14,4 kg CO<sub>2</sub>-Eq. Voraussetzung für eine derartige Einsparung in dieser und allen anderen Wirkungskategorien ist, dass die Kupferkabel der Leitungssätze im EoL tatsächlich einem fachgerechten Recycling zugeführt werden.

### 4.3.2. Ottomotor-Leitungssatz

#### 4.3.2.1. Gesamtergebnis

Abbildung 16 führt die Ergebnisse in der Wirkungskategorie Treibhausgaspotential für den Ottomotor-Leitungssatz auf. Auch hier haben die Fertigung sowie alle Transporte nur einen geringen Einfluss auf das Gesamtergebnis, machen jedoch in Relation zur Werkstoffherstellung einen höheren Anteil aus (etwa 17%). Das Recycling von Kupferkabeln führt insgesamt zu einer Einsparung von THG-Emissionen.



Abbildung 16: Ergebnis des Treibhausgaspotentials des Ottomotor-Leitungssatzes über den gesamten Lebenszyklus

#### 4.3.2.2. Werkstoffherstellung

Abbildung 17 zeigt die Ergebnisse für die Werkstoffherstellung des Ottomotor-Leitungssatzes. Metalle weisen mit 63% erneut den höchsten Anteil und Kunststoffe mit 31% den zweithöchsten Anteil auf. Im Vergleich zum BEV-Leitungssatz machen Klebstoffe, Farben und weitere Werkstoffe mit 6% einen geringfügig höheren Anteil aus. Wie in Abbildung 18 dargestellt, handelt es sich bei diesen sonstigen Materialien hauptsächlich um Textilien, wobei die Stoffe aus PA und PES hier den größten Anteil ausmachen (Vgl. Abschnitt 3.1). Im Gegensatz zu dem anderen Kabelsatz sind in diesem Produkt ungefüllte Thermoplaste mit 19% der größte Emissionstreiber nach Kupferkabeln mit 59%. Gefüllte Thermoplaste sind für 10% des Treibhausgaspotentials verantwortlich. In Abbildung 19 sind Gold und Silber mit den höchsten spezifischen THG-Wirkungen abgebildet. Mit einem Massenanteil von etwa 0,002% ist deren Anteil an den Gesamtemissionen erneut sehr gering.

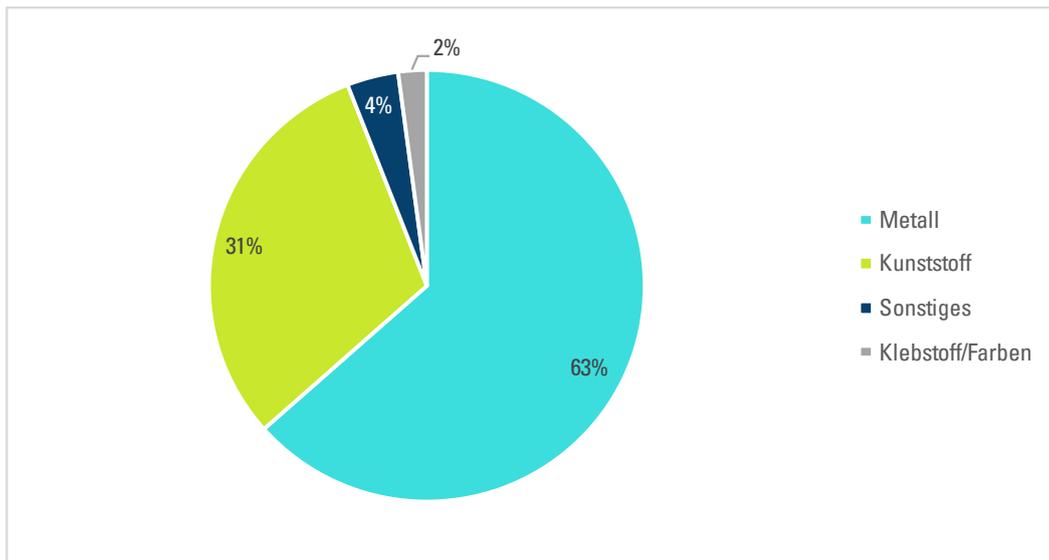


Abbildung 17: Ergebnis der Anteile des Treibhausgaspotentials der Werkstoffherstellung des Ottomotor-Leitungssatzes nach Materialkategorien

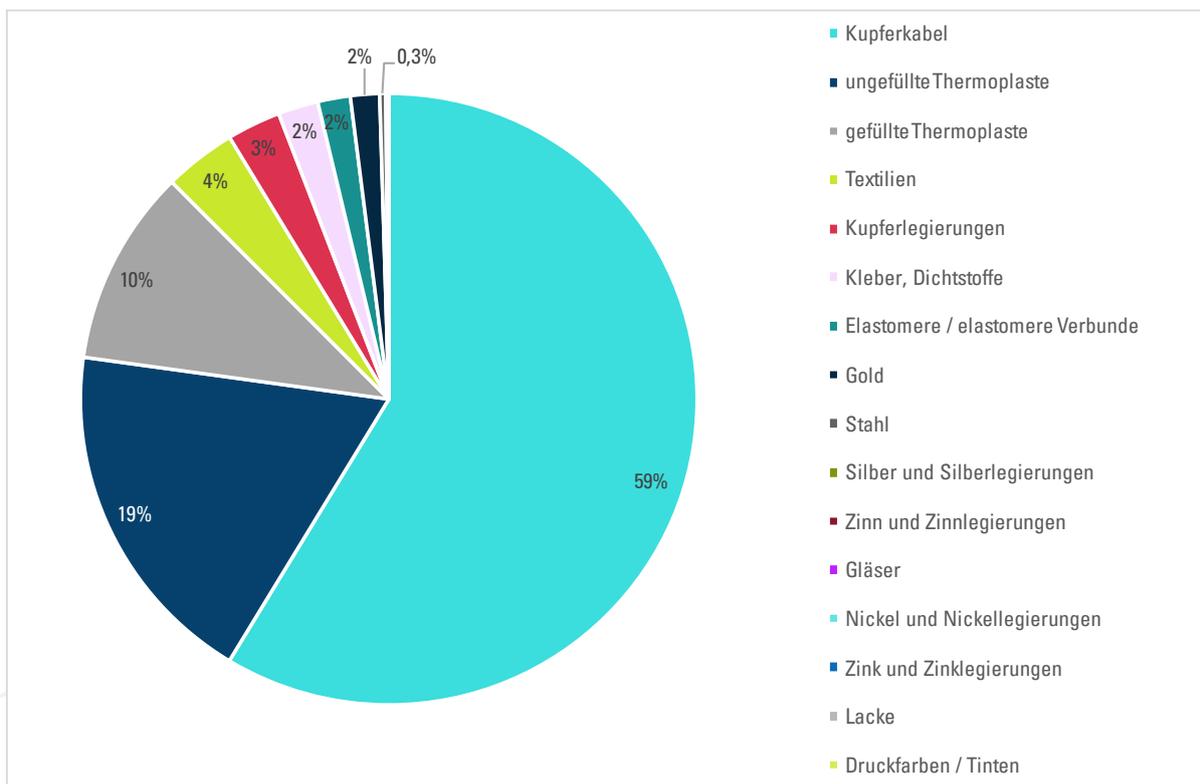


Abbildung 18: Ergebnis der Anteile des Treibhausgaspotentials der Werkstoffherstellung des Ottomotor-Leitungssatzes nach Materialgruppen (detailliert)

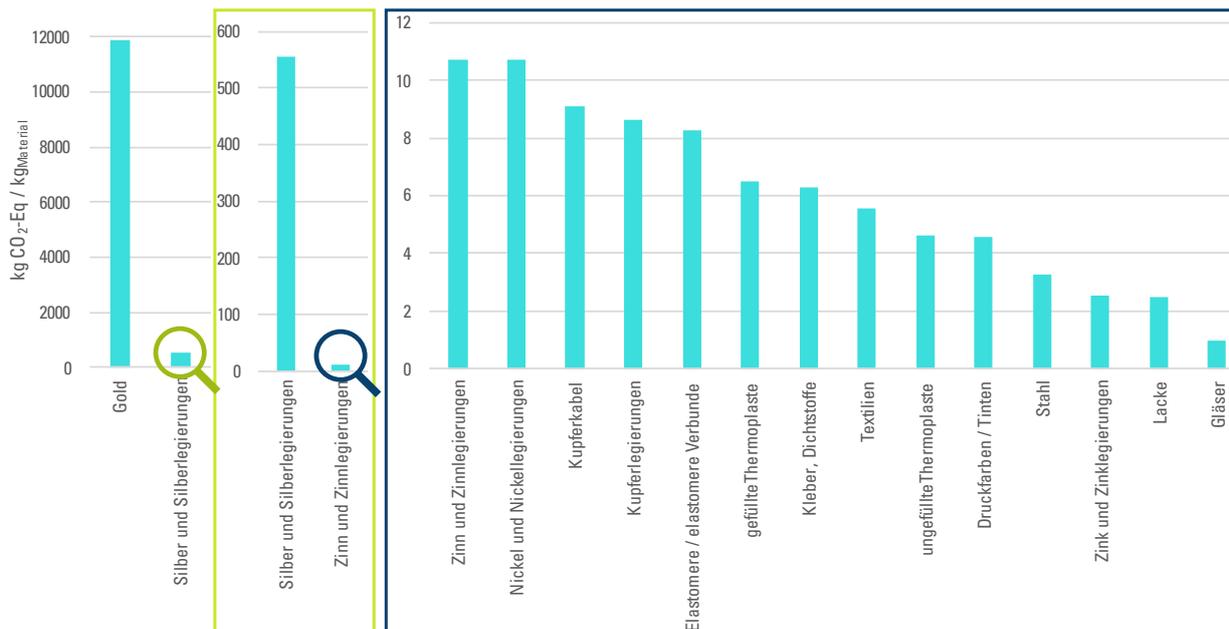


Abbildung 19: Spezifisches Treibhausgaspotential der Materialien im Ottomotor-Leitungssatz (kg CO<sub>2</sub>-Eq / kg Material)

### 4.3.2.3. End-of-Life

Für das End-of-Life des Ottomotor-Kabelsatzes ergibt sich eine analoge Verteilung der Emissionen und Gutschriften wie beim BEV-Leitungssatz (Vgl. Abbildung 20). In Summe wird eine Einsparung von etwa 3,6 kg CO<sub>2</sub>-Eq berechnet.

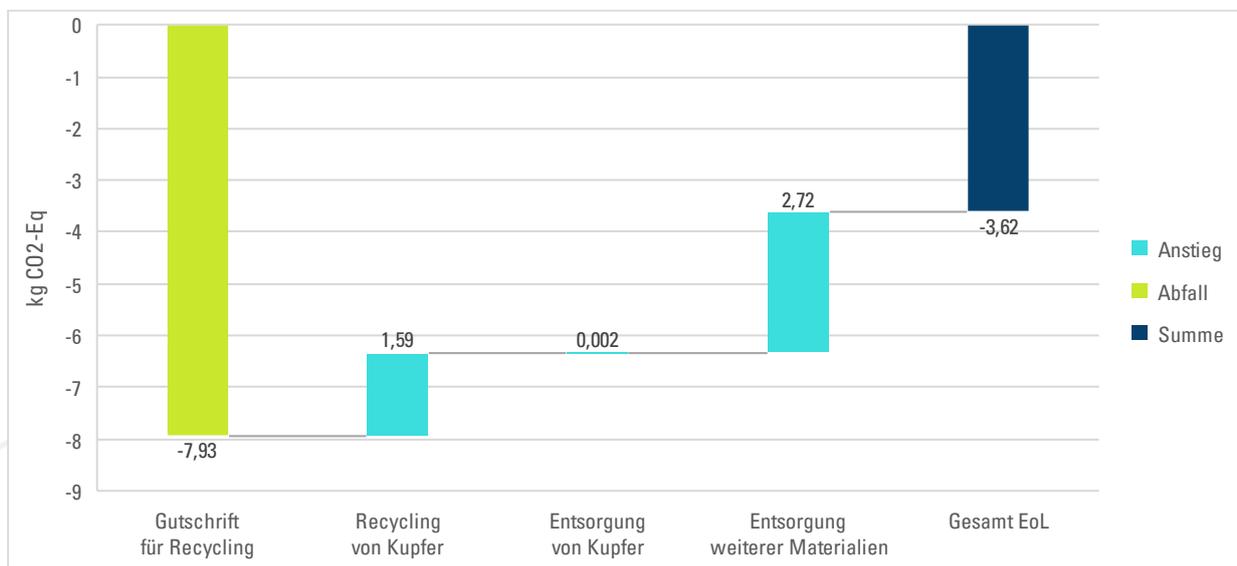


Abbildung 20: Ergebnisse des Treibhausgaspotentials aus dem EoL des Ottomotors

### 4.3.3. Vergleich der GWP-Ergebnisse für Kupfer mit Literaturwerten

In Abbildung 21 werden die vorliegenden Ergebnisse der Wirkungsabschätzung des Treibhausgaspotentials der Kupferherstellung den Werten aus der Literaturlauswertung von [Sanjuan-Delmás et al. 2022] gegenübergestellt. Dabei wird sowohl Kupfer der pyrometallurgischen Route als auch aus der Herstellung mit dem hydrometallurgischen Verfahren sowie Sekundärkupfer abgebildet. Es gilt weiterhin zu beachten, dass teilweise unterschiedliche Systemgrenzen betrachtet werden.

Auffällig ist, dass die Ergebnisse der vorliegenden Studie (Referenzwert) im Vergleich zu den Literaturdaten am höchsten ausfallen. Dies liegt darin begründet, dass für die Modellierung der Kabelsätze wie in Abschnitt 3.1.1 als konservative Annahme ein globaler ecoinvent-Datensatz für die pyrometallurgische Route verwendet worden ist. Bei der Wirkungsabschätzung für Europa haben [Sanjuan-Delmás et al. 2022] den ecoinvent-Prozess „treatment of copper scrap by electrolytic refining | copper, cathode | Cutoff, U – RER“ verwendet, welcher die Sekundärkupferherstellung in Europa abbildet und somit zu dem geringsten Treibhausgaspotential (82% geringer als der Referenzwert) führt. Bei der Modellierung mit ecoinvent für Schweden wird von den Autoren der Prozess „gold mine operation and refining | copper, cathode | Cutoff, U – SE“ verwendet, bei dem Kupfer als ein Nebenprodukt der Goldgewinnung und -raffination aufgeführt ist. Das Treibhausgaspotential ist in diesem Fall um 48% geringer als der Referenzwert. Bei der Dokumentation in ecoinvent ist für diese Art der Kupferherstellung in Schweden angegeben, dass die Datenqualität für Emissionen gering ist. Entsprechend kann der in der vorliegenden Studie modellierte Prozess als der für den Untersuchungsrahmen geeignetste Datensatz aus der ecoinvent-Datenbank gesehen werden.

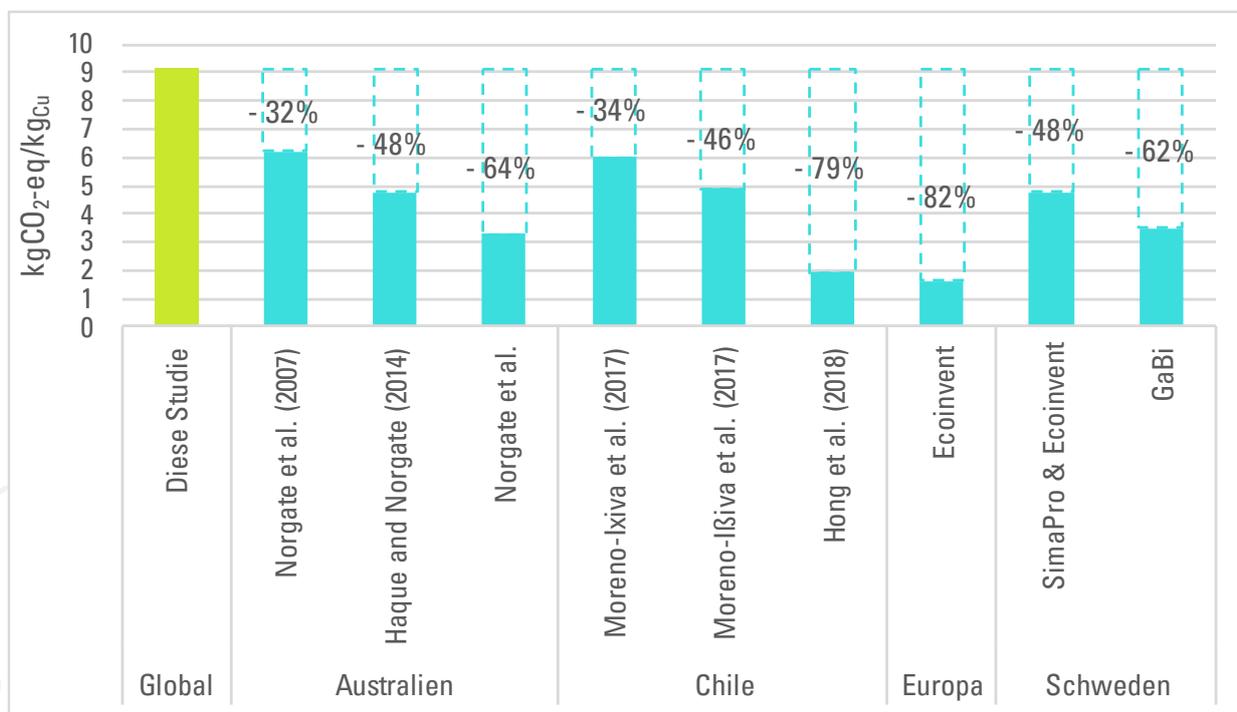


Abbildung 21: Vergleich der GWP-Ergebnisse für Kupfer mit den Ergebnissen der Literaturlauswertung nach [Sanjuan-Delmás et al. 2022] (kg CO<sub>2</sub>-Eq / kg Material)

## 4.4. Versauerungspotential

### 4.4.1. BEV-Leitungssatz

#### 4.4.1.1. Gesamtergebnis

In Abbildung 22 sind die Ergebnisse für das Versauerungspotential aller Lebenszyklusphasen des BEV-Leitungssatzes dargestellt. Auch hier führen Fertigung und Transporte im Vergleich zu anderen Lebenszyklusphasen nur zu sehr geringen Emissionen. Im End-of-Life ergibt sich aus dem Recycling von Kupferkabeln eine vergleichsweise hohe Gutschrift.

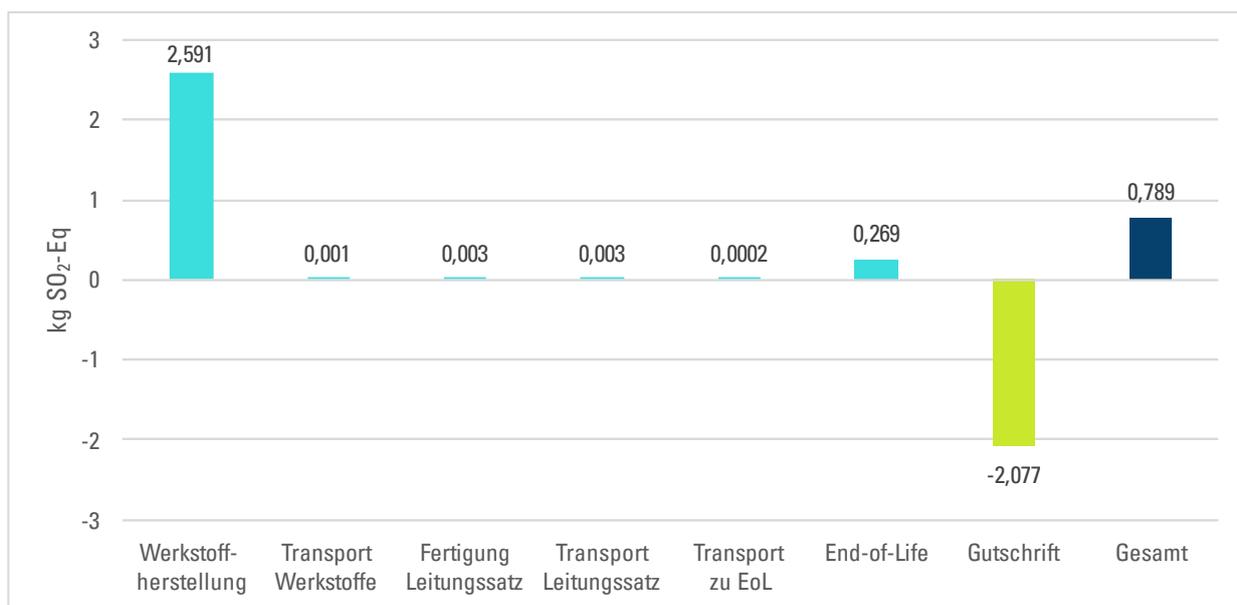


Abbildung 22: Ergebnis des Versauerungspotentials des BEV-Leitungssatzes über den gesamten Lebenszyklus

#### 4.4.1.2. Werkstoffherstellung

Wie in Abbildung 23 dargestellt, sind Metalle mit etwa 98% für den Hauptteil der Versauerungswirkung in der Werkstoffherstellung verantwortlich. Kunststoffe haben einen Einfluss von knapp 2% auf das Gesamtergebnis und andere Materialgruppen tragen zu etwa 0,2% bei. Aufgeschlüsselt nach Werkstoffgruppen zeigt Abbildung 24, dass Kupferkabel zu 92% des Versauerungspotentials beitragen und Kupferlegierungen zu 6%. Dies liegt darin begründet, dass Kupfer eine deutlich höhere spezifische Versauerungswirkung aufweist als Kunststoffe, wie in Abbildung 25 dargestellt. Platin, Gold, Silber und Nickel weisen noch höhere spezifische Versauerungswerte auf, stellen zusammen aber nur etwa 0,02% der Gesamtmasse und damit einen sehr geringen Teil der gesamten Versauerungswirkung dar.

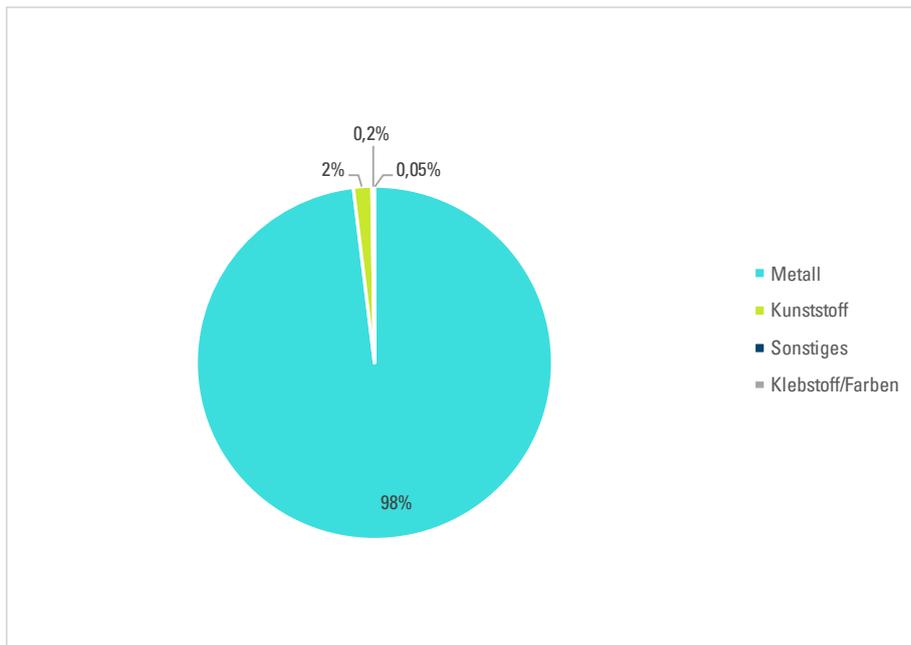


Abbildung 23: Ergebnis der Anteile des Versauerungspotentials der Werkstoffherstellung des BEV-Leitungssatzes nach Materialkategorie

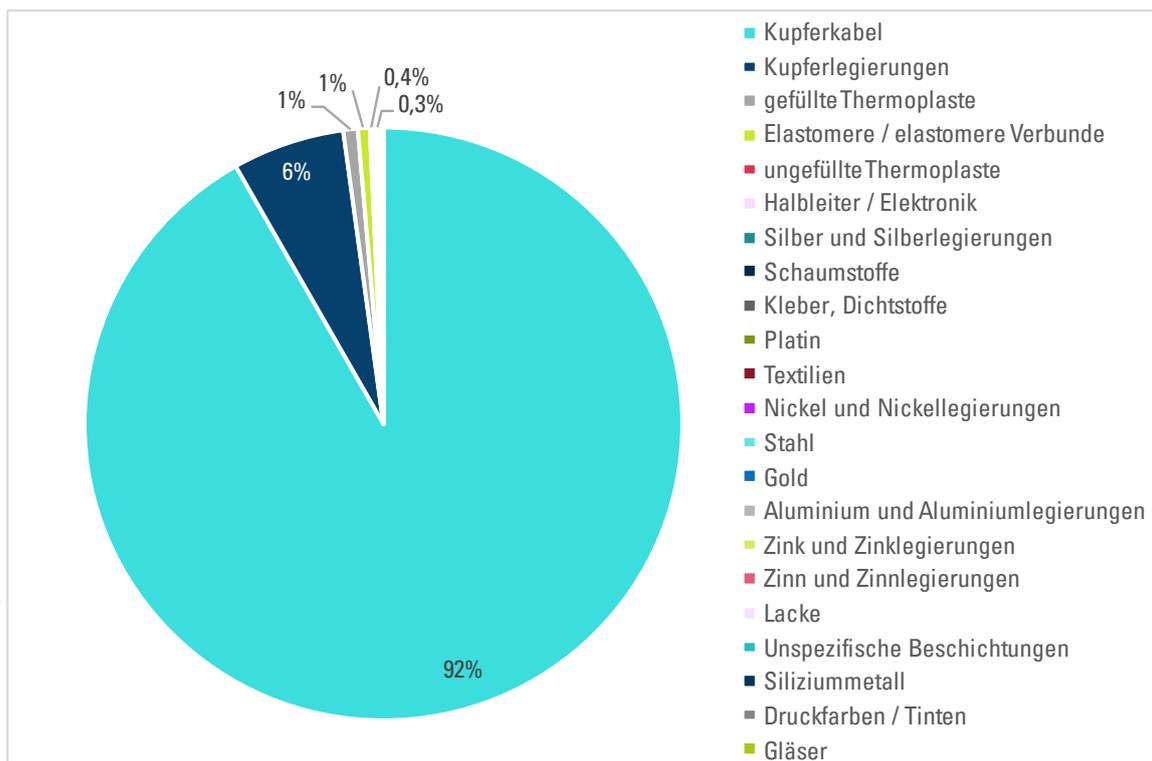


Abbildung 24: Ergebnis der Anteile des Versauerungspotentials der Werkstoffherstellung des BEV-Leitungssatzes nach Materialgruppe (detailliert)

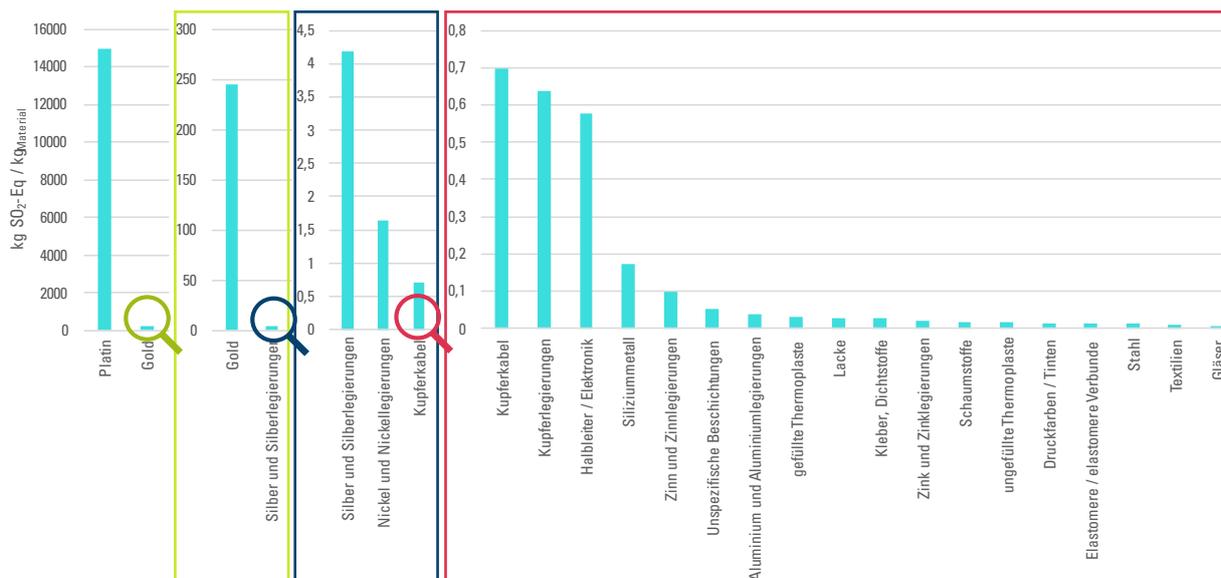


Abbildung 25: Spezifisches Versauerungspotential der Materialien im BEV-Leitungssatz (kg SO<sub>2</sub>-Eq / kg Material)

#### 4.4.1.3. End-of-Life

Abbildung 26 stellt die Emissionen und Gutschriften im End-of-Life des BEV-Leitungssatzes dar. Im Vergleich zu der Wirkungskategorie Treibhausgaspotential ergeben sich deutlich höhere Einsparungen, da die Versauerungswirkung des Recyclings und der Entsorgungsprozesse signifikant geringer ist als die der Herstellung von Primärkupfer, welches hier durch das rezyklierte Kupfer substituiert wird. Insgesamt ergibt sich für das End-of-Life eine Reduktion des Versauerungspotentials um etwa 1,8 kg SO<sub>2</sub>-Eq.

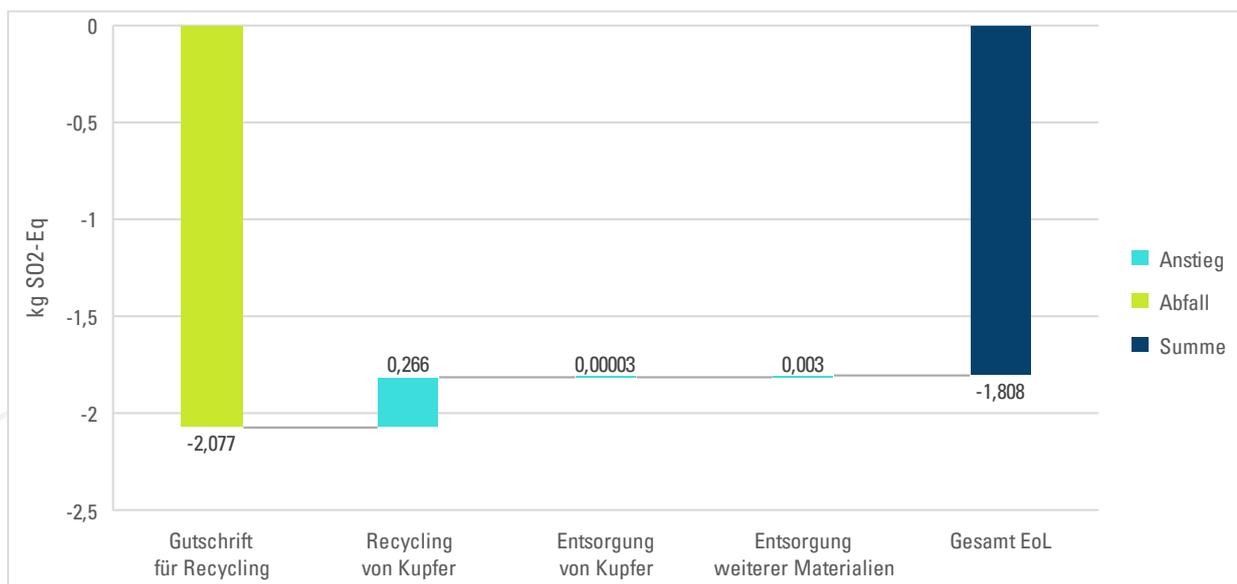


Abbildung 26: Ergebnisse des Versauerungspotentials aus dem EoL des BEV-Leitungssatzes

#### 4.4.2. Ottomotor-Leitungssatz

##### 4.4.2.1. Gesamtergebnis

Die Verteilung der Treiber des Versauerungspotentials im Ottomotor-Kabelsatz ist vergleichbar zum BEV-Leitungssatz (Vgl. Abbildung 27). Fertigung und Transporte haben nahezu keinen Einfluss auf das Gesamtergebnis.

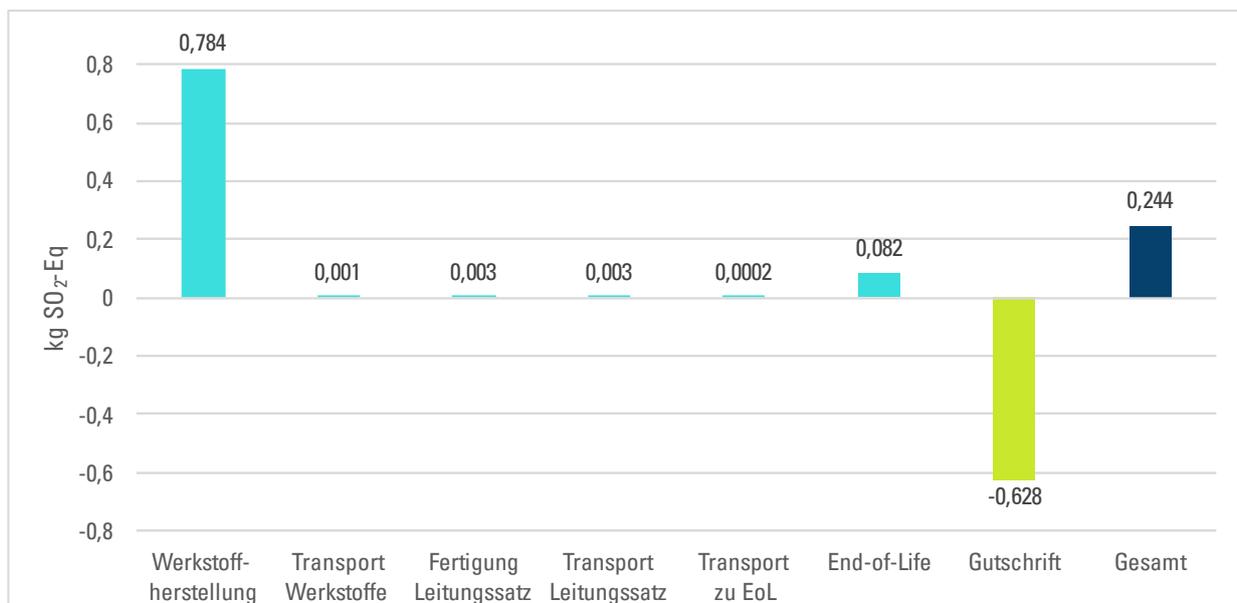


Abbildung 27: Ergebnis des Versauerungspotentials des Ottomotor-Leitungssatzes über den gesamten Lebenszyklus

##### 4.4.2.2. Werkstoffherstellung

Abbildung 28 stellt Metalle mit einem Anteil von etwa 97% ebenfalls als Haupttreiber des Versauerungspotentials der Werkstoffherstellung da, während Kunststoffe zu etwa 3% und sonstige Materialien zu 0,5% beitragen. Aus Abbildung 29 wird ersichtlich, dass ähnlich wie beim BEV-Leitungssatz Kupferkabel zu 92% des Versauerungspotentials beitragen und Kupferlegierungen zu 5%. Dies lässt sich erneut auf das hohe spezifische Versauerungspotential von Kupfer zurückführen. In Abbildung 30 ist dieses den Werten der anderen Werkstoffgruppen im Ottomotor-Leitungssatz gegenübergestellt. Gold hat mit etwa 250 kg SO<sub>2</sub>-Eq pro kg Material das höchste spezifische Versauerungspotential, ist im Kabelsatz aber nur mit knapp 0,001 Gewichts-% enthalten.

