



Masterarbeit 10/2024

zur Erlangung des akademischen Grades „Master of Science“

**Externe Kosten im Schienengüterverkehr:  
Erstellung eines Modells zur Berechnung der  
externen Kosten im  
Schienengüterverkehr, differenziert nach den  
einzelnen Produktionssystemen**

vorgelegt von

Georg Nickel

Berlin, 13.01.2025

Betreuung: Prof. Dr.-Ing. Markus Hecht

WiMi, M.Sc. Aaron Kaffler

## **Zusammenfassung**

Diese Arbeit untersucht die Umweltauswirkungen der drei Produktionssysteme des Schienengüterverkehrs: Einzelwagenverkehr, Kombiniertes Verkehr und Ganzzugverkehr. Zu diesem Zweck wurden die externen Kosten der einzelnen Produktionssysteme berechnet und miteinander verglichen, um Unterschiede in deren Umweltbelastung zu quantifizieren.

Die Berechnung basiert auf einer Zerlegung der Produktionssysteme in ihre jeweiligen Teilprozesse. Die Kostensätze für externe Kosten wurden aus verschiedenen Studien abgeleitet und durch eigene Berechnungen an die Anforderungen dieser Arbeit angepasst. Für die Analyse wurden Basisszenarien entwickelt, die typische Betriebsabläufe der Produktionsprozesse abbilden. Durch die Verknüpfung dieser Szenarien mit den externen Kostensätzen konnten die spezifischen Umweltkosten der einzelnen Produktionssysteme ermittelt werden. Ergänzend wurde eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt, um den Einfluss wesentlicher Einflussgrößen auf die externen Kosten zu bewerten.

Die Ergebnisse zeigen klare Unterschiede in den Umweltauswirkungen der untersuchten Produktionssysteme. Der Kombinierte Verkehr und der Ganzzugverkehr verursachen – abhängig von ihrer Ausprägungsform – signifikant weniger externe Kosten als der Einzelwagenverkehr.

## **Abstract**

This paper examines the environmental impacts of the three production systems in rail freight transport: single wagon load transport, combined transport, and block train transport. For this purpose, the external costs of each production system were calculated and compared to quantify differences in their environmental burdens.

The calculation is based on a breakdown of the production systems into their respective subprocesses. The cost rates for external costs were derived from various studies and adjusted through own calculations to meet the specific requirements of this paper. For the analysis, baseline scenarios were developed that reflect typical operational processes of the production systems. By linking these scenarios with the external cost rates, the specific environmental costs of each production system were determined. Additionally, a sensitivity analysis was conducted to assess the impact of key factors on the external costs.

The results show clear differences in the environmental impacts of the examined production systems. Combined transport and block train transport cause – depending on their form – significantly lower external costs than single wagon load transport.

# Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung .....	11
2	Theoretische Grundlagen externer Kosten .....	14
2.1	Externe Kosten .....	14
2.2	Internalisierung externer Kosten .....	15
2.3	Externe Kosten im Verkehr .....	16
2.3.1	Kostenbereiche .....	16
2.3.2	Verkehrsartenvergleich .....	17
2.3.3	Kostenarten.....	18
2.4	Externe Kosten im Schienengüterverkehr .....	19
3	Produktionssysteme im Schienengüterverkehr .....	21
3.1	Einzelwagenverkehr.....	22
3.1.1	Produktionsverfahren EWW .....	22
3.1.2	Teilprozesse des EWW .....	26
3.1.3	Operationalisierung der Teilprozesse des EWW .....	28
3.2	Kombinierter Verkehr .....	30
3.2.1	Produktionsverfahren KV .....	30
3.2.2	Teilprozesse des KV .....	31
3.2.3	Operationalisierung der Teilprozesse des KV.....	34
3.3	Ganzzugverkehr.....	36
3.3.1	Teilprozesse des GV .....	36
3.3.2	Operationalisierung der Teilprozesse des GV .....	37
4	Methodik für die Berechnung externe Kostensätze im Schienengüterverkehr .....	38
4.1	Herleitung der Verkehrsmengen und Energieverbräuche.....	39
4.2	Unfallkosten .....	42
4.3	Luftverschmutzung.....	44
4.3.1	Emissionsfaktoren für Luftschadstoffe im dieselbetriebenen SGV .....	45
4.3.2	Kostensätze für Luftschadstoffe .....	46

4.3.3	Externe Kosten für Luftschadstoffe nach Fahrleistung.....	47
4.4	Klimakosten aus dem direkten Betrieb .....	47
4.5	Vor- und nachgelagerte Prozesse .....	49
4.5.1	Energiebereitstellung .....	50
4.5.2	Lebenszyklus der Fahrzeuge und Infrastruktur.....	51
4.5.3	Gesamtkosten vor- und nachgelagerte Prozesse .....	52
4.6	Lärmkosten .....	52
4.7	Flächenverbrauch und Zerschneidung .....	55
4.8	Rangierbetrieb .....	55
4.9	Umschlag von Ladeeinheiten .....	56
4.10	Übersicht externe Kostensätze .....	58
5	Berechnungsmodell externer Kosten im SGV.....	59
5.1	Basisszenario der Produktionssysteme.....	59
5.1.1	Einzelwagenverkehr.....	60
5.1.2	Kontinentaler Kombiniertes Verkehr.....	64
5.1.3	Maritimer Kombiniertes Verkehr.....	69
5.1.4	Ganzzugverkehr.....	72
5.1.5	Zusammenfassung der externen Kosten - Basisszenario.....	75
5.2	Szenario 2: höherer CO <sub>2</sub> -Preis.....	76
5.2.1	Einzelwagenverkehr .....	77
5.2.2	Kontinentaler und maritimer Kombiniertes Verkehr .....	78
5.2.3	Ganzzugverkehr.....	79
5.2.4	Zusammenfassung der externen Kosten – Szenario höherer CO <sub>2</sub> -Preis .....	80
5.3	Szenario 3: geringere Lärmkosten .....	81
5.3.1	Einzelwagenverkehr .....	82
5.3.2	Kontinentaler und Maritimer KV.....	83
5.3.3	Ganzzugverkehr.....	84
5.3.4	Zusammenfassung der externen Kosten – Szenario höherer CO <sub>2</sub> -Preis .....	85

## Inhaltsverzeichnis

---

6	Diskussion der Ergebnisse .....	86
6.1	Diskussion der Berechnungsmethodik der externen Kostensätze .....	86
6.2	Diskussion der Annahmen des Basisszenarios .....	87
6.3	Diskussion des Ergebnisses .....	88
7	Fazit .....	89
8	Literaturverzeichnis .....	91
9	Anhang.....	95

## **Abkürzungsverzeichnis**

EVU	Eisenbahnverkehrsunternehmen
EWV	Einzelwagenverkehr
Fzkm	Fahrzeugkilometer
GV	Ganzzugverkehr
Kap.-Tkm	Kapazitäts-Tonnenkilometer
KV	Kombinierter Verkehr
L <sub>DEN</sub>	Lärminde <sub>x</sub> Day-Evening-Night
LE	Ladeeinheiten
SGV	Schienengüterverkehr
SPV	Schienenpersonenverkehr
THG	Treibhausgase
Tkm	Tonnenkilometer
UBA	Umweltbundesamt
ZBA	Zugbildungsanlage

## **Abbildungsverzeichnis**

Abbildung 1: Gebräuchliche Einteilung der Produktionssysteme des SGV .....	21
Abbildung 2: Hierarchisches Knotenpunktsystem, fiktives kleines EWV-Netz .....	23
Abbildung 3: Netzgestaltungen und Produktionsverfahren des EWV in Europa.....	25
Abbildung 4: Schaubild EWV-Netz in Deutschland .....	26
Abbildung 5: Teilprozesse des EWV.....	28
Abbildung 6: Transportketten der Marktsegmente im KV .....	30
Abbildung 7: Umschlagtechnologien im KV .....	33
Abbildung 8: Teilprozesse des KV .....	34
Abbildung 9: Berechnungsmethodik der externen Unfallkosten des SGV in Deutschland 2022 pro Fzkm .....	44
Abbildung 10: Berechnungsmethodik der externen Kosten der Luftschadstoffemissionen des SGV in Deutschland 2022 pro Fzkm.....	45
Abbildung 11: Berechnungsmethodik der externen Kosten der Klimaschäden des SGV in Deutschland 2022 pro Fzkm.....	48
Abbildung 12: Berechnungsmethodik der externen Kosten der Energiebereitstellung des SGV in Deutschland 2022 pro Fzkm .....	50
Abbildung 13: Berechnungsmethodik der externen Lärmkosten des SGV in Deutschland 2016 im Handbuch der EU-Kommission.....	54

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Parameter der Zugfahrten des EWW zur Berechnung der externen Kosten .....	29
Tabelle 2: Parameter der Zugfahrten des KV zur Berechnung der externen Kosten .....	35
Tabelle 3: Parameter der LKW-Fahrten des KV zur Berechnung der externen Kosten .....	35
Tabelle 4: Parameter der Umschläge im KV zur Berechnung der externen Kosten .....	35
Tabelle 5: Parameter der Zugfahrten des GV zur Berechnung der externen Kosten .....	37
Tabelle 6: Verkehrs- und Energieverbrauchsdaten des SGV in Deutschland 2022.....	40
Tabelle 7: Spezifischer Energieverbrauch in TREMOD .....	42
Tabelle 8: Emissionsfaktoren von Luftschadstoffen des dieselbetriebenen SGV in Deutschland 2022 in g/kg.....	46
Tabelle 9: durchschnittliche Kostensätze der Luftverschmutzung durch Emissionen aus unbekannter Quelle .....	46
Tabelle 10: Kostensätze für Schienenverkehrslärm für die EU (pro Person, Jahr, nach Dezibelstufe (A), in € <sub>2016</sub> ) .....	53
Tabelle 11: Energieverbrauch je Umschlagsgerätetyp.....	57
Tabelle 12: Externe Kosten des Umschlags von LE im KV in € <sub>2022</sub> pro Umschlag .....	57
Tabelle 13: Durchschnittliche externe Kosten der Fahrzeugkategorie in € <sub>2022</sub> pro Fahrzeugkilometer.....	58
Tabelle 14: Parameter für das Basisszenario EWW .....	62
Tabelle 15: Externe Kosten des EWW nach Teilprozess und Kostenbereich – Basisszenario .....	63
Tabelle 16: Externe Kosten des EWW nach Teilprozess, Tonnage und Transportleistung – Basisszenario.....	63
Tabelle 17: Parameter der Zug- und LKW-Fahrten für das Basisszenario kontinentaler KV ..	67
Tabelle 18: Parameter der Umschläge für das Basisszenario kontinentaler KV .....	67
Tabelle 19: Externe Kosten des kontinentalen KV nach Teilprozess und Kostenbereich – Basisszenario.....	68
Tabelle 20: Externe Kosten des kontinentalen KV nach Teilprozess, Tonnage und Transportleistung – Basisszenario.....	68
Tabelle 21: Parameter der Zug- und LKW-Fahrten für das Basisszenario maritimer KV .....	70

## Tabellenverzeichnis

---

Tabelle 22: Parameter der Umschläge für das Basisszenario maritimer KV .....	70
Tabelle 23: Externe Kosten des maritimen KV nach Teilprozess und Kostenbereich – Basisszenario.....	71
Tabelle 24: Externe Kosten des maritimen KV nach Teilprozess, Tonnage und Transportleistung – Basisszenario.....	71
Tabelle 25: Beispielhafte Güterwagen im GV .....	73
Tabelle 26: Parameter der Zugfahrten für das Basisszenario GV .....	74
Tabelle 27: Externe Kosten des GV nach Zugarten und Kostenbereich – Basisszenario.....	74
Tabelle 28: Externe Kosten des GV nach Zugarten, Tonnage und Transportleistung – Basisszenario.....	75
Tabelle 29: Übersicht der externen Kosten der Produktionssysteme im Kontext der Transportmenge und -leistung im Basisszenario .....	75
Tabelle 30: Externe Kosten des EWV nach Teilprozess, Tonnage und Transportleistung - Szenario höherer CO <sub>2</sub> -Preis .....	77
Tabelle 31: Externe Kosten des kontinentalen KV nach Teilprozess, Tonnage und Transportleistung – Szenario höherer CO <sub>2</sub> -Preis.....	78
Tabelle 32: Externe Kosten des maritimen KV nach Teilprozess, Tonnage und Transportleistung - Szenario höherer CO <sub>2</sub> -Preis.....	78
Tabelle 33: Externe Kosten des GV nach Zugarten, Tonnage und Transportleistung – Szenario höherer CO <sub>2</sub> -Preis .....	79
Tabelle 34: Übersicht der externen Kosten der Produktionssysteme im Kontext der Transportmenge und -leistung – Szenario höhere CO <sub>2</sub> -Preis .....	80
Tabelle 35: Externe Kosten des EWV nach Teilprozess, Tonnage und Transportleistung - Szenario geringere Lärmkosten.....	82
Tabelle 36: Externe Kosten des kontinentalen KV nach Teilprozess, Tonnage und Transportleistung – Szenario geringere Lärmkosten .....	83
Tabelle 37: Externe Kosten des maritimen KV nach Teilprozess, Tonnage und Transportleistung - Szenario geringere Lärmkosten .....	83
Tabelle 38: Externe Kosten des GV nach Zugarten, Tonnage und Transportleistung – Szenario geringere Lärmkosten.....	84

## Tabellenverzeichnis

---

Tabelle 39: Übersicht der externen Kosten der Produktionssysteme im Kontext der Transportmenge und -leistung - Szenario geringere Lärmkosten .....	85
Tabelle 40: Durchschnittliche externe Kosten der Fahrzeugkategorie in € <sub>2022</sub> pro Fahrzeugkilometer bei Doppeltraktion .....	95
Tabelle 41: Externe Kosten des EWV nach Teilprozess und Kostenbereich – Szenario höherer CO <sub>2</sub> -Preis .....	95
Tabelle 42: Externe Kosten des kontinentalen KV nach Teilprozess und Kostenbereich – Szenario höherer CO <sub>2</sub> -Preis .....	96
Tabelle 43: Externe Kosten des maritimen KV nach Teilprozess und Kostenbereich – Szenario höherer CO <sub>2</sub> -Preis .....	96
Tabelle 44: Externe Kosten des GV nach Zugarten und Kostenbereich – Szenario höherer CO <sub>2</sub> -Preis .....	97
Tabelle 45: Externe Kosten des EWV nach Teilprozess und Kostenbereich – Szenario geringere Lärmkosten.....	97
Tabelle 46: Externe Kosten des kontinentalen KV nach Teilprozess und Kostenbereich – Szenario geringere Lärmkosten.....	98
Tabelle 47: Externe Kosten des maritimen KV nach Teilprozess und Kostenbereich – Szenario geringere Lärmkosten.....	98
Tabelle 48: Externe Kosten des GV nach Zugarten und Kostenbereich – Szenario geringere Lärmkosten .....	99

## 1 Einleitung

„Vom Verkehr gehen erhebliche Belastungen für die Umwelt und Gefahren für die menschliche Gesundheit aus.“ schreibt die deutsche Bundesregierung (BMUV 2020) und nennt dabei verschiedene umwelt- und gesundheitsrelevante Belastungsbereiche des Verkehrs, wie Klimaschutz, Luftschadstoffe, Lärmemissionen sowie der Schutz von Natur- und Landschaftsräumen. Gleichzeitig wird betont, dass der Verkehr eine zentrale Voraussetzung für das Funktionieren der Industrie- und Dienstleistungsgesellschaft darstellt. Daher muss es Ziel der Verkehrs- und Umweltpolitik sein, den notwendigen Verkehr so umweltverträglich wie möglich zu gestalten. Um dieses Ziel zu erreichen, sind Strategien und Konzepte erforderlich, die einerseits die Mobilitätsbedürfnisse im Personen- und Güterverkehr decken und andererseits die Umweltbelastungen des Verkehrs minimieren (vgl. ebd.). Eine zentrale Strategie zur Förderung eines umweltfreundlichen und nachhaltigen Verkehrssektors ist die Verlagerung von Verkehren auf die Schiene, insbesondere im Güterverkehr. Die Bundesregierung verfolgt dabei das Ziel, den Anteil des Schienengüterverkehrs (SGV) bis zum Jahr 2030 auf 25 Prozent zu steigern (vgl. BMDV 2024b).