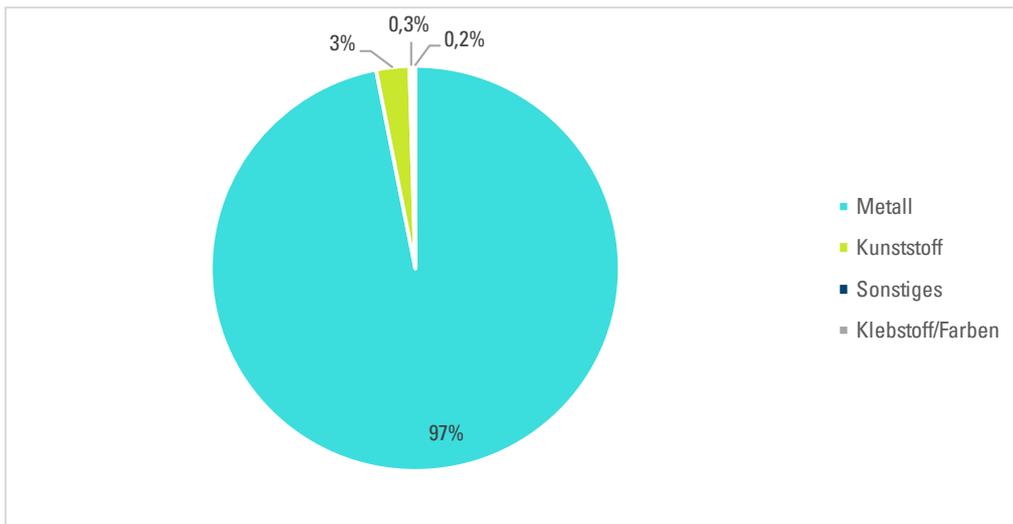


Abbildung 28: Ergebnis der Anteile des Versauerungspotentials der Werkstoffherstellung des Ottomotor-Leitungssatzes nach Materialkategorie

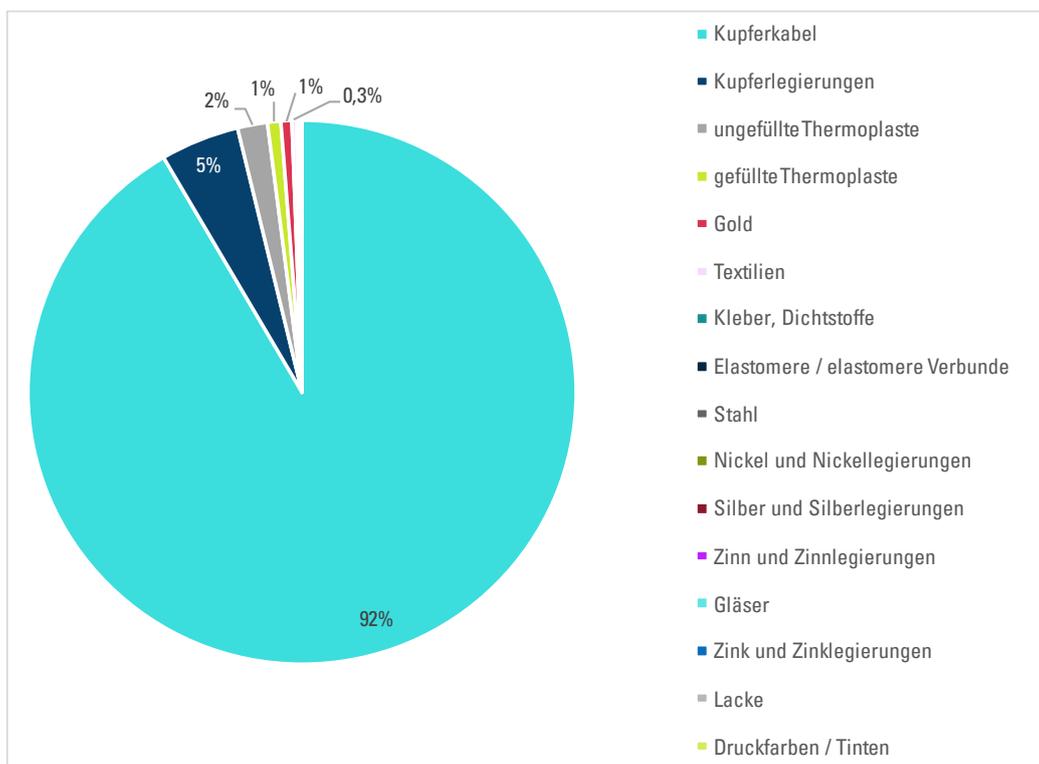


Abbildung 29: Ergebnis der Anteile des Versauerungspotentials der Werkstoffherstellung des Ottomotor-Leitungssatzes nach Materialgruppe (detailliert)

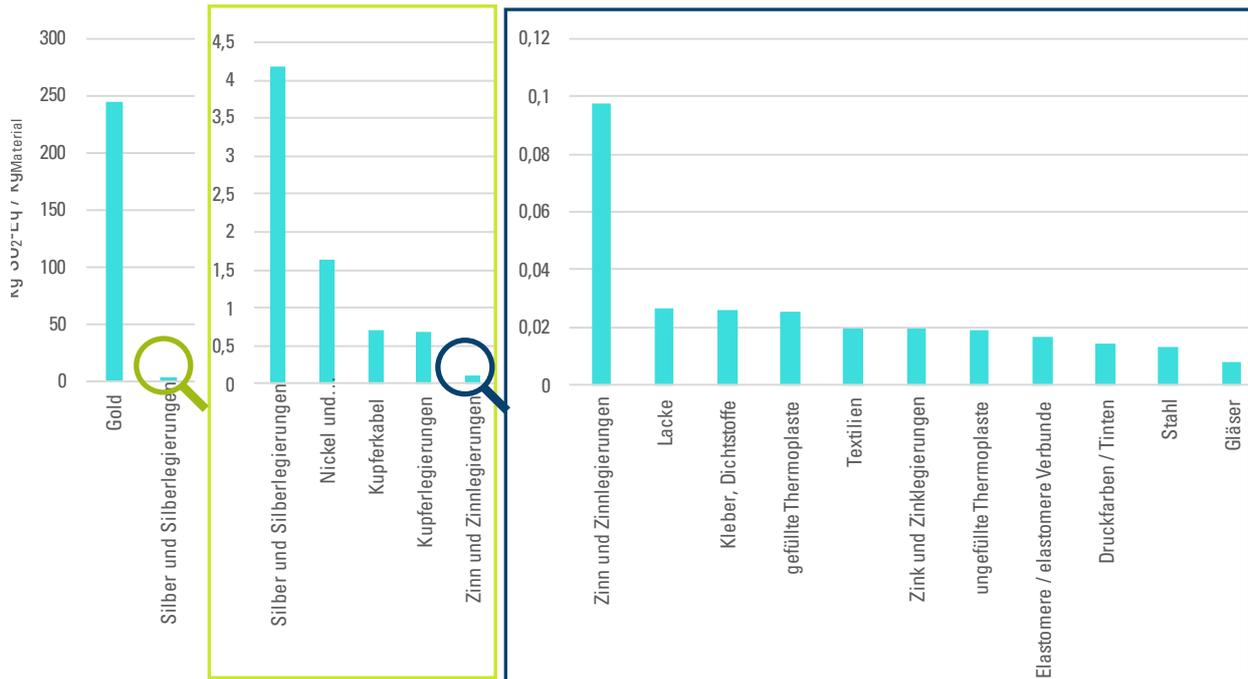


Abbildung 30: Spezifisches Versauerungspotential der Materialien im Ottomotor-Leitungssatz (kg SO<sub>2</sub>-Eq / kg Material)

#### 4.4.2.3. End-of-Life

Die in Abbildung 31 illustrierte Verteilung der Versauerungswirkungen im End-of-Life des Ottomotor-Leitungssatzes ist analog zum anderen betrachteten Produktsystem. In Summe ergeben sich Einsparungen um etwa 0,5 kg SO<sub>2</sub>-Eq.

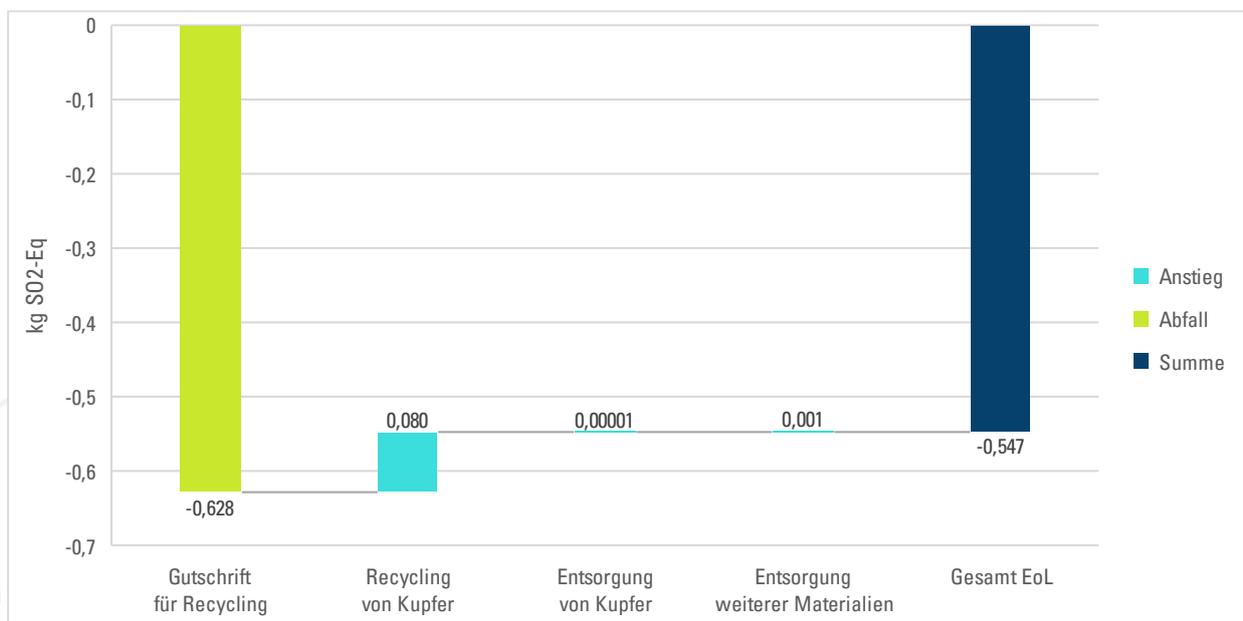


Abbildung 31: Ergebnisse des Versauerungspotentials aus dem EoL des Ottomotor-Leitungssatzes

#### 4.4.3. Vergleich der AP-Ergebnisse für Kupfer mit Literaturwerten

Abbildung 32 stellt die AP-Ergebnisse für die Kupferherstellung mehreren Literaturwerten gegenüber. Erneut ist auffällig, dass die vorliegende Studie den höchsten Emissionswert aufweist. [Dong et al. 2020] berechnen für die Kupferherstellung nach der pyrometallurgischen Route in China 49% geringere Emissionen als der Referenzwert. Der AP-Emissionswert der [International Copper Association 2021] setzt sich aus der jährlichen Kupferherstellung aus allen Herstellungsrouten (inklusive Sekundärkupfer) zusammen und ist um 91% geringer als die Ergebnisse der vorliegenden Studie. Die Wirkungsabschätzungsergebnisse von [Sanjuan-Delmás et al. 2022] beziehen sich, wie in Abschnitt 4.3.3 erläutert, auf Kupfer als Nebenprodukt der Goldgewinnung in Schweden und stellen mit -95% den geringsten Literaturwert in diesem Vergleich dar.

Insgesamt lässt sich feststellen, dass das Versauerungspotential der Kupferherstellung eine noch größere Bandbreite aufweist als das Treibhausgaspotential. In einer Zeitreihenanalyse von Umweltauswirkungen der Kupferherstellung in Australien zwischen 1940 und 2008 geben [Memary et al. 2012] für den Hersteller Mount Isa eine Reduktion des Versauerungspotentials von etwa 2,5 kg SO<sub>2</sub>-Eq pro kg Kupfer zu unter 0,1 kg SO<sub>2</sub>-Eq durch Technologieverbesserungen an. Dies lässt sich primär auf die Abscheidung von Schwefeldioxidemissionen bei der Kupferschmelze zurückführen.

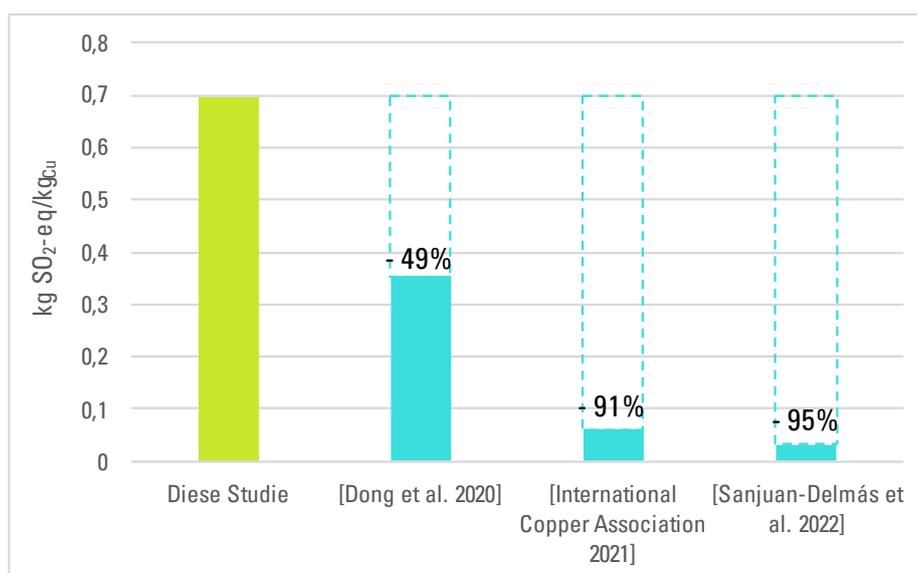


Abbildung 32: Vergleich der AP-Ergebnisse für Kupfer mit Literaturwerten nach [Dong et al. 2020], [International Copper Association 2021] und [Sanjuan-Delmás et al. 2022] (kg SO<sub>2</sub>-Eq / kg Material)

## 4.5. Erneuerbarer Primärenergieverbrauch (CED – renewable)

### 4.5.1. BEV-Leitungssatz

#### 4.5.1.1. Gesamtergebnis

Im Vergleich zum Versauerungspotential lässt sich für das Gesamtergebnis des BEV-Kabelsatzes erkennen, dass die Fertigung und das End-of-Life mit etwas höheren erneuerbaren Primärenergiebedarfen verbunden sind (Vgl. Abbildung 33). In Relation zur Werkstoffherstellung und zur Gutschrift durch das Recycling ist dieser Wert dennoch gering.

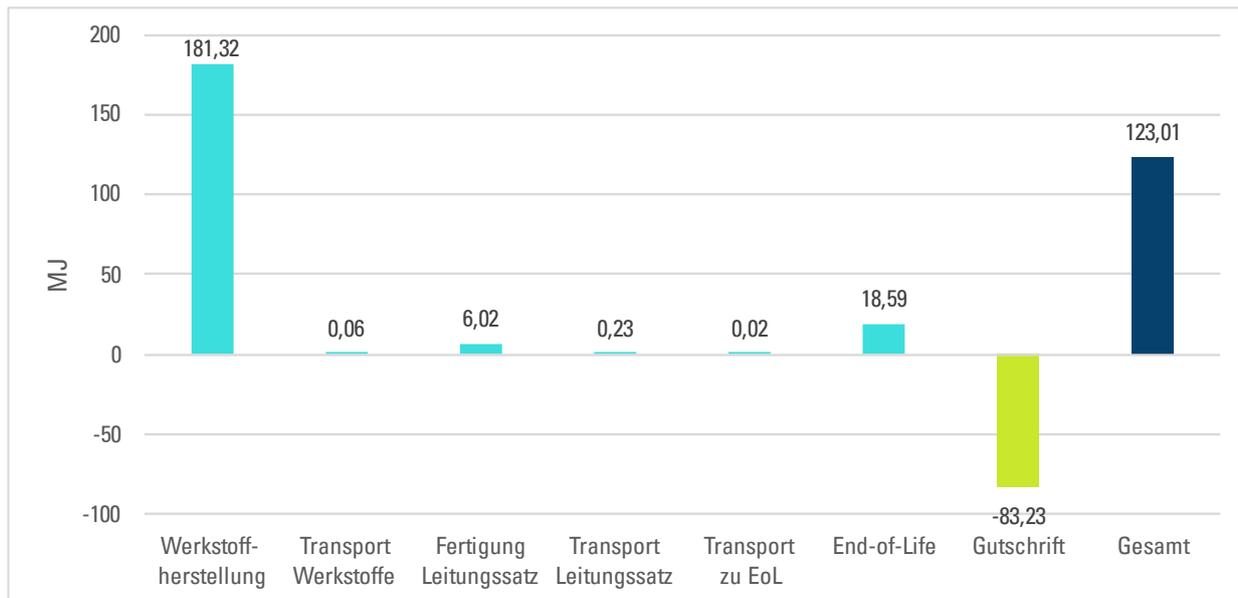


Abbildung 33: Ergebnis des Erneuerbaren Primärenergieverbrauchs des BEV-Leitungssatzes über den gesamten Lebenszyklus

#### 4.5.1.2. Werkstoffherstellung

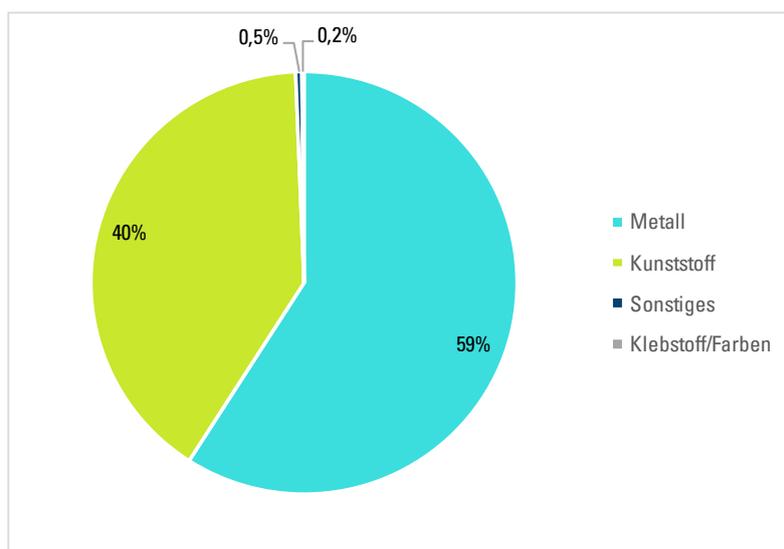


Abbildung 34: Ergebnis der Anteile des Erneuerbaren Primärenergieverbrauchs der Werkstoffherstellung des BEV-Leitungssatzes nach Materialkategorie

Abbildung 34 stellt den Anteil der Werkstoffgruppen am erneuerbaren Primärenergiebedarf der Werkstoffherstellung dar. Ähnlich zum Treibhausgaspotential sind Metalle für den Hauptteil der Umweltwirkung verantwortlich, gefolgt von Kunststoffen. Weitere Stoffe haben mit insgesamt 0,7% einen sehr geringen Einfluss auf das Ergebnis. In Abbildung 35 sind die Auswirkungen weiter nach Werkstoffgruppen unterteilt. 59% des Primärenergieverbrauchs der Werkstoffherstellung entsteht durch Kupferkabel und 40% durch Elastomere bzw. Elastomerverbunde. Thermoplaste haben im Vergleich hierzu einen geringen Einfluss auf das Ergebnis, was sich auf die niedrigen erneuerbaren Anteile am Primärenergiebedarf bei den verwendeten ecoinvent-Datensätzen zurückführen lässt, während der Ökobaudat-Datensatz für Silikonkautschuks einen höheren erneuerbaren Anteil aufweist (Vgl. Abschnitt

3.1.2). Wie auch bei den THG-Emissionen weisen Platin, Gold, Silber und Silizium die höchsten materialspezifischen Primärenergiebedarfe auf (Vgl. Abbildung 36), was sich aufgrund der sehr geringen Mengen kaum auf das Gesamtergebnis auswirkt.

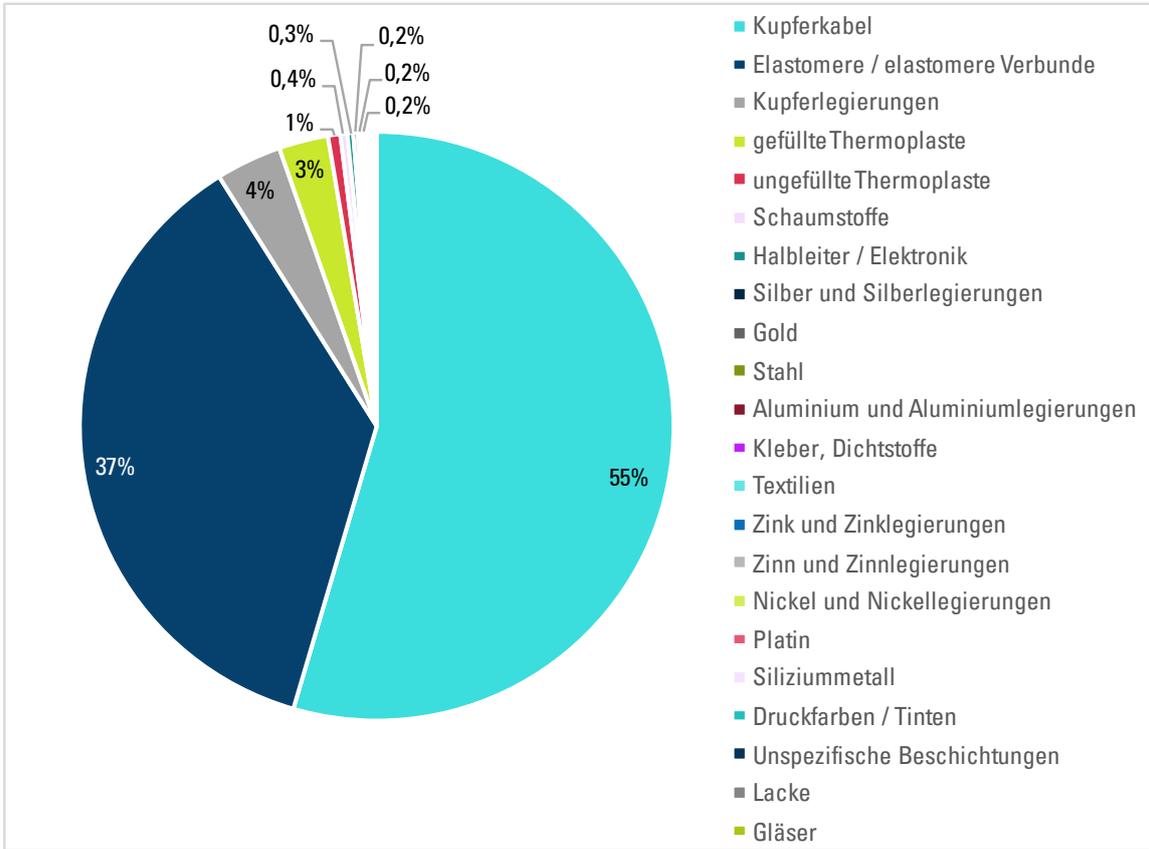


Abbildung 35: Ergebnis der Anteile des Erneuerbaren Primärenergieverbrauchs der Werkstoffherstellung des BEV-Leitungssatzes nach Materialgruppe (detailliert)

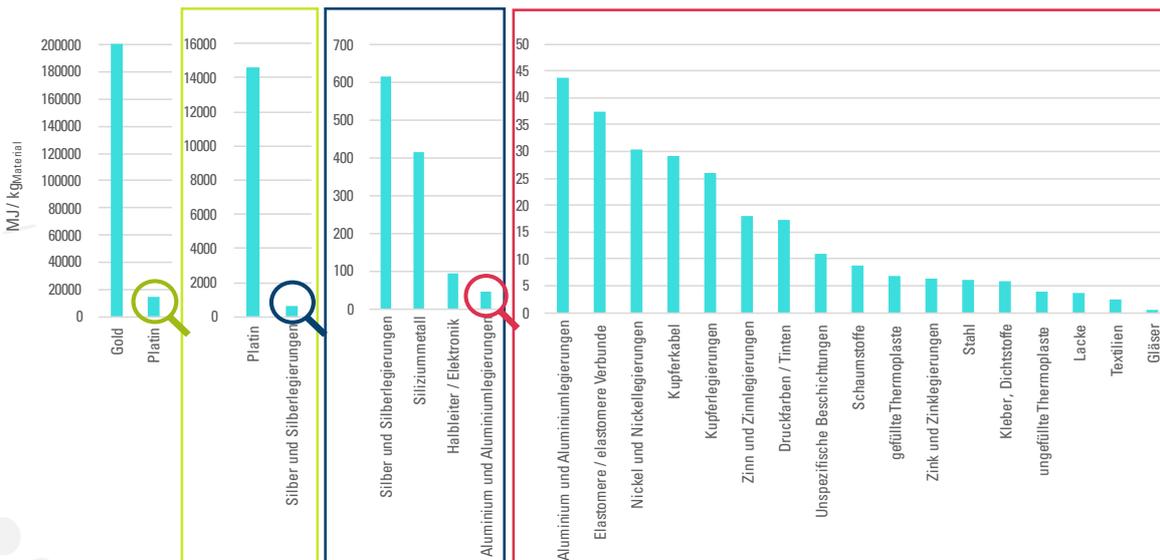


Abbildung 36: Spezifischer erneuerbarer Primärenergieverbrauch der Materialien im BEV-Leitungssatz (MJ / kg Material)

### 4.5.1.3. End-of-Life

Für den erneuerbaren Primärenergiebedarf führt Abbildung 37 auf, dass die Entsorgungsprozesse im End-of-Life im Vergleich zur Auswertung des Treibhausgaspotentials einen sehr geringen Einfluss auf das Ergebnis haben. Die insgesamt Gutschrift wird nur geringfügig durch den Energiebedarf des Recyclings von Kupferkabeln reduziert und beträgt knapp 64,6 MJ.

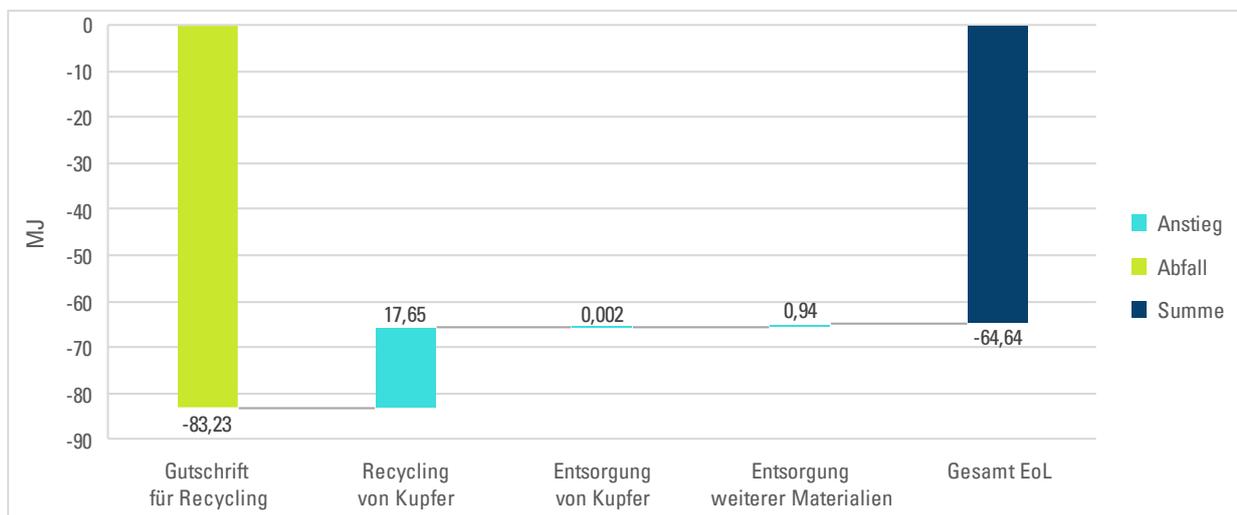


Abbildung 37: Ergebnis des Erneuerbaren Primärenergieverbrauchs aus dem EoL des BEV-Leitungssatz

### 4.5.2. Ottomotor-Leitungssatz

#### 4.5.2.1. Gesamtergebnis

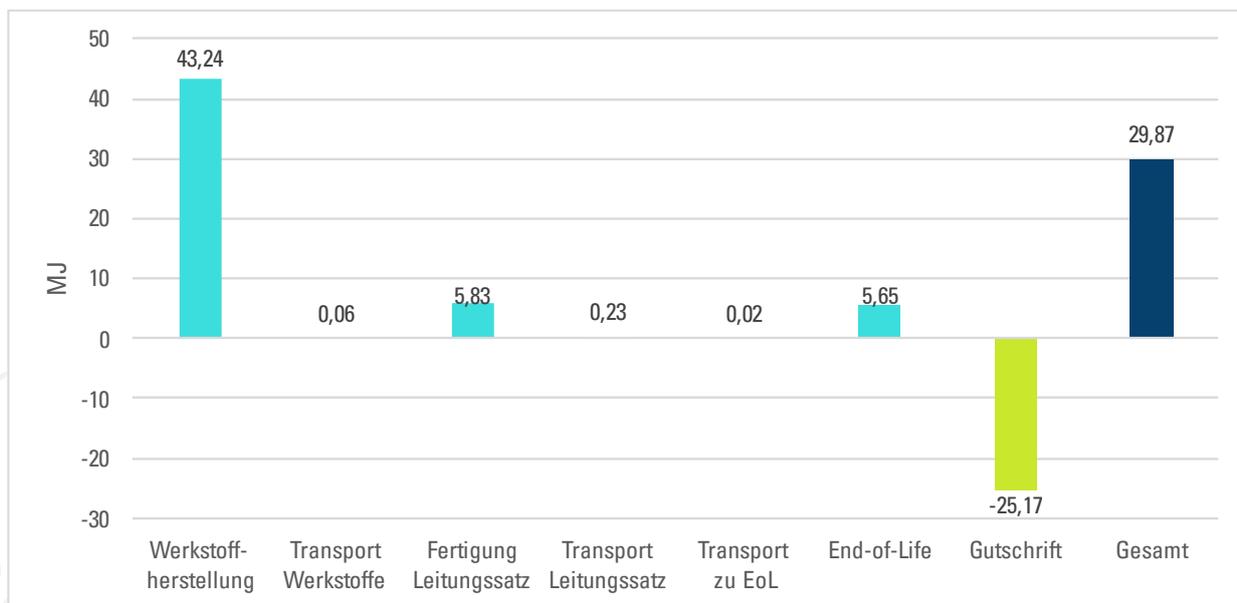


Abbildung 38: Ergebnis des Erneuerbaren Primärenergieverbrauchs des Ottomotor-Leitungssatzes über den gesamten Lebenszyklus

Für den Ottomotor-Kabelsatz ist der erneuerbare Primärenergieverbrauch nach Abbildung 38 über den Lebenszyklus ähnlich verteilt wie beim BEV-Leitungssatz. Auffällig ist, dass die Fertigung mit höheren Auswirkungen einhergeht als das End-of-Life.

#### 4.5.2.2. Werkstoffherstellung

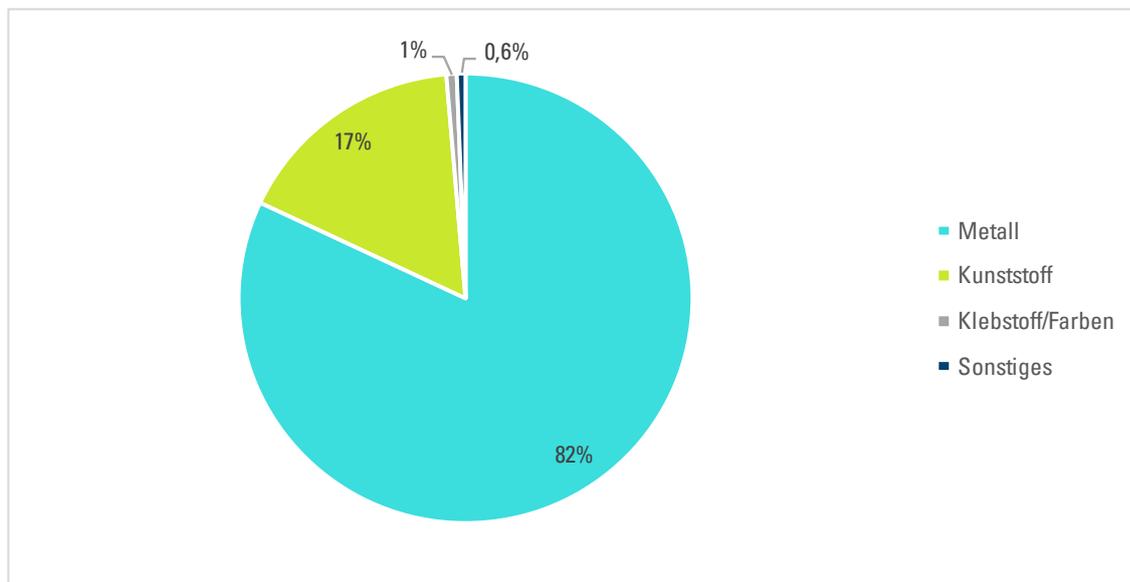


Abbildung 39: Ergebnis der Anteile des Erneuerbaren Primärenergieverbrauchs der Werkstoffherstellung des Ottomotor-Leitungssatzes nach Materialkategorie

In Abbildung 39 ist der relative erneuerbare Primärenergiebedarf der Werkstoffherstellung des Ottomotor-Leitungssatzes abgebildet. Im Vergleich zu den Ergebnissen des anderen Kabelsatzes haben Kunststoffe hier mit 17% einen signifikant geringeren Einfluss. Dies lässt sich dadurch begründen, dass Elastomere im vorliegenden Leitungssatz nur einen Anteil von etwa 1,6% an der Gesamtmasse aufweisen und somit weniger zum Gesamtergebnis beitragen als beim BEV-Kabelsatz. Nach Kupferkabeln ist Gold trotz dem sehr geringen Massenanteil von 0,001% der größte Treiber für den erneuerbaren Primärenergiebedarf (Vgl. Abbildung 40). Die materialspezifischen Werte sind in Abbildung 41 aufgeführt.

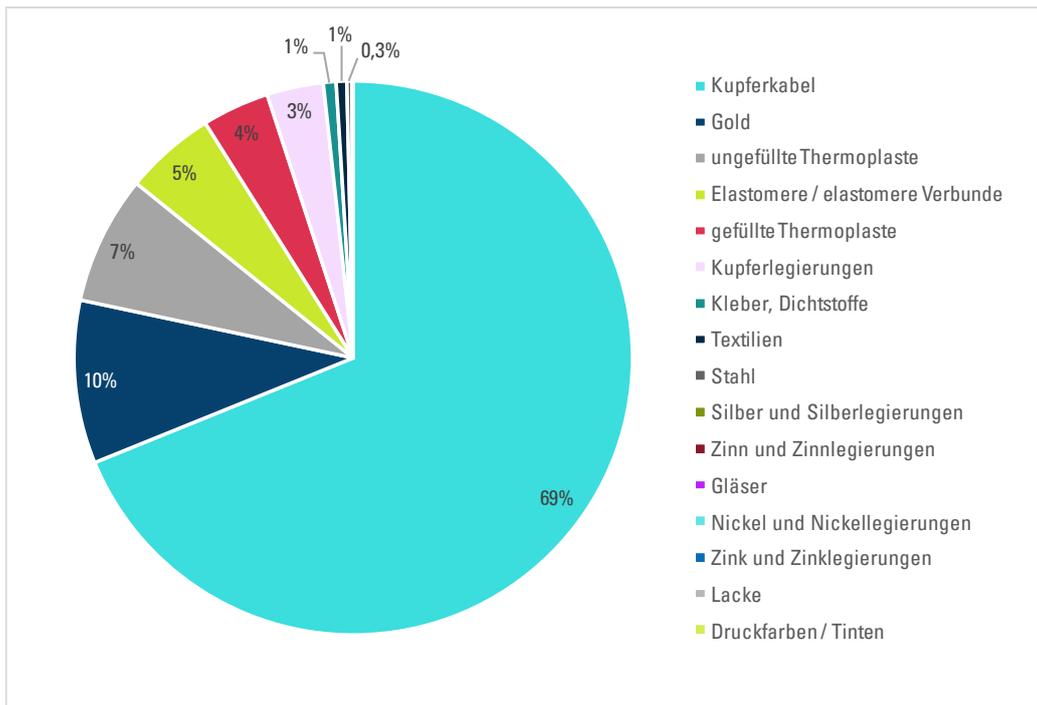


Abbildung 40: Ergebnis der Anteile des Erneuerbaren Primärenergieverbrauchs der Werkstoffherstellung des Ottomotor-Leitungssatzes nach Materialgruppe (detailliert)

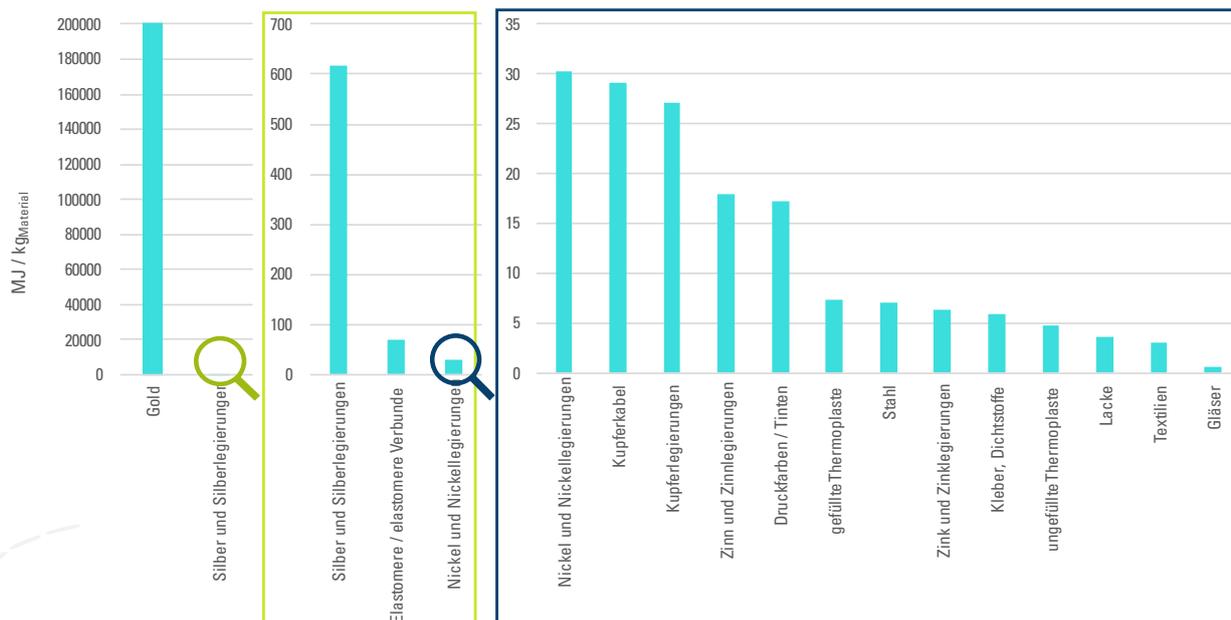


Abbildung 41: Spezifischer erneuerbarer Primärenergieverbrauch der Materialien im Ottomotor-Leitungssatz (MJ / kg Material)

### 4.5.2.3. End-of-Life

Die Verteilung der erneuerbaren Primärenergieverbräuche für den Ottomotor-Leitungssatz ist im End-of-Life analog zum BEV-Leitungssatz (Vgl. Abbildung 42). Insgesamt resultieren das Recycling sowie die Entsorgungsprozesse in einer Gutschrift von etwa 19,5 MJ.

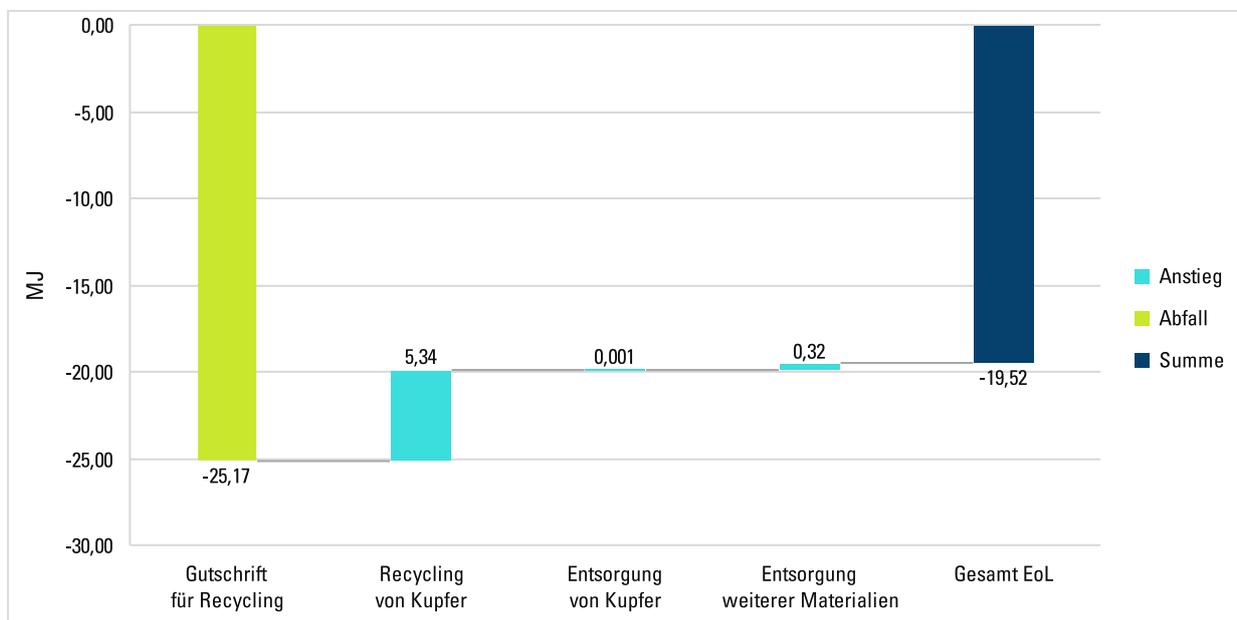


Abbildung 42: Ergebnis des Erneuerbaren Primärenergieverbrauchs aus dem EoL des Ottomotor-Leitungssatzes

## 4.6. Nicht-Erneuerbarer Primärenergieverbrauch (CED – fossil)

### 4.6.1. BEV-Leitungssatz

#### 4.6.1.1. Gesamtergebnis

In Abbildung 43 sind die Ergebnisse für die Auswertung des nicht-erneuerbaren Primärenergiebedarfs über den Lebenszyklus des BEV-Leitungssatzes aufgeführt. Die relativen Einflüsse der verschiedenen Lebenszyklusphasen sind sehr ähnlich zum erneuerbaren Anteil in Abschnitt 4.5.1.1.



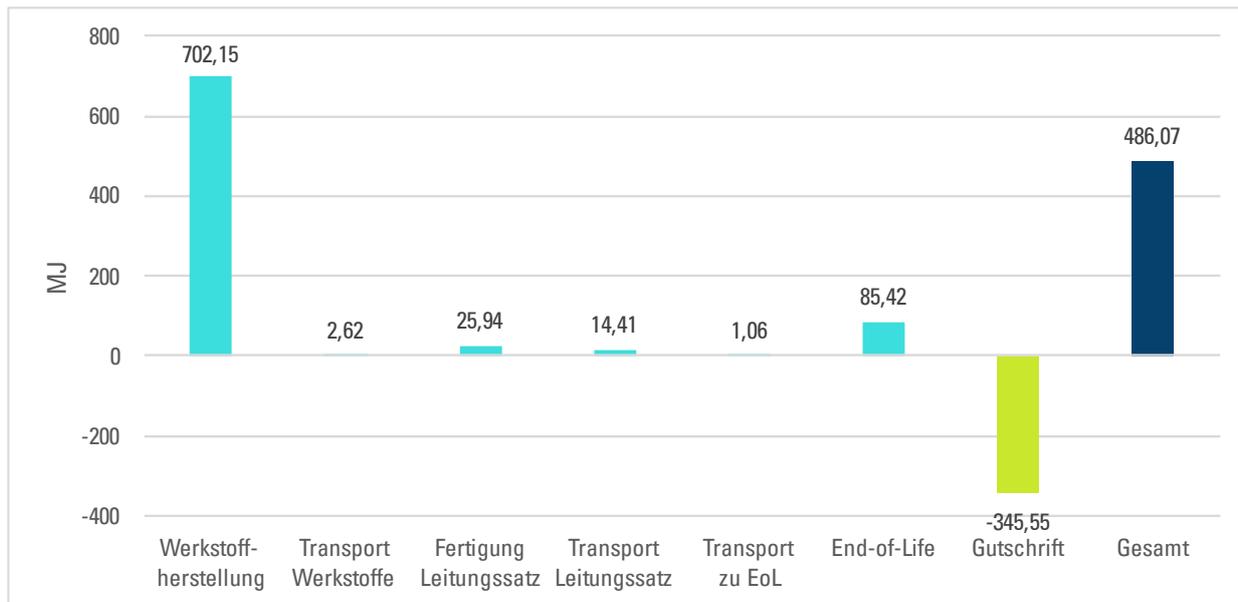


Abbildung 43: Ergebnis des Nicht-Erneuerbaren Primärenergieverbrauchs des BEV-Leitungssatzes über den gesamten Lebenszyklus

#### 4.6.1.2. Werkstoffherstellung

In Abbildung 44 ist der Anteil der Materialgruppen am nicht-erneuerbaren Primärenergiebedarf der Werkstoffherstellung dargestellt. Metalle tragen hier zu 64% und Kunststoffe zu 33% bei. Die Aufschlüsselung nach Werkstoffgruppen in Abbildung 45 zeigt eine ähnliche Verteilung wie für das Treibhausgaspotential des BEV-Leitungssatzes. Kupferkabel haben einen Einfluss von 59%, Elastomere bzw. Elastomerverbunde von 16% und gefüllte Thermoplaste von 12%. Wie in Abbildung 46 aufgeführt, weisen Gold, Platin, Silber und Silizium die höchsten materialspezifischen Primärenergiebedarfe auf, wirken sich durch ihre geringen Massenanteile aber kaum auf das Gesamtergebnis aus.

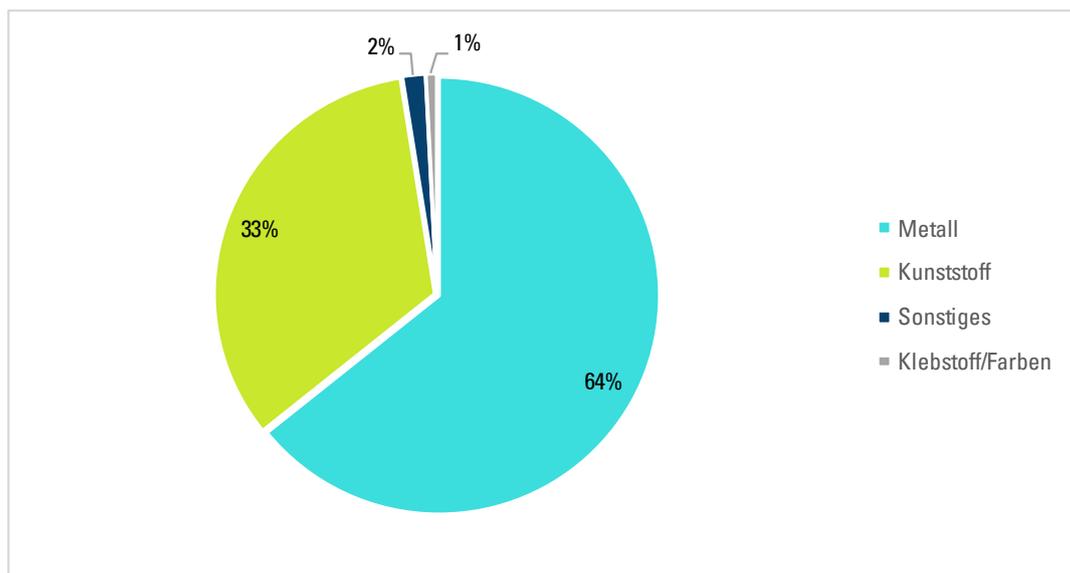


Abbildung 44: Ergebnis der Anteile des Nicht-Erneuerbaren Primärenergieverbrauchs der Werkstoffherstellung des BEV-Leitungssatzes nach Materialkategorie

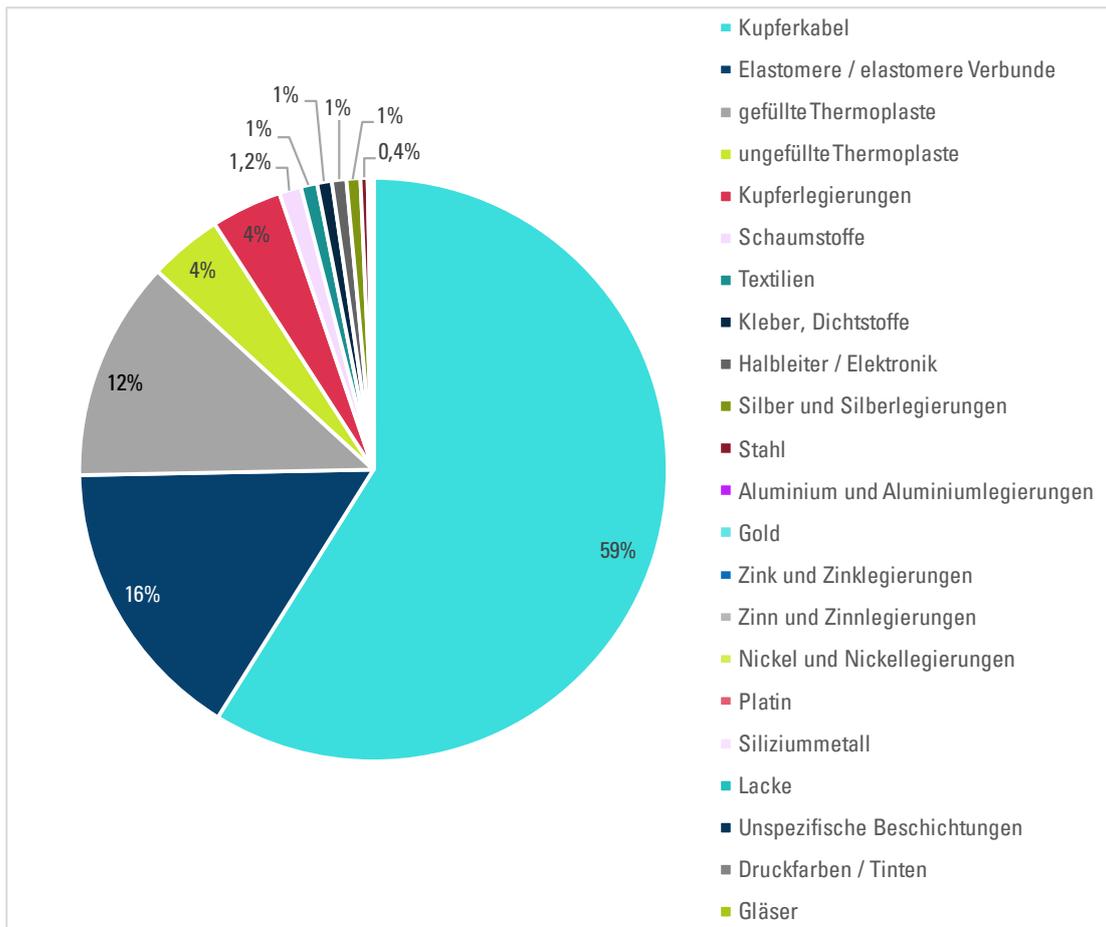


Abbildung 45: Ergebnis der Anteile des Nicht-Erneuerbaren Primärenergieverbrauchs der Werkstoffherstellung des BEV-Leitungssatzes nach Materialgruppe

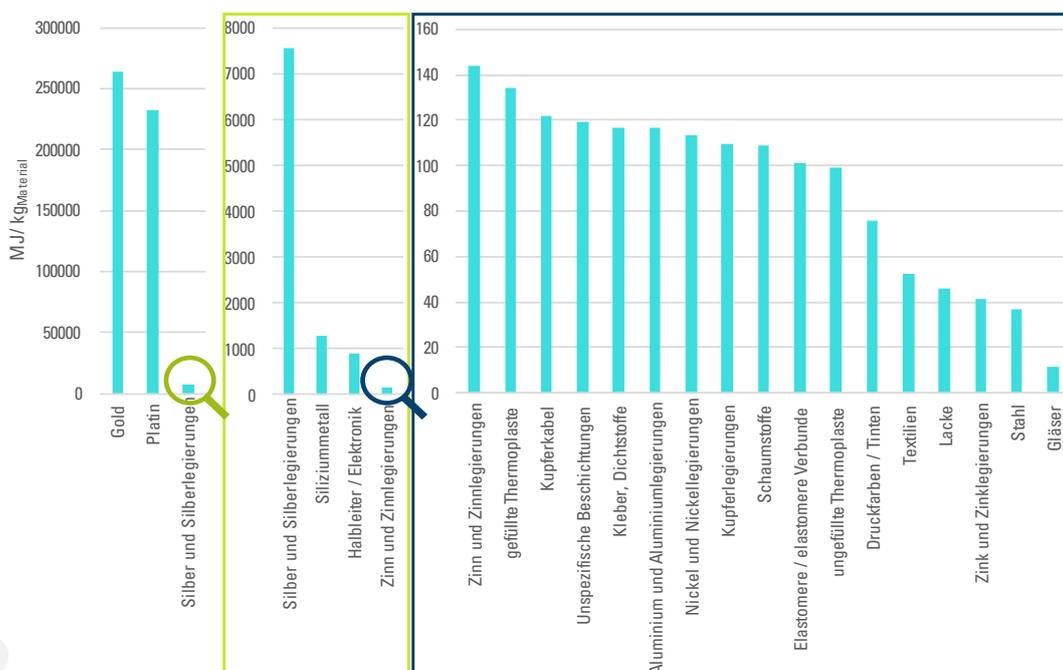


Abbildung 46: Spezifischer nicht-erneuerbarer Primärenergieverbrauch der Materialien im BEV-Leitungssatz (MJ / kg Material)

### 4.6.1.3. End-of-Life

Für den nicht-erneuerbaren Primärenergiebedarf lässt sich eine ähnliche Verteilung der verschiedenen Anteile erkennen wie zuvor bei den Ergebnissen des erneuerbaren Primärenergieverbrauchs (Vgl. Abbildung 47). In Summe ergibt sich eine Einsparung von 260,1 MJ.

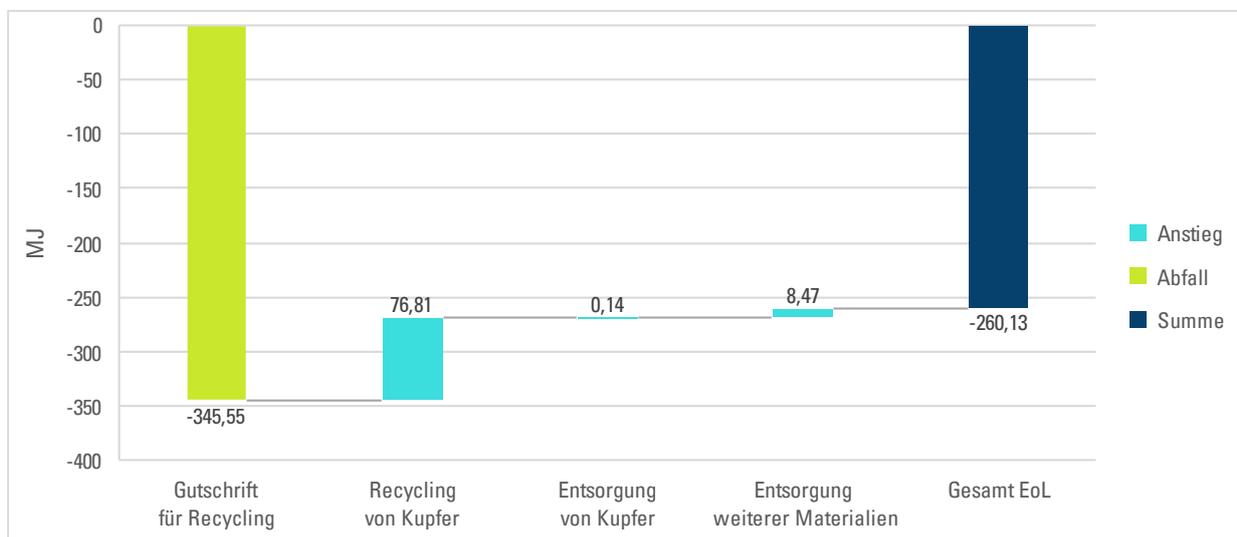


Abbildung 47: Ergebnis des Nicht-Erneuerbaren Primärenergieverbrauchs aus dem EoL des BEV-Leitungssatz

### 4.6.2. Ottomotor-Leitungssatz

#### 4.6.2.1. Gesamtergebnis

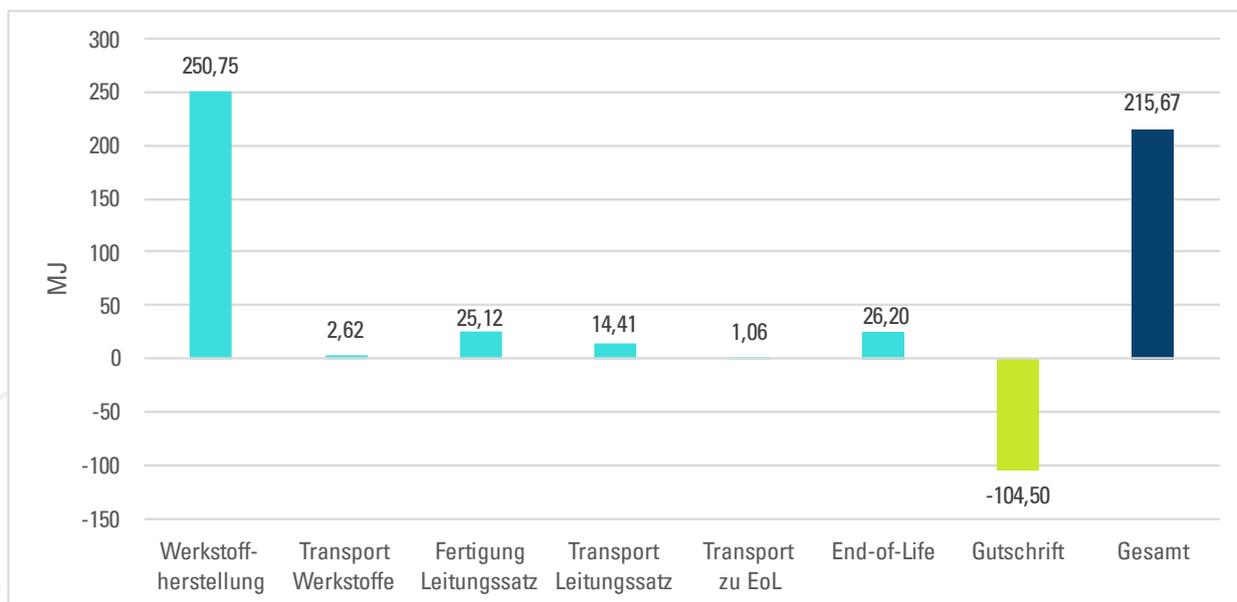


Abbildung 48: Ergebnis des Nicht-Erneuerbaren Primärenergieverbrauchs des Ottomotor-Leitungssatzes über den gesamten Lebenszyklus

Die nicht-erneuerbaren Primärenergieverbräuche des Ottomotor-Leitungssatzes in Abbildung 48 weisen eine sehr ähnliche Verteilung zu dem Ergebnis für die Auswertung des erneuerbaren Anteils in Abschnitt

4.5.2.1 auf. Auch hier hat die Fertigung des Kabelsatzes nahezu die gleichen Auswirkungen wie die Energiebedarfe des End-of-Life.

#### 4.6.2.2. Werkstoffherstellung

Abbildung 49 zeigt die Ergebnisse für die Werkstoffherstellung des Ottomotor-Leitungssatzes. Der Anteil der Metalle beträgt hier 54%, während Kunststoffe 39% ausmachen. Der Rest des nicht-erneuerbaren Primärenergieverbrauchs lässt sich zu 3% auf Klebstoffe und Farben, sowie zu 4% hauptsächlich auf Textilien zurückführen (Vgl. Abbildung 50). Entsprechend ihrem höheren Massenanteil im Produkt haben ungefüllte Thermoplaste mit 26% einen höheren Einfluss als gefüllte Thermoplaste mit 12%. Wie Abbildung 51 illustriert, sind Gold und Silber die Materialien mit den höchsten spezifischen Primärenergiebedarfen. Dies führt bei Gold zu einem Anteil von 2% an den Ergebnissen der Werkstoffherstellung.

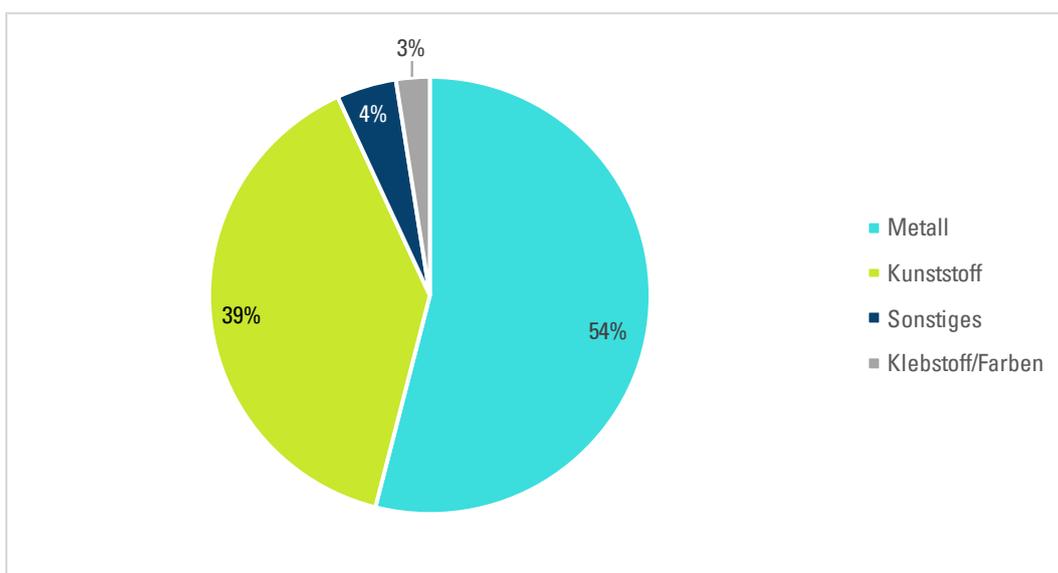


Abbildung 49: Ergebnis der Anteile des Nicht-Erneuerbaren Primärenergieverbrauchs der Werkstoffherstellung des Ottomotor-Leitungssatzes nach Materialkategorie

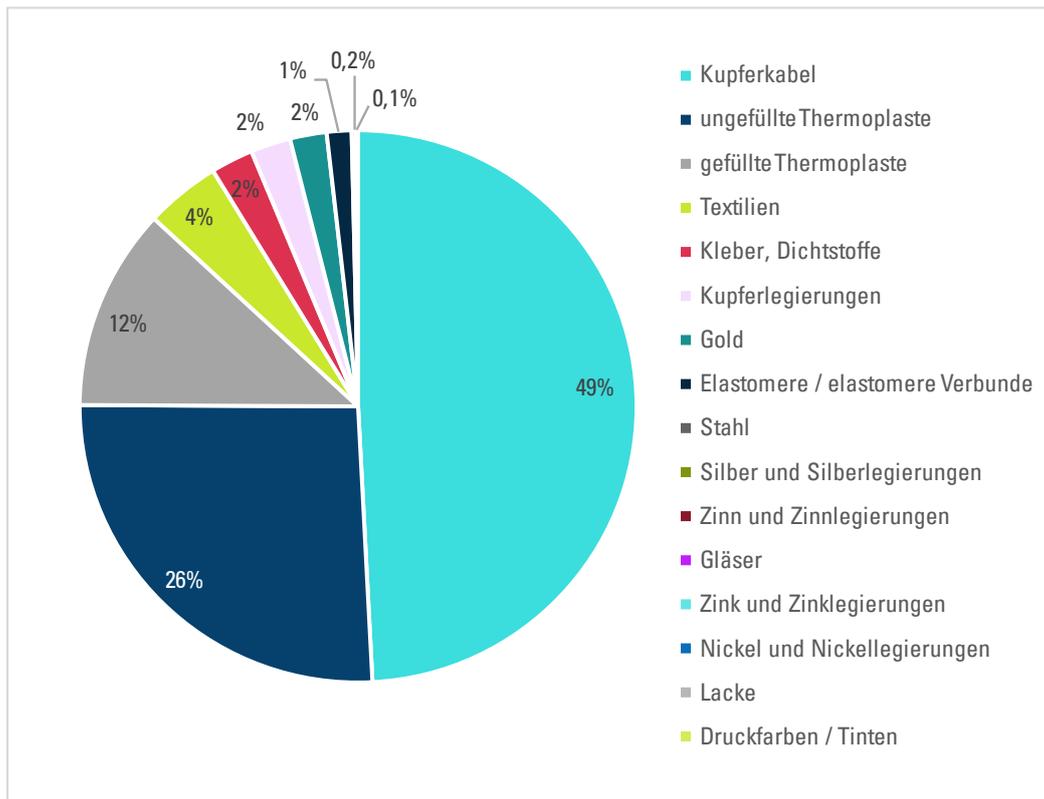


Abbildung 50: Ergebnis der Anteile des Nicht-Erneuerbaren Primärenergieverbrauchs der Werkstoffherstellung des Ottomotor-Leitungssatzes nach Materialgruppe

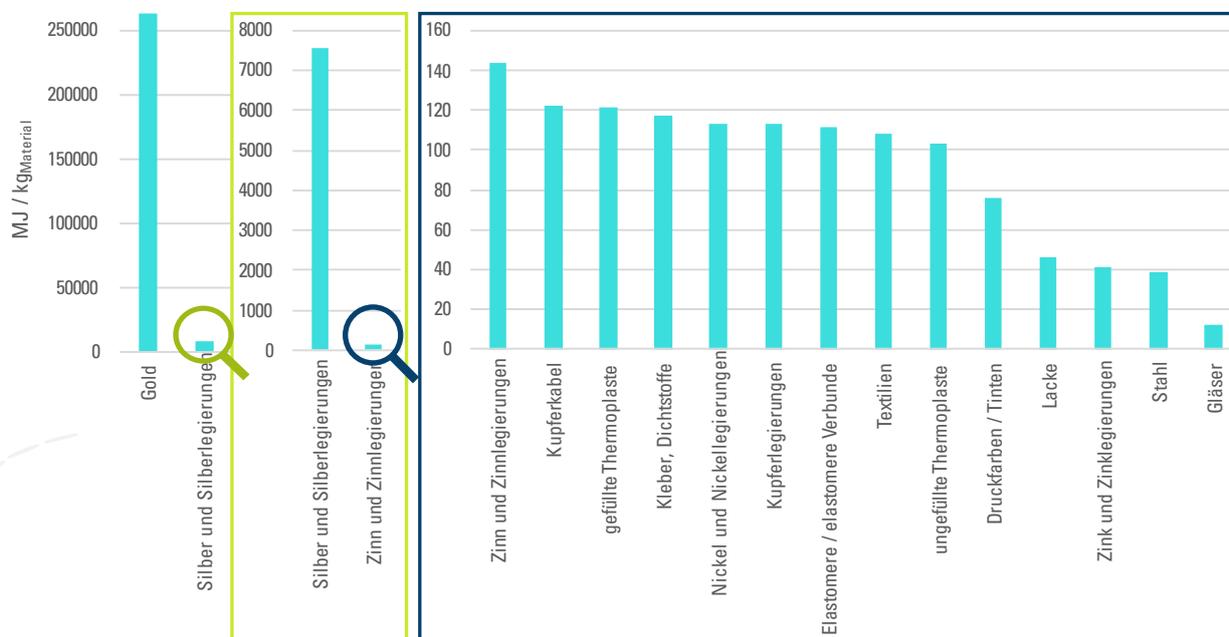


Abbildung 51: Spezifischer nicht-erneuerbarer Primärenergieverbrauch der Materialien im Ottomotor-Leitungssatz (MJ / kg Material)

### 4.6.2.3. End-of-Life

Abbildung 52 zeigt, dass die Ergebnisse für den Ottomotor-Kabelsatz analog sind zum Leitungssatz des BEV. Als Summe der Auswirkungen der End-of-Life-Prozesse ergibt sich eine Gutschrift von 78,3 MJ.