Zur Erreichung dieses Ziels wird der SGV durch eine Vielzahl unterschiedlicher Maßnahmen gefördert. Dazu zählt beispielsweise die anteilige Finanzierung der Trassenentgelte, bei der Eisenbahnverkehrsunternehmen (EVU) im SGV finanzielle Unterstützung für genehmigte Trassenentgelte vom Bund erhalten. (vgl. BMWK 2023). Neben allgemeinen Fördermaßnahmen existieren auch zielgerichtete Förderprogramme für spezifische Teilbereiche des SGV. Dazu gehören die Förderung von Umschlaganlagen im Kombinierten Verkehr (KV), bei der Investitionen in den Neu- und Ausbau solcher Anlagen finanziell unterstützt werden (vgl. BMDV 2024c), sowie die Betriebskostenförderung im Einzelwagenverkehr (EWW), womit die Bundesregierung den Betrieb von EVU im EWW finanziell unterstützt (vgl. BMDV 2024a). Die Bundesregierung begründet diese Förderungen im *Masterplan Schienengüterverkehr* mit den physikalischen Vorteilen des Rad-Schiene-Systems, dem hohen Anteil an Elektromobilität, der generellen Energieeffizienz sowie der geringeren Klimabelastung des SGV (vgl. BMDV 2017:5).

Doch wie schneidet der SGV in den weiteren eingangs genannten Umweltbelastungsbereichen ab? Eine Möglichkeit zur Beantwortung dieser Frage ist die Erfassung dieser Umweltwirkungen in Form sogenannter externer Kosten. Darunter versteht man die Monetarisierung von Externalitäten (z. B. Umweltschäden), die durch Produktion entstehen, jedoch nicht vom Verursacher getragen werden (vgl. UBA 2024). Für den Verkehrssektor, einschließlich des SGV, wurden solche Berechnungen bereits durchgeführt,

wobei der SGV in diesen Analysen besonders positiv abschneidet (vgl. ebd.). Dies liefert ein weiteres Argument für die Förderung des SGV im Kontext eines umweltverträglichen Verkehrssektors.

Doch gilt dies gleichermaßen für alle Produktionssysteme des SGV? Der SGV ist keineswegs einheitlich, sondern gliedert sich in mehrere Produktionssysteme mit unterschiedlichen Charakteristika (vgl. Stuhr u. a. 2023:187 ff.), die sich potenziell auch auf die Umweltbelastung auswirken. Bestehende Studien zu externen Kosten im Verkehr berücksichtigen diese Differenzierung bislang nicht.

Um die gesteckten Umwelt- und Nachhaltigkeitsziele im Verkehrssektor zu erreichen, ist eine gezielte Förderung jener Verkehrsmittel und Produktionssysteme erforderlich, die die geringsten Belastungen für Umwelt und Gesellschaft verursachen. Dies setzt eine fundierte Informationsbasis voraus, die aktuell für die Produktionssysteme des SGV nicht ausreichend vorhanden ist. Diese Lücke soll in der vorliegenden Arbeit durch eine differenzierte Analyse der externen Kosten der einzelnen Produktionssysteme des SGV geschlossen werden.

Ziel dieser Masterarbeit ist die Entwicklung eines Modells zur Berechnung der externen Kosten im SGV in Deutschland, das eine Differenzierung nach den einzelnen Produktionssystemen ermöglicht. Damit soll die Forschungsfrage beantwortet werden, inwieweit und in welchem Ausmaß sich die Produktionssysteme des SGV hinsichtlich ihrer Umwelt- und Gesundheitsbelastungen unterscheiden. Darüber hinaus soll analysiert werden, wodurch diese Unterschiede entstehen. Ziel ist es, eine belastbare Datengrundlage zu schaffen, um die Förderungswürdigkeit der einzelnen Produktionssysteme im SGV differenziert bewerten zu können.

Der Aufbau der Arbeit gestaltet sich wie folgt:

- Kapitel 2 liefert eine theoretische Grundlage zu externen Kosten, erläutert deren Bedeutung und zeigt auf, wie diese zur Bewertung von Umweltwirkungen genutzt werden können. Zudem wird der aktuelle Stand der externen Kostenberechnung im Verkehrssektor vorgestellt.
- Kapitel 3 befasst sich mit den Produktionssystemen des SGV. Die Systeme Einzelwagenverkehr (EWW), Kombiniertes Verkehr (KV) und Ganzzugverkehr (GV) werden in ihre Teilprozesse zerlegt und relevante Parameter für die Berechnung externer Kosten identifiziert.

- In Kapitel 4 werden auf Basis der in Kapitel 2 erarbeiteten Grundlagen die externen Kostensätze ermittelt und so angepasst, dass sie auf die in Kapitel 3 bestimmten Teilprozesse anwendbar sind.
- Kapitel 5 enthält die Berechnung der externen Kosten für die drei Produktionssysteme. Hierfür wird zunächst für jedes System ein Basisszenario definiert, das einen durchschnittlichen Betriebsfall abbildet. Die daraus resultierenden Annahmen ermöglichen die Berechnung der externen Kosten anhand der in Kapitel 3 bestimmten Parameter sowie der in Kapitel 4 berechneten externen Kostensätze.
- In Kapitel 6 erfolgt eine kritische Diskussion der angewandten Methodik und der ermittelten Ergebnisse.
- Abschließend werden in Kapitel 7 die wichtigsten Erkenntnisse zusammengefasst und ein Fazit zur Beantwortung der Forschungsfrage gezogen.

## 2 Theoretische Grundlagen externer Kosten

Dieses Kapitel bildet die theoretische Grundlage für die Berechnung der externen Kosten. Nach der allgemeinen Erklärung der externen Kosten, wird auf die Möglichkeiten der Internalisierung eingegangen, um danach auf die externen Kosten im Verkehrsbereich und im spezifischen den SGV einzugehen.

### 2.1 Externe Kosten

Externe Effekte oder Externalitäten treten auf, wenn die Produktion oder der Konsum von Gütern und Dienstleistungen Auswirkungen auf Dritte hat, ohne dass diese Auswirkungen in den Marktpreisen berücksichtigt werden. Diese Effekte können sowohl positiv als auch negativ sein. Positive externe Effekte führen dazu, dass die Gesellschaft oder Teile dieser einen zusätzlichen Nutzen erfährt, ohne dafür bezahlen zu müssen. Ein Beispiel dafür ist die Impfung eines Teils der Bevölkerung. Durch die Impfung werden geimpfte Personen nicht nur selbst vor einer Krankheit geschützt, sondern sie tragen auch dazu bei, die Ausbreitung der Krankheit zu verhindern. Dadurch verringert sich das Risiko einer Ansteckung auch für diejenigen, die nicht geimpft sind und volkswirtschaftlich betrachtet sinken die Gesundheitskosten. (vgl. FIS 2023)

Negative externe Effekte hingegen verursachen Kosten, die nicht vom Verursacher, sondern von anderen getragen werden müssen (z. B. Steuerzahler oder die nächste Generation). Ein klassisches Beispiel ist die Verschmutzung von Trinkwasser, bei der die Kosten für die Beseitigung der Verschmutzung nicht vom Verursacher, sondern von der Allgemeinheit getragen werden. Diese externen Kosten, die nicht im Preis des Produktes enthalten sind, führen zu Marktverzerrungen. Da die Preise nicht die tatsächlichen (volkswirtschaftlichen) Produktionskosten widerspiegeln, werden solche Güter oft zu günstig angeboten. Dies kann zu einer Übernachfrage und letztlich zu Marktversagen führen. (vgl. Rogall 2013:38)

Ein besonders relevantes Beispiel für negative externe Effekte ist der Verkehr. Hier entstehen zahlreiche externe Kosten, wie Umweltverschmutzung, Lärmbelästigung und Gesundheitskosten, die nicht im Preis für die Nutzung von Verkehrsmitteln enthalten sind. Diese externalisierten Kosten tragen erheblich zu einem ineffizienten und übermäßigen Verbrauch natürlicher Ressourcen bei. (vgl. Allekotte u. a. 2020:18 ff.)

Da somit die klassischen Marktmechanismen der Preisbildung in diesem Zusammenhang nicht greifen, gibt es verschiedene Instrumente, um externe Kosten zu internalisieren.

## 2.2 Internalisierung externer Kosten

Die bekannteste wirtschaftspolitische Maßnahme für die Internalisierung, also der Einpreisung, von externen Kosten ist die sogenannte Pigousche Mengensteuer, kurz Pigou-Steuer, benannt nach dem Erfinder Arthur Pigou. Die Idee dieser Steuer ist relativ einfach: eine Mengensteuer des Verursacherprinzips, die der Höhe der externen Kosten im Marktgleichgewicht entspricht. Durch die Berücksichtigung der externen Kosten in Form einer Steuer pro Mengeneinheit, soll das individuelle Kalkül zur Produktion bzw. dem Konsum eines Produktes nicht mehr nur auf Basis den privaten Kosten beruhen, sondern unter Einbezug aller gesellschaftlich anfallenden Kosten (auch soziale Kosten genannt). Eine effizient angesetzte Pigou-Steuer erwirkt damit, dass gar kein Anreiz mehr besteht Produkte über das sozial gewünschte Niveau hinaus anzubieten. Die praktische Umsetzung dieser Steuerlösung gestaltet sich jedoch als herausfordernd, da für eine realitätsnahe Abbildung der externen Kosten eine umfangreiche Informationsbasis erforderlich ist, die den Entscheidungsträgern häufig nicht vollständig zur Verfügung steht. Folglich kann die Pigou-Steuer nur dann effektiv wirken, wenn die externen Kosten präzise quantifiziert werden können. (vgl. Scheufen, 2019, S. 253 ff.)

Im Verkehrssektor wird seitens der EU mit der *Strategie zur Internalisierung externer Kosten* versucht externe Kosten durch Anlastung der sozialen Kosten, die Preisgestaltung zu beeinflussen. Dabei „(...) sollen die Preise im Verkehrssektor so angesetzt werden, dass sie die durch einen zusätzlichen Nutzer der Infrastrukturen kurzfristig verursachten zusätzlichen Kosten decken.“ (Europäische Kommission 2008) Weiterhin wird jedoch angemerkt, dass ein allgemeingültiger Mechanismus zur Internalisierung externer Kosten im Verkehr nur schwer vorstellbar ist, weshalb, bei gleichem Grundsatz, mit differenzierten Instrumenten gearbeitet werden soll. (vgl. ebd.)

In Deutschland werden im Verkehrssektor durch die Energiesteuer auf Kraftstoffe, Mautgebühren für LKW oder der Kfz-Steuer bereits einige Instrumente verwendet, die die Kosten im Verkehr beeinflussen und damit Teile der externen Kosten internalisieren. Dies erfolgt allerdings nur partiell und von einem Steuern -und Abgabesystem, das einen Großteil der externen Kosten im Verkehr internalisiert, ist Deutschland weit entfernt. (vgl. Friedl und Blanck 2021:7 ff.)

Neben den bereits etablierten Instrumenten existiert eine Vielzahl weiterer Steuerungssysteme, die zur Internalisierung externer Kosten im Verkehrssektor beitragen könnten. Voraussetzung für deren Einsatz ist jedoch die systematische Erhebung der verursachten externen Kosten. Diese können nach unterschiedlichen Kostenarten und -

bereichen spezifiziert werden, die in der Folge für den Verkehr näher analysiert werden (vgl. Tiedtke 2013:7 ff.).

## 2.3 Externe Kosten im Verkehr

Die externen Kosten im Verkehrssektor wurden bereits in einer Vielzahl von Studien nach unterschiedlichen Kriterien quantifiziert. Ein wichtiges Betrachtungskriterium ist dabei die Bestimmung der zu analysierenden Kostenbereiche, also an welchen Stellen im Verkehrssektor externe Kosten entstehen. Diese werden nachfolgend näher beschrieben.

### 2.3.1 Kostenbereiche

Um die wichtigsten externen Kostenquellen im Verkehr darzustellen und eine umfassende Bewertung der sozialen und ökologischen Auswirkungen des Verkehrs zu ermöglichen, wurden im Zuge einer umfangreichen Studie der Forschungseinrichtung CE Delft im Auftrag der Europäischen Kommission mit dem Namen *Handbook on the external costs of transport* (im folgenden *Handbuch der EU-Kommission* genannt) folgende Kategorien ausgewählt:

1. **Unfallkosten:** Diese umfassen die direkten und indirekten Kosten, die durch Verkehrsunfälle entstehen, wie medizinische Versorgung, Sachschäden und Produktionsverluste. Diese Kategorie ist wichtig, da Verkehrsunfälle eine signifikante externe Belastung darstellen.
2. **Luftverschmutzungskosten:** Hierbei handelt es sich um die gesundheitlichen und ökologischen Schäden, die durch Emissionen von Fahrzeugen verursacht werden. Diese Kostenkategorie ist entscheidend, um die Auswirkungen auf die öffentliche Gesundheit und die Umwelt zu quantifizieren.
3. **Klimakosten:** Diese beziehen sich auf die Kosten, die durch Treibhausgasemissionen verursacht werden, insbesondere durch CO<sub>2</sub>. Diese Kategorie ist zentral, um die langfristigen Auswirkungen des Verkehrs auf den Klimawandel zu bewerten.
4. **Lärmkosten:** Diese umfassen die gesundheitlichen und sozialen Auswirkungen von Verkehrslärm, wie Schlafstörungen und Stress. Lärmbelastung ist eine wichtige externe Kostenquelle, die besonders in urbanen Gebieten relevant ist.
5. **Vor- und nachgelagerte Prozesse:** Diese berücksichtigen die Umweltauswirkungen, die zusätzlich zu den Kosten der Nutzungsphase entstehen. Etwa durch die Produktion

und den Transport von Kraftstoffen sowie die im gesamten Lebenszyklus der Fahrzeuge und der Infrastruktur entstehenden externen Kosten.

6. **Flächenverbrauch und Zerschneidung:** Diese Kategorie bezieht sich auf die Schäden, die an natürlichen Lebensräumen durch den Bau und die Nutzung von Verkehrswegen entstehen.
7. **Staukosten (Verzögerungskosten):** Diese beinhalten die wirtschaftlichen Verluste durch Zeitverluste, die im Verkehr entstehen. Diese Kategorie wurde ausgewählt, um die Ineffizienzen und zusätzlichen Betriebskosten zu messen, die durch Verkehrsüberlastung verursacht werden. (vgl. van Essen u. a. 2019b:24 ff.)

Eine Studie von *Infras* aus dem Jahr 2019, welche die externen Kosten des Verkehrs in Deutschland ermittelt, orientiert sich an den entsprechenden Kostenbereichen. Dabei wird jedoch auf die Berücksichtigung von Staukosten verzichtet (vgl. Bieler und Sutter 2019:10). Ebenso erfolgt in der *Ökologischen Bewertung von Verkehrsarten* des Umweltbundesamtes (UBA), in der die externen Kosten des Verkehrs in Deutschland anhand ihrer Wirkungskategorien quantifiziert werden, keine Einbeziehung der Staukosten (vgl. Allekotte u. a. 2020:18 ff.).

Im Vergleich zu anderen Kostenbereichen können externe Staukosten als pekuniäre externe Kosten klassifiziert werden. Diese externen Effekte stellen natürliche Konsequenzen des Marktmechanismus dar. Aufgrund der Knappheit eines Gutes (Straßenraum) verändert sich der Preis (Monetarisierung der Reisezeit), was Marktteilnehmer dazu veranlassen kann, ihre Entscheidung hinsichtlich der Wahl des Verkehrsmittels zu überdenken und anzupassen. Infolgedessen sind Staukosten als pekuniäre Kosten keine Folge von Marktversagen. (vgl. Scheufen 2019:250)

Vor diesem Hintergrund werden im Rahmen der Berechnung externer Kosten in dieser Arbeit ausschließlich die sechs zuvor genannten Kostenbereiche ohne Berücksichtigung der Staukosten betrachtet. Eine detaillierte Beschreibung der jeweiligen Kostenbereiche sowie deren Berechnung erfolgt in Kapitel 4.

### 2.3.2 Verkehrsartenvergleich

Neben der Differenzierung nach Kostenbereichen werden die externen Kosten im Verkehrssektor auch nach dem verursachenden Verkehrsmittel unterschieden. Diese Unterscheidung erfolgt zunächst zwischen Personen- und Güterverkehr. Innerhalb dieser

Kategorien wird eine weitere Differenzierung nach verschiedenen Verkehrsmitteln vorgenommen. Im Güterverkehr erfolgt die gängige Kategorisierung in die Verkehrsmittel Flugzeug, Binnenschiff, Güterzug sowie LKW und kleinere Transporter (vgl. Allekotte u. a. 2020:82 ff.).

Vor dem Hintergrund der Forschungsfrage dieser Arbeit wird nachfolgend auf die externen Kosten des SGV eingegangen. Zuvor werden die verschiedenen Kostenarten der externen Kosten näher erläutert.

### 2.3.3 Kostenarten

Zur Angabe externer Kosten werden grundsätzlich drei unterschiedliche Methoden angewandt, die je nach Betrachtungsperspektive eingesetzt werden. Eine zentrale Methode ist die Berechnung der **externen Gesamtkosten**, welche die Summe aller in einem definierten Betrachtungsraum entstandenen Kosten darstellen. Ein Beispiel hierfür ist die Summe der durch den SGV in Deutschland im Jahr 2017 verursachten externen Kosten, die gemäß einer Berechnung von *Infras* im Auftrag der *Allianz pro Schiene* bei 2,6 Milliarden Euro lagen. Im Vergleich dazu verursachte der LKW-Verkehr 21,2 Mrd. Euro externe Kosten (vgl. Bieler und Sutter 2019:21). Es zeigt sich, dass die Gesamtkosten eine Grundlage für volkswirtschaftliche Analysen bieten können. Weiterhin dienen sie als Basis für die Ermittlung von Durchschnittskosten, die nachfolgend erläutert werden. (vgl. Ecoplan und Infrac 2014:113 f.; vgl. van Essen u. a. 2019b:32)

Die **externen Durchschnittskosten** basieren auf den Gesamtkosten und ermöglichen die spezifische Zuordnung von externen Kosten zu Leistungseinheiten, also wie viele externe Kosten im Durchschnitt für eine Leistungseinheit entstanden sind. Um beim Beispiel des Güterverkehrs in Deutschland 2017 zu bleiben, verursachte der SGV pro Verkehrsleistungseinheit Tonnenkilometer (Produkt aus dem Gewicht der Gütermenge und der Transportentfernung) externe Kosten in Höhe von 2,04 Eurocent pro Tonnenkilometer. Der LKW-Verkehr im Vergleich dazu im Durchschnitt 4,46 Eurocent pro Tonnenkilometer (vgl. Bieler und Sutter 2019:27). Anhand der Durchschnittskosten lässt sich dadurch ein aussagekräftigerer Vergleich zwischen Verursachern von externen Kosten herstellen. Die Berechnung erfolgt dabei üblicherweise mittels eines Top-Down-Ansatzes, der eine belastbare Hochrechnung sowohl der Gesamtkosten als auch der genutzten Leistungseinheiten voraussetzt. (vgl. Ecoplan und Infrac 2014:113 f.; vgl. van Essen u. a. 2019b:32)

Eine weitere dritte Möglichkeit der Angabe externer Kosten sind die **externen Grenzkosten** (oder auch externe marginale Kosten). Sie beschreiben die Kosten, die durch die Nutzung

einer *zusätzlichen* Leistungseinheit entstehen. Wenn beispielsweise eine Internalisierung externer Kosten vorgesehen ist, bietet die Einpreisung von Grenzkosten eine fundierte Grundlage. Im Gegensatz zu den Durchschnittskosten erfolgt die Berechnung in der Regel bottom-up anhand spezifischer Modelle. (vgl. ebd.)

Um den Unterschied zu den Durchschnittskosten zu verdeutlichen, können die Beispiele für externe Kosten im Verkehr durch Klimaschäden und durch Flächenverbrauch herangezogen werden. Für eine zusätzliche Fahrt einer Diesellokomotive sollten die Grenzkosten den Durchschnittskosten entsprechen, da die Emission von Treibhausgasen (THG) direkt mit der Nutzung zusammenhängt. Reduzieren sich die Anzahl der Fahrten, bleiben sowohl die Durchschnitts- als auch die Grenzkosten für diese Emissionsquelle konstant. Anders gestaltet sich die Situation bei externen Kosten durch Flächenverbrauch. Diese stehen nicht in direktem Zusammenhang mit der Nutzung, da die Infrastruktur und die damit verbundenen externen Kosten bereits bestehen. In diesem Fall sind die Grenzkosten für eine zusätzliche Fahrt zunächst geringer. Langfristig könnten sie jedoch ansteigen, wenn zusätzliche Leistungseinheiten den Bau neuer Verkehrsflächen erforderlich machen und dadurch höhere externe Grenzkosten verursachen. (vgl. van Essen u. a. 2019b:32 ff.)

Die Wahl zwischen Gesamt-, Durchschnitts- und Grenzkosten richtet sich nach dem spezifischen Untersuchungsgegenstand sowie der Verfügbarkeit und Qualität der zugrunde liegenden Daten. In der vorliegenden Arbeit wurde der Schwerpunkt überwiegend auf den Ansatz der Durchschnittskosten gelegt, da das vorhandene Verkehrsmengengerüst aus öffentlichen Statistiken eine fundierte und belastbare Hochrechnung ermöglicht. Zudem zielt diese Arbeit auf eine vergleichende Analyse der Umweltauswirkungen der verschiedenen Produktionssysteme ab, wodurch die Betrachtung der Durchschnittskosten als besonders aussagekräftig erachtet wird. Eine ausführlichere Beschreibung der Kostenberechnung erfolgt in Kapitel 4.

### **2.4 Externe Kosten im Schienengüterverkehr**

Die externen Kosten des SGV wurden bereits in einigen Studien untersucht. Beispielsweise in der bereits genannten Studie zu den externen Kosten des Verkehrs in Deutschland wurden für den SGV die Gesamtkosten berechnet. Durch das ins Verhältnis Setzen zur Transportleistung ergaben durchschnittliche Kostensätze von 1,97 für den elektrisch Betrieben und 2,95 Euro-cent pro Tonnenkilometer (Tkm) für den dieselbetrieben SGV. (vgl. Bieler und Sutter 2019:21)

Die Studie des UBA zu Kostensätzen von Umweltkosten aus dem Jahr 2020 berechnete durchschnittlichen Kostensätze für verschiedene Verkehrsmittel pro erbrachtem Fahrzeugkilometer. Für den SGV wurde dafür ein Wert von 6,88 Euro pro Fahrzeugkilometer ermittelt, ohne dabei zwischen den Traktionsarten zu unterscheiden. (vgl. Matthey und Bünger 2020:29)

Im *Handbuch der EU-Kommission* wurden die externen Kosten auf europäischer Ebene berechnet. Dabei wurde unter anderem eine detaillierte Übersicht der externen Grenzkosten (Erklärung dazu in Kapitel 2.5) pro Tonnenkilometer von verschiedenen Güterzugarten, wie beispielsweise ein kurzer Containerzug mit Elektrotraktion oder ein langer Massengutzug mit Dieseltraktion erstellt. (vgl. van Essen u. a. 2019b:319)

Eine Betrachtung der externen Kosten aus Sicht der verschiedenen Produktionssysteme (EWV, KV und GV) wurde in keiner dieser Studien sowie in keiner, zum Bearbeitungszeitpunkt dieser Arbeit existierenden, anderen Studie vorgenommen. Um die externen Kosten der Produktionssysteme des SGV im Verlauf dieser Arbeit zu berechnen, ist zunächst eine fundierte Kenntnis des SGV erforderlich. Diese dient als Grundlage für die Formulierung von Annahmen zur Berechnungsmethodik. Im weiteren Verlauf wird der SGV in seine Produktionssysteme unterteilt, welche wiederum in ihre einzelnen Teilprozesse zerlegt werden, um die Basis für die Berechnung der externen Kosten zu schaffen.

### 3 Produktionssysteme im Schienengüterverkehr

Die Planung und praktische Umsetzung von Transportprozessen im SGV unterscheiden sich in der Vorgehensweise in drei wesentliche Produktionssysteme, wie in Abbildung 1 zu sehen ist.

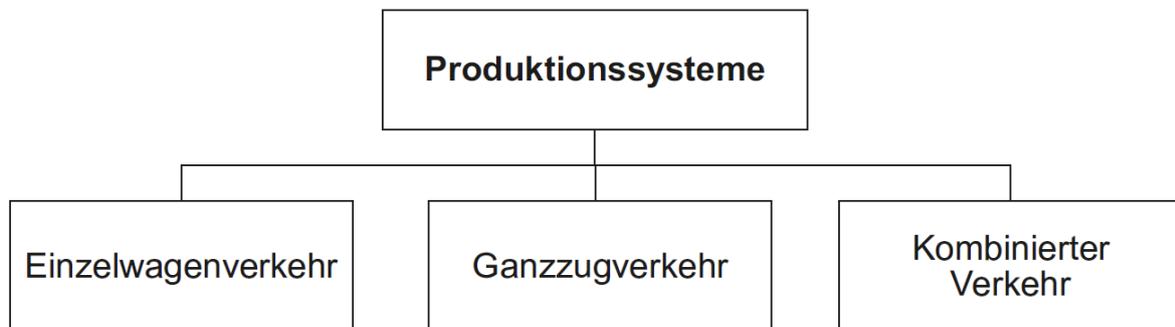


Abbildung 1: Gebräuchliche Einteilung der Produktionssysteme des SGV (Stuhr et al., 2023, S. 188)

Stuhr et al. betonen, dass die Differenzierung in Ganzzugverkehr (GV), Einzelwagenverkehr (EWW) und Kombinierten Verkehr (KV) die gängigste Klassifikation der Produktionssysteme darstellt. Historisch umfasste diese Systematik zudem den Sammelgut- und Teilladungsverkehr, welcher jedoch mittlerweile aufgegeben wurde. Darüber hinaus ist eine weitere Differenzierung innerhalb der drei Hauptproduktionssysteme möglich. Ebenso sind Transporte im SGV aufgrund von Mischformen nicht immer eindeutig einem Produktionssystem zuzuordnen. (vgl. Stuhr u. a. 2023:187 f.)

Das Beratungsunternehmen Roland Berger gliedert in seiner Studie *Gutachten zum Schienengüterverkehr* im Auftrag des VDV den Markt des SGV ebenfalls entlang der drei Produktionssysteme GV, EWW und KV. Weiterhin wird angegeben, dass der Modal Split der Transportleistung im SGV im Jahr 2020 aus 17 % EWW, 43,5 % KV und 39,5 % GV bestand. Dabei zeigen die Anteile von EWW und GV eine rückläufige Tendenz, während der Anteil des KV zunimmt. (vgl. Roland Berger 2021:40)

Im Rahmen dieser Arbeit wird die in Abbildung 1 dargestellte etablierte Klassifikation der Produktionssysteme herangezogen, da der Schwerpunkt auf den Unterschieden dieser Systeme liegt, also dem Betrachten des Systemgedankens ohne dabei auf etwaige Mischformen einzugehen. Ziel der Arbeit ist es, zu analysieren, in welchem Umfang die Wahl des Produktionssystems die entstehenden externen Kosten beeinflusst.

Dabei wird untersucht, wie die spezifischen Eigenschaften und Abläufe der einzelnen Produktionssysteme zu unterschiedlichen Energieverbräuchen, Emissionen und weiteren Umweltwirkungen führen können. Um eine fundierte Analyse dieser Auswirkungen zu ermöglichen, ist es erforderlich, die Produktionssysteme in ihre Teilprozesse zu zerlegen. Diese Zerlegung erlaubt eine differenzierte Betrachtung, bei der die externen Kosten auf Basis praxisnaher Szenarien detailliert und auf granularer Ebene bewertet werden können (siehe Kapitel 5).

### **3.1 Einzelwagenverkehr**

Stuhr et al. definieren das System EWW wie folgt:

*„Im EWW werden einzelne Wagen oder Wagengruppen vom Start zum Ziel über ein mehrstufiges Transportnetz unter Nutzung mehrerer Züge und Rangieranlagen transportiert. Kennzeichnend ist dabei das freie Routing: ein Transport ist flexibel von jedem zu jedem angebundener Start- und Zielpunkt möglich. Die kleinste Sendungseinheit ist dabei ein Güterwagen. Beim Start und Ziel handelt es sich um private Gleisanschlüsse des Versenders und des Empfängers, sowie öffentliche Zugangsstellen wie Freiladegleise und für verschiedene Transportkunden nutzbare Stückgutcenter, die auch Lager- und Konsolidierungsfunktionen anbieten.“* (Stuhr u. a. 2023:205 f.)

Eine genauere Beschreibung des Produktionsverfahren erfolgt im nächsten Abschnitt, bevor anhand dessen Teilprozesse ausgemacht werden, die dann wiederum für die Berechnung der externen Kosten operationalisiert werden können.

#### **3.1.1 Produktionsverfahren EWW**

Im mehrstufigen Transportnetz des EWW erfolgt die Organisation und Produktion der Transporte im sogenannten Knotenpunktsystem. Dieses besteht aus den Zugfahrten zwischen den Knoten und dem Rangieren von Güterwagen und Zusammenstellen von Wagengruppen im Knoten. Der Begriff „Knoten“ bezieht sich dabei auf eine Betrachtung als Netzstruktur. In der Praxis wird von Zugbildungsanlagen (ZBA) gesprochen (Stuhr u. a. 2023:101). Eine schematische Darstellung eines vereinfachten und fiktiven Transportnetzes des EWW basierend auf diesem System ist in Abbildung 2 dargestellt. Innerhalb der Abbildung sind die Teile der Knoten nummeriert. Im Folgenden wird exemplarisch ein Transport innerhalb des Knotenpunktsystems beschrieben, wie er in der Fachliteratur erläutert wird.

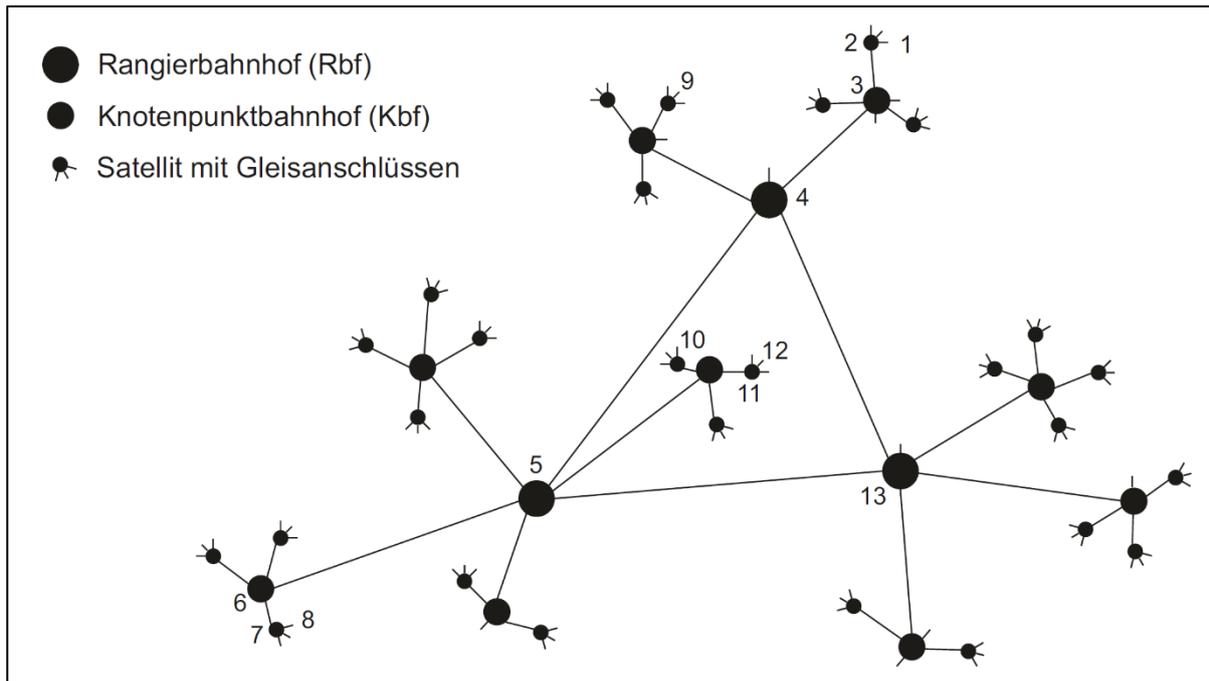


Abbildung 2: Hierarchisches Knotenpunktsystem, fiktives kleines EWV-Netz (Stuhr u. a. 2023:210)

Die Transportproduktion beginnt, indem ein oder mehrere Güterwagen an einem (privaten) Gleisanschluss, einem Freiladegleis oder einem Railport bereitgestellt werden (Nr. 1). Von dort werden die Wagen durch eine Rangierlok in einer Rangierfahrt zur kleinsten Knoten-Kategorie, den sogenannten Satelliten (Nr. 2), transportiert, wo die Güterwagen der Gleisanschlüsse gebündelt werden. In einem weiteren Schritt werden die am Satelliten gesammelten Güterwagen mittels einer Übergabefahrt zu einem regionalen Rangierbahnhof, dem sogenannten Knotenpunktbahnhof (Kbf) (Nr. 3), befördert. Im Knotenpunktbahnhof werden die Güterwagen aus mehreren Satelliten zu einem Nahgüterzug zusammengestellt und zu einem überregionalen Rangierbahnhof (Rbf) (Nr. 4) weitergeleitet. Im überregionalen Rbf erfolgt die Sortierung und Zusammenführung der Wagen nach ihrer Fahrtrichtung. Anschließend werden die Wagen als Teil eines Ferngüterzugs zu einem weiteren überregionalen Rbf (Nr. 5) transportiert. Dort werden sie in kleinere Transporteinheiten aufgeteilt und zu den regionalen Kbf (Nr. 6) weiterbefördert. In den regionalen Kbf erfolgt schließlich die Zustellung der Wagen zu den Satelliten (Nr. 7), von wo aus sie zum Zielort (Nr. 8) transportiert werden. Dieser Zielort ist typischerweise ein Gleisanschluss oder eine Ziel-Güterverkehrsstelle und stellt den Endpunkt der Transportkette dar, an dem die Güter den Empfänger erreichen. Das dargestellte Beispiel illustriert einen möglichen Ablauf eines Transports im Knotenpunktsystem des EWV. Grundsätzlich ist jeder Knoten im Netz erreichbar, sodass Transporte flexibel organisiert werden können. (vgl. Stuhr u. a. 2023:210 f.; Bundesnetzagentur 2022:14 f.)