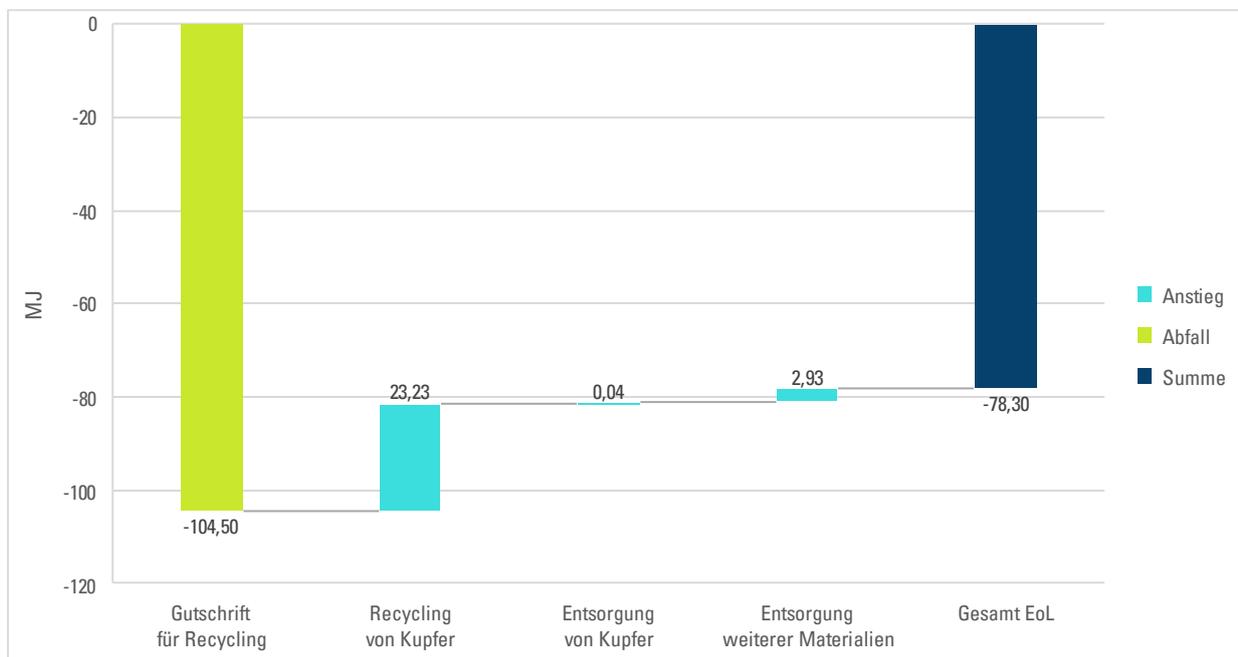


Abbildung 52: Ergebnis des Nicht-Erneuerbaren Primärenergieverbrauchs aus dem EoL des Ottomotor-Leitungssatzes



### 4.6.3. Vergleich der CED-Ergebnisse für Kupfer mit der Literatur (CED renewable + CED fossil)

Der Vergleich des Referenzwerts mit Ergebnissen der Literaturlauswertung von [Sanjuan-Delmás et al. 2022] in Abbildung 53 zeigt auch für die Wirkungskategorie Primärenergieverbrauch Unterschiede auf. Hier wird jeweils der gesamte Primärenergiebedarf ohne Aufteilung in einen erneuerbaren und nicht-erneuerbaren Anteil abgebildet.

Die Werte für Schweden beziehen sich auf die Kupferherstellung aus Erz mit einem Kupferanteil von 0,18% über die pyrometallurgische Route und weichen nur geringfügig von dem Ergebnis der vorliegenden Studie ab. Die Werte für Australien bilden unterschiedliche Kupferanteile im Erz bzw. andere Verarbeitungsprozesse ab. Der Emissionswert für Europa aus der ecoinvent-Datenbank bezieht sich auf Sekundärkupfer, was den geringen Primärenergieverbrauch erklärt.

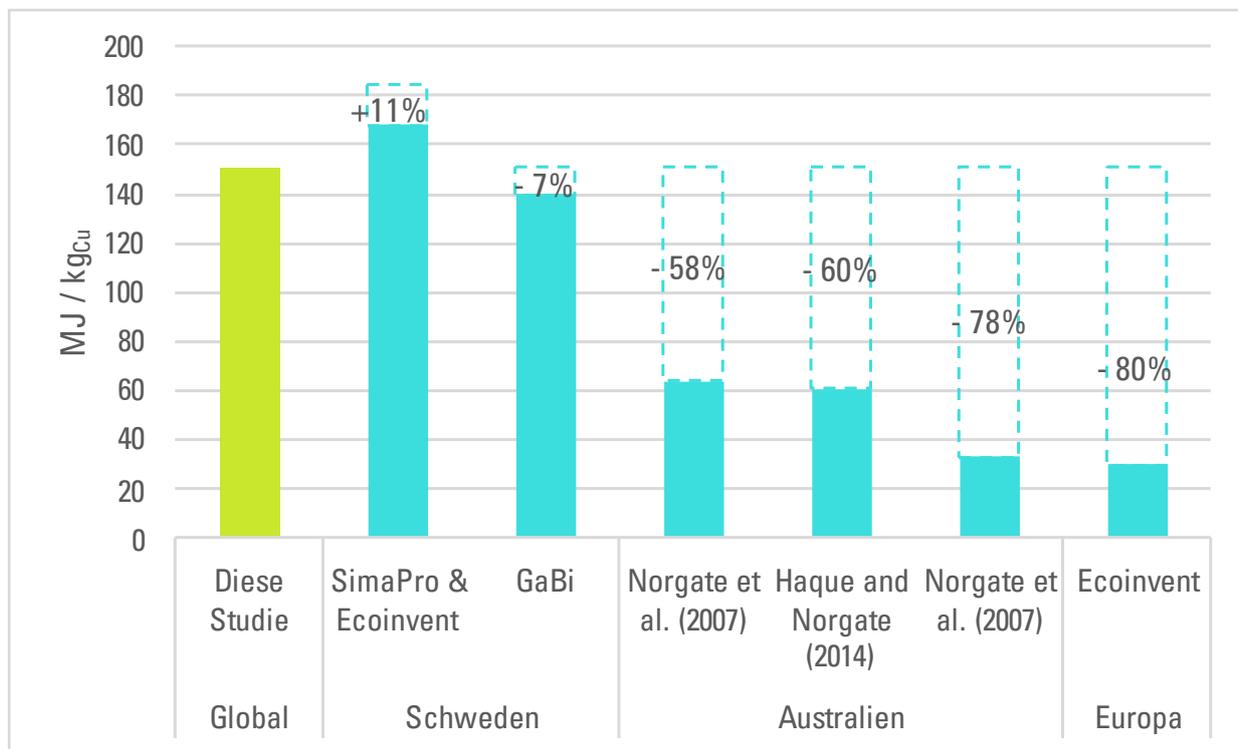


Abbildung 53: Vergleich der CED-Ergebnisse für Kupfer mit den Ergebnissen der Literaturlauswertung nach [Sanjuan-Delmás et al. 2022] (MJ / kg Material)



## 4.7. Sensitivitätsanalyse „Best-Case“

Aus den vorangegangenen Ergebnissen der Wirkungsabschätzung ist ersichtlich, dass Kupfer in allen Wirkungskategorien den höchsten Einfluss aufweist und die Umweltauswirkungen gleichzeitig mit hohen Unschärfen verbunden sind. Um die Abhängigkeit der Gesamtergebnisse von diesem wichtigen Parameter zu untersuchen, wird als erste Sensitivitätsanalyse eine Substitution des Primärkupfers bei der Kabelherstellung durch Sekundärkupfer betrachtet. Dadurch wird neben der konservativen Annahme im Basisszenario (pyrometallurgisches Kupfer aus der globalen Produktion) ein „Best-Case-Szenario“ dargestellt. Entsprechend den niedrigsten Literaturwerten nach [Sanjuan-Delmás et al. 2022] wird dabei der ecoinvent-Prozess „treatment of copper scrap by electrolytic refining | copper, cathode | Cutoff, U – RER“ verwendet (Vgl. Abschnitt 4.3.3, 4.4.3 und 4.6.3). Hierbei handelt es sich um den gleichen Prozess, der beim Recycling von Kupferkabeln modelliert wird (Vgl. Anhang A. 16). Mit Ausnahme des entsorgten Kupferkabelanteils von 10% im End-of-Life stellt dieses Szenario einen geschlossenen Kreislauf für Kupferkabel in Leitungssätzen dar.

### 4.7.1. BEV-Leitungssatz

Für den BEV-Leitungssatz führt der Einsatz von Sekundärkupfer in der Kategorie Treibhausgaspotential zu einer Einsparung von 47% bei der Werkstoffherstellung (Vgl. Abbildung 54). Die Emissionen der Fertigung und der Transporte verändern sich dadurch nicht. Nach dem End-of-Life ergibt sich durch die im Vergleich zu Primärkupfer geringeren THG-Emissionen von Sekundärkupfer auch eine deutlich geringere Gutschrift durch das Recycling und die Wiederverwendung. Insgesamt führt die Nutzung von Kupferkabeln aus recykliertem Kupfer somit zu einer Einsparung von 7% über den gesamten Produktlebenszyklus.

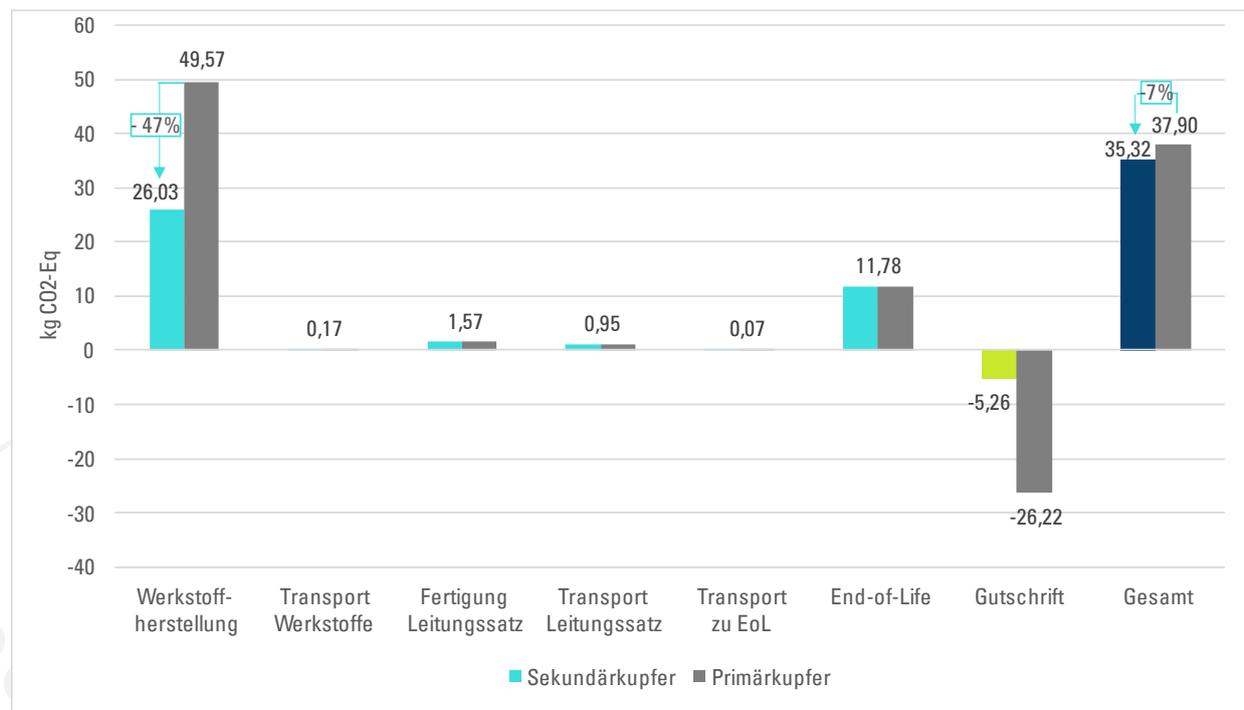


Abbildung 54: Ergebnis des Treibhausgaspotentials des BEV-Leitungssatzes mit Sekundärkupfer über den gesamten Lebenszyklus

In der Wirkungskategorie Versauerung führt dieses Szenario, wie in Abbildung 55 dargestellt, zu wesentlich höheren Einsparungen von 78% in der Werkstoffherstellung. Dies lässt sich auf die deutlich geringere Versauerungswirkung von Sekundärkupfer im Vergleich zu Primärkupfer zurückführen. Unter Berücksichtigung der Gutschrift durch das Recycling ergibt sich insgesamt eine Einsparung von 28%.

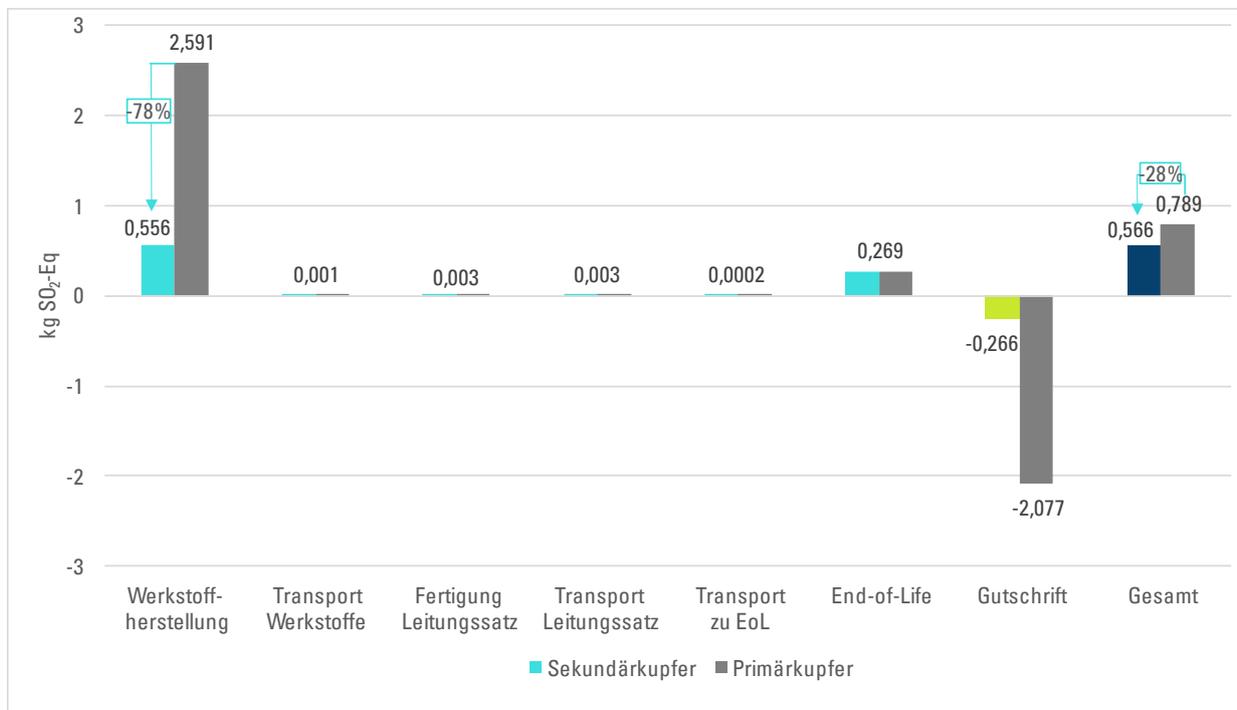


Abbildung 55: Ergebnis des Versauerungspotentials des BEV-Leitungssatzes mit Sekundärkupfer über den gesamten Lebenszyklus

Für den Primärenergieverbrauch werden ähnliche Ergebnisse berechnet. Der erneuerbare Anteil des Verbrauchs sinkt durch die Verwendung von Sekundärkupfer um 41% bei der Werkstoffherstellung und um 7% im Gesamtergebnis (Vgl. Abbildung 56). Der nicht-erneuerbare Primärenergiebedarf der Werkstoffherstellung nimmt um 43% ab und führt ebenfalls zu einer Einsparung von 7% über den gesamten Lebenszyklus (Vgl. Abbildung 57).



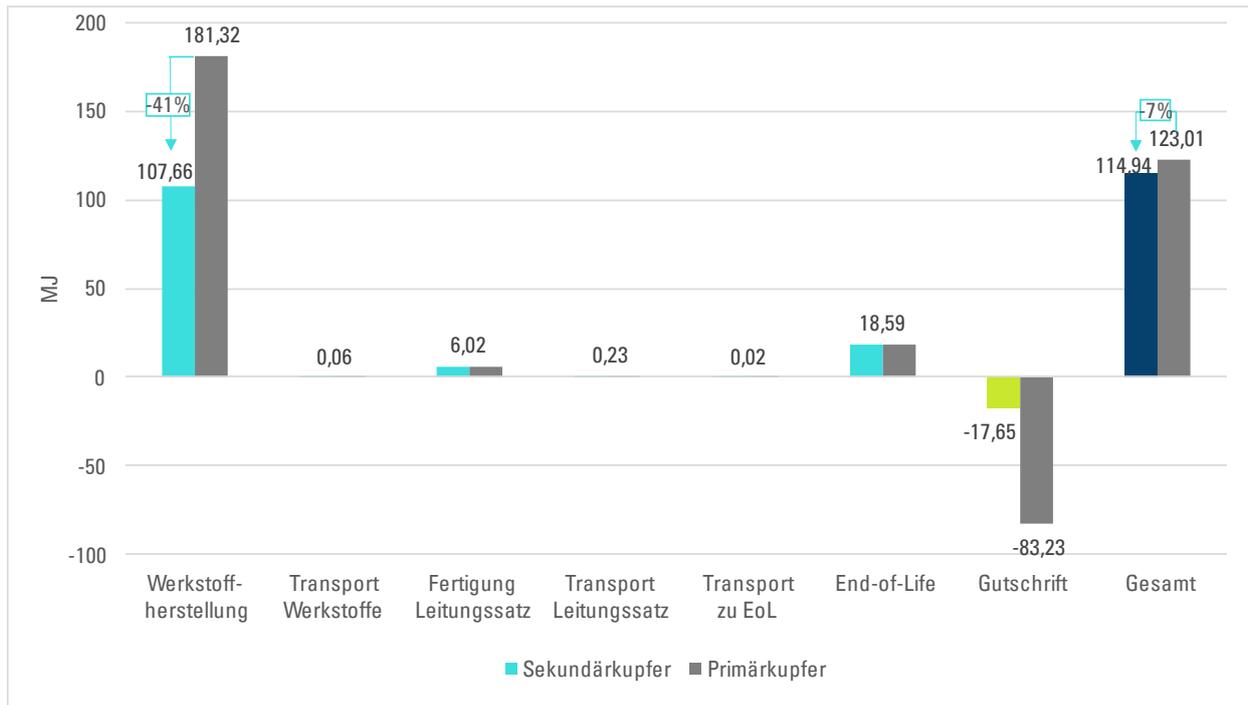


Abbildung 56: Ergebnis des Erneuerbaren Primärenergieverbrauchs des BEV-Leitungssatzes mit Sekundärkupfer über den gesamten Lebenszyklus

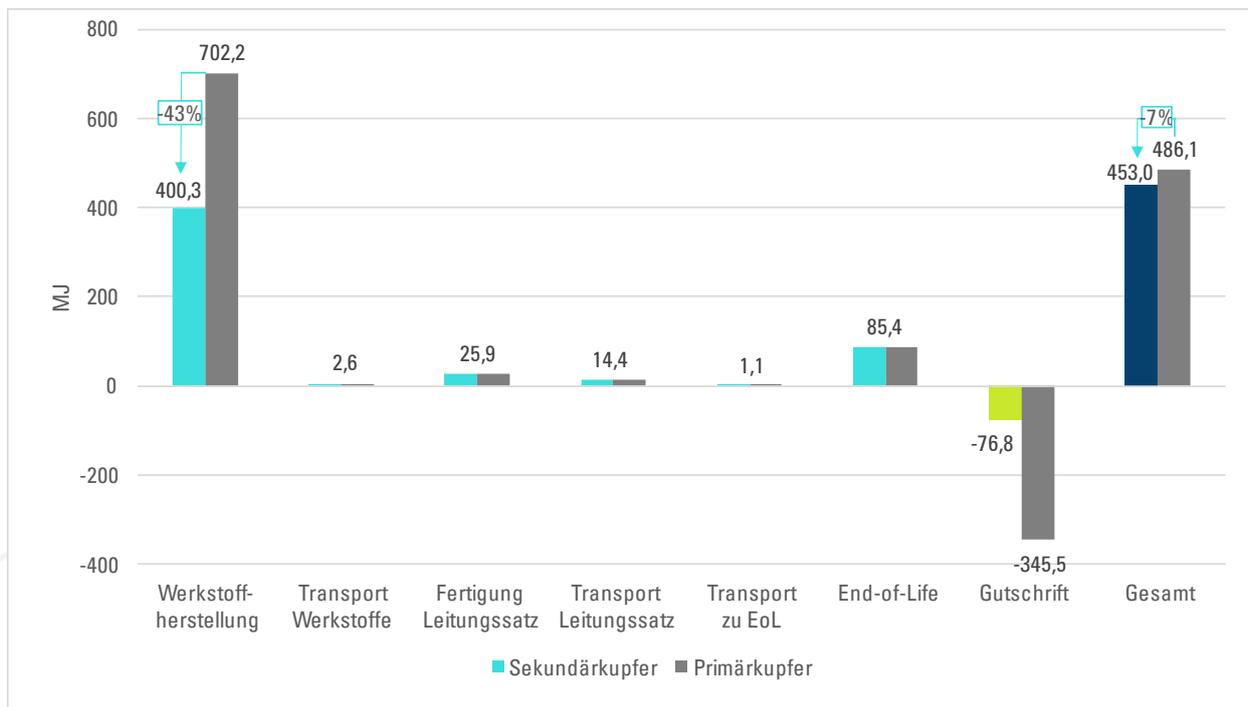


Abbildung 57: Ergebnis des Nicht-Erneuerbaren Primärenergieverbrauchs des BEV-Leitungssatzes mit Sekundärkupfer über den gesamten Lebenszyklus

### 4.7.2. Ottomotor-Leitungssatz

Bei der Werkstoffherstellung des Ottomotor-Leitungssatzes ergeben sich als Folge der Substitution von Primärkupfer durch Sekundärkupfer THG-Emissions-Einsparungen in Höhe von 45% (Vgl. Abbildung 58. Für den gesamten Lebenszyklus entspricht das unter Berücksichtigung der Recycling-Gutschrift insgesamt 5%.

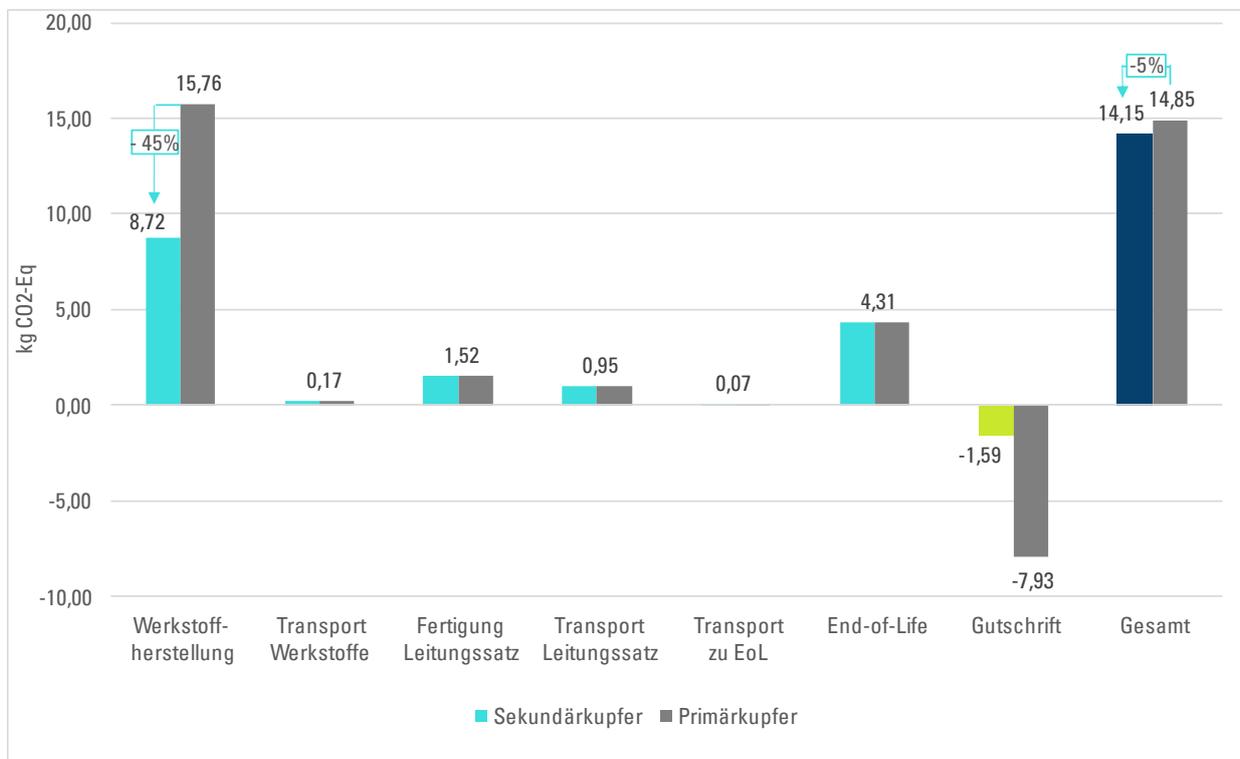


Abbildung 58: Ergebnis des Treibhausgaspotentials des Ottomotor-Leitungssatzes mit Sekundärkupfer über den gesamten Lebenszyklus

Wie auch für den BEV-Leitungssatz, sind die Reduktionen des Versauerungspotenzials in diesem Szenario mit 78% höher als in den anderen Wirkungskategorien (Vgl. Abbildung 59). Dies hat im Gesamtergebnis Einsparungen von 25% zur Folge.



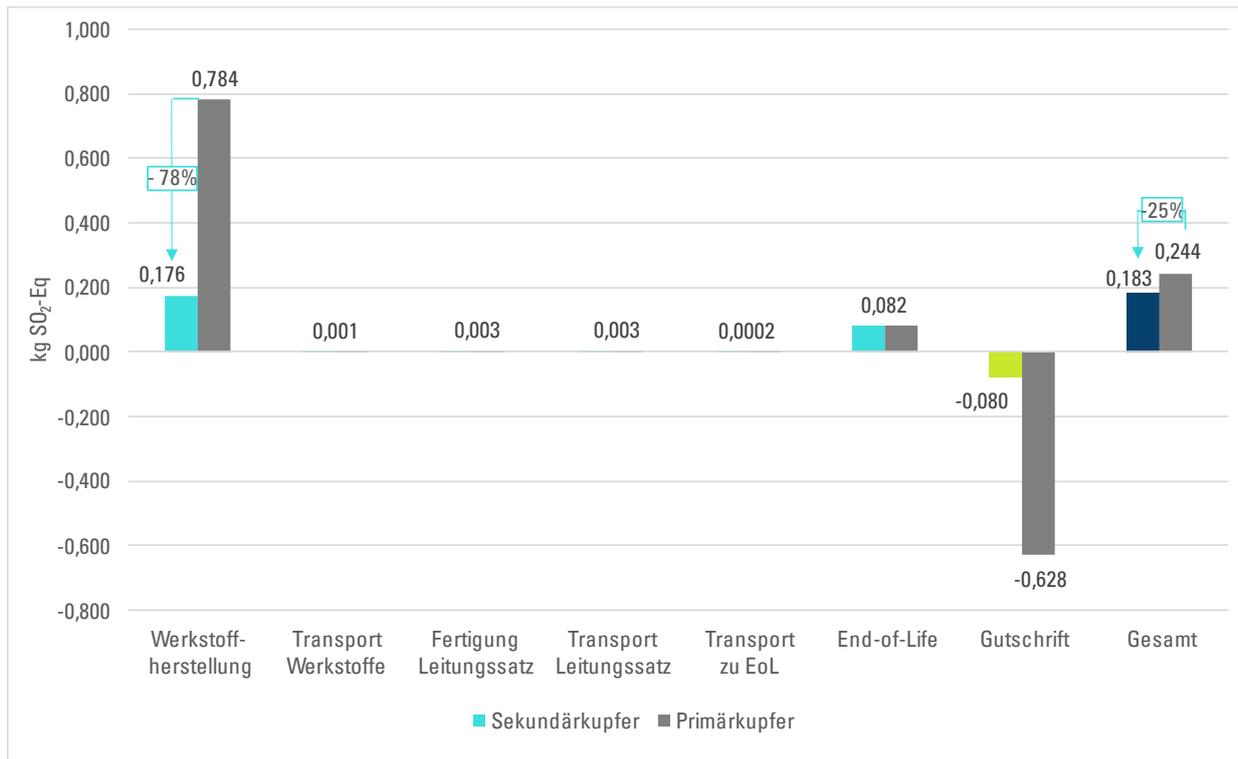


Abbildung 59: Ergebnis des Versauerungspotentials des Ottomotor-Leitungssatzes mit Sekundärkupfer über den gesamten Lebenszyklus

Abbildung 60 und Abbildung 61 illustrieren den erneuerbaren und nicht-erneuerbaren Primärenergiebedarf des Ottomotor-Leitungssatzes unter Einsatz von Sekundärkupfer. Für die Werkstoffherstellung sinken diese um 51% bzw. 36%. Im gesamten Lebenszyklus führt das zu einer Reduktion des erneuerbaren Primärenergieverbrauchs um 7% und einem Abfall des nicht-erneuerbaren Anteils um 4%.



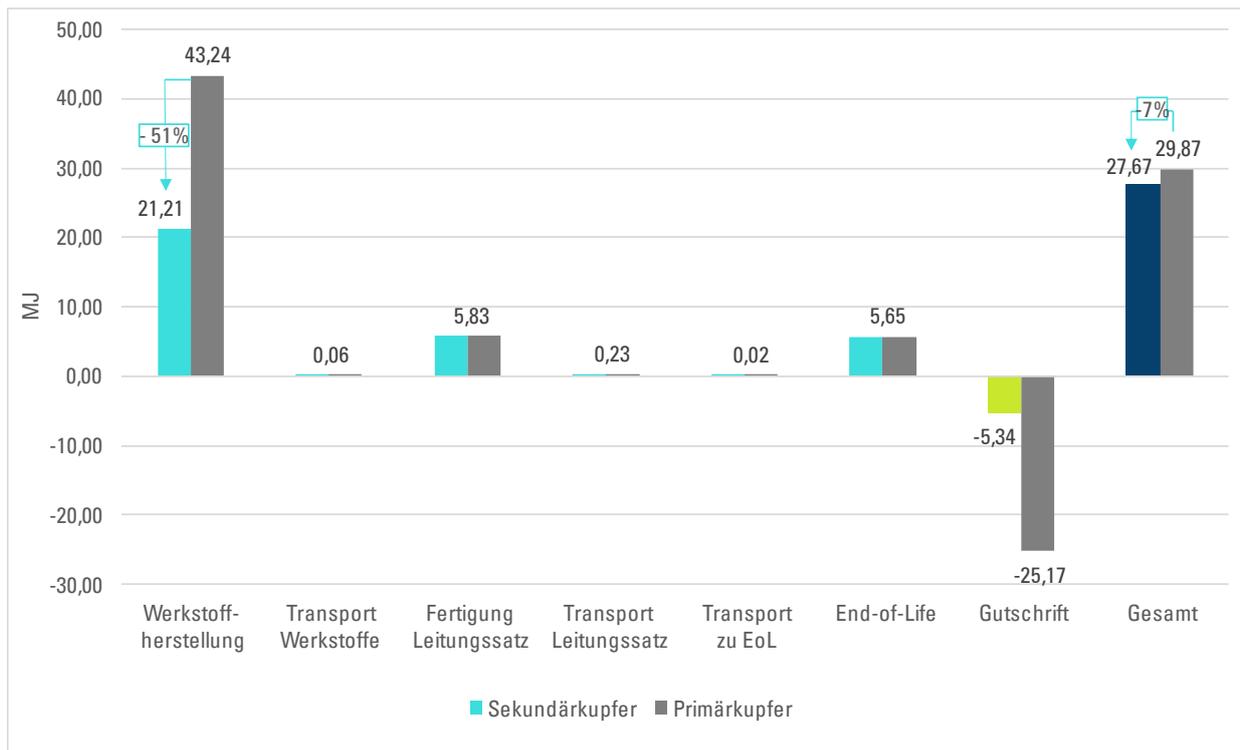


Abbildung 60: Ergebnis des Erneuerbaren Primärenergieverbrauchs des Ottomotor-Leitungssatzes mit Sekundärkupfer über den gesamten Lebenszyklus

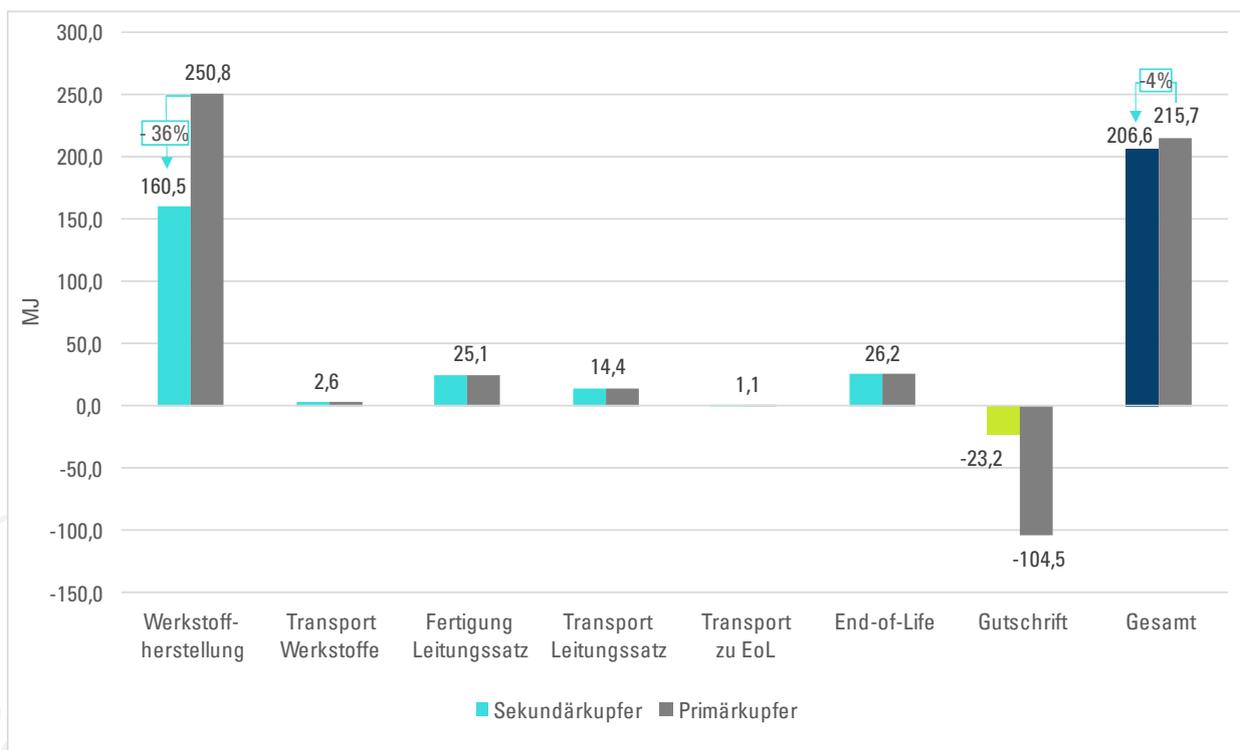


Abbildung 61: Ergebnis des Nicht-Erneuerbaren Primärenergieverbrauchs des Ottomotor-Leitungssatzes mit Sekundärkupfer über den gesamten Lebenszyklus

### 4.7.3. Interpretation der Sensitivitätsanalyse „Best Case“

Der Vergleich der Umweltauswirkungen von Kupfer mit Literaturdaten (Vgl. Abschnitt 4.3.3, 4.4.3 und 4.6.3) ließ erwarten, dass der Einsatz von Sekundärkupfer statt Primärkupfer zu signifikanten Reduktionen in allen Wirkungskategorien führt. Die Sensitivitätsanalyse bestätigt dies, nachdem es hier in der Werkstoffherstellung zu Einsparungen von -36% bis -78% kommt. Aufgrund der geringeren Umweltauswirkungen des Sekundärrohstoffs fällt die Gutschrift für das Recycling im End-of-Life entsprechend geringer aus. Über den gesamten Lebenszyklus heben sich diese Effekte für das Treibhausgaspotential und den Primärenergiebedarf nahezu auf und es ergeben sich für die beiden Leitungssätze lediglich Einsparungen von -5% bis -7% im Vergleich zum Basisszenario. Für das Versauerungspotential fällt diese Einsparung durch den sehr hohen Einfluss von Kupfer auf das Gesamtergebnis mit -25% bis -28% etwas höher aus.

Es lässt sich somit feststellen, dass die Ergebnisse der Werkstoffherstellung zwar wesentlich von den Annahmen für Kupfer abhängen, dies jedoch keinen signifikanten Einfluss auf den gesamten Lebenszyklus hat, sofern eine hohe Gutschrift für das Recycling angerechnet wird.

Zudem verdeutlichen die Ergebnisse dieser Sensitivitätsanalyse, wie der Einsatz von Sekundärkupfer bei der Leitungssatzherstellung Umweltauswirkungen erheblich reduzieren kann. Auch wenn die Einsparungen im Gesamtergebnis unter Berücksichtigung einer Gutschrift geringer ausfallen, sind aus Sicht eines Konfektionärs primär die Werkstoffherstellung, Kabelsatzfertigung und damit einhergehende Transporte relevant.

### 4.8. Sensitivitätsanalyse „Worst-Case“

Da neben den Umweltauswirkungen durch Kupferkabel v.a. die Gutschrift durch das Recycling einen hohen Einfluss auf das Gesamtergebnis der beiden Produkte hat, wird auch hierfür eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Wie in Abschnitt 3.4.2 erwähnt, wird ein Teil deutscher Gebrauchtwagen ins EU-Ausland verkauft und dort teilweise unfachgerecht entsorgt. Als „Worst-Case-Szenario“ wird ein End-of-Life der Kabelsätze in Ghana modelliert, bei dem Kupfer durch offene Verbrennung der Kabel zurückgewonnen wird. Eine entsprechende Gutschrift wird nicht angerechnet, da das Sekundärkupfer nicht mehr für die Herstellung neuer Kabel in Europa zur Verfügung steht.

Neben dem EoL-Transport mit LKW in Deutschland wird für den Transport nach Ghana ein Schiffstransport mit 7695,56 km Distanz angenommen [DP World 2025]. Hierbei wird der ecoinvent-Prozess „transport, freight, sea, container ship | transport, freight, sea, container ship | Cutoff, U – GLO“ verwendet. Für die Verbrennung der Kabel liegt mit „treatment of waste, electrical and electronic cables, open burning | waste, electrical and electronic cables | Cutoff, U – GH“ liegt ein für Ghana spezifischer Datensatz in ecoinvent vor. In der Dokumentation dieses Prozesses ist angegeben, dass dieser für die offene Kabelverbrennung in sämtlichen Ländern angenommen werden kann und von Kabeln mit einem Anteil von 62% Kupfer und 38% Isolierung ausgeht. Dies entspricht näherungsweise den Kupferkabel- und Kunststoffanteilen im BEV-Leitungssatz (58% Kupfer und 34% Kunststoffe) sowie im Ottomotor-Kabelsatz (50% Kupfer und 39% Kunststoffe). Für die Entnahme der Kabel aus dem Altfahrzeug und das Sortieren werden manuelle Prozesse angenommen, durch die keine Umweltauswirkungen entstehen.

### 4.8.1. BEV-Leitungssatz

Für die Ergebnisse aller Lebenszyklusphasen bis zur Nutzung ergeben sich in diesem Szenario keine Änderungen. Das Treibhausgaspotential des BEV-Leitungssatz-Transports zum EoL nach Ghana ist um etwa den Faktor 8 höher als beim reinen EoL-Transport mit LKW innerhalb Deutschlands. Dieser Wert ist jedoch nach wie vor sehr gering im Vergleich zu den Emissionen der Werkstoffherstellung. Durch die offene Kabelverbrennung treten weniger Treibhausgasemissionen auf als bei einer fachgerechten Verwertung des Leitungssatzes, nachdem die energieintensiven Prozesse Schreddern, Sortieren und Recycling nicht zum Einsatz kommen. Die fehlende Recycling-Gutschrift hat den höchsten Einfluss auf das Gesamtergebnis, das insgesamt zu einem 53% höheren Treibhausgaspotential führt als im Basisszenario (Vgl. Abbildung 62).

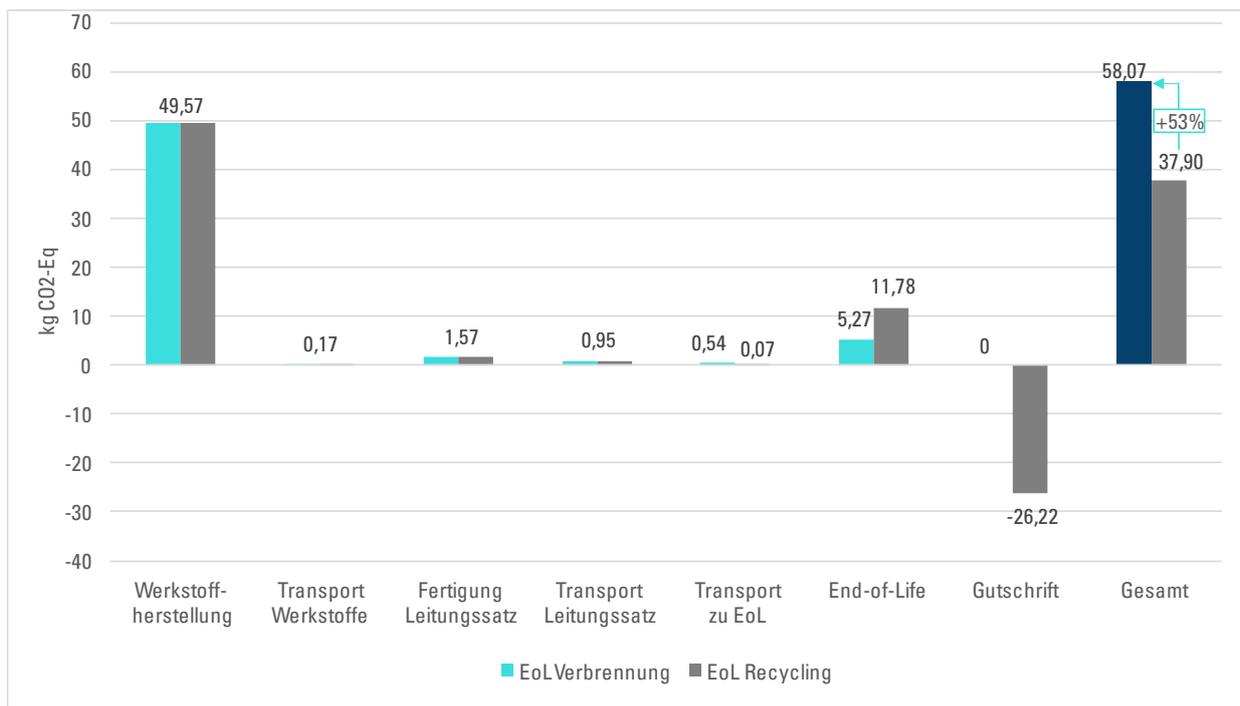


Abbildung 62: Ergebnis des Treibhausgaspotentials des BEV-Leitungssatzes ohne Recycling über den gesamten Lebenszyklus

Abbildung 63 zeigt, dass der Transport über das Meer und die Verbrennung im EoL auch beim Versauerungspotential nur einen sehr geringen Einfluss auf das Gesamtergebnis haben. Ohne eine Recycling-Gutschrift nehmen die Auswirkungen in dieser Wirkungskategorie um 231% zu.



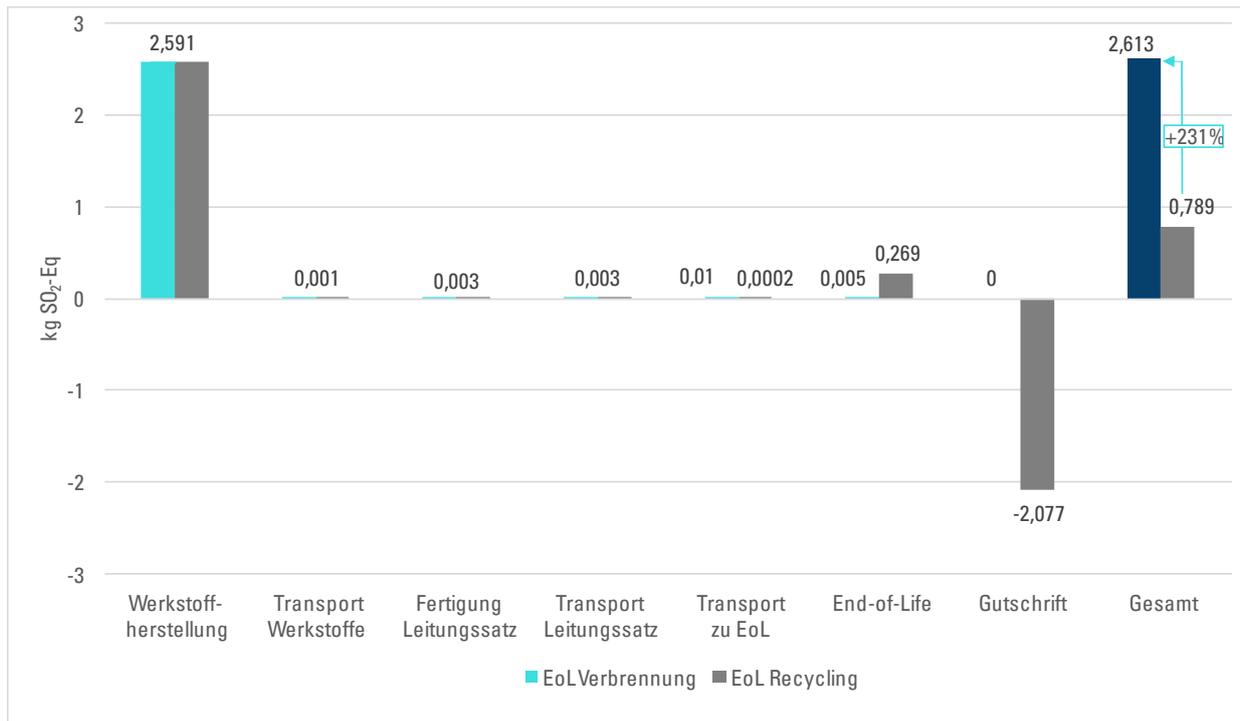


Abbildung 63: Ergebnis des Versauerungspotentials des BEV-Leitungssatzes ohne Recycling über den gesamten Lebenszyklus

Der erneuerbare und nicht-erneuerbare Primärenergieverbrauch des Schiffstransports ist ebenfalls vernachlässigbar gering. Im End-of-Life treten keinerlei Auswirkungen auf, da keine Energieträger für die Verwertung zum Einsatz kommen. Insgesamt nimmt der erneuerbare Primärenergiebedarf durch die fehlende Gutschrift um 53% zu (Vgl. Abbildung 64). Beim nicht-erneuerbaren Anteil beträgt die Zunahme 55% (Vgl. Abbildung 65).



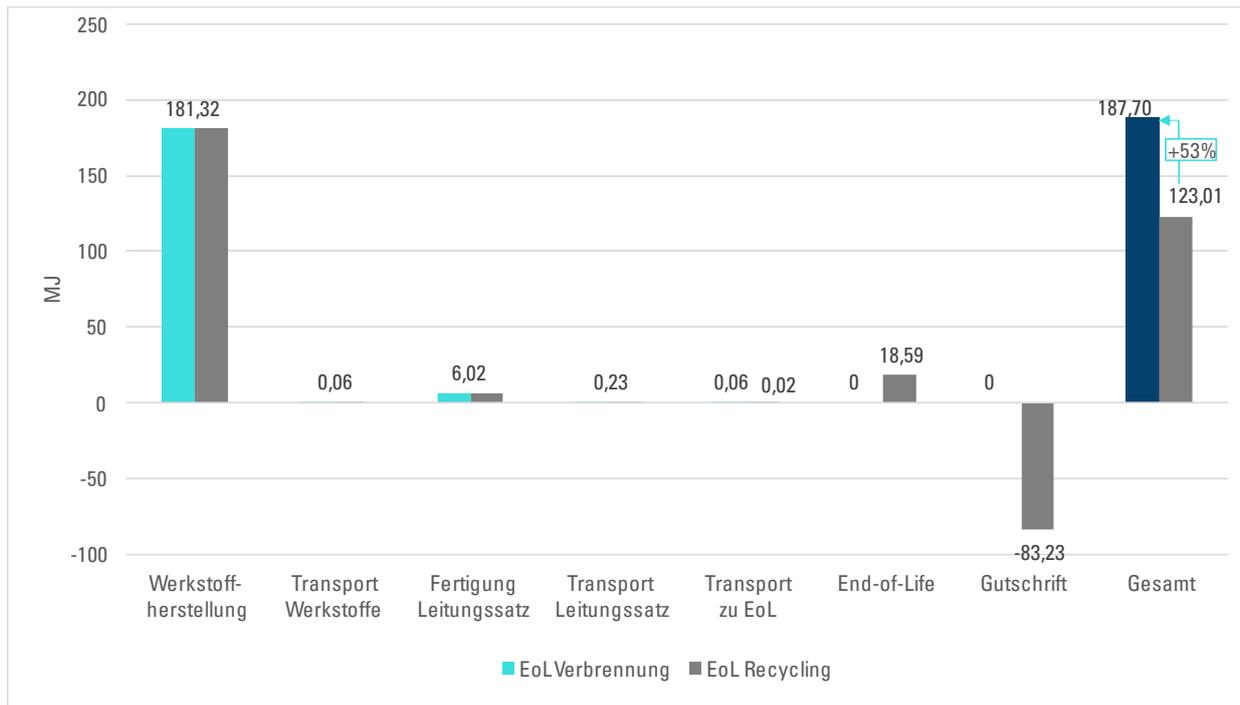


Abbildung 64: Ergebnis des Erneuerbaren Primärenergieverbrauchs des BEV-Leitungssatzes ohne Recycling über den gesamten Lebenszyklus

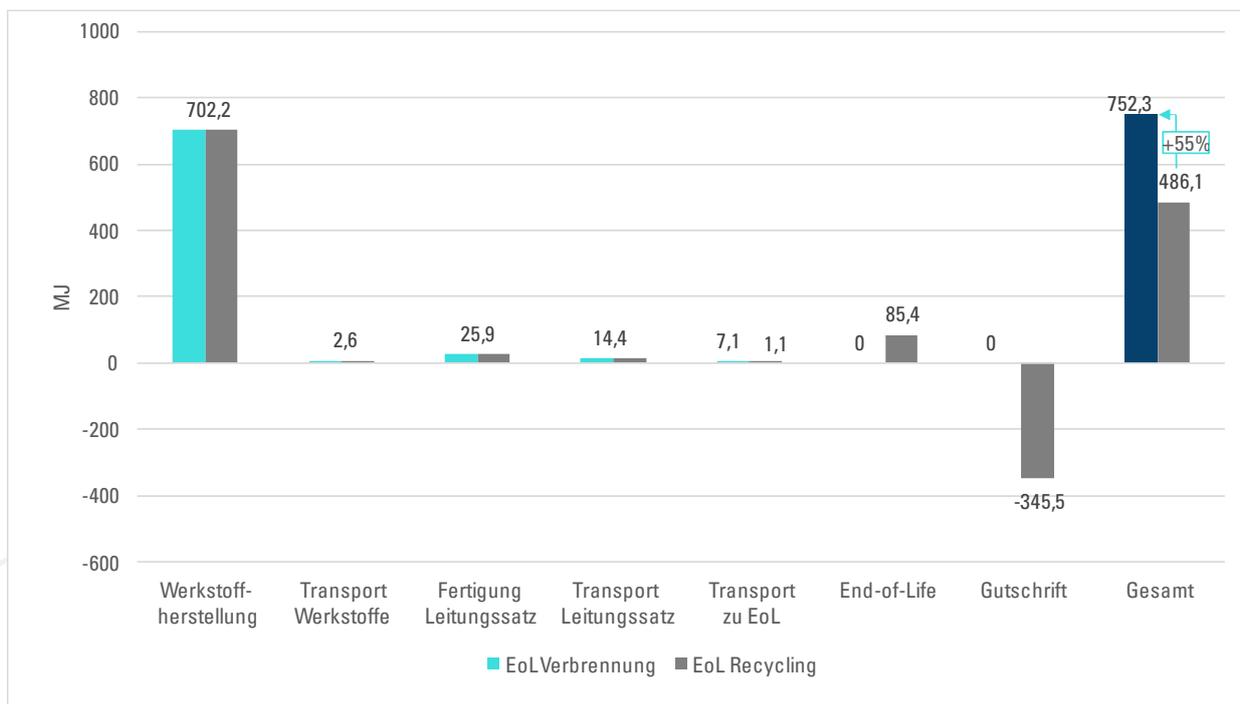


Abbildung 65: Ergebnis des Nicht-Erneuerbaren Primärenergieverbrauchs des BEV-Leitungssatzes ohne Recycling über den gesamten Lebenszyklus

#### 4.8.2. Ottomotor-Leitungssatz

Die Ergebnisse für den Ottomotor-Leitungssatz sind ähnlich zu denen des BEV-Kabelsatzes. Für das Treibhausgaspotential ergibt sich eine Zunahme um 38% zum Basiszenario (Vgl. Abbildung 66). Das Versauerungspotential steigt ohne Recycling um 226% an (Vgl. Abbildung 67). Der Primärenergieverbrauch

nimmt für den erneuerbaren Anteil um 65% (Vgl. Abbildung 68) und für den nicht-erneuerbaren Anteil um 37% zu (Vgl. Abbildung 69).

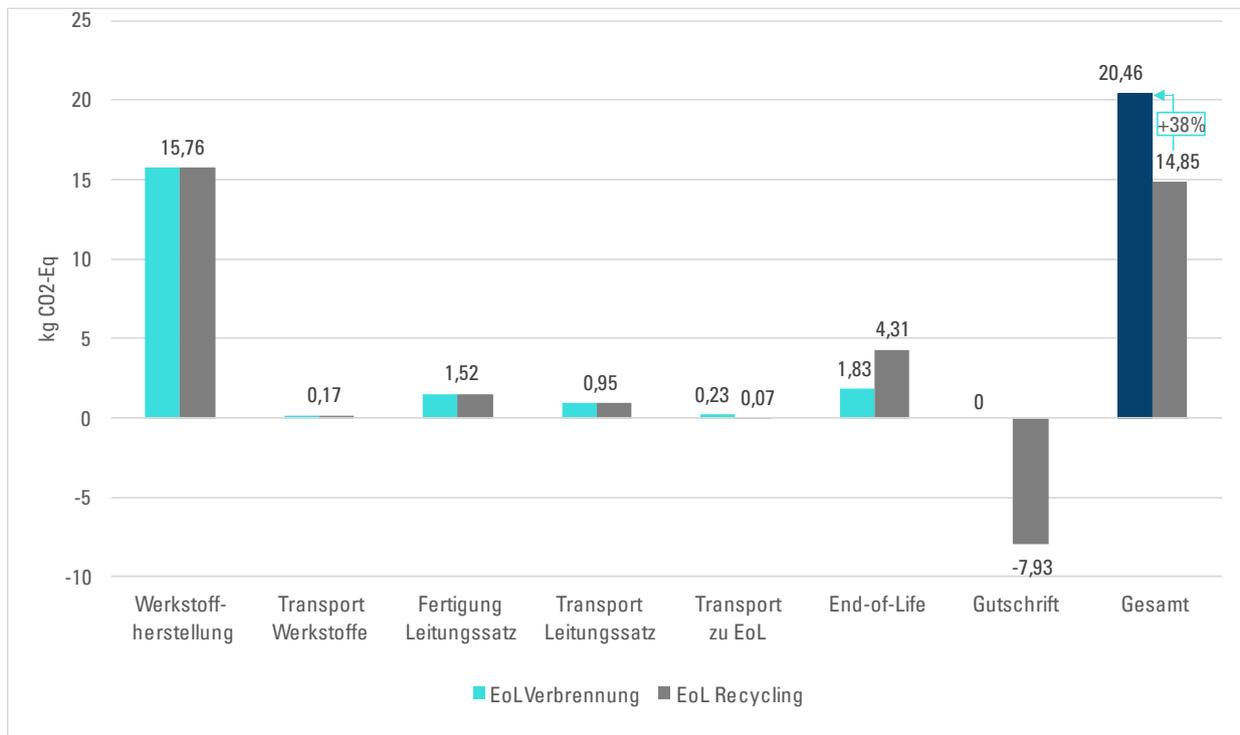


Abbildung 66: Ergebnis des Treibhausgaspotentials des Ottomotor-Leitungssatzes ohne Recycling über den gesamten Lebenszyklus



Abbildung 67: Ergebnis des Versauerungspotentials des Ottomotor-Leitungssatzes ohne Recycling über den gesamten Lebenszyklus

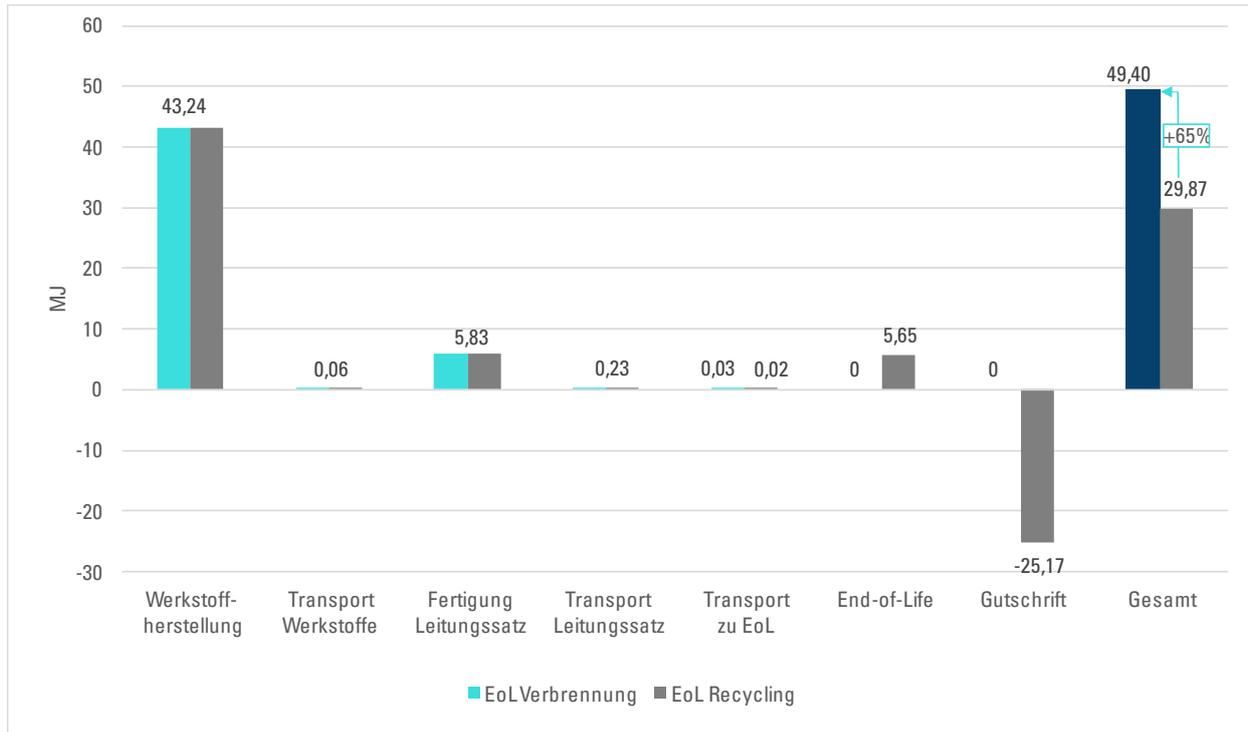


Abbildung 68: Ergebnis des Erneuerbaren Primärenergieverbrauchs des Ottomotor-Leitungssatzes ohne Recycling über den gesamten Lebenszyklus

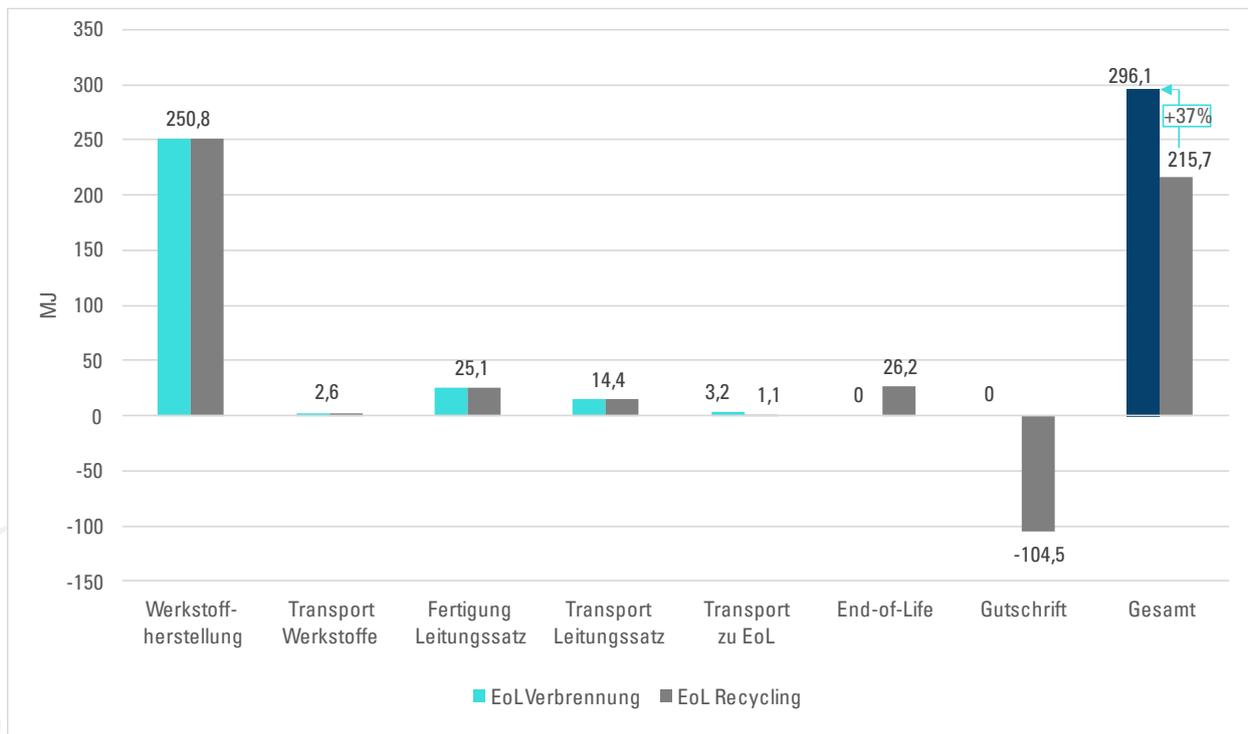


Abbildung 69: Ergebnis des Nicht-Erneuerbaren Primärenergieverbrauchs des Ottomotor-Leitungssatzes ohne Recycling über den gesamten Lebenszyklus

### 4.8.3. Interpretation der Sensitivitätsanalyse „Worst Case“

Für beide Leitungssätze lässt sich feststellen, dass der Transport nach Ghana nur zu sehr geringen Umweltauswirkungen in allen Wirkungskategorien führt. Auch die offene Kabelverbrennung hat nur einen geringen Einfluss auf die Gesamtergebnisse und es treten dabei geringere Treibhaus- und Versauerungswirkungen sowie Primärenergiebedarfe als bei einem energieintensiven fachgerechten EoL-Prozess in Europa auf. Hierbei bleibt jedoch unberücksichtigt, dass eine offene Verbrennung von Kunststoffen und anderen Bestandteilen der Kabelsätze u.a. zu Feinpartikelemissionen führt und neben Umweltauswirkungen auch erhebliche negative Auswirkungen auf die Gesundheit der lokalen Bevölkerung haben kann. Es ist somit von hoher Bedeutung, dass Fahrzeuge am Ende des Lebenszyklus möglichst fachgerecht verwertet werden.

Diese Sensitivitätsanalyse zeigt zudem, dass die Auswirkungen in allen Wirkungskategorien signifikant zunehmen, wenn keine Gutschrift durch ein Recycling von Kupferkabeln angerechnet wird, v.a. in der Wirkungskategorie Versauerung.

## 5. FAZIT

Die Untersuchung des Ressourcenverbrauchs hat ergeben, dass der BEV-Leitungssatz insgesamt einen höheren Anteil an Metallen und mehr strategische und kritische Rohstoffe als der Ottomotor-Kabelsatz enthält. Dafür besteht letzterer aus mehr Gold und ungefüllten Thermoplasten. Aluminium, Silizium, Platin und Schaumstoffe sind der Stückliste nach nicht im Ottomotor-Leitungssatz enthalten.

Aus den Ergebnissen der Wirkungsabschätzung der anderen Kategorien lässt sich schließen, dass die Umweltbelastungen der einzelnen Werkstoffe in den Wirkungskategorien Treibhausgaspotential und Primärenergiebedarf größtenteils proportional zu ihrem Massenanteil im Leitungssatz sind. Ausnahmen bilden Platin, Gold, Silber und Silizium mit jeweils sehr hohen spezifischen Umweltauswirkungen. Diese Metalle haben aufgrund ihrer geringen Anteile in den Produktsystemen jedoch nur einen sehr geringen Einfluss auf die Gesamtergebnisse. In der Wirkungskategorie Versauerung sind Kupferkabel und weitere Kupferbestandteile für 97-98% der Belastungen verantwortlich, obwohl sie nur etwa 50-60% der Gesamtmasse der jeweiligen Kabelsätze ausmachen. Kupfer ist somit der größte Treiber in allen Wirkungskategorien. Gleichzeitig stellen Emissions- und Energiebedarfswerte für Kupfer in dieser Studie die höchste Unschärfe bei den Umweltauswirkungen der Leitungssätze dar. Für produktspezifische LCA sollten deshalb möglichst Primärdaten zu THG-Emissionen, SO<sub>2</sub>-Emissionen und Primärenergiebedarfen des Kupferlieferanten verwendet werden. Durch die zunehmenden Berichtspflichten zu Nachhaltigkeitskennzahlen von Unternehmen werden entsprechende Daten in Zukunft voraussichtlich einfacher zugänglich sein [Südkupfer 2023].

Fertigung und Transport der Kabelsätze sind in allen Wirkungskategorien nur mit sehr geringen Umweltauswirkungen verbunden. Die Ergebnisse dieser Lebenszyklusphasen sind aufgrund der begrenzten Datenverfügbarkeit jedoch mit hohen Unsicherheiten verbunden. Für zukünftige LCA von Leitungssätzen ist deshalb zu empfehlen, dass detailliertere Primärdaten für die Fertigung von Kabelsätzen sowie für Transporte entlang der Wertschöpfungskette verwendet werden. Ebenso ist eine Berücksichtigung der Nutzungsphase anzustreben, beispielsweise durch Daten zu Reparatur und Austausch von (Teil-)Leitungssätzen.

Im End-of-Life verursachen Schredder-, Sortierungs- und Entsorgungs- bzw. Recyclingprozesse geringe Umweltauswirkungen, welche bei einer Recyclingquote von 90% für Kupferkabel durch eine Gutschrift mehr als ausgeglichen werden. Es ist hervorzuheben, dass die Anrechnung dieser Gutschrift im End-of-Life nur dann möglich ist, wenn die zugrunde liegenden Annahmen tatsächlich zutreffen. Also nur, wenn das Auto mit dem betrachteten Leitungssatz am Ende des Lebenszyklus in Deutschland verbleibt und einer fachgerechten Verwertung zugeführt wird. Sollte ein Konfektionär eine derartige Gutschrift für eine Bilanzierung der Umweltauswirkungen eigener Produkte (bspw. durch ein PCF) beanspruchen wollen, müsste dieser zudem sicherstellen, dass das rezyklierte Kupfer wieder für die Herstellung der eigenen Kabelsätze verwendet wird. Sonst könnte es zu einer mehrfachen Anrechnung von Recycling-Gutschriften kommen, wenn das Sekundärkupfer in einer anderen Industrie zum Einsatz kommt.

Aus der ersten durchgeführten Sensitivitätsanalyse zeigt sich, dass der Einsatz von Sekundärkupfer bei der Kabelherstellung und das Recycling von Kupfer am Ende des Lebenszyklus jeweils mit signifikanten Einsparungen in allen Wirkungskategorien verbunden sind. Es handelt sich demnach um sinnvolle Maßnahmen, um die Umweltbelastung von Kabelsätzen zu reduzieren und Rohstoffe zu sparen. Die zweite

Sensitivitätsanalyse verdeutlicht, dass eine unsachgerechte Verwertung in Form einer offenen Verbrennung der Produkte im EU-Ausland vermieden werden sollte.