Das beschriebene Beispiel illustriert ein streng hierarchisches Knotenpunktsystem, bei dem alle hierarchischen Stufen des Netzwerks eingehalten werden. Wie Abbildung 2 verdeutlicht, bedeutet die strikte Einhaltung der Hierarchie jedoch nicht zwangsläufig die Wahl des kürzesten Transportwegs. Ein Transport von Gleisanschluss Nr. 1 über den Satelliten Nr. 2, den Kbf Nr. 3, die überregionalen Rbf Nr. 4 und Nr. 5 sowie den Kbf und Satelliten Nr. 10 und 11 bis hin zum Empfängergleis Nr. 12 stellt beispielsweise einen signifikanten Umweg dar. In einem flexiblen System, das auf die strikte Hierarchie verzichtet, könnte der Transportweg optimiert werden, etwa durch eine direkte Verbindung vom Kbf Nr. 3 zum Kbf Nr. 11. Dies würde sowohl die Transportdistanz als auch die Anzahl der erforderlichen Zwischenhalte reduzieren. Ein solcher Ansatz setzt jedoch eine ausreichende Auslastung voraus, um zusätzliche Direktverbindungen wirtschaftlich betreiben zu können. Stuhr et al. beschreiben diesen Zusammenhang als eine „Spirale nach oben“: Je mehr Verkehrsaufkommen in das System integriert wird, desto mehr Direktverbindungen können wirtschaftlich betrieben werden. Dies führt zu einem erweiterten Angebot, das die Attraktivität des Systems weiter steigert und zusätzliches Verkehrsaufkommen generiert. Umgekehrt existiert eine „Spirale nach unten“, die bei rückläufigem Gesamtaufkommen greift. Sinkt das Verkehrsaufkommen, es erfolgt eine stärkere Konzentration auf Hauptverkehrsrouten, was längere Transportzeiten und höhere Transportkosten zur Folge hat. (vgl. Stuhr u. a. 2023:211 ff.)

Das zuvor beschriebene Knotenpunktverfahren mit bis zu drei Hierarchiestufen kann als theoretische Grundlage für die Organisation und Produktion des EWV betrachtet werden. Dennoch verdeutlicht die enge Wechselwirkung zwischen Netzdichte und Verkehrsaufkommen, dass eine kontinuierliche Anpassung des Produktionssystems in der Praxis unverzichtbar ist, um ein Systemoptimum zu erreichen (vgl. ebd.). Infolgedessen variiert die tatsächliche Netzgestaltung der EWV-Systeme in Europa erheblich. Eine Analyse von PwC Advisory und der Universität „La Sapienza“ in Rom aus dem Jahr 2015, die im Auftrag der EU-Kommission durchgeführt wurde, identifizierte verschiedene Varianten von Produktionsverfahren, die beispielhaft in Abbildung 3 dargestellt sind.

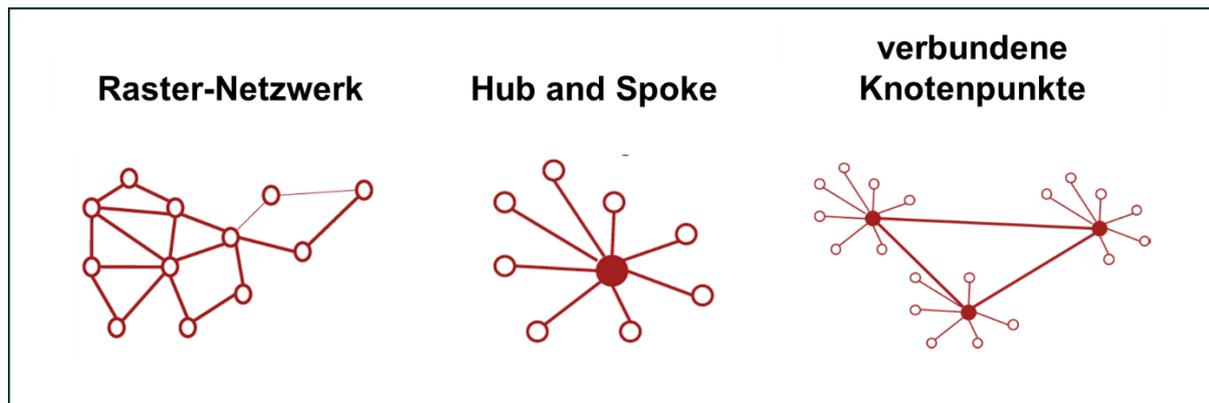


Abbildung 3: Netzgestaltungen und Produktionsverfahren des EWV in Europa (eigene Darstellung nach Guglielminetti, et al., 2015, S. 74)

Das **Raster-Netzwerk** zeichnet sich durch das Fehlen einer hierarchischen Struktur aus und ermöglicht „many-to-many“-Verbindungen, wie sie beispielsweise im Vereinigten Königreich zu finden sind. Das „**Hub-and-Spoke**“-Netzwerk hingegen basiert auf einem zentralen Knotenpunkt, der durch Direktverbindungen mit allen kleineren Knotenpunkten verknüpft ist, wie es exemplarisch in Tschechien umgesetzt wird. Im Vergleich dazu ähnelt das Netzwerk der **verbundenen Knotenpunkte**, das häufig im deutschen EWV verwendet wird, dem hierarchischen Knotenpunktverfahren, reduziert jedoch die Hierarchie auf zwei Stufen (vgl. Guglielminetti, u. a. 2015:73 ff.)

Laut einem Interview mit der DB Cargo, die den EWV in Deutschland betreibt, entspricht das Netz der verbundenen Knotenpunkte am ehesten der praktischen Umsetzung des EWV in Deutschland. Obwohl es auch Mischformen und Abweichungen gibt, handelt es sich bei diesen nicht um den Regelfall (vgl. Interview DB Cargo vom 24.10.2024). Dieses Netz dient daher als Grundlage für die weiteren Analysen in dieser Arbeit. Eine detaillierte Darstellung des Netzes und der zugrunde liegenden Begrifflichkeiten findet sich in Abbildung 4.

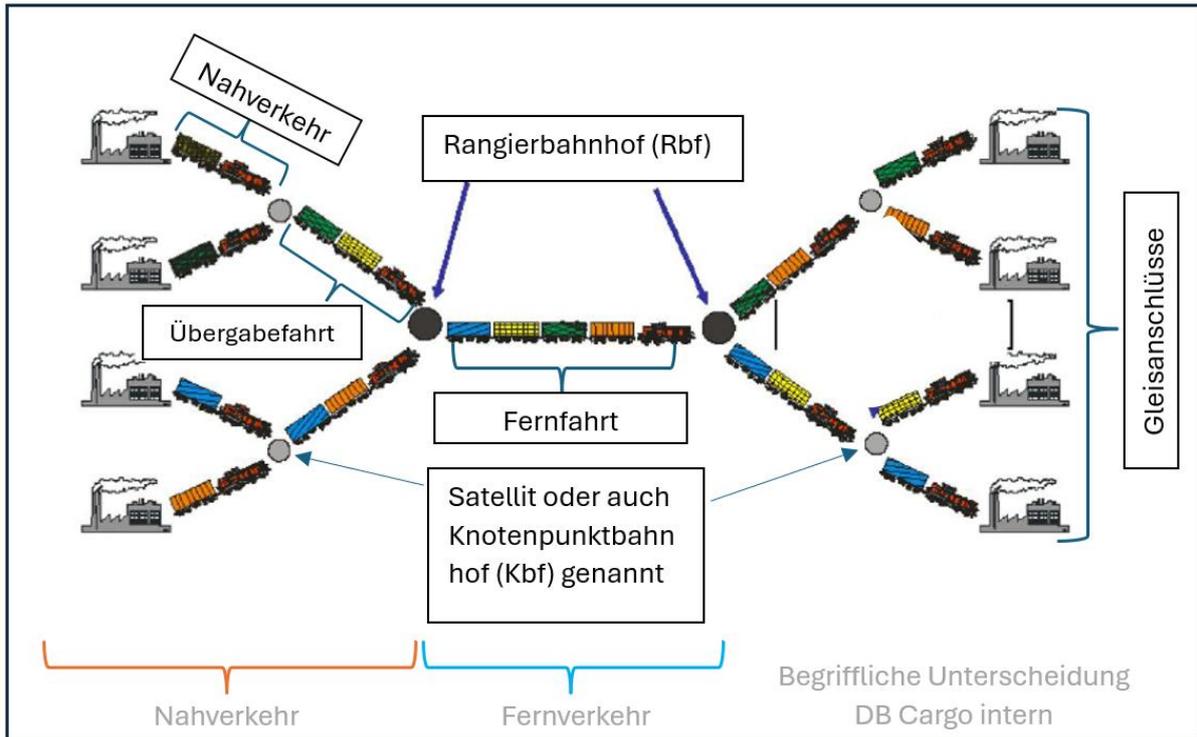


Abbildung 4: Schaubild EWW-Netz in Deutschland (eigene Darstellung nach Guglielminetti, et al., 2015, S. 94 & Interview DB Cargo am 20.11.2024)

Auf die Praxis übertragen umfasst das aktuelle Netzwerk der DB Cargo neun Rangierbahnhöfe, 23 Kbf und 111 Satelliten (vgl. Stuhr u. a. 2023:211). Eine genauere Betrachtung der praktischen Ausführung des EWW in Deutschland erfolgt in Kapitel 5.

Im nachfolgenden Kapitel wird anhand des beschriebenen Netzes der verbundenen Knotenpunkte eine genauere Betrachtung der Teilprozesse vorgenommen.

### 3.1.2 Teilprozesse des EWW

Der EWW weist, wie im vorangegangenen Abschnitt erläutert, unterschiedliche Ausprägungen auf. Dies betrifft nicht nur die Systemstruktur, sondern auch die Begriffe und Bezeichnungen, die sowohl innerhalb der Fachliteratur als auch zwischen Fachliteratur und Praxis variieren. Um eine einheitliche Grundlage zu schaffen, die für die Modellierung des EWW erforderlich ist, wurde in dieser Arbeit eine standardisierte Terminologie und Teilprozessdarstellung gewählt, wie sie in Abbildung 4 dargestellt ist. In dieser vereinfachten Darstellung wird nicht zwischen Satellit und Knotenpunktbahnhof (Kbf) differenziert; beide werden zur Vereinfachung einheitlich als "Satellit" bezeichnet.

Die Teilprozesse des EWW lassen sich grundsätzlich in Zugfahrten und Rangiervorgänge unterteilen. Dabei werden vor- und nachgelagerte Prozesse, wie das Be- und Entladen der Güterwagen, nicht betrachtet. Die Zugfahrten gliedern sich in drei bzw., auf den gesamten

Transportprozess bezogen, fünf Teilprozesse: die 1. Fahrt („**Nahverkehr**“), die 2. Fahrt („**Übergabefahrt**“), die 3. Fahrt („**Fernfahrt**“) sowie die 4. und 5. Fahrt, die wiederum als „Übergabefahrt“ und „Nahverkehr“ erfolgen. Diese Fahrten unterscheiden sich hinsichtlich der Streckenlänge, der verwendeten Traktionsart, der Anzahl der transportierten Güterwagen und dem Anteil leerer Wagen. (vgl. Guglielminetti, et al., 2015, S. 83 f.; Interviews DB Cargo vom 15.10.2024 und 20.11.2024)

Weiterhin wird angenommen, dass vor dem eigentlichen Transportauftrag, eine Leerwagendistribution stattfindet, ähnlich dem Last- und Leerlauf im GV und im Vor- und Nachlauf des KV (siehe Kapitel 3.2 und 3.3). D. h. zusätzlich zum eigentlichen Transport durchläuft ein Güterwagen eine oder mehrere weitere Fahrten, bevor er vom Transportkunden beladen werden kann. Auf globaler Netzebene wird versucht leere Güterwagen so effizient wie möglich zu verteilen, um die Anzahl solcher Fahrten zu minimieren. (vgl. Voll, 2014, S. 12 ff.; Interview DB Cargo vom 16.10.2024)

Die Rangiervorgänge in den Zugbildungsanlagen lassen sich in zwei bzw., auf den gesamten Transportprozess bezogen, vier Teilprozesse unterteilen: den **1. Rangiervorgang** im ersten Satelliten, den **2. Rangiervorgang** im ersten Rbf, den **3. Rangiervorgang** im zweiten Rbf und schließlich den **4. Rangiervorgang** im zweiten Satelliten. Rangierbahnhöfe unterscheiden sich insbesondere durch die eingesetzten Rangierverfahren, die maßgeblich die Leistungsfähigkeit und weitere betriebliche Parameter beeinflussen.

Die gängigen Rangierverfahren sind:

1. **Umsetzverfahren:** Güterwagen werden mit einem Triebfahrzeug gekuppelt, welches durch Rangierfahrten neue Züge formt. Dieses Verfahren ist das am wenigsten leistungsfähige.
2. **Abstoßverfahren:** Güterwagen werden durch ein Triebfahrzeug beschleunigt, lösen sich jedoch nach kurzer Fahrt und rollen eigenständig in ihre Zielgleise. Es ermöglicht das Rangieren mehrerer Wagen oder Wagengruppen in kurzer Abfolge und ist leistungsfähiger als das Umsetzverfahren.
3. **Ablaufverfahren:** Güterwagen werden vorentkuppelt und von einem Triebfahrzeug über einen Ablaufberg hinabgestoßen, wobei sie durch Schwerkraft in die Zielgleise rollen. Automatische Weichenstellungen und Gleisbremsen ermöglichen hierbei eine hohe Effizienz. Dieses Verfahren stellt den Standard in großen deutschen Rangierbahnhöfen dar (vgl. Pacht, 2018, S. 252 f.)

Die Leistungsfähigkeit der Rangierprozesse hängt somit wesentlich vom verwendeten Verfahren ab. Während Rangierbahnhöfe (Teilprozesse zwei und drei der Rangiervorgänge) in der Regel das Ablaufverfahren nutzen, kommen in Satelliten aufgrund fehlender Ablaufberge meist das Abstoß- oder Umsetzverfahren zum Einsatz. (vgl. Interview DB Cargo vom 16.10.2024)

Durch die Analyse der eingesetzten Rangierverfahren und der Anzahl der Rangiervorgänge pro Güterwagen in den ZBA lassen sich Rückschlüsse auf den Energiebedarf je Wagen ziehen. Dies ermöglicht eine vergleichende Bewertung der Rangierprozesse und der daraus entstehenden externen Kosten.

Eine schematische Übersicht der Teilprozesse des EWW ist in Abbildung 5 dargestellt. Im Folgenden wird die Operationalisierung der analysierten Teilprozesse vorgenommen, um die Fragestellung dieser Arbeit systematisch zu bearbeiten.