Zur weiteren Reduzierung der Umweltauswirkungen im End-of-Life ist eine Verringerung des Aufwands für Recycling- und Entsorgungsprozesse anzustreben. Dies lässt sich beispielsweise durch eine verpflichtende Demontage von Leitungssätzen vor dem Schreddern von Altfahrzeugen erreichen, wie es teilweise bereits gefordert wird [Umweltbundesamt 2020].

Entlang des Lebenszyklus von Kfz bieten sich zusammenfassend mehrere Potentiale zur Einsparung von Emissionen, Energie und Rohstoffbedarfen, die praktisch umsetzbar sind und zur Reduktion der Umweltauswirkungen der Automobilindustrie und des Verkehrssektors beitragen können.



## Literaturverzeichnis

- [Abouljalil & Amrani 2020] Abouljalil, H.; Amrani, M.: Life cycle assessment of manufacturing processes of a cable harness in Morocco. IOSR Journal of Environmental Scienc, Band 13, Ausgabe 11, 2020, S. 19-27. Verfügbar unter <https://www.iosrjournals.org/iosr-jestft/papers/Vol14-Issue11/Series-2/C1411021927.pdf>
- [Abouljalil & Amrani 2022] Abouljalil, H.; Amrani, M.: Life Cycle Assessment: Comparative Analysis of an Electric Wiring Harness Using Different Impact Methods. International Journal of Science and Research (IJSR), Band 11, Ausgabe 1, 2022, S. 923-933. Verfügbar unter <https://www.ijsr.net/archive/v11i1/SR22115183619.pdf>
- [Albis 2024] Albis: Ultramid® A3Z PA66-I . 2024. Verfügbar unter <https://www.albis.com/de/products/download/doc/de/SI/basf/UltramidA3Z.pdf> (zuletzt abgerufen am 12. Dezember 2024)
- [Ardlon 2024] Ardlon: PA66 5% Impact Modified. 2024. Verfügbar unter [https://www.nylon.com.tw/en/Products/pa66\\_impact\\_modified\\_5](https://www.nylon.com.tw/en/Products/pa66_impact_modified_5) (zuletzt abgerufen am 12. Dezember 2024)
- [Autohaus 2022] Autohaus: Neues Netzwerk Catena-X: Autoindustrie will mit Datenaustausch nachhaltiger werden. 20. Juni 2022. Verfügbar unter <https://www.autohaus.de/nachrichten/autohersteller/neues-netzwerk-catena-x-autoindustrie-will-mit-datenaustausch-nachhaltiger-werden-3190928> (zuletzt abgerufen am 19. Dezember 2024)
- [Bayerischer Rundfunk 2023] Bayerischer Rundfunk: Autoschrott in Afrika: Was deutsche Gebrauchtwagen anrichten. 2023. Verfügbar unter <https://www.br.de/nachrichten/deutschland-welt/was-deutsche-gebrauchtwagen-in-afrika-anrichten,T17bFBv> (zuletzt abgerufen am 12. März 2025)
- [Boustead 2005] Boustead, I. im Auftrag von Plastics Europe: Eco-profiles of the European Plastics Industry: POLYBUTADIENE. 2005. Verfügbar unter <https://plasticseurope.org/sustainability/circularity/life-cycle-thinking/eco-profiles-set/> (zuletzt abgerufen am 11. Dezember 2024)
- [Ciroth 2007] Giroth, A: ICT for environment in life cycle applications openLCA — A new open source software for life cycle assessment. The International Journal of Life Cycle Assessment, Band 12(4), 2007, S. 209-210, doi: 10.1065/lca2007.06.337
- [COOP 2024] COOP: Kabelkonfektion. Verfügbar unter <https://www.c-o-o-p.de/de/produkte/kabelkonfektion/> (zuletzt abgerufen am 19. Dezember 2024)
- [Deutsches Kupferinstitut 2019] Deutsches Kupferinstitut: Cu-ETP. 2019. Verfügbar unter <https://kupfer.de/wp-content/uploads/2019/11/Cu-ETP.pdf> (zuletzt abgerufen am 10. Dezember 2024)

- [Dong et al. 2020] Dong, D.; van Oers, L.; Tukker, A.; van der Voet, E.: Assessing the future environmental impacts of copper production in China: Implications of the energy transition. Journal of Cleaner Production, Band 274, 2020, S. 122825, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122825>
- [DP World 2025] DP World: Searates by DP World. Distance & Transit Time Calculator.. 2025. Verfügbar unter <https://www.searates.com/de/distance-time/> (zuletzt abgerufen am 12. März 2025)
- [Entec 2024] Entec: Ethylene Ethyl Acrylate Copolymer (EEA). 2024. Verfügbar unter <https://www.entecpolymers.com/products/resin-types/ethylene-ethyl-acrylate-copolymer-eea> (zuletzt abgerufen am 12. Dezember 2024)
- [EU 2024] EU: Verordnung (EU) 2024/1252 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 11. April 2024 zur Schaffung eines Rahmens zur Gewährleistung einer sicheren und nachhaltigen Versorgung mit kritischen Rohstoffen [...]. 3. Mai 2024. Verfügbar unter [https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=OJ:L\\_202401252](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=OJ:L_202401252)
- [European Copper Institute 2023] European Copper Institute: Copper - The Pathway to Net Zero. 2023. Verfügbar unter [https://internationalcopper.org/wp-content/uploads/2023/03/Copper\\_The-Pathway-to-Net-Zero\\_Focus-on-Europe\\_final.pdf](https://internationalcopper.org/wp-content/uploads/2023/03/Copper_The-Pathway-to-Net-Zero_Focus-on-Europe_final.pdf) (zuletzt abgerufen am 10. Dezember 2024)
- [Frischknecht 2010] Frischknecht, Rolf: LCI Modelling approaches applied on recycling of materials in view of environmental sustainability, risk perception and eco-efficiency. The International Journal of Life Cycle Assessment, Band 15, August 2010, S. 666-671, doi: 10.1007/s11367-010-0201-6
- [International Copper Association 2021] International Copper Association: Copper Environmental Profile. 2021. Verfügbar unter <https://internationalcopper.org/wp-content/uploads/2021/08/ICA-EnvironmentalProfileHESD-201803-FINAL-LOWRES-1.pdf> (zuletzt abgerufen am 10. Dezember 2024)
- [IPCC 2021] IPCC im Auftrag von Intergovernmental Panel on Climate Change: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2391 pp., 2021
- [ISO 14040 : 2006] ISO 14040 :: Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework. Juli 2006, 2006. Verfügbar unter <https://www.iso.org/standard/37456.html>
- [ISO 14044 : 2006] ISO 14044 :: Environmental management – Life cycle assessment – Requirements and guidelines. Juli 2006, 2006. Verfügbar unter <https://www.iso.org/standard/38498.html>
- [Joliet et al. 2016] Joliet, O.; Saadé-Sbeih, M.; Shaked, S.; Joliet, A.; Crettaz, P.: Environmental Life Cycle Assessment. CRC Press, 2016

- [Kunststoffrohrverband e.V. 2007] Kunststoffrohrverband e.V.: Vernetztes Polyethylen: PE-X. 2007. Verfügbar unter <https://www.krv.de/artikel/vernetztes-polyethylen-pe-x> (zuletzt abgerufen am 12. Dezember 2024)
- [Kupferverband e.V. 2024] Kupferverband e.V.: Gewinnung. 2024. Verfügbar unter <https://kupfer.de/kupferwerkstoffe/kupfer/produktionsprozesse/gewinnung/> (zuletzt abgerufen am 10. Dezember 2024)
- [Lumitos 2024] Lumitos: Flammschutzmittel. 2024. Verfügbar unter <https://www.chemie.de/lexikon/Flammschutzmittel.html> (zuletzt abgerufen am 12. Dezember 2024)
- [Lumitos 2025] Lumitos, : Weichmacher. 2025. Verfügbar unter <https://www.chemie.de/lexikon/Weichmacher.html> (zuletzt abgerufen am 15. Januar 2025)
- [Maga et al. 2024] Maga, D.; Aryan, V.; Beard, A.: Toward Sustainable Fire Safety: Life Cycle Assessment of Phosphinate-Based and Brominated Flame Retardants in E-Mobility and Electronic Devices. ACS Sustainable Chemistry & Engineering , Band 12(9), 2024, S. 3652-3658 , doi: 10.1021/acssuschemeng.3c07096
- [Memaury et al. 2012] Memaury, R.; Giurco, D.; Mudd, G.; Mason, L.: Life cycle assessment: a time-series analysis of copper. Journal of Cleaner Production, Band 33 , 2012, S. 97-108, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.04.025>
- [Netzsch 2024] Netzsch: PVC-P: Polyvinylchloride (with plasticizer). 2024. Verfügbar unter <https://analyzing-testing.netzsch.com/en/polymers-netzsch-com/commodity-thermoplastics/pvc-p-polyvinylchloride-with-plasticizer> (zuletzt abgerufen am 12. Dezember 2024)
- [Northern Engineering Sheffield 2019] Northern Engineering Sheffield: . 2019. Verfügbar unter <https://www.nes-ips.com/mq-vmq-pmq-fvmq-what-does-it-all-mean/> (zuletzt abgerufen am 12. Dezember 2024)
- [OHLF 2024] OHLF: Transformations-Hub Leitungssatz. Verfügbar unter <https://open-hybrid-labfactory.de/forschung-projekte/projekteverbund/trafo-hub-ls> (zuletzt abgerufen am 19. Dezember 2024)
- [Ökobaumat 2023] Ökobaumat: Prozess-Datensatz: Elastomer Fugenbänder, Silikonkautschuk (de). 2023. Verfügbar unter <https://www.oekobaumat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=4ff98099-91cf-44da-8b19-1dcc8b77baa9&version=20.24.070> (zuletzt abgerufen am 12. Dezember 2024)
- [Open Hybrid LabFactory e.V. 2022] Open Hybrid LabFactory e.V. : Transformations-Hub Leitungssatz. 2022. Verfügbar unter <https://open-hybrid-labfactory.de/forschung-projekte/projekteverbund/trafo-hub-ls> (zuletzt abgerufen am 18. Dezember 2024)

- [Redaktionsnetzwerk Deutschland 2022] Redaktionsnetzwerk Deutschland: Recyclen bis zum Kabelbaum: Wie BMW nachhaltiger werden will. 2022. Verfügbar unter <https://www.rnd.de/wirtschaft/bmw-und-die-nachhaltigkeit-wie-der-autobauer-auf-recycling-setzen-will-MQRHHJXZHFUEDMXT55UXD7WIIY4.html> (zuletzt abgerufen am 9. Dezember 2024)
- [Rehau 2021] Rehau: PP ist nicht. 2021. Verfügbar unter <https://www.rehau.com/downloads/1031934/pp-ist-nicht-gleich-pp-whitepaper.pdf> (zuletzt abgerufen am 12. Dezember 2024)
- [Sanjuan-Delmás et al. 2022] Sanjuan-Delmás, D.; Alvarenga, R.A.F.; Lindblom, M.; Kampmann, T.C.; Oers, L.F.C.M. van: Environmental assessment of copper production in Europe: an LCA case study from Sweden conducted using two conventional software-database setups. International Journal Of Life Cycle Assessment, Band 27(2), 2022, S. 255-266, doi: 10.1007/s11367-021-02018-5
- [Sprovieri 2014] Sprovieri, J.: Wire Harness Recycling. 1. Juli 2014. Verfügbar unter <https://www.assemblymag.com/articles/92263-wire-harness-recycling> (zuletzt abgerufen am 19. Dezember 2024)
- [Südkupfer 2023] Südkupfer: Der Kupfermarkt im Wandel. 2023. Verfügbar unter <https://www.suedkupfer.de/der-kupfermarkt-im-wandel/> (zuletzt abgerufen am 17. Januar 2025)
- [TER Chemicals 2024] TER Chemicals: Phosphorsäureester - multifunktional & hochwirksam. 2024. Verfügbar unter [https://www.terchemicals.com/produktdetail/phosphorsaureester?gclid=Cj0KCQiAst2BBhDJARIsAGo2IdVI\\_U9WvRNSTXgrUUawb9\\_hE6Y2tB\\_yDModACgfa5pif\\_Q\\_gaUewpBQaAoVLEALw\\_wcB](https://www.terchemicals.com/produktdetail/phosphorsaureester?gclid=Cj0KCQiAst2BBhDJARIsAGo2IdVI_U9WvRNSTXgrUUawb9_hE6Y2tB_yDModACgfa5pif_Q_gaUewpBQaAoVLEALw_wcB) (zuletzt abgerufen am 19. Dezember 2024)
- [Umweltbundesamt 2020] Umweltbundesamt: Evaluierung und Fortschreibung der Methodik zur Ermittlung der Altfahrzeugverwertungsquoten durch Schredderversuche unter der EG-Altfahrzeugrichtlinie 2000/53/EG. 2020. Verfügbar unter [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2020-01-20\\_texte\\_15-2020\\_altfahrzeugemonitoring.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2020-01-20_texte_15-2020_altfahrzeugemonitoring.pdf) (zuletzt abgerufen am 10. Dezember 2024)
- [Umweltbundesamt 2022] Umweltbundesamt: Altauto fachgerecht entsorgen oder verkaufen. 2022. Verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/umwelttipps-fuer-den-alltag/mobilitaet/altauto-altautoverwertung#was-sie-beim-verkauf-ihres-altautos-beachten-sollten> (zuletzt abgerufen am 9. Dezember 2024)
- [Umweltbundesamt 2024] Umweltbundesamt: Altfahrzeugverwertung und Fahrzeugverbleib. 2024. Verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/daten/ressourcen-abfall/verwertung-entsorgung-ausgewaehlter-abfallarten/altfahrzeugverwertung-fahrzeugverbleib> (zuletzt abgerufen am 9. Dezember 2024)

- [Universität Leiden 2016]      Universität Leiden: CML-IA Characterisation Factors. 2016. Verfügbar unter <https://www.universiteitleiden.nl/en/research/research-output/science/cml-ia-characterisation-factors> (zuletzt abgerufen am 17. Dezember 2024)
- [VDI 2012]                VDI: VDI 4600: Cumulative energy demand (KEA) - Terms, definitions, methods of calculation. Energie und Umwelt , 2012
- [Villanueva-Rey et al. 2018]      Villanueva-Rey, P; Belo, S.; Quinteiro, P.; Arroja, L.; Dias, A.C.: Wiring in the automobile industry: Life cycle assessment of an innovative cable solution. Journal of Cleaner Production, Band 204, 2018, S. 237-246, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.09.017>
- [Wernet et al. 2016]      Wernet, G; Bauer, C.; Steubing, B.; Reinhard, J.: The ecoinvent database version 3 (Part I): Overview and methodology. The International Journal of Life Cycle Assessment, Band 21, Ausgabe 9, September 2016. Verfügbar unter [https://www.researchgate.net/publication/301561039\\_The\\_ecoinvent\\_database\\_version\\_3\\_Part\\_I\\_Overview\\_and\\_methodology](https://www.researchgate.net/publication/301561039_The_ecoinvent_database_version_3_Part_I_Overview_and_methodology) (zuletzt abgerufen am 30. Oktober 2024)
- [Xiamen Keyuan Plastic 2024]      Xiamen Keyuan Plastic: Mit Talk gefüllte PP Td-20 Talkum-Polypropylen-Kunststoffpartikel. 2024. Verfügbar unter <https://de.ky-plastics.com/polypropylene/talc-filled-pp-td-20-talcum-polypropylene.html> (zuletzt abgerufen am 12. Dezember 2024)

## Anhang

### A. 1. Materialzusammensetzung der Hauptwerkstoffe im BEV-Leitungssatz

Werkstoff	Material 1	Anteil 1	Material 2	Anteil 2	Material 3	Anteil 3
Cu-ETP1	Copper	100%	-	-	-	-
MQ	Silicone rubber	100%	-	-	-	-
PA6-GF30 (FR30)	Polyamide 6	50%	Glass Fiber	30%	Flame Retardant	20%
PET	PET	100%	-	-	-	-
CuPb1P	Copper	99%	Lead	1%	-	-
PUR Flexible Integral Foam	PUR flexible foam	100%	-	-	-	-
PBT GF20	Polybutylene Terephthalate	80%	Glass Fiber	20%	-	-
PVC-P-KD25	Polyvinyl Chloride	75%	Plasticizer	25%	-	-
CuZn37Pb2	Copper	61%	Zinc	37%	Lead	2%
PA66-GF30	Polyamide 66	70%	Glass Fiber	30%	-	-
PES cloth 1	Nonwoven polyester textile	100%	-	-	-	-
PA6-(GF10+GB20)	Polyamide 6	70%	Glass Fiber	10%	Glass Beads	20%
PA6-I-GF15	Polyamide 6	85%	Glass Fiber	15%	-	-
Cu-ETP	Copper	100%	-	-	-	-
65 (Hot rolled carbon steel strips)	Steel 65	100%	-	-	-	-
Pressure sensitive adhesive 3	Polyurethane adhesive	100%	-	-	-	-
PVC-P-KD20	Polyvinyl Chloride	80%	Plasticizer	20%	-	-
PVC-KD20 P	Polyvinyl Chloride	80%	Plasticizer	20%	-	-
PA6-GF15	Polyamide 6	85%	Glass Fiber	15%	-	-
High Copper Alloy	Copper	100%	-	-	-	-
PA66-I GF25 FR(52)	Polyamide 66	55%	Glass Fiber	25%	Flame Retardant	20%
PA66-I	Polyamide 66	100%	-	-	-	-

PA66	Polyamide 66	100%	-	-	-	-
PA66-GF20	Polyamide 66	80%	Glass Fiber	20%	-	-
Cu-PHC	Copper	100%	-	-	-	-

## A. 2. Materialzusammensetzung der Hauptwerkstoffe im Ottomotor-Leitungssatz

Werkstoff	Material 1	Anteil 1	Material 2	Anteil 2	Material 3	Anteil 3
Cu-ETP1	Copper	100%	-	-	-	-
>PA66-I<	Polyamide 66	100%	-	-	-	-
HDPE FR(60)	High density polyethylene	80%	Flame retardant	20%	-	-
PE	Polyethylene	100%	-	-	-	-
PE-HD FR(61)	High density polyethylene	80%	Flame retardant	20%	-	-
PA Cloth	Nonwoven polyester textile	100%	-	-	-	-
PES cloth 1	Nonwoven polyester textile	100%	-	-	-	-
PA66-GF30	Polyamide 66	70%	Glass Fiber	30%	-	-
PE-X-MD40-FR(61)	Polyethylene	40%	Gypsum	40%	Flame retardant	20%
PBT	Polybutylene Terephthalate	100%	-	-	-	-
HDPE FR(61)	High density polyethylene	80%	Flame retardant	20%	-	-
PAK Adhesive	Polyurethane adhesive	100%	-	-	-	-
Pressure sensitive adhesive 3	Polyurethane adhesive	100%	-	-	-	-
PA66 GF30	Polyamide 66	70%	Glass Fiber	30%	-	-
PA46	Polyamide 46	100%	-	-	-	-
PA66-GF50	Polyamide 66	50%	Glass Fiber	50%	-	-
PE-HD-TD5-FR(61)	High density polyethylene	80%	Flame retardant	20%	-	-
CuSn0,15	Copper	99,85%	Tin	0,15%	-	-
PA66-I	Polyamide 66	100%	-	-	-	-
PA6-I-GF15	Polyamide 6	85%	Glass Fiber	15%	-	-
X10CrNi18-8	Chromium steel	100%	-	-	-	-
PBT-GF30	Polybutylene Terephthalate	70%	Glass Fiber	30%	-	-

Copper Nickel	Copper	90%	Nickel	10%	-	-
PE-HD- MD40-FR(61)	High density polyethylene	40%	Gypsum	40%	Flame retardant	20%
PE-LD- X+EEAK-X	Polyethylene	100%	-	-	-	-
CuSn6	Copper	94%	Tin	6%	-	-
PA66	Polyamide 66	100%	-	-	-	-
VMQ	Silicone rubber	100%	-	-	-	-
PET Fabric	Nonwoven polyester textile	100%	-	-	-	-
PA66-GF15	Polyamide 66	85%	Glass Fiber	15%	-	-
Copper Alloy	Copper	100%	-	-	-	-
High Copper Alloy	Copper	100%	-	-	-	-
C75S	Unalloyed steel	100%	-	-	-	-
PVC	Polyvinylchloride	100%	-	-	-	-

### A. 3. Verwendete Datensätze zur detaillierten Modellierung der Hauptwerkstoffe (jeweils 1 kg) im BEV-Leitungssatz

Werkstoff	Material / Verarbeitungsprozess	Menge	Einheit	Ecoinvent-Datensatz
Cu-ETP1	Copper	1	kg	electrorefining of copper, anode   copper, cathode   Cutoff, U - GLO
	Drahtziehen	1	kg	wire drawing, copper   wire drawing, copper   Cutoff, U - RER
MQ	Silicone rubber	1	kg	silicone rubber
	Extrusion	1	kg	extrusion, plastic pipes   extrusion, plastic pipes   Cutoff, U - RER
PA6-GF30 (FR30)	Polyamide 6	0,5	kg	nylon 6 production   nylon 6   Cutoff, U - RER
	Glass Fiber	0,3	kg	glass fibre production   glass fibre   Cutoff, U - RER
	Flame Retardant	0,2	kg	phosphorus production, white, liquid   phosphorus, white, liquid   Cutoff, U - RER
	Spritzguss	1	kg	injection moulding   injection moulding   Cutoff, U - RER
PET	PET	1	kg	polyethylene terephthalate production, granulate, amorphous   polyethylene terephthalate, granulate, amorphous   Cutoff, U - RER
	Extrusion	1	kg	extrusion, plastic pipes   extrusion, plastic pipes   Cutoff, U - RER
CuPb1P	Copper	0,99	kg	electrorefining of copper, anode   copper, cathode   Cutoff, U - GLO
	Lead	0,01	kg	primary lead production from concentrate   lead   Cutoff, U - GLO
PUR Flexible Integral Foam	PUR flexible foam	1	kg	polyurethane production, flexible foam, TDI-based, low density   polyurethane, flexible foam   Cutoff, U - RER
PBT GF20	Polybutylene Terephthalate	0,8	kg	polybutylene terephthalate
	Glass Fiber	0,2	kg	glass fibre production   glass fibre   Cutoff, U - RER
	Spritzguss	1	kg	injection moulding   injection moulding   Cutoff, U - RER
PVC-P-KD25	Polyvinyl Chloride	0,75	kg	polyvinylchloride production, bulk polymerisation   polyvinylchloride, bulk polymerised   Cutoff, U - RER
	Plasticizer	0,25	kg	dioctyl terephthalate production   dioctyl terephthalate   Cutoff, U - GLO
	Extrusion	1	kg	extrusion, plastic pipes   extrusion, plastic pipes   Cutoff, U - RER
CuZn37Pb2	Copper	0,61	kg	electrorefining of copper, anode   copper, cathode   Cutoff, U - GLO
	Zinc	0,37	kg	primary zinc production from concentrate   zinc   Cutoff, U - RoW
	Lead	0,02	kg	primary lead production from concentrate   lead   Cutoff, U - GLO

PA66-GF30	Polyamide 66	0,7	kg	nylon 6-6 production   nylon 6-6   Cutoff, U - RER
	Glass Fiber	0,3	kg	glass fibre production   glass fibre   Cutoff, U - RER
	Spritzguss	1	kg	injection moulding   injection moulding   Cutoff, U - RER
PES cloth 1	Nonwoven polyester textile	1	kg	textile production, nonwoven polyester, needle-punched   textile, nonwoven polyester   Cutoff, U – RoW*
PA6-(GF10+GB20)	Polyamide 6	0,7	kg	nylon 6 production   nylon 6   Cutoff, U - RER
	Glass Fiber	0,1	kg	glass fibre production   glass fibre   Cutoff, U - RER
	Glass Beads	0,2	kg	glass fibre production   glass fibre   Cutoff, U – RER*
	Spritzguss	1	kg	injection moulding   injection moulding   Cutoff, U - RER
PA6-I-GF15	Polyamide 6	0,85	kg	nylon 6 production   nylon 6   Cutoff, U - RER
	Glass Fiber	0,15	kg	glass fibre production   glass fibre   Cutoff, U - RER
	Spritzguss	1	kg	injection moulding   injection moulding   Cutoff, U - RER
Cu-ETP	Copper	1	kg	electrorefining of copper, anode   copper, cathode   Cutoff, U - GLO
	Drahtziehen	1	kg	wire drawing, copper   wire drawing, copper   Cutoff, U - RER
65 (Hot rolled carbon steel strips)	Steel 65	1	kg	steel production, low-alloyed, hot rolled   steel, low-alloyed, hot rolled   Cutoff, U - RER
Pressure sensitive adhesive 3	Polyurethane adhesive	1	kg	polyurethane adhesive production   polyurethane adhesive   Cutoff, U – GLO*
PVC-P-KD20	Polyvinyl Chloride	0,8	kg	polyvinylchloride production, bulk polymerisation   polyvinylchloride, bulk polymerised   Cutoff, U - RER
	Plasticizer	0,2	kg	phosphorus production, white, liquid   phosphorus, white, liquid   Cutoff, U - RER
	Extrusion	1	kg	extrusion, plastic pipes   extrusion, plastic pipes   Cutoff, U - RER
PVC-KD20 P	Polyvinyl Chloride	0,8	kg	polyvinylchloride production, bulk polymerisation   polyvinylchloride, bulk polymerised   Cutoff, U - RER
	Plasticizer	0,2	kg	phosphorus production, white, liquid   phosphorus, white, liquid   Cutoff, U - RER
	Extrusion	1	kg	extrusion, plastic pipes   extrusion, plastic pipes   Cutoff, U - RER
PA6-GF15	Polyamide 6	0,85	kg	nylon 6 production   nylon 6   Cutoff, U - RER
	Glass Fiber	0,15	kg	glass fibre production   glass fibre   Cutoff, U - RER
	Spritzguss	1	kg	injection moulding   injection moulding   Cutoff, U - RER
High Copper Alloy	Copper	1	kg	electrorefining of copper, anode   copper, cathode   Cutoff, U - GLO
PA66-I GF25 FR(52)	Polyamide 66	0,55	kg	nylon 6-6 production   nylon 6-6   Cutoff, U - RER
	Glass Fiber	0,25	kg	glass fibre production   glass fibre   Cutoff, U - RER

	Flame Retardant	0,2	kg	phosphorus production, white, liquid   phosphorus, white, liquid   Cutoff, U - RER
	Spritzguss	1	kg	injection moulding   injection moulding   Cutoff, U - RER
PA66-I	Polyamide 66	1	kg	nylon 6-6 production   nylon 6-6   Cutoff, U - RER
	Extrusion	1	kg	extrusion, plastic pipes   extrusion, plastic pipes   Cutoff, U - RER
PA66	Polyamide 66	1	kg	nylon 6-6 production   nylon 6-6   Cutoff, U - RER
	Extrusion	1	kg	extrusion, plastic pipes   extrusion, plastic pipes   Cutoff, U - RER
PA66-GF20	Polyamide 66	0,8	kg	nylon 6-6 production   nylon 6-6   Cutoff, U - RER
	Glass Fiber	0,2	kg	glass fibre production   glass fibre   Cutoff, U - RER
	Spritzguss	1	kg	injection moulding   injection moulding   Cutoff, U - RER
Cu-PHC	Copper	1	kg	electrorefining of copper, anode   copper, cathode   Cutoff, U - GLO
X5CrNi18-10	Chromium steel	1	kg	steel production, electric, chromium steel 18/8   steel, chromium steel 18/8   Cutoff, U - RER

\*Proxy

#### A. 4. Verwendete Datensätze zur detaillierten Modellierung der Hauptwerkstoffe (jeweils 1 kg) im Ottomotor-Leitungssatz

Werkstoff	Material / Verarbeitungsprozess	Menge	Einheit	Ecoinvent-Datensatz
Cu-ETP1	Copper	1	kg	electrorefining of copper, anode   copper, cathode   Cutoff, U - GLO
	Drahtziehen	1	kg	wire drawing, copper   wire drawing, copper   Cutoff, U - RER
>PA66-I<	Polyamide 66	1	kg	nylon 6-6 production   nylon 6-6   Cutoff, U - RER*
	Extrusion	1	kg	extrusion, plastic pipes   extrusion, plastic pipes   Cutoff, U - RER
HDPE FR(60)	High density polyethylene	0,8	kg	polyethylene production, high density, granulate   polyethylene, high density, granulate   Cutoff, U - RER
	Flame retardant	0,2	kg	phosphorus production, white, liquid   phosphorus, white, liquid   Cutoff, U - RER
	Extrusion	1	kg	extrusion, plastic pipes   extrusion, plastic pipes   Cutoff, U - RER
PE	Polyethylene	1	kg	polyethylene production, low density, granulate   polyethylene, low density, granulate   Cutoff, U - RER
	Extrusion	1	kg	extrusion, plastic pipes   extrusion, plastic pipes   Cutoff, U - RER

PE-HD FR(61)	High density polyethylene	0,8	kg	polyethylene production, high density, granulate   polyethylene, high density, granulate   Cutoff, U - RER
	Flame retardant	0,2	kg	phosphorus production, white, liquid   phosphorus, white, liquid   Cutoff, U - RER
	Extrusion	1	kg	extrusion, plastic pipes   extrusion, plastic pipes   Cutoff, U - RER
PA Cloth	Nonwoven polyester textile	1	kg	textile production, nonwoven polyester, needle-punched   textile, nonwoven polyester   Cutoff, U – RoW*
PES cloth 1	Nonwoven polyester textile	1	kg	textile production, nonwoven polyester, needle-punched   textile, nonwoven polyester   Cutoff, U – RoW*
PA66-GF30	Polyamide 66	0,7	kg	nylon 6-6 production   nylon 6-6   Cutoff, U - RER
	Glass Fiber	0,3	kg	glass fibre production   glass fibre   Cutoff, U - RER
	Spritzguss	1	kg	injection moulding   injection moulding   Cutoff, U - RER
PE-X-MD40-FR(61)	Polyethylene	0,4	kg	polyethylene production, low density, granulate   polyethylene, low density, granulate   Cutoff, U – RER*
	Gypsum	0,4	kg	gypsum quarry operation   gypsum, mineral   Cutoff, U - CH
	Flame retardant	0,2	kg	phosphorus production, white, liquid   phosphorus, white, liquid   Cutoff, U - RER
	Spritzguss	1	kg	injection moulding   injection moulding   Cutoff, U - RER
PBT	Polybutylene Terephthalate	1	kg	polybutylene terephthalate
	Extrusion	1	kg	extrusion, plastic pipes   extrusion, plastic pipes   Cutoff, U - RER
HDPE FR(61)	High density polyethylene	0,8	kg	polyethylene production, high density, granulate   polyethylene, high density, granulate   Cutoff, U - RER
	Flame retardant	0,2	kg	phosphorus production, white, liquid   phosphorus, white, liquid   Cutoff, U - RER
	Extrusion	1	kg	extrusion, plastic pipes   extrusion, plastic pipes   Cutoff, U - RER
PAK Adhesive	Polyurethane adhesive	1	kg	polyurethane adhesive production   polyurethane adhesive   Cutoff, U – GLO*
	Extrusion	1	kg	extrusion, plastic pipes   extrusion, plastic pipes   Cutoff, U - RER
Pressure sensitive adhesive 3	Polyurethane adhesive	1	kg	polyurethane adhesive production   polyurethane adhesive   Cutoff, U – GLO*
PA66 GF30	Polyamide 66	0,7	kg	nylon 6-6 production   nylon 6-6   Cutoff, U - RER
	Glass Fiber	0,3	kg	glass fibre production   glass fibre   Cutoff, U - RER
	Spritzguss	1	kg	injection moulding   injection moulding   Cutoff, U - RER
PA46	Polyamide 46	1	kg	nylon 6-6 production   nylon 6-6   Cutoff, U – RER*

	Extrusion	1	kg	extrusion, plastic pipes   extrusion, plastic pipes   Cutoff, U - RER
PA66-GF50	Polyamide 66	0,5	kg	nylon 6-6 production   nylon 6-6   Cutoff, U - RER
	Glass Fiber	0,5	kg	glass fibre production   glass fibre   Cutoff, U - RER
	Spritzguss	1	kg	injection moulding   injection moulding   Cutoff, U - RER
PE-HD-TD5-FR(61)	High density polyethylene	0,8	kg	polyethylene production, high density, granulate   polyethylene, high density, granulate   Cutoff, U - RER
	Flame retardant	0,2	kg	phosphorus production, white, liquid   phosphorus, white, liquid   Cutoff, U - RER
	Spritzguss	1	kg	injection moulding   injection moulding   Cutoff, U - RER
CuSn0,15	Copper	0,9985	kg	electrorefining of copper, anode   copper, cathode   Cutoff, U - GLO
	Tin	0,0015	kg	tin production   tin   Cutoff, U - RoW
PA66-I	Polyamide 66	1	kg	nylon 6-6 production   nylon 6-6   Cutoff, U - RER
	Extrusion	1	kg	extrusion, plastic pipes   extrusion, plastic pipes   Cutoff, U - RER
PA6-I-GF15	Polyamide 6	0,85	kg	nylon 6 production   nylon 6   Cutoff, U - RER
	Glass Fiber	0,15	kg	glass fibre production   glass fibre   Cutoff, U - RER
	Spritzguss	1	kg	injection moulding   injection moulding   Cutoff, U - RER
X10CrNi18-8	Chromium steel	1	kg	steel production, electric, chromium steel 18/8   steel, chromium steel 18/8   Cutoff, U - RER
PBT-GF30	Polybutylene Terephthalate	0,7	kg	polybutylene terephthalate**
	Glass Fiber	0,3	kg	glass fibre production   glass fibre   Cutoff, U - RER
	Spritzguss	1	kg	injection moulding   injection moulding   Cutoff, U - RER
Copper Nickel	Copper	0,9	kg	electrorefining of copper, anode   copper, cathode   Cutoff, U - GLO
	Nickel	0,1	kg	smelting and refining of nickel concentrate, 16% Ni   nickel, class 1   Cutoff, U - GLO
PE-HD-MD40-FR(61)	High density polyethylene	0,4	kg	polyethylene production, high density, granulate   polyethylene, high density, granulate   Cutoff, U - RER
	Gypsum	0,4	kg	gypsum quarry operation   gypsum, mineral   Cutoff, U - CH
	Flame retardant	0,2	kg	phosphorus production, white, liquid   phosphorus, white, liquid   Cutoff, U - RER
	Spritzguss	1	kg	injection moulding   injection moulding   Cutoff, U - RER
PE-LD-X+EEAK-X	Polyethylene	1	kg	polyethylene production, low density, granulate   polyethylene, low density, granulate   Cutoff, U - RER*
	Extrusion	1	kg	extrusion, plastic pipes   extrusion, plastic pipes   Cutoff, U - RER

CuSn6	Copper	0,94	kg	electrorefining of copper, anode   copper, cathode   Cutoff, U - GLO
	Tin	0,06	kg	tin production   tin   Cutoff, U - RoW
PA66	Polyamide 66	1	kg	nylon 6-6 production   nylon 6-6   Cutoff, U - RER
	Extrusion	1	kg	extrusion, plastic pipes   extrusion, plastic pipes   Cutoff, U - RER
VMQ	Silicone rubber	1	kg	silicone rubber**
	Extrusion	1	kg	extrusion, plastic pipes   extrusion, plastic pipes   Cutoff, U - RER
PET Fabric	Nonwoven polyester textile	1	kg	textile production, nonwoven polyester, needle-punched   textile, nonwoven polyester   Cutoff, U – RoW*
PA66-GF15	Polyamide 66	0,85	kg	nylon 6-6 production   nylon 6-6   Cutoff, U - RER
	Glass Fiber	0,15	kg	glass fibre production   glass fibre   Cutoff, U - RER
	Spritzguss	1	kg	injection moulding   injection moulding   Cutoff, U - RER
Copper Alloy	Copper	1	kg	electrorefining of copper, anode   copper, cathode   Cutoff, U - GLO
High Copper Alloy	Copper	1	kg	electrorefining of copper, anode   copper, cathode   Cutoff, U - GLO
C75S	Unalloyed steel	1	kg	steel production, converter, unalloyed   steel, unalloyed   Cutoff, U - RER
PVC	Polyvinylchloride	1	kg	polyvinylchloride production, bulk polymerisation   polyvinylchloride, bulk polymerised   Cutoff, U - RER
	Extrusion	1	kg	extrusion, plastic pipes   extrusion, plastic pipes   Cutoff, U - RER

\*Proxy

\*\* Modelliert nach [Ökobaudat 2023] und [Boustead 2005]

### A. 5. Verwendete Datensätze zur Modellierung von Silikonkautschuk und PBT (jeweils 1 kg)

Werkstoff	Wirkungskategorie	Menge	Einheit	Ecoinvent-Datensatz
silicone rubber	Erneuerbare Primärenergie	69,01	MJ	Energy, gross calorific value, in biomass
	Nicht-erneuerbare Primärenergie	111,3	MJ	Energy, gross calorific value, in biomass, primary forest
	Treibhausgas-potential	8,263	kg	Carbon dioxide, fossil
	Versauerungs-potential	0,014	kg	Sulfur dioxide
polybutylene terephthalate	Erneuerbare Primärenergie	0,31	MJ	Energy, gross calorific value, in biomass
	Nicht-erneuerbare Primärenergie	102,05	MJ	Energy, gross calorific value, in biomass, primary forest

Treibhausgas-potential	3,9	kg	Carbon dioxide, fossil
Versauerungs-potential (nur Ammoniak)	0,000001	kg	Ammonia
Versauerungs-potential (nur Stickoxide)	0,077	kg	Nitrogen oxides
Versauerungs-potential (nur Schwefeloxide)	0,013	kg	Sulfur dioxide
Versauerungs-potential (nur Schwefelsäure)	0,000001	kg	Sulfuric acid

### A. 6. Verwendete Datensätze zur generischen Modellierung von Werkstoffgruppen im BEV-Leitungssatz

Werkstoffgruppe	Material / Verarbeitungsprozess	Menge	Einheit	Ecoinvent-Datensatz
Elastomere / elastomere Verbunde	synthetic rubber	1	kg	synthetic rubber production   synthetic rubber   Cutoff, U - RER
	extrusion, plastic pipes	1	kg	extrusion, plastic pipes   extrusion, plastic pipes   Cutoff, U - RER
gefüllte Thermoplaste	glass fibre reinforced plastic, polyamide, injection moulded	1	kg	glass fibre reinforced plastic production, polyamide, injection moulded   glass fibre reinforced plastic, polyamide, injection moulded   Cutoff, U - RER
	injection moulding	1	kg	injection moulding   injection moulding   Cutoff, U - RER
ungefüllte Thermoplaste	polyethylene, high density, granulate	1	kg	polyethylene production, high density, granulate   polyethylene, high density, granulate   Cutoff, U - RER
	extrusion, plastic pipes	1	kg	extrusion, plastic pipes   extrusion, plastic pipes   Cutoff, U - RER
Kupferlegierungen	copper, cathode	1	kg	electrorefining of copper, anode   copper, cathode   Cutoff, U - GLO
Stahl	steel, low-alloyed, hot rolled	1	kg	steel production, low-alloyed, hot rolled   steel, low-alloyed, hot rolled   Cutoff, U - RER
Schaumstoffe	polyurethane, flexible foam, flame retardant	1	kg	polyurethane production, flexible foam, TDI-based, flame retardant   polyurethane, flexible foam, flame retardant   Cutoff, U - RER
Textilien	cellulose fibre	1	kg	cellulose fibre production   cellulose fibre   Cutoff, U - CH
Kleber, Dichtstoffe	polyurethane adhesive	1	kg	polyurethane adhesive production   polyurethane adhesive   Cutoff, U - GLO
Zink und Zinklegierungen	zinc	1	kg	primary zinc production from concentrate   zinc   Cutoff, U - RoW

Aluminium und Aluminium-legierungen	aluminium, primary, ingot	1	kg	aluminium production, primary, ingot   aluminium, primary, ingot   Cutoff, U - IAI Area, EU27 & EFTA
Halbleiter / Elektronik	electronic component, passive, unspecified	1	kg	electronic component production, passive, unspecified   electronic component, passive, unspecified   Cutoff, U - GLO
Zinn und Zinnlegierungen	tin	1	kg	tin production   tin   Cutoff, U - RoW
Silber und Silberlegierungen	silver	1	kg	silver-gold mine operation with refinery   silver   Cutoff, U - RoW
Nickel und Nickellegierungen	nickel, class 1	1	kg	smelting and refining of nickel concentrate, 16% Ni   nickel, class 1   Cutoff, U - GLO
Lacke	acrylic varnish, with water, in 53% solution state	1	kg	acrylic varnish production, with water, in 53% solution state   acrylic varnish, with water, in 53% solution state   Cutoff, U - RER
Unspezifische Beschichtungen	coating powder	1	kg	coating powder production   coating powder   Cutoff, U - RER
Druckfarben / Tinten	printing ink, rotogravure, without solvent, in 55% toluene solution state	1	kg	printing ink production, rotogravure, product in 55% toluene solution state   printing ink, rotogravure, without solvent, in 55% toluene solution state   Cutoff, U - RER
Gold	gold	1	kg	gold mine operation and refining   gold   Cutoff, U - SE
Siliziummetall	silicon, electronics grade	1	kg	silicon production, electronics grade   silicon, electronics grade   Cutoff, U - DE
Gläser	flat glass, uncoated	1	kg	flat glass production, uncoated   flat glass, uncoated   Cutoff, U - RER
Platin	platinum	1	kg	platinum group metal mine operation, ore with high palladium content   platinum   Cutoff, U - RU

### A. 7. Verwendete Datensätze zur generischen Modellierung von Werkstoffgruppen im Ottomotor-Leitungssatz

Werkstoffgruppe	Material / Verarbeitungsprozess	Menge	Einheit	Ecoinvent-Datensatz
ungefüllte Thermoplaste	polyethylene, high density, granulate	1	kg	polyethylene production, high density, granulate   polyethylene, high density, granulate   Cutoff, U - RER
	extrusion, plastic pipes	1	kg	extrusion, plastic pipes   extrusion, plastic pipes   Cutoff, U - RER
gefüllte Thermoplaste	glass fibre reinforced plastic, polyamide, injection moulded	1	kg	glass fibre reinforced plastic production, polyamide, injection moulded   glass fibre reinforced plastic, polyamide, injection moulded   Cutoff, U - RER
	injection moulding	1	kg	injection moulding   injection moulding   Cutoff, U - RER
Textilien	cellulose fibre	1	kg	cellulose fibre production   cellulose fibre   Cutoff, U - CH
Kleber, Dichtstoffe	polyurethane adhesive	1	kg	polyurethane adhesive production   polyurethane adhesive   Cutoff, U - GLO

Kupferlegierungen	copper, cathode	1	kg	electrorefining of copper, anode   copper, cathode   Cutoff, U - GLO
Elastomere / elastomere	synthetic rubber	1	kg	synthetic rubber production   synthetic rubber   Cutoff, U - RER
Verbunde	extrusion, plastic pipes	1	kg	extrusion, plastic pipes   extrusion, plastic pipes   Cutoff, U - RER
Stahl	steel, low-alloyed, hot rolled	1	kg	steel production, low-alloyed, hot rolled   steel, low-alloyed, hot rolled   Cutoff, U - RER
Gläser	flat glass, uncoated	1	kg	flat glass production, uncoated   flat glass, uncoated   Cutoff, U - RER
Zinn und Zinnlegierungen	tin	1	kg	tin production   tin   Cutoff, U - RoW
Zink und Zinklegierungen	zinc	1	kg	primary zinc production from concentrate   zinc   Cutoff, U - RoW
Nickel und Nickellegierungen	nickel, class 1	1	kg	smelting and refining of nickel concentrate, 16% Ni   nickel, class 1   Cutoff, U - GLO
Silber und Silberlegierungen	silver	1	kg	silver-gold mine operation with refinery   silver   Cutoff, U - RoW
Lacke	acrylic varnish, with water, in 53% solution state	1	kg	acrylic varnish production, with water, in 53% solution state   acrylic varnish, with water, in 53% solution state   Cutoff, U - RER
Gold	gold	1	kg	gold mine operation and refining   gold   Cutoff, U - SE
Druckfarben / Tinten	printing ink, rotogravure, without solvent, in 55% toluene solution state	1	kg	printing ink production, rotogravure, product in 55% toluene solution state   printing ink, rotogravure, without solvent, in 55% toluene solution state   Cutoff, U - RER

### A. 8. Verwendete Datensätze zur Modellierung des Transports der Werkstoffe zur Fertigung des BEV-Leitungssatzes

Transportmodus	Menge	Einheit	Ecoinvent-Datensatz
Zugtransport Europa	0,259	t*km	market group for transport, freight train   transport, freight train   Cutoff, U - RER
Schiffstransport Europa	0,130	t*km	market for transport, freight, inland waterways, barge   transport, freight, inland waterways, barge   Cutoff, U - RER
Straßentransport Europa	1,013	t*km	market for transport, freight, lorry, unspecified   transport, freight, lorry, unspecified   Cutoff, U - RER

### A. 9. Verwendete Datensätze zur Modellierung des Transports der Werkstoffe zur Fertigung des Ottomotor-Leitungssatzes

Transportmodus	Menge	Einheit	Ecoinvent-Datensatz
Zugtransport Europa	0,090	t*km	market group for transport, freight train   transport, freight train   Cutoff, U - RER

Schiffstransport Europa	0,045	t*km	market for transport, freight, inland waterways, barge   transport, freight, inland waterways, barge   Cutoff, U - RER
Straßentransport Europa	0,351	t*km	market for transport, freight, lorry, unspecified   transport, freight, lorry, unspecified   Cutoff, U – RER

## A. 10. Verwendete Datensätze zur Modellierung der Fertigung des BEV-Leitungssatzes

Strommix	Menge	Einheit	Ecoinvent-Datensatz
Strommix Deutschland	3.731	kWh	market for electricity, medium voltage   electricity, medium voltage   Cutoff, U - DE

## A. 11. Verwendete Datensätze zur Modellierung der Fertigung des Ottomotor-Leitungssatzes

Strommix	Menge	Einheit	Ecoinvent-Datensatz
Strommix Deutschland	3.612	kWh	market for electricity, medium voltage   electricity, medium voltage   Cutoff, U - DE

## A. 12. Verwendete Datensätze zur Modellierung des Transports des BEV-Leitungssatzes zur Installation

Transportmodus	Menge	Einheit	Ecoinvent-Datensatz
Straßentransport Europa	6,197	t*km	market for transport, freight, lorry, unspecified   transport, freight, lorry, unspecified   Cutoff, U - RER

## A. 13. Verwendete Datensätze zur Modellierung des Transports des Ottomotor-Leitungssatzes zur Installation

Transportmodus	Menge	Einheit	Ecoinvent-Datensatz
Straßentransport	5,454	t*km	market for transport, freight, lorry, unspecified   transport, freight, lorry, unspecified   Cutoff, U - RER

## A. 14. Verwendete Datensätze zur Modellierung des Transports des BEV-Leitungssatzes zum End-of-Life

Transportmodus	Menge	Einheit	Ecoinvent-Datensatz
Straßentransport	0,456	t*km	market for transport, freight, lorry, unspecified   transport, freight, lorry, unspecified   Cutoff, U - RER

## A. 15. Verwendete Datensätze zur Modellierung des Transports des Ottomotor-Leitungssatzes zum End-of-Life

Transportmodus	Menge	Einheit	Ecoinvent-Datensatz
Straßentransport	0,158	t*km	market for transport, freight, lorry, unspecified   transport, freight, lorry, unspecified   Cutoff, U - RER

## A. 16. Verwendete Datensätze zur Modellierung der angenommenen Entsorgungsprozesse (jeweils für 1 kg Material)

Werkstoffgruppe	Entsorgtes Material	Menge	Einheit	Ecoinvent-Datensatz
Schreddern von Leitungssatz	waste electric and electronic equipment	1	kg	treatment of waste electric and electronic equipment, shredding   waste electric and electronic equipment   Cutoff, U - GLO
Sortieren von Schredderfraktionen	iron scrap, sorted, pressed	1	kg	treatment of metal scrap, mixed, for recycling, unsorted, sorting   iron scrap, sorted, pressed   Cutoff, U - Europe without Switzerland
EoL von Kupferkabeln	scrap copper	0,1	kg	treatment of scrap copper, municipal incineration   scrap copper   Cutoff, U - Europe without Switzerland
	copper, cathode	0,9	kg	treatment of copper scrap by electrolytic refining   copper, cathode   Cutoff, U - RER
	copper, cathode	-0,9	kg	electrorefining of copper, anode   copper, cathode   Cutoff, U - GLO
EoL von Elastomeren / elastomeren Verbunden	waste rubber, unspecified	1	kg	treatment of waste rubber, unspecified, municipal incineration   waste rubber, unspecified   Cutoff, U - Europe without Switzerland
EoL von gefüllten Thermoplasten	waste wire plastic	1	kg	treatment of waste wire plastic, municipal incineration FAE   waste wire plastic   Cutoff, U - CH
EoL von ungefüllten Thermoplasten	waste polyethylene	1	kg	treatment of waste polyethylene, municipal incineration FAE   waste polyethylene   Cutoff, U - CH
EoL von Kupferlegierungen	scrap copper	1	kg	treatment of scrap copper, municipal incineration   scrap copper   Cutoff, U - Europe without Switzerland
EoL von Stahl	steel in car shredder residue	1	kg	treatment of steel in car shredder residue, municipal incineration FAE   steel in car shredder residue   Cutoff, U - CH
EoL von Schaumstoffen	waste polyurethane foam	1	kg	treatment of waste polyurethane foam, collection for final disposal   waste polyurethane foam   Cutoff, U - CH
EoL von Textilien	waste textile, soiled	1	kg	treatment of waste textile, soiled, municipal incineration FAE   waste textile, soiled   Cutoff, U - CH

EoL von Kleber, Dichtstoffen	waste polyurethane	1	kg	treatment of zinc in car shredder residue, municipal incineration FAE   zinc in car shredder residue   Cutoff, U - CH
EoL von Zink und Zinklegierungen	zinc in car shredder residue	1	kg	treatment of zinc in car shredder residue, municipal incineration FAE   zinc in car shredder residue   Cutoff, U - CH
EoL von Aluminium und Aluminiumlegierungen	aluminium in car shredder residue	1	kg	treatment of aluminium in car shredder residue, municipal incineration FAE   aluminium in car shredder residue   Cutoff, U - CH
EoL von Halbleitern / Elektronik	electronics scrap from control units	1	kg	treatment of electronics scrap from control units   electronics scrap from control units   Cutoff, U - RER
EoL von Zinn und Zinnlegierungen	scrap tin sheet	1	kg	treatment of scrap tin sheet, municipal incineration FAE   scrap tin sheet   Cutoff, U - CH
EoL von Silber und Silberlegierungen	silver	1	kg	treatment of precious metal from electronics scrap, in anode slime, precious metal extraction   silver   Cutoff, U - SE
EoL von Nickel und Nickellegierungen	nickel, class 1	1	kg	treatment of metal part of electronics scrap, in copper, anode, by electrolytic refining   nickel, class 1   Cutoff, U - SE
EoL von Lacken	waste paint	1	kg	treatment of waste paint, municipal incineration   waste paint   Cutoff, U - Europe without Switzerland
EoL von unspezifischen Beschichtungen	coating from waste cathode ray tube display	1	kg	treatment of coating from waste cathode ray tube display, municipal incineration FAE   coating from waste cathode ray tube display   Cutoff, U
EoL von Druckfarben / Tinten	waste paint	1	kg	treatment of waste paint, municipal incineration   waste paint   Cutoff, U - Europe without Switzerland
EoL von Gold	precious metal from electronics scrap, in anode slime	1	kg	treatment of metal part of electronics scrap, in copper, anode, by electrolytic refining   precious metal from electronics scrap, in anode slime   Cutoff, U - SE
EoL von Siliziummetall	electronics scrap from control units	1	kg	treatment of electronics scrap from control units   electronics scrap from control units   Cutoff, U - RER
EoL von Gläsern	waste glass	1	kg	treatment of waste glass, municipal incineration FAE   waste glass   Cutoff, U - CH
EoL von Platin	precious metal from electronics scrap, in anode slime	1	kg	treatment of metal part of electronics scrap, in copper, anode, by electrolytic refining   precious metal from electronics scrap, in anode slime   Cutoff, U - SE



Ludwig Bolkow Systemtechnik

LUDWIG-BÖLKOW-SYSTEMTECHNIK GMBH (LBST)  
DAIMLERSTR. 15 | 85521 OTTOBRUNN | GERMANY  
WWW.LBST.DE



## 1 Überprüfungsumfang und Zielsetzung

Die TÜV SÜD Energietechnik GmbH Baden-Württemberg wurde von Open Hybrid LabFactory (OHLF) e.V. beauftragt, eine unabhängige Kritische Prüfung gemäß ISO 14071:2024 durchzuführen.

### Beschreibung des Überprüfungsprozesses:

- Die Überprüfung wurde gemäß ISO 14044 6.2 durchgeführt;
- Die Überprüfung wurde am Ende der Studie durchgeführt;
- Die Überprüfung umfasste eine Bewertung des LCI- und LCIA-Modells und der Berechnung;
- Die Überprüfung umfasste eine Analyse einzelner Datensätze;
- Die Kommentare der Prüfer wurden durch einen kritischen Überprüfungsbericht bereitgestellt und diskutiert. Die Umsetzung wurde vom Prüfer gründlich überprüft.

## 2 Details zum Umfang der kritischen Überprüfung

### 2.1 Bewertete Produkte

Die LCA-Ergebnisse wurden für die funktionale Einheit der genannten Produkte berechnet.

Der entsprechende Referenzfluss ist: ein (Teil)-Leitungssatz eines Pkw

### 2.2 Einrichtungen, physische Infrastruktur, Aktivitäten, Technologien und Prozesse

Die Lebenszyklusanalyse umfasst die Produktion der Rohmaterialien, deren Verarbeitung und Transport zum Hersteller des Kfz-Leitungssatzes, den Transport zum Fahrzeughersteller sowie Entsorgung und Recycling. Die Nutzung im Kfz wird nicht betrachtet. Es handelt sich um eine Cradle-to-cradle-Analyse, bei der über den Lebenszyklus eines Produkts hinaus eine Gutschrift durch das Recycling modelliert wird. Im Vergleich dazu würde eine Cradle-to-gate-Analyse nur die Umweltauswirkungen bis zum Ende der Produktfertigung betrachten und eine Cradle-to-grave-Analyse bis zum End-of-Life ohne Berücksichtigung einer Gutschrift durch das Recycling. Da keine Daten zu den Umweltauswirkungen während der Nutzung vorliegen, wird diese Phase nicht aufgeführt.

Der größte Anteil der Emissionen stammt von der Produktion von Metallen (Kupferkabel und Kupferlegierungen) und Kunststoffe (ungefüllte Thermoplaste und gefüllte Thermoplaste sowie Elastomere).

### 2.3 Wirkungskategorien

- Klimawandel: GWP100 (IPCC 2021)
- Versauerung: CML v.4.8 2016
- Kumulierter Energieaufwand: VDI 2012
- Ressourcenverbrauch: Verordnung (EU) 2024/1252 [EU 2024].

### 2.4 Angewandte Standards und zusätzliche Anforderungen

Die LCA-Studie wurde gemäß ISO 14040:2006+Amd 1:2020, ISO 14044:2006+Amd 1:2017+Amd 2:2020 durchgeführt.



### **3 Einschränkungen**

Geringe Unschärfen bei der Modellierung der Werkstoffherstellung ergeben sich durch die Aggregation aller Werkstoffe zu Werkstoffgruppen, die nicht als Hauptwerkstoffe definiert sind. Weitere geringfügige Unsicherheiten ergeben sich bei der Modellierung von Materialzusammensetzungen für das Mapping, welche auf Literaturrecherchen beruht. Unschärfen durch generische Sekundärdaten haben einen höheren Einfluss auf die Berechnungsergebnisse. Die Annahme einer Recyclingquote von 90% für Kupferkabel hat signifikante Auswirkungen auf die Wirkungsabschätzung.

### **4 Fazit**

Basierend auf dem kritischen Überprüfungsbericht kommt der Prüfer der TÜV SÜD Energietechnik GmbH Baden-Württemberg zu dem Schluss, dass die Studie den Anforderungen der ISO 14040 und ISO 14044 entspricht. Der kritische Prüfer bewertete die Gesamtqualität des Berichts als hoch, seine Methoden als wissenschaftlich und technisch gültig und die verwendeten Daten als angemessen und vernünftig. Der Studienbericht ist transparent und konsistent, und die Interpretation der Ergebnisse spiegelt das Ziel und die identifizierten Einschränkungen der Studie wider.

### **5 Unabhängigkeit**

Der Auftraggeber ist verantwortlich für die Sammlung und faire Darstellung der präsentierten Informationen. Der Prüfer der TÜV SÜD Energietechnik GmbH Baden-Württemberg ist nicht an der Herstellung von Produkten, der Berechnung potenzieller Umweltauswirkungen und der Erstellung von LCA-Ansprüchen beteiligt. Die Überprüfungsaktivitäten sind unabhängig vom Auftraggeber und dem Praktiker.

Critical Review Life Cycle Assessment according to DIN-EN-ISO-14040 and 14044



Dokumentation der Auditfeststellungen					
Unternehmen		Open-Hybrid LabFactory e.V.			
		38440 Wolfsburg			
		0			
Datum des Audits		27.02.2025 bis 27.02.2025			
Auditgrundlage / Standard		DIN EN ISO 14040 DIN EN ISO 14044 ISO 14071			
Leitende/r Prüfer/in		Espinosa			
weitere Prüfer/innen		Engelhardt			
Nr.	Auditergebnis / Feststellung / nachzureichende Unterlagen (Befund vom Reviewer und Handlungsempfehlung)	Datum	Einordnung	Geplante / durchgeführte Korrekturmaßnahme (vom Kunden auszufüllen) --> Antwort vom LCA Auftraggeber/Ersteller	Beurteilung der durchgeführten Maßnahmen durch TÜV SÜD (Erfüllung und Wirksamkeit)
1	Auftraggeber und Ersteller müssen deutlich bei der Einleitung erwähnt werden, nicht nur in dem Disclaimer.	05.05.2025	M	Abschnitt 1: Die vorliegende Studie stellt eine Lebenszyklusanalyse (LCA) für automobile Leitungssätze dar, welche von der Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH (LBST) im Auftrag von OHLF erstellt worden ist.	<b>Befund abgeschlossen:</b> In Kapitel 1 Einleitung, Seite 11 aufgenommen
2	Zielgruppe im Abs. 2.1 bitte genauer beschreiben. Sind es nationale (in Deutschland) oder globale Produzenten die Anwender der Ergebnisse?	05.05.2025	M	Abschnitt 2.1: Die Zielgruppe sind hierbei deutsche Unternehmen aus der Leitungssatz-Industrie (Automobilhersteller, Zulieferer der Automobilbranche, Leitungssatzkonfektionierer, Material- und Komponentenproduzenten der Branche).	<b>Befund abgeschlossen:</b> In Kapitel 2.1 Untersuchungsziel, Seite 12 aufgenommen
3	Eine Abbildung /Foto/Scheme im Abschn. 2.2.1 mit der Darstellung von beiden Produkten wäre sehr hilfreich für die Verständlichkeit der Referenzprodukte.	05.05.2025	M	Abschnitt 2.2.1: Abbildungen 1 & 2	<b>Befund abgeschlossen:</b> In Kapitel 2.2. 1 Produktsysteme und Funktionen, Seite 13 aufgenommen
4	Die funktionelle Einheit in Kapitel 2.2.2 ist nicht richtig beschrieben. Vor allem fehlen Informationen die die "use phase" betreffen. Es fehlen Angaben zu Lebensdauer, Qualitätsmerkmale, Leistung, die von den Produkten zu erbringen ist (was sind typische, messbare Leistungsmerkmale von KFZ-Bäume?). Auch zum Thema "use phase", fehlen Angaben über möglich Instandhaltung Maßnahmen, die während diese Phase nötig wären, um die Leistung so zu erbringen die in der funktionalen Einheit definiert. Fehlt diese Information, kann die Studie nicht die use phase richtig repräsentieren und das müsste deutlich im Bericht stehen als Einschränkung, bzw. als Auslassung vom Lebenswegabschnitt.	05.05.2025	NC	Abschnitt 2.2.2: Da es sich bei den beiden betrachteten Produkten jeweils um Teileitungssätze und nicht um die vollständigen Steck- und Kabelverbindungen eines Kfz handelt, lässt sich ihre Funktion nicht genau quantifizieren (z.B. in gefahrenen Kilometern eines Pkw). Zu Qualitäts- bzw. Leistungsunterschieden der Produkte liegen keine Informationen vor. Eine Wartung oder ein Austausch von Kabelbäumen findet während der Nutzung von Fahrzeugen nur in Ausnahmefällen statt, weshalb angenommen wird, dass nur jeweils ein Leitungssatz während der Lebensdauer eines Kfz zum Einsatz kommt. Entsprechend wird der Referenzfluss „ein (Teil)-Leitungssatz eines Pkw“ als funktionelle Einheit definiert. Dies ermöglicht die Durchführung der LCA für beide betrachteten Produkte, wenngleich diese nicht direkt miteinander vergleichbar sind. Eine Betrachtung der Nutzungsphase ist ausgeschlossen.  Abschnitt 2.2.3: Zu Umweltauswirkungen des verbauten Leitungssatzes im Kfz während der Nutzung liegen keine Daten vor, weshalb diese Lebenszyklusphase im Folgenden <b>nicht</b> aufgeführt wird.	<b>Befund abgeschlossen:</b> Begründet und angenommen in Kapitel 2.2.2, Seite 14. Begründet als Annahme, nicht als Einschränkung

Nr.	Auditergebnis / Feststellung / nachzureichende Unterlagen (Befund vom Reviewer und Handlungsempfehlung)	Datum	Einordnung	Geplante / durchgeführte Korrekturmaßnahme (vom Kunden auszufüllen) --> Antwort vom LCA Auftraggeber/Ersteller	Beurteilung der durchgeführten Maßnahmen durch TÜV SÜD (Erfüllung und Wirksamkeit)
5	<p>Um den Untersuchungsrahmen der Studie vollständig zu beschreiben, ergänzen Sie bitte den Bericht in Kapitel. 2 mit folgenden Informationen:</p> <p>-Warum wurden die 4 Wirkungskategorien ausgewählt und nicht andere? welche Übereinstimmung mit dem Ziel der Studie haben diese 4 Wirkungskategorien? (bitte wie beim Audit erklärt, noch im Bericht ergänzen)</p> <p>-Angaben über die Wirkungsabschätzungsmethoden für Ressourcenverbrauch fehlen (Erwähnung der "Impact assessment method")</p>	05.05.2025	M	<p>Abschnitt 2: Für die Auswahl der Kategorien liegen vor dem Hintergrund der Zielsetzung und der Zielgruppe (siehe Abschnitt 2.1) drei Gründe vor. Erstens ist das Treibhausgaspotential von Produkten für die Treibhausgasminderungsziele Deutschlands und Europas sowie für entsprechende Berichtspflichten von Unternehmen von hoher Relevanz. Zweitens wird für die betrachteten Produkte, welche jeweils einen hohen Anteil an Kupfer enthalten, im Vergleich zu anderen Umweltauswirkungen eine besonders hohe Versauerungswirkung erwartet. Drittens ermöglicht eine Analyse des Primärenergie- und Ressourcenbedarfs ein besseres Verständnis der Produktzusammensetzung und Prozessketten. Dadurch wird auch eine Identifikation von Ineffizienzen und Risiken entlang der Wertschöpfungskette ermöglicht, wie z.B. dem Einsatz von kritischen und strategischen Rohstoffen nach Verordnung (EU) 2024/1252 [EU 2024].</p> <p>Abschnitt 2.2.5: Für den Ressourcenverbrauch wird keine Wirkungsabschätzung mit einer spezifischen Methode und Charakterisierungsfaktoren durchgeführt, sondern stattdessen eine Materialbilanz aufgestellt.</p>	<p><b>Befund abgeschlossen</b> Kapitel 2 angepasst</p>
6	<p>Um den Untersuchungsrahmen der Studie vollständig zu beschreiben, sind folgende Verbesserungen nötig:</p> <p>- In Kapitel 2.2.3 Stellen Sie sicher, dass die Vordergrund und der Hintergrundprozesse im Bericht klar sind, indem Sie Abb. 1 verbessern oder eine neue Abbildung mit den Prozessen im Vordergrund und Hintergrund sowie den Inputs and Outputs hinzufügen (sie können gruppiert werden)</p> <p>Auch bitte eine einfache Abbildung der Fertigungsprozesse einfügen, am besten unter 3.2, wie im Audit diskutiert.</p>	05.05.2025	M	<p>Abschnitt 2.2.3: Da in der Datenbank ecoinvent nur generische Prozesse für die Herstellung und das End-of-Life von Kabelprodukten zur Verfügung stehen, ist eine eigene Modellierung der Werkstoffherstellung aus den Rohstoffen, der Fertigung der Leitungssätze sowie des End-of-Life im Rahmen dieser Studie notwendig. Abbildung 4 stellt eine Übersicht der Vordergrundprozesse, also aller selbst modellierten Prozesse auf Basis von Primär- und Sekundärdaten dar.</p> <p>Abschnitt 3.2: Abbildung 5 stellt die Inputs, Outputs sowie einzelne Teilprozesse der Fertigung von Teilleitungssätzen nach [Aboujlal &amp; Amrani 2020] dar. Zunächst werden Werkstoffe miteinander verbunden (Spleißen) und Kabel montiert (Konfektionierung). Anschließend werden alle Steckverbindungen hergestellt und Kabel weiter isoliert (Taping). Zuletzt erfolgt eine Nachbearbeitung.</p>	<p><b>Befund abgeschlossen, mit ergänzende Empfehlung:</b> Es wurde eine neue Abbildung hinzugefügt mit den Vordergrundprozesse und ergänzende Erklärungen dazu sind im Bericht enthalten.</p> <p>Ergänzende Empfehlung: Abbildung 4 auf Seite 15 zeigt lediglich die Vordergrundprozesse, während die Hintergrundprozesse nicht sichtbar sind. Die Abbildung könnte verbessert werden, indem die Systemgrenzen, Hilfsmaterialien und Outputs (z.B. Emissionen, Abfälle, Abwasser) ebenfalls dargestellt werden.</p>
7	<p>Da dieser Studie für eine Schulung eingesetzt wird, nutzen Sie den Anhang, um die wichtigsten Prozesse der Werkstoffherstellung und EoL darzustellen, z.B. mit Screenshots der Prozessdiagramme von OpenLCA. Oder mit einfachen Box Diagrammen, wo Inputs/Outputs ersichtlich werden und auch die Kriterien für die Auswahl der Input dato, und die Auswahl vom Ecolnvent benutzte Datensätze. Damit der Nutzer sich das vorstellen kann, und es leichter reproduzieren kann</p>	05.05.2025	Re		<p><b>Befund abgeschlossen:</b> keine Maßnahmen erforderlich aufgrund der Empfehlungskategorie.</p>