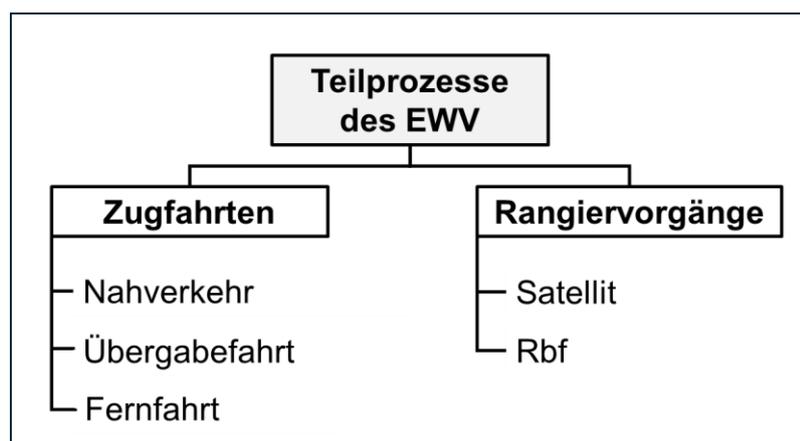


Abbildung 5: Teilprozesse des EWW (eigene Darstellung)

### 3.1.3 Operationalisierung der Teilprozesse des EWW

Wie in Abbildung 5 dargestellt, gliedern sich die Prozesse des EWW in Zugfahrten und Rangiervorgänge. Die Zugfahrten werden in die Kategorien Nahverkehr, Übergabefahrt und Fernfahrt unterteilt. Die Rangiervorgänge differenzieren sich je nach ihrer Lokalisierung in Satelliten und Rbf.

Zur Analyse der externen Kosten wurden für die Zugfahrten spezifische Parameter festgelegt, die als Berechnungsgrundlage dienen (siehe Tabelle 1). Diese Parameter werden in Kapitel 5 dieser Arbeit mit praxisnahen Werten belegt, wobei für die drei Kategorien der Zugfahrten (Nahverkehr, Übergabefahrt und Fernfahrt) unterschiedliche Werte angesetzt werden. Um zu

berücksichtigen, dass im Nah- und Übergabeverkehr oftmals Leerfahrten zur Abholung stattfinden, wird der Parameter *Streckenlänge* nach *Lastlauf* und *Leerlauf* unterschieden.

*Tabelle 1: Parameter der Zugfahrten des EWW zur Berechnung der externen Kosten (eigene Darstellung)*

<b>Parameter</b>	<b>Einheit</b>
Streckenlänge Lastlauf	Kilometer
Streckenlänge Leerlauf	Kilometer
Anzahl Güterwagen	Anzahl
davon leere Güterwagen (Leerquote)	Prozent
Nettogewicht pro Güterwagen (Beladen)	Tonnen
Nettogewicht des Zuges	Tonnen
Traktionsart	Diesel oder elektrisch

Die in Tabelle 1 genannten Parameter ermöglichen eine differenzierte Betrachtung der Teilprozesse der Zugfahrten im EWW. Durch die Zuordnung von realitätsnahen Werten in Kapitel 5 wird eine fundierte Quantifizierung der externen Kosten sichergestellt.

Für die Teilprozesse der Rangiervorgänge wurden verschiedene Parameter identifiziert, die eine Quantifizierung der externen Kosten ermöglichen. Wie im vorherigen Kapitel erläutert, kann der Energieverbrauch pro Rangiervorgang basierend auf der Anzahl der Rangiervorgänge eines Güterwagens in den ZBA und dem entsprechenden Energieverbrauch der Triebfahrzeuge berechnet werden.

Allerdings liegen keine spezifischen Verbrauchs- oder Leistungsdaten vor, die den durchschnittlichen Energieverbrauch pro Rangiervorgang präzise quantifizieren lassen. Auf Anfrage teilte die DB Cargo mit, dass der Dieserverbrauch von Lokomotiven im Nahverkehr und in den ZBA nicht separat erfasst wird. Dies liegt daran, dass Lokomotiven, die Transportleistungen im Nahverkehr erbringen, häufig auch Rangieraufgaben in den ZBA übernehmen. Für die Anzahl an Rangiervorgängen pro Güterwagen in den ZBA konnten Schätzwerte angegeben werden. (vgl. Interviews DB Cargo, 15.10.2024 und 20.11.2024).

Eine Studie des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) in Kooperation mit dem Duisburger Hafen (Duisport) bestätigt ein ähnliches Einsatzprofil von Rangierlokomotiven. Auch hier wurde das Konzept sogenannter „Mischprofile“ beschrieben, bei dem Rangierlokomotiven sowohl Transportaufgaben im Nahverkehr als auch Rangierarbeiten in den Rangierbahnhöfen übernehmen. Diese Mischprofile erschweren eine präzise Trennung

und Zuordnung des Energieverbrauchs zu einzelnen Teilprozessen. (vgl. Konrad u. a. 2022:20 f.). Eine detaillierte Beschreibung der Berechnungsmöglichkeiten der externen Kosten von Rangiervorgängen wird in Kapitel 4.8 vorgenommen.

### 3.2 Kombiniertes Verkehr

Die UNECE definiert den Kombinierten Verkehr (KV) als:

*„Intermodaler Verkehr, bei dem der überwiegende Teil der in Europa zurückgelegten Strecke mit der Eisenbahn, dem Binnen- oder Seeschiff bewältigt und der Vor- und Nachlauf auf der Straße so kurz wie möglich gehalten wird.“ (UNECE 2001:20)*

Intermodaler Verkehr ist dabei der Transport derselben Ladeinheit unter Benutzung von zwei oder mehr Verkehrsträgern. Dabei erfolgt lediglich ein Wechsel der Ladeinheit zwischen den Verkehrsträgern, nicht jedoch des transportierten Gutes selbst. (vgl. ebd., S. 19)

Eine genauere Beschreibung des Produktionsverfahrens erfolgt im nachfolgenden Abschnitt.

#### 3.2.1 Produktionsverfahren KV

Grundsätzlich wird der KV in zwei Hauptmarktsegmente unterteilt: den kontinentalen KV und den Seehafenhinterland-KV. Eine Übersicht dieser Marktsegmente sowie die Darstellung der zugehörigen Transportsegmente ist in Abbildung 6 dargestellt. Weiterhin kann der sogenannte

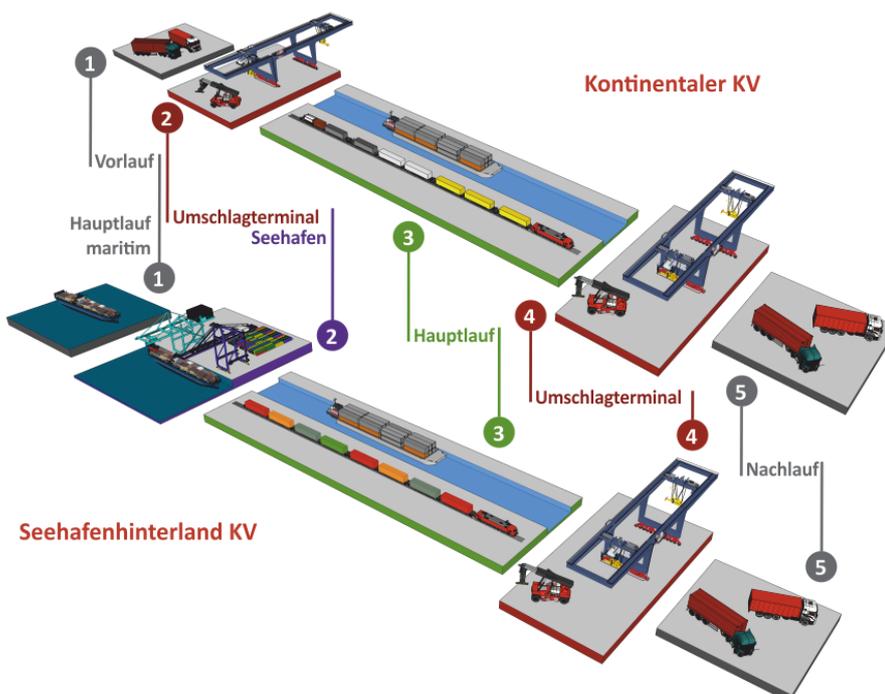


Abbildung 6: Transportketten der Marktsegmente im KV (SGKV, 2024)

Hauptlauf im KV auf der Schiene oder auf der Wasserstraße erfolgen. Im Rahmen dieser Arbeit wird der Fokus auf den KV mit Schienenbeteiligung gelegt.

Der Seehafenhinterland-KV, auch maritimer KV genannt, umfasst Hinterlandtransporte, die an internationale und zumeist interkontinentale Seeschifftransporte anschließen. Charakteristisch für dieses Segment ist die Nutzung des ISO-Containers als dominierende Ladeinheit, bedingt durch dessen zentrale Rolle im globalen Schiffsverkehr. In Europa konzentrieren sich die Seehafenhinterlandverkehre hauptsächlich auf die Nord-Süd-Achse, also auf das Hinterland der großen Häfen der Nordrange sowie der bedeutenden Mittelmeerhäfen. (vgl. SGKV 2024b)

Im Gegensatz dazu umfasst der kontinentale KV Transporte innerhalb eines Kontinents. Hier werden in Europa überwiegend nicht ISO-genormte Container (Binnencontainer), Wechselbrücken und Sattelaufleger als Ladeeinheiten verwendet. In Europa verläuft der kontinentale KV nicht nur entlang der Nord-Süd-Achse, sondern auch auf der Ost-West-Achse. (vgl. ebd.)

Für den KV unter Einbeziehung der Schiene existiert zudem die Sonderform der Rollenden Landstraße (begleiteter KV). Aufgrund ihres vergleichsweise geringen Marktanteils (vgl. SGKV 2024f:8), wird diese Sonderform in der vorliegenden Arbeit nicht weiter betrachtet.

Analog zum E WV ist auch der KV auf ein Netz von Infrastruktureinrichtungen angewiesen, die als Umschlagterminals bezeichnet werden. Diese Terminals erfüllen zwei zentrale Funktionen: Zum einen dienen sie dem Umschlag der Ladeeinheiten zwischen verschiedenen Verkehrsträgern, zum anderen stellen sie Orte der Mengenkonsolidierung und Pufferung dar. Umschlagterminals können nach den angeschlossenen Verkehrsträgern differenziert werden, etwa in trimodale Terminals (Schiene, Straße, Wasserstraße) sowie bimodale Terminals, die entweder Schiene und Straße oder Wasserstraße und Straße verbinden. In Deutschland existieren über 200 solcher Umschlagterminals, die sich hinsichtlich ihrer Größe und ihres Umschlagequipments unterscheiden. Da sich diese Arbeit ausschließlich auf den KV unter Einbeziehung der Schiene konzentriert, liegt der Fokus ebenfalls auf den entsprechenden bimodalen und trimodalen Terminals mit Schienenanbindung. (vgl. SGKV 2024c)

### 3.2.2 Teilprozesse des KV

Aus den Transportsegmenten wie sie in Abbildung 6 zu sehen sind, lassen sich die Teilprozesse des KV ableiten. Beim kontinentalen KV umfassen die fünf Teilprozesse der Transportkette: den **Vorlauf** mit dem Lkw, den **Umschlag** der Ladeinheit vom Lkw auf den

Güterzug, den **Hauptlauf** mit dem Güterzug, den **Umschlag** vom Güterzug auf den Lkw sowie den **Nachlauf** mit dem Lkw bis zum Transportziel.

Für den maritimen KV ergeben sich hingegen vier Teilprozesse, da der vor- oder nachgelagerte Transport mit dem Seeschiff nicht dem Produktionssysteme des KV im Kontext des Produktionssystems im SGV zugerechnet wird. Diese vier Teilprozesse umfassen den **Umschlag** der Ladeeinheit im Seehafen auf den Güterzug, den **Hauptlauf** mit dem Güterzug, den **Umschlag** vom Güterzug auf den Lkw sowie den **Nachlauf** mit dem Lkw zum endgültigen Zielort.

Die im Hauptlauf eingesetzten Güterzüge bestehen üblicherweise aus einer Lokomotive (auch als Triebfahrzeug oder Traktionsmittel bezeichnet) sowie den Güterwagen. Im Gegensatz zum EKV und GV werden die Güterwagen im KV nicht direkt mit dem Transportgut beladen, sondern dienen als Plattform für die Ladeeinheiten, welche das Transportgut enthalten. (vgl. SGKV 2024e)

Der Vor- und Nachlauf auf der Straße wird mithilfe von Lkw (auch Sattelzugmaschinen genannt) durchgeführt, die die Ladeeinheiten vom Versender zum Umschlagterminal bzw. vom Umschlagterminal zum Empfänger transportieren. Analog zu den Güterwagen im Hauptlauf werden sogenannte Containerchassis verwendet, welche die Plattform für Ladeeinheiten wie Container und Wechselbrücken bilden. Darüber hinaus kommen auch Sattelaufleger zum Einsatz, die selbst die Ladeeinheit darstellen und somit keine zusätzliche Plattform benötigen. (vgl. ebd.)

Der Umschlag der Ladeeinheit zwischen den Verkehrsträgern findet in den genannten Umschlagterminals statt. Die Umschlagterminals im KV unterscheiden sich hinsichtlich der angebotenen Umschlagtechnologien und der dafür eingesetzten Umschlaggeräte. Eine Übersicht der verschiedenen Anwendungsfälle ist in Abbildung 7 dargestellt. Grundsätzlich wird zwischen vertikalem und horizontalem Umschlag unterschieden. Dabei bezeichnet der vertikale Umschlag den Transport der Ladeeinheit durch Anheben in die Vertikale für den Verkehrsträgerwechsel, während beim horizontalen Umschlag die Ladeeinheit durch Auf- oder Einschleppen horizontal zwischen den Verkehrsträgern wechselt. Innerhalb dieser Kategorien erfolgt eine weitere Differenzierung nach den eingesetzten Systemen bzw. Geräten. Beim vertikalen Umschlag dominieren drei Gerätearten: der Auslegekran (auch Containerbrücke genannt), der Portalkran und der Reachstacker. Der Straddle Carrier wird hingegen für den internen Transport von Containern innerhalb der Umschlaganlage eingesetzt und zählt daher nicht zum klassischen Umschlagequipment. Spezielle Systeme wie das ISU-System oder

NiKRASA ermöglichen den vertikalen Umschlag von nicht-kranbaren Sattelaufliegern, wobei dieser ebenfalls mithilfe eines der drei genannten Gerätearten durchgeführt wird. Der horizontale Umschlag betrifft vor allem den Umschlag von nicht kranbaren Ladeeinheiten (wie Sattelaufliegern und Sattelzügen) und wird von verschiedenen Anbietern mit unterschiedlichen Systemen realisiert. (vgl. SGKV 2024d).

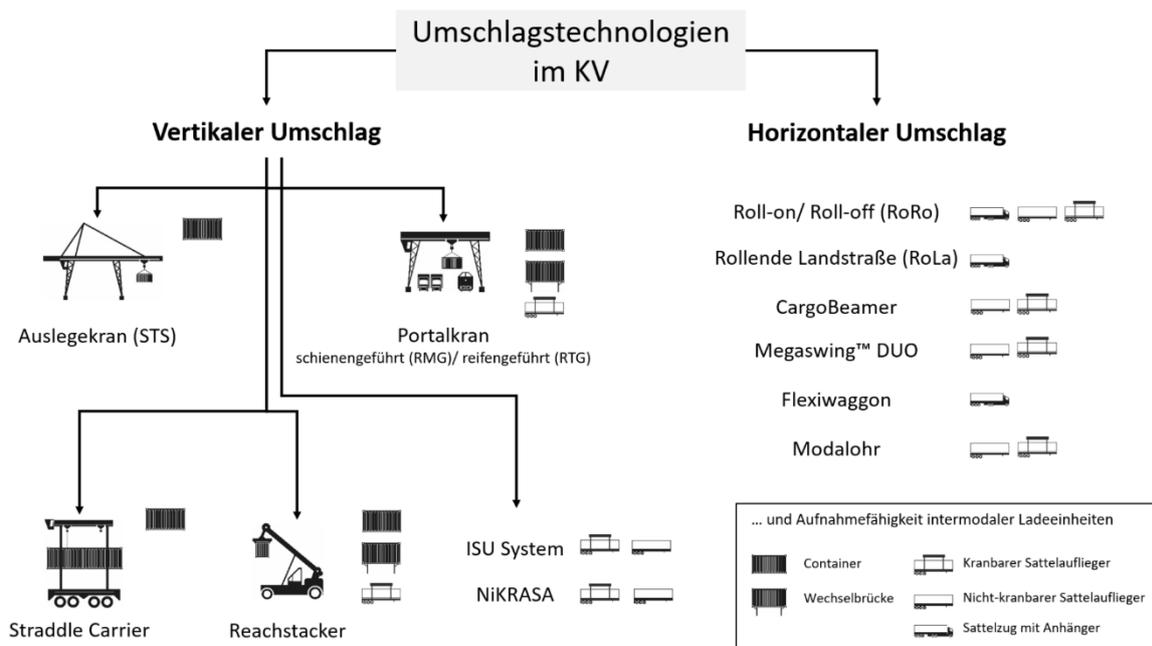


Abbildung 7: Umschlagstechnologien im KV (SGKV 2024d)

Da der horizontale Umschlag einen geringen Marktanteil besitzt (vgl. KombiConsult und pwc 2022:93) und viele verschiedene Systeme zum Einsatz kommen, wurde sich im Zuge dieser Arbeit dafür entschieden, in Hinblick auf die Teilprozesse, nur den vertikalen Umschlag unter Nutzung der drei dominierenden Umschlaggeräte (Containerbrücke, Portalkran und Reachstacker) zu betrachten.