Nr.	Auditergebnis / Feststellung / nachzureichende Unterlagen (Befund vom Reviewer und Handlungsempfehlung)	Datum	Einordnung	Geplante / durchgeführte Korrekturmaßnahme (vom Kunden auszufüllen) --> Antwort vom LCA Auftraggeber/Ersteller	Beurteilung der durchgeführten Maßnahmen durch TÜV SÜD (Erfüllung und Wirksamkeit)
8	<p>Folgende Information müsste im Bericht ergänzt werden (siehe Kapitel 4.2.3. der ISO 14044)</p> <p>-Welche Anforderungen werden an die Datenqualität gestellt? Bitte trennen Sie die Anforderungen von der tatsächlichen Verfügbarkeit und Qualität.</p> <p>Hierzu fehlt noch auch eine kurze Erklärung über dem Einsatz von "Proxy" Daten. d.h. der Prozess der Mapping im Tab "Materialzusammensetzung" (Materials Zuordnung zu Datensätze, bzw. Proxys). Das muss im Bericht erwähnt werden</p> <p>-Alle Einschränkungen, die in Abschn. 2.2.6 sind, bitte separat vom Datenanforderungen beschreiben (z.B. neues Unterkapitel, nach 2.2.6).</p>	05.05.2025	M	<p>Abschnitt 2.2.6: Da es ein Ziel der Studie ist, ein Verständnis über die Zusammensetzung und Prozessketten der beiden betrachteten Produkte aufzubauen, sind hier vor allem möglichst repräsentative Sachbilanzdaten für die enthaltenen Materialien sowie für die Verarbeitungsschritte vor der Nutzung erforderlich. Entsprechende Primärdaten sollten möglichst aktuell sein. Nachdem die Zielgruppe deutsche Unternehmen umfasst, sind zudem v.a. deutschland- bzw. europaspezifische Daten zu verwenden.</p> <p>Abschnitt 2.2.7: Detaillierte Literaturdaten zu dem Lebenszyklus von Kfz-Kabelbäumen liegen nicht vor. Auf Basis von öffentlich verfügbaren Daten wurde jedoch die Materialzusammensetzung der Werkstoffe aus der Stückliste des Herstellers erarbeitet (Vgl. Anhang A. 5 und A. 6). Die daraus resultierende Materialbilanz wurde in Microsoft Excel entsprechenden Prozessbezeichnungen aus der Datenbank ecoinvent zugeordnet („Mapping“) und daraufhin in openLCA eingefügt. Für die Fälle, in denen keine passenden Datensätze verfügbar waren, sind möglichst verwandte Prozesse („Proxys“) ausgewählt worden. Daraus ergeben sich teilweise Unschärfen. Im folgenden Abschnitt wird im Detail auf die Einschränkungen und Unsicherheiten der Modellierung der Sachbilanz eingegangen.</p> <p>Abschnitt 2.2.8</p>	<p><b>Befund abgeschlossen</b>, mit ergänzende Empfehlung: In Kapitel 2.2.6, S. 16 wurde ein Abschnitt über die Anforderungen an die Datenqualität hinzugefügt, jedoch könnten diese Aspekte für ein Training berücksichtigt und erwähnt werden (Empfehlung):</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>-Zeitbezogenheit: Der Zeitraum der Daten fehlt (z. B. 6 Monate, 1 Jahr, 1-2 Chargen).</li> <li>-Hintergrundprozesse: Es wird keine technologische Erfassung der Hintergrundprozesse angegeben.</li> <li>-Vollständigkeit: Der prozentuale Anteil des gemessenen oder geschätzten Flusses fehlt.</li> <li>-Konsistenz: Es fehlt eine Einschätzung zur einheitlichen Anwendung der Methodik.</li> <li>-Vergleichspräzision: Es wird keine Einschätzung zur Reproduzierbarkeit der Ergebnisse gegeben.</li> </ul> <p>Erklärung zur Verwendung von "Proxy"-Daten wurde in Kapitel 2.2.7 und 2.2.8, S. 17 und S. 18 aufgenommen. Einschränkungen wurden in Kapitel 2.2.8, S. 17 und S. 18 aufgenommen</p>
9	<p>Die Beschriftungen + Beschreibungen von Tabelle 3 und 4 bitte ergänzen, damit es klar wird, dass die restliche % der Masse, zwar nicht in der Tabelle aufgeführt ist (weil da ja nur die Hauptwerkstoffe erscheinen, die die LBST selbst modelliert hat), aber es ist direkt als Inputs mit generic Data mitgerechnet wurden. Das, um klarzustellen, dass keine Abschneidung von Stoffströme stattgefunden hat.</p>	05.05.2025	M	<p>Beschriftungen von beiden Tabellen ergänzt und zwei weitere Tabellen mit restlichen Materialmengen pro Werkstoffgruppe hinzugefügt.</p>	<p><b>Befund abgeschlossen:</b> Die Tabellen 3, 4, 5 und 6 wurden ergänzt. S.20-23</p>
10	<p>-Abschnitt 2.2.7 zur kritischen Prüfung nach Vorgaben von ISO14044 Abschn. 5.2(g) so ergänzen: KP nach ISO14071, Reviewer ist Dr.Espinosa, TÜV SÜD. KP Bericht mit Stellungnahmen als Anhang am Ende des LCA Bericht miterfassen, wenn fertig.</p>	05.05.2025	M	<p>Abschnitt 2.2.10: Für die Veröffentlichung der LCA ist nach ISO 14044 ein vorangehendes Critical Review durch eine Drittpartei notwendig. Dieses wurde von Februar bis März 2025 durch Frau Dr. Espinosa von TÜV SÜD nach ISO 14071 durchgeführt.</p>	<p><b>Befund abgeschlossen:</b> Der Satz wurde ergänzt in Kapitel 2.2.10, S18</p>

Nr.	Auditergebnis / Feststellung / nachzureichende Unterlagen (Befund vom Reviewer und Handlungsempfehlung)	Datum	Einordnung	Geplante / durchgeführte Korrekturmaßnahme (vom Kunden auszufüllen) --> Antwort vom LCA Auftraggeber/Ersteller	Beurteilung der durchgeführten Maßnahmen durch TÜV SÜD (Erfüllung und Wirksamkeit)
11	Zur Vervollständigung der Datenerhebungsverfahren auf Kapitel 2 und 3: Definition des Konfektionärs und detaillierte Angaben zur Herkunft der Primärdaten (z.B. in Kap 3.2, wie und wann (Zeitspanne) wurden die Daten erhoben?	05.05.2025	M	<p>Abschnitt 2.2.7: Primärdaten eines europäischen Leitungssatz-Konfektionärs, welche für firmeninterne Analysen im Jahr 2023 erhoben worden sind, liegen in Form von Stücklisten für die Bestandteile (Werkstoffe) der beiden Leitungssätze vor. Diese sind sehr genau, umfangreich, aktuell und spezifisch für diesen Hersteller. Die meisten Werkstoffe bzw. Materialien der Stücklisten werden von Zulieferern aus Europa bezogen. Nachdem diese Daten sowohl für die Sachbilanz der Werkstoffherstellung als auch des End-of-Life verwendet werden, ist der Detailgrad dieser beiden Lebenszyklusphasen sehr hoch.</p> <p>Für die Fertigung und den Transport des Leitungssatzes liegen dem Konfektionär Emissionswerte vor, die im Jahr 2023 für einen nicht veröffentlichten Product Carbon Footprint (PCF) erhoben worden sind. Aus Vertraulichkeitsgründen wurden vom Hersteller nur aggregierte Emissionswerte als kg CO<sub>2</sub>eq pro Teilleitungssatz für die Erstellung der vorliegenden Studie zur Verfügung gestellt. Entsprechend sind die Daten zwar aktuell und spezifisch für den Kabelsatz-Konfektionär, ermöglichen jedoch nur eine oberflächliche Analyse dieser Lebenszyklusphasen. Nachdem auch die Emissionsquellen bzw. verwendeten Energieträger der einzelnen Fertigungsschritte nicht bekannt sind, wurde Strom aus dem deutschen Strommix als alleinige Quelle angenommen (Vgl. Abschnitt 3.2.1). Es wird nicht erwartet, dass bei den Konfektionierungsprozessen weitere Emissionsquellen auftreten. Unterstützende Prozesse wie etwaige Instandhaltungsmaßnahmen von Maschinen der Produktion, Verpackung und Lagerung der Produkte sowie die Behandlung von Abfällen werden nicht berücksichtigt.</p>	<b>Befund abgeschlossen:</b> In Kapitel 2.2.7 Datenverfügbarkeit und Datenqualität, Seite 16-17 aufgenommen
12	Es muss als Einschränkung erwähnt werden, dass die tatsächlichen Emissionsquellen von dem Fertigungsprozess nicht bekannt sind. Angenommen wurde also die Nutzung von Strom (wie bereits im Abs. 3.2.1 erwähnt), als Quelle der kommunizierten Footprint, und keine weiteren Energieträger und auch keine weitere Emissionsquellen sind bekannt. Erkläre im Bericht, ob es in der Realität auch keine direkte weitere Emission Quellen erwartet sind, und dass es nur den Energiebedarf der Fertigungsprozess berücksichtigt wurde. Weitere Prozesse der Fertigungsprozess, die für einen kompletten Cradle-to-Cradle Berechnung im Frage kommen sind nicht berücksichtigt, wie z.B. Behandlung von Abfall, die bei der Produktion entsteht, Instandhaltung der Maschinen bei der Produktion, Verpackung und Lagerung der Produkte.	05.05.2025	M	siehe oben (Nr. 11)	<b>Befund abgeschlossen,</b> mit ergänzende Empfehlung: In Kapitel 2.2.7 Datenverfügbarkeit und Datenqualität, Seite 16-17 aufgenommen, jedoch könnten diese Aspekte für ein Training berücksichtigt und erwähnt werden: In Kapitel 2.2.3 sollte klar gestellt werden, dass „Cradle to Cradle“ nur für Kupfer gilt und nicht für das gesamte Produkt (Leitungssätze), da es auf über 200 Materialien basiert, die unterschiedlich bei der EoL in Deutschland bewertet werden. Die EoL des Produkts endet mit der EoL eines PKW, basierend auf den Annahmen in Kapitel 2.2.2 und der Beschreibung in Kapitel 3.4.2.

Nr.	Auditergebnis / Feststellung / nachzureichende Unterlagen (Befund vom Reviewer und Handlungsempfehlung)	Datum	Einordnung	Geplante / durchgeführte Korrekturmaßnahme (vom Kunden auszufüllen) --> Antwort vom LCA Auftraggeber/Ersteller	Beurteilung der durchgeführten Maßnahmen durch TÜV SÜD (Erfüllung und Wirksamkeit)
13	<p>Ist der Konfektionär von BEV oder Ottomotor Leitungssätze? Bitte erklären Sie im Abschn. 3.2.2 ob diese Distanzen zum Automanufaktur repräsentativ für beide Produkte sind .Es kann ja sein, dass je nach Produkt, den Markt ganz unterschiedlich ist und die Distanzen wären auch sehr unterschiedlich.</p> <p>Sie müssen in dem Bericht angeben, dass es sich um eine generische Darstellung der Produktion der Werkstoff/Materialien in der EU handelt, und dass eine realistische Modellierung mit tatsächlichen Lieferkettendaten (Herkunft der Rohstoffe, Produktion von Vorprodukten für den KFZ-Leitsatz, etc.) die nicht nur aus der EU stammen müssten, einen wichtigen Effekt auf die Umweltauswirkungen haben kann.</p>	05.05.2025	M	<p>Abschnitt 1: Dabei werden sowohl ein Leitungssatz eines konventionell betriebenen sowie eines elektrisch angetriebenen Pkw betrachtet. Hierfür wurden Primärdaten eines europäischen Leitungssatz-Konfektionärs herangezogen, welcher beide Produkte herstellt.</p> <p>Abschnitt 3.1.3: Nachdem es sich hierbei um eine generische Darstellung der Produktion der Werkstoffe bzw. Materialien in Europa handelt, können die Transportdistanzen nicht als repräsentativ für beide Produkte im Allgemeinen gesehen werden. Tatsächliche Entfernungen hängen von den Standorten der Zulieferer und der Konfektionäre ab. Transporte in internationalen Lieferketten gehen in den meisten Fällen mit höheren Emissionen einher.</p> <p>Abschnitt 3.2.2: Diese Transportdistanzen können nicht als repräsentativ für BEV- und Ottomotor-Kabelsätze allgemein gesehen werden. Tatsächliche Entfernungen hängen von den Standorten der Konfektionäre und der Kunden ab.</p>	<p><b>Befund abgeschlossen:</b> In Kapitel 1, 3.1.3 und 3.2.2 aufgenommen</p>
14	<p>Die Lebensphase "Nutzung" muss als Auslassung deklariert werden, da keine vollständige Beschreibung dieser Lebensphase oder konkrete Angaben über die Nutzung gibt (schon oben beschrieben)</p>	05.05.2025	NC	<p>Abschnitt 3.3: Die Nutzung der Teilleitungssätze wird wie bereits in Abschnitt 2.2.3 erläutert nicht betrachtet.</p>	<p><b>Befund abgeschlossen</b> Bericht konsistent angepasst</p>

Nr.	Auditergebnis / Feststellung / nachzureichende Unterlagen (Befund vom Reviewer und Handlungsempfehlung)	Datum	Einordnung	Geplante / durchgeführte Korrekturmaßnahme (vom Kunden auszufüllen) --> Antwort vom LCA Auftraggeber/Ersteller	Beurteilung der durchgeführten Maßnahmen durch TÜV SÜD (Erfüllung und Wirksamkeit)
15	<p>Für den EoL-Prozess in 3.3.2 erwähnen, dass die manuelle Entnahme (removal) des KFZ-Leitungssatzes stattfindet und dass diese manuelle Entnahme bei der Modellierung nicht berücksichtigt wurde, sondern nur die Wiederverwertung des Teils nach der Entnahme (Datensatz "Behandlung von Elektro- und Elektronikaltgeräten")</p> <p>Die Nutzung von Gutschriften zur rechnerischen Verbesserung der Umweltauswirkungen muss deutlicher in der Auswertung und in dem Fazit diskutiert werden. Die Anrechnung der positiven Auswirkungen des End-of-Life (EoL) ist nur gewährt, wenn die zugrunde liegenden Annahmen tatsächlich zutreffen. Das bedeutet, nur wenn                      (1) das Auto bleibt in Deutschland, und                      (2) das Auto geht zu einem Wertstoffhof/Recyclinganlage am Ende der Nutzung, beide Annahmen müssen wahr sein.</p> <p>Auch muss es sichergestellt werden, dass keine andere Organisation (Industrie, Nutzer) das Recht hat, die nachhaltigen Eigenschaften des recycelten Produkts zu deklarieren. Das trifft zu, wenn das zurückgewonnenen Kupfer in einer andere Industrie eingesetzt wird, was sehr möglich der Fall sein kann.</p> <p>Der Fokus soll daran liegen, dass die positive Effekte in einer Lieferkette nur dann gesichert werden können (und bei Footprints angerechnet werden können), wenn die Prozesse/Materialien innerhalb der Berichterstattende Organisation sind, bzw. wenn die Rechte dafür erworben hat (physisch beim Einkauf von Materialien, oder abgekoppelt, als unbundled Garantie of Origin)</p>	05.05.2025	M	<p>Abschnitt 3.4.2: Die vorangehende Entnahme des Kabelsatzes aus dem Fahrzeug wird nicht berücksichtigt.</p> <p>Hier ist anzumerken, dass diese Gutschrift nur unter den Annahmen angerechnet werden kann, dass ein Auto am Ende des Lebenszyklus wirklich in Deutschland verbleibt und einen fachgerechten Verwertungsprozess durchläuft. Für das End-of-Life in anderen Ländern, insbesondere im EU-Ausland, sind andere Annahmen zu treffen.</p> <p>Abschnitt 5: Im End-of-Life verursachen Schredder-, Sortierungs- und Entsorgungs- bzw. Recyclingprozesse geringe Umweltauswirkungen, welche bei einer Recyclingquote von 90% für Kupferkabel durch eine Gutschrift mehr als ausgeglichen werden. Es ist hervorzuheben, dass die Anrechnung dieser Gutschrift im EoL nur dann möglich ist, wenn die zugrunde liegenden Annahmen tatsächlich zutreffen. Also nur, wenn das Auto mit dem betrachteten Leitungssatz am Ende des Lebenszyklus in Deutschland verbleibt und einer fachgerechten Verwertung zugeführt wird. Sollte ein Konfektionär eine derartige Gutschrift für eine Bilanzierung der Umweltauswirkungen eigener Produkte (bspw. durch ein PCF) beanspruchen wollen, müsste dieser zudem sicherstellen, dass das recycelte Kupfer wieder für die Herstellung der eigenen Kabelsätze verwendet wird. Sonst könnte es zu einer mehrfachen Anrechnung von Recycling-Gutschriften kommen, wenn das Sekundärkupfer in einer anderen Industrie zum Einsatz kommt.</p>	<p>Befund abgeschlossen.</p> <p>Text wurde im Kapitel 3.4.2 und Kapitel 5 angepasst</p>
16	<p>-Die Auswahl der Datensätze wurde überprüft und kommt zu dem Schluss, dass diese sorgfältig und auf wissenschaftlicher Basis ausgewählt wurden.</p> <p>-Für die Produktion der Materialzusammensetzung wurden Datensätze aus dem Ecoinvent-Datensatz für Europa in konsistenter Weise ausgewählt und erstellt.</p> <p>-Für den Rohstoff Kupfer wurde der globale Datensatz Market in konsistenter Weise ausgewählt.</p>	05.05.2025	P	-	<p><b>Befund abgeschlossen</b> (positive Anmerkung)</p>

Nr.	Auditergebnis / Feststellung / nachzureichende Unterlagen (Befund vom Reviewer und Handlungsempfehlung)	Datum	Einordnung	Geplante / durchgeführte Korrekturmaßnahme (vom Kunden auszufüllen) --> Antwort vom LCA Auftraggeber/Ersteller	Beurteilung der durchgeführten Maßnahmen durch TÜV SÜD (Erfüllung und Wirksamkeit)
17	<p>a. Für BEV Leitungssatz_Sachbilanz_ Excel-Datei gibt es eine Werkstoffgruppe mit 16 Gruppen dargestellt und Materialzusammensetzung von 203 Materialien. In OpenLCA aber 47 Materialien bei Werkstoffe gibt. Können Sie bitte diese Gruppierung von Excel auf OpenLca erklären?</p> <p>b. Für Ottomotor_Sachbilanz_ Excel Datei gibt es eine Werkstoffgruppe mit 22 Gruppen dargestellt und Materialzusammensetzung von 86 Materialien aber nur 34 wurden mit Materialien gemappt aber 47 Materialien erscheinen in Open LCA unter Werkstoff. Können Sie diese Gruppierung von Excel auf OpenLca erklären?</p>	05.05.2025	M	<p>In openLCA sind für BEV (Prozess: "ZB EL.LTG.SATZ mit Ladedose ECE X5 Werkstoffe") 47 Inputs und für Ottomotor (Prozess: "LTGS.MOTRVORVERKA EVO4 LK1 Werkstoffe") 46 Inputs. Dies lässt sich folgendermaßen erklären:</p> <p>Insgesamt gibt es 22 verschiedene Werkstoffgruppen (siehe Tabelle 2 im Bericht), von denen 16 im Ottomotor-Leitungssatz vorkommen. Aus diesen Gruppen wurden für den BEV 26 Werkstoffe (von 203) als Hauptwerkstoffe (&gt; 95%) definiert und für den Ottomotor 34 Werkstoffe (von 86).</p> <p>Die restlichen 177 Werkstoffe für BEV und 52 Werkstoffe für Ottomotor (&lt; 5%) wurden jeweils aggregiert und als generische Werkstoffgruppen modelliert. Daraus ergeben sich 21 weitere Einträge für BEV (ohne Werkstoffgruppe "Kupferkabel", da alle Kabel innerhalb der &gt; 95% sind). Für Ottomotor ergeben sich 12 weitere Einträge (ohne Kupferkabel, Textilien, Elastomere &amp; Stahl, da diese innerhalb &gt; 95% sind).</p> <p>BEV: 26 + 21 = 47 ; Ottomotor: 34 + 12 = 46</p> <p>Zum besseren Verständnis haben wir die Stücklisten aggregierter Werkstoffe (&lt; 5%) als Tabelle 4 und Tabelle 6 ergänzt.</p>	<p><b>Befund abgeschlossen</b> Zur Verdeutlichung wurden die Tabellen 3, 4, 5 und 6 ergänzt.</p>
18	<p>In den Anhängen könnte der Hinweis aus Kapitel 3 nochmal aus den Hinweisen Auswahl der Anzahl und Rohstoffe in den Anhängen hinzugefügt werden, um dies für den Leser zu vereinfachen</p>	05.05.2025	Re	-	<p><b>Befund abgeschlossen</b> (Vorschlag nicht in Anspruch genommen)</p>
19	<p>Für Zinn und Zink wurde bei einigen Rohstoffen das falsche Material gemappt. Da der Anteil sehr gering ist, empfehlen wir nur eine Anpassung des Materials für Zinn und Zink.</p>	05.05.2025	Re	<p>Die Korrektur hat lediglich einen Einfluss von geringer als 0,1% auf die Ergebnisse aller Wirkungskategorien, weshalb diese nicht in den Bericht eingearbeitet wird.</p>	<p><b>Befund abgeschlossen</b> Begründet, nicht angepasst</p>
20	<p>in Kap.3: Zur Vervollständigung der Prozess zur Datenvalidierung: Erwähnung über Verfahren zur Datenvalidierung, Plausibilisierung, Quality Assurance, und oder Iterationen.</p> <p>(die interne Qualitätssicherung muss erwähnt werden. Insbesondere der Prozess der Datenvalidierung; einschließlich Bewertung der Datenqualität und Behandlung fehlender Daten; z.B. Massen- und Energiebilanzen die angewendet wurden und das System/Daten zu validieren (siehe Kapitel 4.3.3.2 der ISO 14044))</p>	05.05.2025	M	<p>Abschnitt 2.2.9: Eine Qualitätssicherung der Sachbilanz und der Wirkungsabschätzungsergebnisse wurde durch eine Überprüfung der Massenbilanz (Masse aller Inputs entspricht Masse aller Outputs) sowie durch ein internes Review des Berichts durch einen weiteren Mitarbeiter der LBST („4-Augen-Prinzip“) durchgeführt.</p>	<p><b>Befund abgeschlossen</b> In Kapitel 2.2.9 Datenvalidierung aufgenommen</p>
21	<p>Da Ihr Modell den 'Gutschriften', die außerhalb der Kontrolle des Herstellers entstehen, so viel Bedeutung beimisst, bitte ich Sie, für den Abschnitt Sensitivitätsanalyse ein Szenario zu berechnen, das eine realistische Rückgewinnung der Kupferanteile von Autos auf dem Weltmarkt darstellt (da nicht alle Autos in Deutschland bleiben). Verwenden Sie Daten aus der Literatur oder treffen Sie eine Annahme und beschreiben Sie diese. Ergänzen Sie dann den Bericht mit den Ergebnissen.</p> <p>Dies soll zeigen, wie wichtig es ist, Maßnahmen zur Reduktion der Umweltauswirkungen in der eigene Lieferkette (vorgelagerte Prozesse) zu ergreifen.</p>	05.05.2025	M	<p>siehe Abschnitt 4.8.</p> <p>Da uns keine Daten zu einer realistischen Rückgewinnung der Kupferanteile von Autos auf dem Weltmarkt vorliegt, haben wir stattdessen ein "Worst-Case-Szenario" mit dem Export von Autos ins EU-Ausland und der Kabelverbrennung im EoL in Ghana angenommen.</p>	<p><b>Befund abgeschlossen</b> In Kapitel 4.8 aufgenommen</p>

Nr.	Auditergebnis / Feststellung / nachzureichende Unterlagen (Befund vom Reviewer und Handlungsempfehlung)	Datum	Einordnung	Geplante / durchgeführte Korrekturmaßnahme (vom Kunden auszufüllen) --> Antwort vom LCA Auftraggeber/Ersteller	Beurteilung der durchgeführten Maßnahmen durch TÜV SÜD (Erfüllung und Wirksamkeit)
22	<p>Klären Sie in der Sensitivitätsanalyse, wie den Vergleich der Ergebnisse der LCA-Studie mit den Literaturwerten (e.g. Abb. 14, Abb.25, usw.) die Sensitivität vom System zu Herkunft der Rohstoffe, Produktion von Werkstoffen für den KFZ-Leitsatz, etc. widerspiegelt.</p> <p>Am besten, bitte den Vergleich mit Literaturwerten in die Sensitivitätsanalyse verschieben und auch in diesen Sinnen abhandeln, um das Nutzen diesem Vergleich klarzustellen.</p>	05.05.2025	M	<p>Abschnitt 4.7: Um die Abhängigkeit der Gesamtergebnisse von diesem wichtigen Parameter zu untersuchen, wird als erste Sensitivitätsanalyse eine Substitution des Primärkupfers bei der Kabelherstellung durch Sekundärkupfer betrachtet. Dadurch wird neben der konservativen Annahme im Basisszenario (pyrometallurgisches Kupfer aus der globalen Produktion) ein „Best-Case-Szenario“ dargestellt. Entsprechend den niedrigsten Literaturwerten nach [Sanjuan-Delmás et al. 2022] wird dabei der ecoinvent-Prozess „treatment of copper scrap by electrolytic refining   copper, cathode   Cutoff, U – RER“ verwendet (Vgl. Abschnitt 4.2.3, 4.3.3 und 4.5.3).</p> <p>Eine Interpretation dieser Sensitivität mit Bezug auf die Literaturwerte haben wir in Abschnitt 4.7.3 ergänzt.</p> <p>Wir möchten die Literaturwerte jedoch in Abschnitt 4.2.3, 4.3.3 und 4.5.3 belassen, damit unsere Berechnungsergebnisse hier sofort in Kontext gesetzt werden (manche Leser überfliegen nur die Grafiken und so stolpern sie unter den Ergebnissen direkt über den Vergleich mit der Literatur).</p>	<p><b>Befund abgeschlossen</b> Änderungen wie beschrieben vorgenommen. Literaturwerte im Abschnitt 4.2.3, 4.3.3 und 4.5.3 belassen, mit dokumentierte Begründung.</p>
23	<p>Darüber hinaus können Sie in dem Fazit das Thema diskutieren, wie wichtig eine globale Regelung für die Wiedergewinnung von Rohmaterialien aus den Produkten am Ende des Lebenszyklus ist, und wie wichtig auch das Ecodesign ist, um die einfache Wiedergewinnung von den Materialien ((Trennung, Demontage, usw.) aus den Produkten am EoL ist.</p>	05.05.2025	Re	-	<p><b>Befund abgeschlossen</b> (Vorschlag nicht in Anspruch genommen)</p>
24	<p>Bitte klären Sie im Bericht, zum Thema Allokation, dass alle Umweltauswirkungen zum Hauptprodukt zugewiesen werden (es gibt keine Nebenprodukte) und keine Allokation im LCA-Model angewendet wurde.</p>	05.05.2025	M	<p>Abschnitt 2.2.4: In den Vordergrundprozessen werden alle Umweltauswirkungen dem Hauptprodukt zugewiesen, nachdem es keine Nebenprodukte gibt. Entsprechend wurde keine Allokation durchgeführt. Bei Hintergrund-prozessen mit mehreren Produkten erfolgt die Allokation gemäß der ecoinvent-Datensätze.</p> <p>Die Allokation des End-of-Life (EoL) erfolgt entsprechend dem ecoinvent-Modell mit Cut-off (Umweltauswirkungen durch Recycling werden dem Nachfolgeprodukt zugeordnet) mit Ausnahme von Recycling von Kupferkabeln, bei denen eine Gutschrift für dieses Produkt berücksichtigt wird.</p>	<p><b>Befund abgeschlossen</b> In Kapitel 2.2. 4 aufgenommen</p>

Nr.	Auditergebnis / Feststellung / nachzureichende Unterlagen (Befund vom Reviewer und Handlungsempfehlung)	Datum	Einordnung	Geplante / durchgeführte Korrekturmaßnahme (vom Kunden auszufüllen) --> Antwort vom LCA Auftraggeber/Ersteller	Beurteilung der durchgeführten Maßnahmen durch TÜV SÜD (Erfüllung und Wirksamkeit)
25	<p>Im Bericht soll im Abschn. 2.2.5 erwähnt werden, dass "Ressourcenverbrauch" keine Wirkungsabschätzung ist, es dient nur die Darstellung welche Materialien, als kritisch nach EU 2024/1252 eingestuft werden. Die Methodologie (Abgleich mit Verordnung) muss kurz erwähnt werden, um Missverständnisse zu vermeiden.</p> <p>Bitte auch im Abschnitt 4.6 Ressourcenverbrauch und auch im Fazit dazu kommentieren, warum wurde das gemacht, und was sind die Auswirkungen oder Erwartete Lerneffekt aus dieser Auswertung.</p>	05.05.2025	M	<p>Abschnitt 2.2.5: Für den Ressourcenverbrauch wird keine Wirkungsabschätzung mit einer spezifischen Methode und Charakterisierungsfaktoren durchgeführt, sondern stattdessen eine Materialbilanz aufgestellt. Dies ermöglicht eine Übersicht über die Materialzusammensetzung der Produkte und eine Identifizierung kritischer und strategischer Rohstoffe nach Verordnung (EU) 2024/1252 [EU 2024].</p> <p>Wir haben das Kapitel nun zur besseren Strukturierung den anderen Ergebniskapiteln vorangestellt.</p> <p>Abschnitt 4.2: Für den Ressourcenverbrauch ist im Folgenden eine Materialbilanz statt eine Wirkungsabschätzung dargestellt. Hierdurch lässt sich ein besseres Verständnis über die Materialzusammensetzung der beiden Produkte und über enthaltene strategische und kritische Rohstoffe gewinnen.</p> <p>Abschnitt 5: Die Untersuchung des Ressourcenverbrauchs hat ergeben, dass der BEV-Leitungssatz insgesamt einen höheren Anteil an Metallen und mehr strategische und kritische Rohstoffe als der Ottomotor-Kabelsatz enthält. Dafür besteht letzterer aus mehr Gold und ungefüllten Thermoplasten. Aluminium, Silizium, Platin und Schaumstoffe sind der Stückliste nach nicht im Ottomotor-Leitungssatz enthalten.</p>	<p><b>Befund abgeschlossen</b> In Kapitel 2.2.5, 4.2 und 5 aufgenommen</p>
26	<p>Im Bericht, Kapitel 4 fehlt den Hinweis, dass "die Wirkungsabschätzungsergebnisse relative Aussagen sind und keine Voraussagen über Auswirkungen auf die Wirkungsendpunkte, Schwellenwertüberschreitungen, Sicherheitsspannen oder Risiken machen". Anforderung von ISO14044 Abschn. 5.2e(8). Bitte gleich am Anfang des Kapitels aufnehmen.</p>	05.05.2025	NC	<p>Abschnitt 4.1: Es ist anzumerken, dass die Wirkungsabschätzungsergebnisse relative Aussagen sind und daraus keine Voraussagen über Auswirkungen auf die Wirkungsendpunkte, Schwellenwertüberschreitungen, Sicherheitsspannen oder Risiken getroffen werden können.</p>	<p><b>Befund abgeschlossen</b> In Kapitel 4.1 aufgenommen</p>
27	<p>Kapitel 4 vom Bericht enthält bereits die Auswertung (Interpretation) von den Ergebnissen der Wirkungsabschätzung. Empfohlen wäre es zuerst die reinen Ergebnisse der Wirkungsabschätzung, und danach getrennt, die Auswertung und Interpretation zu handeln. Ansonsten wird es empfohlen genau diese Situation gleich am Anfang des Kapitels 4 zu erwähnen (dass Kap. 4 sowohl die Ergebnisse als auch die Interpretation enthält) und eine kurze Begründung, warum das vom Vorteil für die Nutzer des Berichts ist.</p>	05.05.2025	Re	-	Nicht in Anspruch genommen
28	<p>Tabelle und Abbildungen in Abschn. 4.1. Alle Beschriftungen müssen ergänzt werden, damit es klar wird, dass diese sich nur auf die Life Phase "Werkstoffherstellung" beziehen.</p>	05.05.2025	M	Beschriftungen wurden aktualisiert	<p><b>Befund abgeschlossen</b> Kapitel 4.1 Beschriftung angepasst</p>
29	<p>Abbildungen in 4.2 (pie charts) müssen deutlicher gekennzeichnet werden. Sind diese Werte mit oder ohne Betrachtung der Gutschrift für Kupfer?</p>	05.05.2025	M	<p>Abschnitt 4.1: In den Ergebnissen für die Werkstoffherstellung ist keine Gutschrift durch das Recycling der Kupferkabel enthalten, da diese der Lebenszyklusphase End-of-Life angerechnet wird.</p> <p>Abschnitt 4.3.1: Die Gutschrift für das Recycling von Kupferkabeln wird in der Grafik zur besseren Übersicht als separater Balken dargestellt, auch wenn sie Teil des End-of-Life ist. In Summe ergibt sich aus EoL-Emissionen und Gutschrift eine Einsparung.</p> <p>"Ergebnis der Anteile des ... <b>der Werkstoffherstellung</b> des ..." bei der Beschriftung aller pie charts ergänzt</p>	<p><b>Befund abgeschlossen</b> Zur Verdeutlichung wurden in Kapitel 4.1 und 4.3.1 ergänzt.</p>

Nr.	Auditergebnis / Feststellung / nachzureichende Unterlagen (Befund vom Reviewer und Handlungsempfehlung)	Datum	Einordnung	Geplante / durchgeführte Korrekturmaßnahme (vom Kunden auszufüllen) --> Antwort vom LCA Auftraggeber/Ersteller	Beurteilung der durchgeführten Maßnahmen durch TÜV SÜD (Erfüllung und Wirksamkeit)
30	In den Kapiteln 4 und 5 ist die Auswertung unter Betrachtung der Annahmen und Einschränkungen bzw. Unschärfen oder Unsicherheiten der Daten näher zu erläutern. Insbesondere da, wo die Ergebnisse für Entscheidungsprozesse relevant sein könnten. In anderen Worten, Sie müssen für die Interpretation die Einschränkungen und Annahmen noch berücksichtigen.	05.05.2025	M	<p>Abschnitt 4.3.1: Aufgrund der mangelnden Primärdaten und der oberflächlichen Modellierung der Transporte und der Fertigung sind die Ergebnisse für Fertigung und Transport in dieser und allen anderen Wirkungskategorien jedoch mit hohen Unsicherheiten verbunden (Vgl. Abschnitt 2.2.8, 3.1.3, 3.2 und 3.4.1).</p> <p>Voraussetzung für eine derartige Einsparung in dieser und allen anderen Wirkungskategorien ist, dass die Kupferkabel der Leitungssätze im EoL tatsächlich einem fachgerechten Recycling zugeführt werden.</p> <p>Abschnitt 5: . Gleichzeitig stellen Emissions- und Energiebedarfswerte für Kupfer in dieser Studie die höchste Unschärfe bei den Umweltauswirkungen der Leitungssätze dar. Für produktspezifische LCA sollten deshalb möglichst Primärdaten zu THG-Emissionen, SO<sub>2</sub>-Emissionen und Primärenergiebedarfen des Kupferlieferanten verwendet werden.</p> <p>Fertigung und Transport der Kabelsätze sind in allen Wirkungskategorien nur mit geringen Umweltauswirkungen verbunden. Die Ergebnisse dieser Lebenszyklusphasen sind aufgrund der begrenzten Datenverfügbarkeit jedoch mit hohen Unsicherheiten verbunden. Für zukünftige LCA von Leitungssätzen ist deshalb zu empfehlen, dass detailliertere Primärdaten für die Fertigung von Kabelsätzen sowie für Transporte entlang der Wertschöpfungskette verwendet werden. Ebenso ist eine Berücksichtigung der Nutzungsphase anzustreben, beispielsweise durch Daten zu Reparatur und Austausch von (Teil-</p>	<b>Befund abgeschlossen</b> Zur Verdeutlichung wurden in Kapitel 4.3.1 und 5 ergänzt.
31	Die Ergebnisse/Fazit sollte folgendes noch erwähnen (Vorschlag): bei der Anwendung der Studie auf die eigene Organisation, sollte jeder Konfektionär (Hersteller) das LCA mit eigenen Primärdaten und unter Berücksichtigung die eigenen Materialien und Prozesse berechnen (Auswahl der Werkstoffe und Lieferanten, Energieverbräuche, Produktionszahlen/Effizienz, Qualität, Lieferketten, Transport zum Kunden, usw.)	05.05.2025	Re	siehe oben (Nr. 30)	<b>Befund abgeschlossen</b> Zur Verdeutlichung wurde in Kapitel 5 ergänzt.
32	Weitere Positive Merkmale: Die LCA-Studie und der Studienbericht sind sehr umfangreich und gut strukturiert. Sie wurden konsistent verfasst, und die Informationsquellen für die Modellierung sind gut dokumentiert und transparent im Bericht dargestellt. Ebenso sind die Erklärungen zur Vorgehensweise klar und nachvollziehbar	05.05.2025	P	-	<b>Befund abgeschlossen</b> (positive Anmerkung)

Einordnung	NC	Nichtkonformität / Abweichung, weil Anforderung nicht erfüllt
	M	Fehler, Falschdarstellung, Unterlassung
	Re	Empfehlung für Verbesserung (Vorschlag der Prüfstelle)
	Docu	Anmerkung zur Dokumentation (z.B. fehlendes Dokument)
	Note	Hinweis (ergänzend und nicht Verifizierungsbericht enthalten)
	P	Positive Anmerkung

Bewertung	Datum	Bewertungsstand	Name der Bewerter
	27.03.2025	finale Bewertung	Espinosa