Neben dem Umschlag der Ladeeinheit finden innerhalb der Umschlagterminals auch Rangiervorgänge zur Zugbildung sowie zum Ziehen des Zuges unter die Krananlage statt. Dabei ergibt sich jedoch eine ähnliche Datenlage wie im EKV. Nach Auskunft verschiedener Terminalbetreiber (BEHALA, HUPAC, Contargo) ist eine spezifische Bestimmung des Verbrauchs pro Rangierfahrt schwierig, da zahlreiche Einflussfaktoren zu berücksichtigen sind. Darüber hinaus findet in Terminals oftmals nicht nur ein Produktionssysteme statt, sondern es werden ebenso Güterzüge des KV als auch des EKV mit denselben Lokomotiven rangiert. Eine monatliche Abrechnung des Dieserverbrauchs erfolgt lediglich auf der Ebene

der Züge insgesamt. (vgl. Mail-Kontakt BEHALA, Interview Hupac vom 03.01.2024, Mail-Kontakt Contargo)

Demzufolge wurde eine schematische Übersicht der Teilprozesse des KV erstellt, die in Abbildung 8 dargestellt ist. Im Folgenden wird die Operationalisierung der analysierten Teilprozesse vorgenommen, um die Fragestellung dieser Arbeit systematisch zu bearbeiten

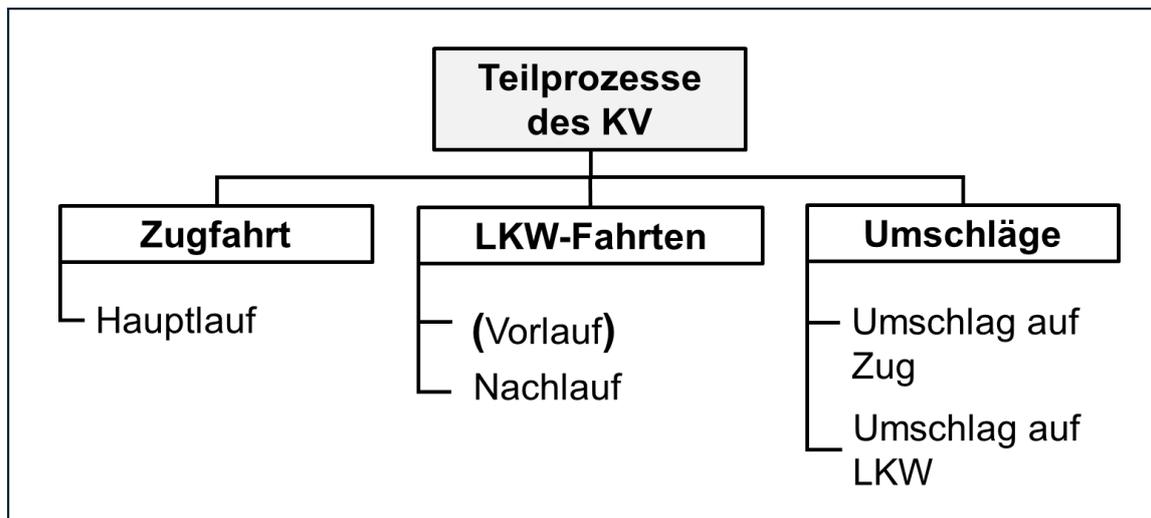


Abbildung 8: Teilprozesse des KV (eigene Darstellung)

### 3.2.3 Operationalisierung der Teilprozesse des KV

Wie in Abbildung 8 dargestellt, lässt sich das Produktionssystem KV in die Teilprozesse Zugfahrt, Lkw-Fahrten und Umschläge unterteilen. Die Lkw-Fahrten werden nach ihrer Position innerhalb der Transportkette differenziert, wobei Fahrten am Anfang der Kette als Vorlauf und Fahrten am Ende als Nachlauf bezeichnet werden. Analog dazu werden die Umschläge ebenfalls nach ihrer Einordnung in die Transportkette unterschieden, je nachdem, ob sie den Wechsel von Lkw auf Zug oder von Zug auf Lkw betreffen

Zur Analyse der externen Kosten wurden für die Zugfahrt spezifische Parameter festgelegt, die als Berechnungsgrundlage dienen (siehe Tabelle 2). Diese Parameter werden in Kapitel 5 dieser Arbeit mit praxisnahen Werten belegt, die beispielhafte Züge im KV abbilden.

*Tabelle 2: Parameter der Zugfahrten des KV zur Berechnung der externen Kosten (eigene Darstellung)*

<b>Parameter</b>	<b>Einheit</b>
Streckenlänge	Kilometer
Anzahl geladene LE	Anzahl
Anteil leere LE (Leerquote)	Prozent
Nettogewicht pro LE	Tonnen
Nettogewicht des Zuges	Tonnen
Traktionsart	Diesel oder elektrisch

Für die Lkw-Fahrten wurden ebenfalls spezifische Parameter zur Berechnung der externen Kosten definiert (siehe Tabelle 3). Um Leerfahrten beim Bringen oder Abholen der leeren Ladeeinheiten zu berücksichtigen, wird die Streckenlänge in Lastlauf und Leerlauf differenziert.

*Tabelle 3: Parameter der LKW-Fahrten des KV zur Berechnung der externen Kosten (eigene Darstellung)*

<b>Parameter</b>	<b>Einheit</b>
Streckenlänge Lastlauf	Kilometer
Streckenlänge Leerlauf	Kilometer
Nettogewicht LE	Tonnen
Streckentyp	Autobahn, Außerorts, Innerorts

Die Berechnung der externen Kosten für Umschläge basiert auf spezifischen Parametern, die in Tabelle 3 aufgeführt sind. Da der Wechsel des Verkehrsmittels oft nicht unmittelbar erfolgt und Ladeeinheiten zwischengelagert werden, sind sogenannte Zwischenhübe zu berücksichtigen. Daher wurde die Anzahl der Hübe pro Ladeeinheit im Terminal als Parameter gewählt, ergänzt durch die Berücksichtigung des eingesetzten Umschlaggeräts. Eine detaillierte Beschreibung der Methodik zur Berechnung externer Kosten beim Umschlag von Ladeeinheiten erfolgt in Kapitel 4.9.

*Tabelle 4: Parameter der Umschläge im KV zur Berechnung der externen Kosten (eigene Darstellung)*

<b>Parameter</b>	<b>Einheit</b>
Umschlaggerät	Containerbrücke, Portalkran, Reachstacker
Anzahl Hübe im Umschlagterminal	Anzahl

Nachfolgend wird auf das Produktionssystem GV näher eingegangen.

### 3.3 Ganzzugverkehr

Stuhr et al. definieren den Ganzzugverkehr (GV) wie folgt:

„(...) *ein* Kunde – *eine* Sendung einer Gutart – *eine* Sendungs-Transportrelation – *ein* Zug.“  
(Stuhr u. a. 2023:192)

Bei alleiniger Betrachtung der Definition des GV und des schienengebundenen Teils der Transportkette, bestehen erneut Überschneidungen mit den anderen Produktionssystemen des SGV. So könnte beispielsweise der Hauptlauf des KV aus EVU-Sicht auch als GV betrachtet werden, da ein Zug, eine Gutart (intermodale LE) transportiert, dabei ein Ziel direkt ansteuert und der KV-Operateur als ein Kunde auftritt. (vgl. ebd.)

Um eine eindeutige Abgrenzung sicherzustellen, erfolgt die Differenzierung des GV von den anderen beiden Produktionssystemen erneut auf Basis des Systemgedankens. Im bereits erwähnten *Gutachten zum Schienengüterverkehr* wird der GV nach einem ähnlichen Maßstab definiert. Demnach findet im GV *„(...) kein Umschlag und keine Wagenverteilung statt, (...) stattdessen werden hier in der Regel klassische Bahngüter, wie z. B. Kohle, Stahl, Chemieprodukte und Mineralöl, in großen Mengen über lange Distanzen mit der Bahn transportiert, häufig direkt von Werk zu Werk und damit von Gleisanschluss zu Gleisanschluss“* (Roland Berger 2021:42). Zusammenfassend werden im Zuge dieser Arbeit jene Verkehre als GV betrachtet, die der obigen Definition von Stuhr et al. entsprechen und gleichzeitig nicht Teilprozesse des EWW oder KV darstellen. Aufgrund der Simplizität des Systems GV im Vergleich zum EWW und KV, erfolgt die detailliertere Beschreibung des Produktionsverfahrens direkt im Zuge der Beschreibung der Teilprozesse.

#### 3.3.1 Teilprozesse des GV

Wie aus der Definition des GV hervorgeht, erfolgt im Rahmen des Transportprozesses weder ein Umschlag noch eine Wagenverteilung, sodass die Wagenzusammensetzung während der gesamten Transportkette unverändert bleibt. Da vor- und nachgelagerte Prozesse, wie etwa das Befüllen der Güterwagen, in dieser Arbeit nicht betrachtet werden, beschränkt sich der GV auf einen einzigen Teilprozess: die Zugfahrt, die auch als Wagenumlauf bezeichnet wird. (vgl. Stuhr u. a. 2023:197)

Der Wagenumlauf des GV weist jedoch spezifische Charakteristika auf. In der Regel sind die Güterwagen auf der Hinrichtung beladen (Lastlauf) und kehren auf der Rückrichtung unbeladen zurück (Leerlauf), was einen pendelnden Wagenumlauf darstellt. Es existieren allerdings auch abweichende Konzepte, bei denen sich die Wagenzusammensetzung nach

Abschluss des Lastlaufs teilweise auflöst, um für andere Ganzzugverbindungen genutzt zu werden. Alternativ kann der Leerlauf, also das Rückführen der Güterwagen, innerhalb des EWV erfolgen. (vgl. ebd.)

Im Rahmen dieser Arbeit wird somit zwischen den Teilprozessen Lastlauf und Leerlauf unterschieden. Eine Berücksichtigung des Konzepts, dass die Wagenzusammensetzung teilweise aufgelöst wird, wird nicht vorgenommen.

### 3.3.2 Operationalisierung der Teilprozesse des GV

Analog zur Vorgehensweise in den vorangegangenen Abschnitten zum EWV und KV wurden für die Analyse der externen Kosten spezifische Parameter für die Teilprozesse Last- und Leerlauf definiert, die als Berechnungsgrundlage dienen (siehe Tabelle 5).

Eine detaillierte Beschreibung der zugrunde liegenden Szenarien sowie der weiteren Parameter erfolgt in Kapitel 5 dieser Arbeit.

*Tabelle 5: Parameter der Zugfahrten des GV zur Berechnung der externen Kosten (eigene Darstellung)*

<b>Parameter</b>	<b>Einheit</b>
Streckenlänge Lastlauf	Kilometer
Streckenlänge Leerlauf	Kilometer
Anzahl Güterwagen	Anzahl
davon leere Güterwagen (Leerquote)	Prozent
Nettogewicht pro Güterwagen	Tonnen
Nettogewicht des Zuges	Tonnen
Traktionsart	Diesel oder elektrisch

Die in Tabelle 5 genannten Parameter ermöglichen eine differenzierte Betrachtung der Teilprozesse des GV. Durch die Zuordnung von realitätsnahen Werten in Kapitel 5 wird eine fundierte Quantifizierung der externen Kosten sichergestellt.

Anhand der in diesem Kapitel ausgemachten Parameter, erfolgt nun die Berechnung der externen Kostensätze für den SGV, unter Erklärung der verwendeten Methodik.

## 4 Methodik für die Berechnung externe Kostensätze im Schienengüterverkehr

In diesem Abschnitt wird die Methodik zur Berechnung der externen Kostensätze für die jeweiligen Kostenbereiche dargestellt. Ziel der Berechnung ist die Ermittlung der durchschnittlichen Kosten für alle externen Kostenbereiche, also jener Kosten, die durch die Produktion einer einzelnen Leistungseinheit entstehen. Im Rahmen dieser Arbeit bezieht sich eine Leistungseinheit im SGV auf einen Fahrzeugkilometer (Fzkm). Eine weitere relevante Leistungseinheit im SGV stellt der Tonnenkilometer dar, welcher als Maß für die sogenannte Transportleistung dient.

In der wissenschaftlichen Literatur zu externen Kosten im Güterverkehr werden Grenzkosten häufig in Euro pro Tonnenkilometer ausgewiesen, wie beispielsweise im *Handbuch der EU-Kommission* (van Essen u. a. 2019b). Diese Einheit erweist sich jedoch für die Zielstellung der vorliegenden Arbeit als ungeeignet, da ein Vergleich der Durchschnittskosten der Produktionssysteme in Euro pro Tonnenkilometer keine Rückschlüsse auf Auslastungsgrade, Leerfahrten oder ähnliche Effekte zulässt. Ein konkretes Beispiel verdeutlicht diesen Sachverhalt:

Werden 100 Tonnen Ladung mit einem einzelnen Zug über eine Strecke von 100 Kilometern transportiert, entstehen externe Kosten für 100 Fahrzeugkilometer. Erfolgt der Transport derselben Ladung hingegen mit fünf verschiedenen Zügen über die gleiche Strecke, entstehen Kosten für 500 Fahrzeugkilometer. Hinsichtlich der Kosten pro Tonnenkilometer ergibt sich jedoch ein anderes Bild: In beiden Fällen resultiert der Transport von 100 Tonnen Ladung über 100 Kilometer in einer Transportleistung von 10.000 Tonnenkilometern, unabhängig davon, ob der Transport mit einem oder mehreren Zügen durchgeführt wurde.

Die Berechnung der externen Durchschnittskosten in Euro pro Fahrzeugkilometer erfolgt auf Basis eines Top-Down-Ansatzes. Dabei werden zunächst die Gesamtkosten der jeweiligen externen Kostenkategorien, wie beispielsweise die Klimakosten des SGV, auf nationaler Ebene erhoben. Im nächsten Schritt werden diese Gesamtkosten den zurückgelegten Fahrzeugkilometern zugeordnet, woraus sich die Durchschnittskosten ergeben. Diese Durchschnittskosten dienen als Grundlage für die Ermittlung der externen Kostensätze.

In Deutschland stellt das UBA als herausgebende Institution die umfassendste Datengrundlage zu externen Kosten bereit. Die Berichte „*Ökologische Bewertung von Verkehrsarten*“ (Allekotte u. a. 2020) und die Emissionsberichterstattung auf Basis von

*TREMODO* (Transport Emission Model) (vgl. Allekotte et al., 2024) analysieren und monetarisieren die Umweltwirkungen verschiedener Verkehrsarten. Bereits existierende Studien zu den externen Kosten des Verkehrs in Deutschland und Europa beruhen wesentlich auf diesen Daten (vgl. Bieler und Sutter 2019:9 ff.) oder greifen auf Teile dieser Datensätze zurück, wie beispielsweise das „*Handbuch zu externen Kosten*“ der EU-Kommission (vgl. van Essen u. a. 2019b:55 ff.).

Die Methodik dieser Arbeit orientierte sich primär an den Datensätzen und Methoden des UBA. Eine direkte Übertragung auf die spezifische Forschungsfrage dieser Arbeit war jedoch nicht vollständig möglich. Aus diesem Grund wurden zusätzliche Ansätze berücksichtigt, etwa aus dem *Handbuch der EU-Kommission*, und eigene methodische Anpassungen vorgenommen. Die verwendeten Datenquellen und das methodische Vorgehen werden in den folgenden Abschnitten detailliert beschrieben.

Für die Betrachtung der Teilprozesse innerhalb der Knoten, also den Terminals im KV und den ZBA im EWV, fehlt die Datengrundlage, um einen Top-Down-Ansatz verfolgen zu können. Weshalb diese nachfolgend separat aufgeführt sind und sich nicht in die Kostenbereiche einreihen.

Da die in Studien angegebenen Kostensätze häufig auf Berechnungen aus früheren Jahren basieren, wurden diese in einigen Fällen inflationsbereinigt auf das Jahr 2022 fortgeschrieben. Für die inflationsbereinigte Fortschreibung der Kostensätze wurde die Entwicklung des Verbraucherpreisindex des Statistischen Bundesamtes (vgl. DESTATIS, 2024) als Grundlage herangezogen.

#### **4.1 Herleitung der Verkehrsmengen und Energieverbräuche**

Zur Berechnung der externen Kosten für die verschiedenen Kostenbereiche ist die Verwendung umfangreicher Datensätze erforderlich. Da historische Daten vergangener Jahre nicht unmittelbar verfügbar waren, wurde im Rahmen dieser Arbeit das Referenzjahr 2022 herangezogen. Dieses Jahr bietet zum Bearbeitungsstand die aktuellste verfügbare Datenbasis mit einer vollständigen Datengrundlage. Eine Übersicht der genutzten Daten ist in Tabelle 6 dargestellt.

Tabelle 6: Verkehrs- und Energieverbrauchsdaten des SGV in Deutschland 2022 (eigene Darstellung)

<b>Faktor</b>	<b>Einheit</b>	<b>Wert</b>
Transportleistung	Mrd. Tkm	132,6
Transportleistung mit Dieseltraktion	Mrd. Tkm	8,1
Transportleistung mit elektrischer Traktion	Mrd. Tkm	124,5
Auslastungsgrad im SGV	%	59,3
Betriebs-Transportleistung	Mrd. Bl.-Tkm	223,6
Betriebs-Transportleistung mit Dieseltraktion	Mrd. Bl.-Tkm	13,7
Betriebsleistung mit elektrischer Traktion	Mrd. Bl.-Tkm	209,9
Energieverbrauch Diesel	Tonnen	61.467,12
Energieverbrauch Diesel	Tsd. Liter	96.406,02
Energieverbrauch Strom	MWh	3.747.104,80
Fahrleistung	Mio. Fzkm	268,89
Fahrleistung mit Dieseltraktion	Mio. Fzkm	16,43
Fahrleistung mit elektrischer Traktion	Mio. Fzkm	252,46

Die Berechnung der Daten und deren Quellen wird nachfolgend genauer beschrieben.

### **Transportleistung**

Eine jährliche Zusammenstellung zentraler Verkehrs- und Transportdaten in Deutschland erfolgt durch das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) und wird durch das Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV) im Bericht *Verkehr in Zahlen* veröffentlicht. Aus diesem Bericht ergibt sich für den SGV im Jahr 2022 eine Transportleistung von 132,6 Mrd. Tonnenkilometern (Tkm) (vgl. DLR 2024:245). Diese Daten werden ebenfalls im Transport-Emissions-Modell TREMOD (vgl. Allekotte u. a. 2024:55), verwendet, das vom Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg (ifeu) entwickelt wurde und als Grundlage für die Emissionsberichterstattung des UBA dient. Darüber hinaus werden im Rahmen der Emissionsberichterstattung des UBA auch die Anteile der Transportleistung nach Antriebsarten ausgewiesen. Für den SGV im Jahr 2022 entfallen 8,1 Mrd. Tkm (6,11 %) auf

dieselbetriebene und 124,5 Mrd. Tkm (93,89 %) auf elektrisch betriebene Transporte (vgl. Allekotte u. a. 2024:55).

### **Betriebs-Transportleistung**

Die Transportleistung beschreibt die tatsächlich erbrachte Menge an Tonnenkilometern. Berücksichtigt man jedoch die theoretisch angebotene Transportkapazität eines Verkehrsmittels, ergibt sich ein potenziell höherer Transportnutzen. Aufgrund von nicht vollständig ausgelasteten Transportkapazitäten stehen im Güterverkehr zusätzliche Transportkapazitäten zur Verfügung. Diese sogenannte Betriebs-Transportleistung wird in der Einheit Kapazitäts-Tonnenkilometer (Kap.-Tkm) ausgedrückt. (vgl. Allekotte et al., 2020, S. 51)

Für den SGV gibt das UBA für das Jahr 2017 einen durchschnittlichen Auslastungsgrad von 57 % an. Da dieser Wert seitdem nicht aktualisiert wurde, wird er auch in der vorliegenden Arbeit verwendet. Für das Jahr 2022 ergibt sich daraus eine Betriebs-Transportleistung von insgesamt 223,6 Mrd. Kap.-Tkm für den SGV, wobei 209,9 Mrd. Kap.-Tkm auf elektrisch angetriebene und 13,7 Mrd. Kap.-Tkm auf dieselbetriebene Transporte entfallen. Eine Differenzierung des Auslastungsgrads nach Traktionsarten wurde bislang nicht vorgenommen, sodass in dieser Arbeit für beide Antriebsarten derselbe Auslastungsgrad zugrunde gelegt wird. (vgl. ebd., S. 213)

### **Fahrleistung**

Wie im vorherigen Abschnitt dargestellt, stellt der Vergleich der Fahrzeugkilometer (Fzkm) eine zentrale Grundlage dar, um verschiedene Verkehrsmittel für die Berechnung der externen Kosten auf einer gleichwertigen Ebene gegenüberzustellen. Für den SGV werden im Statistikbericht *Verkehr in Zahlen* keine Angaben zur Fahrleistung veröffentlicht (vgl. DLR 2024). In der europäischen Datenbank *Eurostat* hingegen werden die zurückgelegten Fahrzeugkilometer erfasst. Im Referenzjahr 2022 wurden für den SGV in Deutschland insgesamt 268,89 Millionen Fzkm dokumentiert (vgl. Eurostat 2024c). Die in der Eurostat-Datenbank hinterlegten Werte korrespondieren mit den Daten, die für den ökologischen Verkehrsartenvergleich des UBA herangezogen werden (vgl. Allekotte u. a. 2020:213). Eine Differenzierung der Fahrleistung nach Traktionsarten ist jedoch nicht für alle europäischen Länder verfügbar, einschließlich Deutschland. Die Anteile dieselbetriebener Fahrleistungen variieren stark zwischen den europäischen Ländern. Beispielsweise beträgt der Anteil im SGV in Lettland 100 %, in Spanien 40 %, in Polen 18 % und in Schweden 4 %. Daten zu den traktionsabhängigen Tonnenkilometern der einzelnen Länder sind in der Eurostat-Datenbank nicht hinterlegt (vgl. Eurostat, 2024c). Vor dem Hintergrund dieser Datenlage wird in der

vorliegenden Arbeit die Annahme getroffen, dass die Unterteilung der Fahrleistung nach Traktionsart in Deutschland auf Basis der Anteile der Transportleistung erfolgt. Für den dieselbetriebenen SGV ergibt sich damit eine Fahrleistung von 16,43 Millionen Fzkm, während der elektrisch betriebene SGV eine Fahrleistung von 252,46 Millionen Fzkm aufweist.

### Energieverbrauch

Für die Berechnung der Energieverbräuche werden die spezifischen Verbrauchsfaktoren aus der TREMOD-Berichterstattung herangezogen. Die entsprechenden Energieverbrauchswerte sind in Tabelle 7 aufgeführt.

*Tabelle 7: Spezifischer Energieverbrauch in TREMOD (Knörr u. a. 2016)*

	<b>Strom (Wh / Kap.- Tkm)</b>	<b>Diesel (g / Kap.-Tkm)</b>
<b>SGV</b>	15,3	4,5

Auf Basis der Betriebs-Transportleistung wurde der gesamte Energieverbrauch für die jeweiligen Traktionsarten im SGV für das Jahr 2022 ermittelt. Für den Dieselantrieb ergibt sich ein Gesamtverbrauch von 61.467,1 Tonnen bzw. 74.056,8 Tausend Litern. Der Stromverbrauch für den elektrisch betriebenen SGV beläuft sich auf 3.212.226 Megawattstunden (MWh). In Relation zur zurückgelegten Fahrleistung ergeben sich durchschnittlich 12,7 kWh Stromverbrauch pro Fahrzeugkilometer bei elektrischer Traktion sowie 4,5 Liter Dieserverbrauch pro Fahrzeugkilometer bei Dieseltraktion. Diese durchschnittlichen Verbrauchswerte repräsentieren im Kontext von Beispielverbindungen realistische Daten, können jedoch in Einzelfällen aufgrund von variierenden Betriebsbedingungen und Einsatzszenarien erheblich abweichen (vgl. DB InfraGO 2024).

Auf Basis dieses Verkehrsmengengerüsts und der Verbrauchswerte wird nun in den folgenden Kapiteln die Grundlage zur Berechnung der externen Kosten gelegt. Die Kostenbereiche ergeben sich aus den in Kapitel 2.3 analysierten Kostenbereichen des SGV sowie der Sonderbetrachtung vom Rangierbetrieb und dem Umschlag von Ladeeinheiten.

### 4.2 Unfallkosten

Das Verfahren zur Berechnung der Unfallkosten wird sowohl auf internationaler als auch auf nationaler Ebene in Deutschland unter Anwendung einer einheitlichen Methodik durchgeführt. Diese basiert auf der Verrechnung von Unfallstatistiken im Verkehr sowie den Schadenskostensätzen, die zur Ermittlung externer Kosten pro betroffener Person herangezogen werden (vgl. Allekotte et al., 2020, S. 153 f. & van Essen et al., 2019, S. 38 ff.).

### **Berechnungsmethodik**

Grundsätzlich erfolgt eine Analyse der Anzahl an Getöteten, Schwerverletzten und Leichtverletzten, die durch das jeweilige Verkehrsmittel verursacht wurden. Mithilfe von Schadenskostensätzen können diese Daten verwendet werden, um die gesamten externen Unfallkosten zu berechnen. Die Schadenskostensätze setzen sich dabei aus verschiedenen Kategorien zusammen: menschliche Kosten, medizinische Kosten, administrative Kosten, Produktionsverluste, Materialschäden sowie sonstige Kosten. Die resultierenden externen Unfallkosten werden anschließend den jeweiligen Verkehrsmitteln zugeordnet. (van Essen u. a. 2019b:38 ff.)

Für die Berechnung der Unfallkosten im Schienenverkehr in Deutschland bildet die Unfallstatistik der European Union Agency for Railways (ERA) die Grundlage. Diese Statistik liefert detaillierte Unfallzahlen, differenziert nach Schwerverletzten und Unfalltoten, aufgeschlüsselt nach einzelnen Ländern. In der Unfallstatistik wird keine Unterscheidung zwischen Schienenpersonen- und Schienengüterverkehr vorgenommen. Aufgrund der vergleichsweise geringen Unfallzahlen im Schienenverkehr wurde ein Durchschnittswert für den Zeitraum von 2012 bis 2016 gebildet, um den Einfluss einzelner, überdurchschnittlich schwerer Unfälle zu minimieren (vgl. van Essen et al., 2019, S. 43). Für den zu Grunde liegenden Betrachtungszeitraum der Unfallkosten von 2012 bis 2016 gab es in Deutschland durchschnittlich 143 getötete und 118 schwerverletzte Personen pro Jahr. Im darauffolgenden Zeitraum 2017 bis 2022 waren es im Durchschnitt 135 getötete und 118 schwerverletzte Personen pro Jahr. Aufgrund der geringen Abweichung der Unfallzahlen der besagten Zeiträume, wurde sich in dieser Arbeit dafür entschieden die Unfallkosten des *Handbuchs der EU-Kommission* zu übernehmen und diese für das Jahr 2022 inflationsbereinigt fortzuschreiben. Dabei wurden ca. 9% der Unfallkosten im deutschen Schienenverkehr dem SGV zugeordnet. (Eurostat 2024a)

Anhand ebendieser Unfallkosten konnten mithilfe der zurückgelegten Fahrzeugkilometer im SGV die durchschnittlichen Unfallkosten pro Fahrzeugkilometer berechnet werden (siehe Abbildung 9)

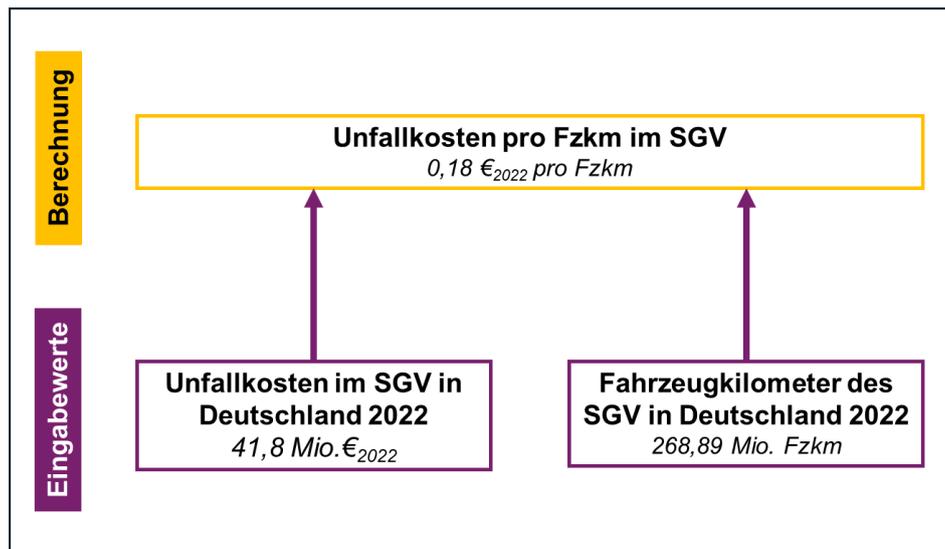


Abbildung 9: Berechnungsmethodik der externen Unfallkosten des SGV in Deutschland 2022 pro Fzkm (eigene Darstellung)

Auf Basis dieser Rechnung betragen die durchschnittlichen Unfallkosten für den SGV in Deutschland 2022 0,18 Euro pro Fahrzeugkilometer.

Für den Lkw-Verkehr konnten die Daten direkt aus *Handbuch der EU-Kommission* übernommen werden. Die Berechnungsmethodik erfolgte analog zu der des Schienenverkehrs. Auch dafür wurde eine inflationsbereinigte Fortschreibung der Kostensätze durchgeführt. Die Unfallkostensätze für den Lkw-Verkehr in Deutschland sind zusätzlich nach Streckenkategorien unterteilt. Die Kostensätze pro Fahrzeugkilometer innerorts betragen 0,017, außerorts 0,022 und auf der Autobahn 0,04 Euro pro Fahrzeugkilometer (van Essen u. a. 2019a).

### 4.3 Luftverschmutzung

Die Berechnung der Luftschadstoffkosten im Verkehr zeigt eine hohe Sensitivität gegenüber bewertungsrelevanten Faktoren. Im *Handbuch der EU-Kommission* werden zwar durchschnittliche EU-weite Grenz- und Durchschnittskosten für die Emission von Luftschadstoffen ausgewiesen (vgl. van Essen u. a. 2019a:57 ff.), jedoch bestehen erhebliche Unterschiede zwischen den Mitgliedsstaaten, insbesondere hinsichtlich der Emissionsquellen und deren geografischer Verteilung. Daher ist eine nationale Eingrenzung der Daten für die Berechnung dieser Kosten essenziell. (vgl. Matthey und Bünger 2020:14)

In Deutschland ist das UBA für die Emissionsberichterstattung von Luftschadstoffen sowie deren Monetarisierung federführend. Das UBA ermittelt in der *Methodenkonvention 3.1 zur Ermittlung von Umweltkosten* die Luftschadstoffemissionen verschiedener Verkehrsträger, einschließlich des SGV im Verhältnis zu den erbrachten Fahrzeugkilometern. Allerdings erfolgt

hierbei keine Differenzierung nach Traktionsart, weshalb die Werte im Rahmen dieser Arbeit nicht verwendet werden können. (vgl. ebd, S. 29)

Dennoch orientiert sich die Berechnung der externen Kosten durch Luftschadstoffe in dieser Arbeit methodisch an der Vorgehensweise des UBA. Die allgemeine Berechnungsmethodik ist in Abbildung 10 schematisch dargestellt. Eine detaillierte Beschreibung der einzelnen Kostenposten sowie der Berechnungsschritte wird in den nachfolgenden Kapiteln erläutert.

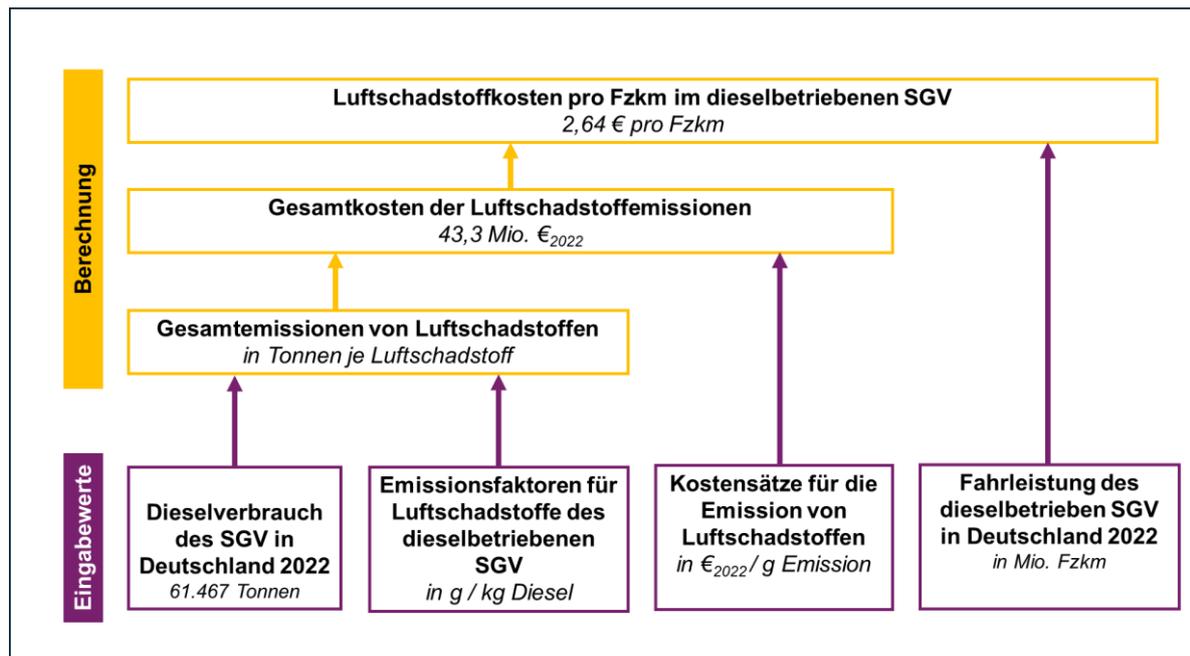


Abbildung 10: Berechnungsmethodik der externen Kosten der Luftschadstoffemissionen des SGV in Deutschland 2022 pro Fzkm (eigene Darstellung)

#### 4.3.1 Emissionsfaktoren für Luftschadstoffe im dieselbetriebenen SGV

Die Basis der Berechnung der Emissionsfaktoren bildet TREMOD. Das Modell stützt sich dabei auf Daten der DB AG, die Betriebsleistungsdaten motorfein abgeleitet hat. Anhand dieser Daten und Emissionsfaktoren der Motoren konnten spezifische Emissionsfaktoren für den SGV berechnet werden. Dabei handelt es sich um kraftstoffbezogene Emissionsfaktoren für die Luftschadstoffe. Dabei wird zwischen den Luftschadstoffen (Nicht-Methanhaltiger)-Kohlenwasserstoff ((NM)-HC), Kohlenmonoxid (CO), Stickstoffoxid (NO<sub>x</sub>) und Feinstpartikeln (PM<sub>10</sub>) für den Dieserverbrauch unterschieden (vgl. Allekotte et al., 2024, S. 57 f.). Laut einer Anfrage beim UBA können weitere Luftschadstoffe wie Ammoniak (NH<sub>3</sub>), Schwefeldioxid (SO<sub>2</sub>) und größeren Partikeln (PM<sub>2.5</sub>) auch mit TREMOD berechnet werden. Aufgrund der

Geringfügigkeit sind diese jedoch zu vernachlässigen. Die Emissionsfaktoren des dieselbetriebenen SGV aus der *TREMODO*-Berichterstattung sind in Tabelle 8 dargestellt.

*Tabelle 8: Emissionsfaktoren von Luftschadstoffen des dieselbetriebenen SGV in Deutschland 2022 in g/kg (eigene Darstellung nach Allekotte et al., 2024, S. 57)*

	(NM)-HC	CO	NOx	PM10
<b>Güterverkehr</b>	5,4	5,4	33	0,7
<b>Rangieren</b>	3,9	1,7	33,1	0,6

#### 4.3.2 Kostensätze für Luftschadstoffe

Die Kostensätze für die Emission von Luftschadstoffen wurden aus der *Methodenkonvention 3.1 zur Ermittlung von Umweltkosten* des UBA übernommen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Schadwirkung von Luftschadstoffen, insbesondere von Feinstaub, erheblich variieren kann, abhängig von der Höhe der Emissionsquelle und der Bevölkerungsdichte in deren Nähe. Eine präzisere Abschätzung der Schadwirkung erfordert daher eine detaillierte Betrachtung der spezifischen Emissionsquellen. (vgl. Matthey und Bünger 2020:13 ff.)

Da für den SGV keine derartige spezifische Betrachtung vorliegt, wurde für diese Arbeit der allgemeine Kostensatz für externe Kosten der Luftverschmutzung aus unbekannter Quelle verwendet (vgl. ebd.). Die Kostensätze, die ursprünglich für das Jahr 2020 angegeben wurden, wurden zudem inflationsbereinigt auf das Jahr 2022 fortgeschrieben. Eine Übersicht der relevanten Kostensätze ist in Tabelle 9 dargestellt.

*Tabelle 9: durchschnittliche Kostensätze der Luftverschmutzung durch Emissionen aus unbekannter Quelle (eigene Darstellung nach Matthey & Bünger, 2020, S. 13 ff.)*

	PM2.5	PM10	NOx	SO <sub>2</sub>	(NM-) HC	NH <sub>3</sub>
€ <sub>2020</sub> / g Emission	0,0615	0,0433	0,0190	0,0158	0,0022	0,0337
€ <sub>2022</sub> / g Emission (inflationsbereinigt)	0,0678	0,0477	0,0209	0,0174	0,0024	0,0371

Zusätzlich enthält Tabelle 9 weitere Kostensätze, die zwar für die direkten Luftschadstoffemissionen des SGV im Betrieb nicht relevant sind, jedoch bei der

Kostenrechnung für die „Vor- und nachgelagerten Prozesse“ Berücksichtigung finden. Für Kohlenstoffmonoxid konnte kein Kostensatz ermittelt werden.

#### 4.3.3 Externe Kosten für Luftschadstoffe nach Fahrleistung

Der Berechnungsmethodik aus Abbildung 10 folgend, konnten anhand des gesamten Dieserverbrauchs im SGV in Deutschland im Jahr 2022 und den in Tabelle 8 aufgelisteten Emissionsfaktoren, die Gesamtemissionen im Betrachtungsrahmen berechnet werden. Anhand der Kostensätze (Tabelle 9) konnten daraufhin die gesamten externe Kosten durch Luftschadstoffe berechnet werden. Unter Einbezug der Fahrleistung mit Dieseltraktion ergab sich daraus ein externer Kostensatz von 2,64 Euro pro Fahrzeugkilometer.

Für den Lkw-Verkehr wurden die externen Kostensätze für Luftverschmutzung aus der *Methodenkonvention 3.1 zur Ermittlung von Umweltkosten* des UBA übernommen und inflationsbereinigt auf das Jahr 2022 fortgeschrieben. Differenziert nach Streckentyp ergeben sich externe Kosten von 0,103 Euro pro Fahrzeugkilometer auf innerörtlichen Strecken, 0,039 Euro pro Fahrzeugkilometer auf außerörtlichen Strecken und 0,03 Euro pro Fahrzeugkilometer auf Autobahnen. (vgl. Matthey und Bünger 2020:28 ff.)

#### 4.4 **Klimakosten aus dem direkten Betrieb**

Die Berechnung der Klimakosten im Verkehr stellt eines der am umfassendsten dokumentierten Verfahren im Bereich der externen Kosten dar. Neben dem *Handbuch der EU-Kommission* für externe Kosten auf internationaler Ebene und der *Methodenkonvention* des UBA zur Berechnung von Umweltkosten auf nationaler Ebene existieren zudem verschiedene Normen und Frameworks, wie die ISO 14083 sowie das GLEC Framework (Global Logistics Emissions Council Framework), die explizit die Treibhausgasberechnung im Verkehrs- und Transportsektor spezifizieren.

Die Klimakosten in diesem Kontext beziehen sich ausschließlich auf die Kosten, die direkt durch den Betrieb eines Verkehrsmittels entstehen. THG, die nicht im direkten Betrieb, sondern beispielsweise durch die Stromproduktion entstehen, werden im Kostenbereich „Vor- und nachgelagerte Prozesse“ erfasst (Kapitel 4.5). Da der elektrisch betriebene SGV im direkten Betrieb keine direkten Treibhausgasemissionen verursacht, wird in der folgenden Analyse ausschließlich der dieseltreibene SGV sowie der Lkw-Verkehr betrachtet.

## Berechnungsmethodik

Die Methodik zur Berechnung der Klimakosten im dieselbetriebenen SGV ist in Abbildung 11 dargestellt.

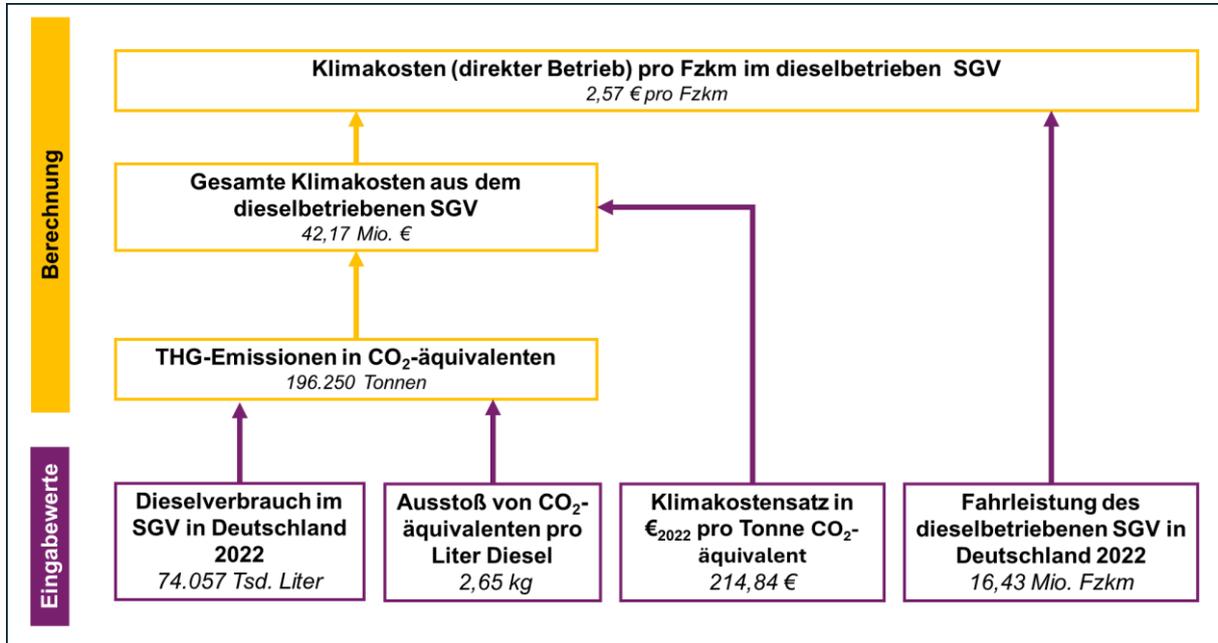


Abbildung 11: Berechnungsmethodik der externen Kosten der Klimaschäden des SGV in Deutschland 2022 pro Fzkm (eigene Darstellung)

Ausgehend vom Dieserverbrauch im SGV in Deutschland im Jahr 2022 (74,06 Millionen Liter) können die gesamten THG berechnet werden. Laut dem *TREMODO*-Modell werden die THG-Emissionen durch die Verbrennung von Diesel mit 2,634 kg CO<sub>2</sub>-Äquivalenten pro Liter Diesel veranschlagt. Es wird mit CO<sub>2</sub>-Äquivalenten gearbeitet, da neben CO<sub>2</sub> auch andere Gase wie Methan (CH<sub>4</sub>) und Lachgas (N<sub>2</sub>O) freigesetzt werden, die aufgrund ihres unterschiedlichen Treibhausgaspotenzials in die Berechnung einfließen. Die relevanten Treibhausgase aus dem Dieserverbrauch setzen sich somit aus Methan, Lachgas und Kohlenstoffdioxid zusammen, wobei Kohlenstoffdioxid den größten Anteil ausmacht. Für den dieselbetriebenen SGV ergeben sich daraus 192.250 Tonnen emittierte CO<sub>2</sub>-Äquivalente im Jahr 2022. (vgl. Matthey & Bünger, 2020, S. 8 f. & *TREMODO* 6.53, 2024)

Auf dieser Basis werden die Klimakosten des dieselbetriebenen SGV unter Anwendung des Kostensatzes für THG berechnet. Das UBA empfiehlt für das Jahr 2020 einen Kostensatz von 195 Euro pro Tonne CO<sub>2</sub>-Äquivalent. Dieser Schadenskostensatz, der auf dem Schadenskostenmodell *FUND* basiert, liegt im internationalen Vergleich am unteren Ende der Skala. Ein alternativer Wert, ermittelt vom IPCC, beläuft sich für 2020 auf 182 Euro pro Tonne CO<sub>2</sub>-Äquivalent und ist dem UBA-Kostensatz sehr nahe. Zusätzlich gibt das UBA einen alternativen höheren Kostensatz von 680 Euro pro Tonne CO<sub>2</sub>-Äquivalent für 2020 an, der

davon ausgeht, dass die heutigen Schäden auch in der Zukunft den gleichen Wert haben, ohne eine Anpassung an eine Zeitpräferenzrate. (vgl. Matthey und Bünger 2020:8 f.)

Für die Berechnung in dieser Arbeit wurde der vom UBA empfohlene Kostensatz von 195 Euro pro Tonne CO<sub>2</sub>-Äquivalent verwendet. Inflationsbereinigt für das Jahr 2022 fortgeschrieben ergeben sich daraus 214,84 Euro pro Tonne CO<sub>2</sub>-Äquivalent. Im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse wurde auch der Einfluss des deutlich höheren Kostensatzes von 680 Euro berücksichtigt (Kapitel 5.2).

Der Kostensatz wird mit den emittierten THG des dieselbetriebenen SGV multipliziert, was zu Gesamtkosten von 42,17 Millionen Euro führt. Auf Basis der Fahrzeugkilometer ergibt sich ein durchschnittlicher Klimakostenwert von 2,57 Euro pro Fahrzeugkilometer für den dieselbetriebenen SGV.

#### **4.5 Vor- und nachgelagerte Prozesse**

Im Kontext des Kostenbereichs „vor- und nachgelagerte Prozesse“ werden jene Kosten berücksichtigt, die zusätzlich zu den Kosten der Nutzungsphase anfallen. Im Verkehrsbereich umfassen diese externen Kosten insbesondere die Bereitstellung der Energie (auch als „Well-to-Tank“ bezeichnet), die Betrachtung des Lebenszyklus der Fahrzeuge einschließlich Herstellung, Wartung und Entsorgung sowie den Lebenszyklus der Infrastruktur, der Bereitstellung, Betrieb, Unterhalt und Entsorgung umfasst. (vgl. Allekotte u. a. 2020:55 ff.; vgl. van Essen u. a. 2019b:137)

Während im *Handbuch der EU-Kommission* primär die externen Kosten der Energiebereitstellung berücksichtigt werden und alle weiteren vor- und nachgelagerten Kosten im Kapitel „indirekte Kosten“ behandelt werden, jedoch keinen Eingang in die Haupttabellen finden, werden in der *Ökologischen Bewertung von Verkehrsarten* des UBA die genannten Prozesse innerhalb eines gemeinsamen Kostenbereiches zusammengeführt. (vgl. ebd.)

In der vorliegenden Arbeit wurde sich an der Methodik der *Ökologischen Bewertung von Verkehrsarten* des UBA orientiert. Die drei genannten Kostenbereiche – Energiebereitstellung, Lebenszyklus der Fahrzeuge und Lebenszyklus der Infrastruktur – wurden separat berechnet und abschließend im Kostenbereich „vor- und nachgelagerte Prozesse“ konsolidiert.

#### 4.5.1 Energiebereitstellung

In diesem Abschnitt werden die Umweltwirkungen der energetischen Vorketten untersucht. Eine schematische Darstellung der Berechnungsmethodik ist in Abbildung 12 zu finden. Grundlage der Berechnung sind die Umweltwirkungen der energetischen Vorketten, insbesondere die Emissionen von Luftschadstoffen und THG, die im Zuge der Strom- und Dieselproduktion entstehen.

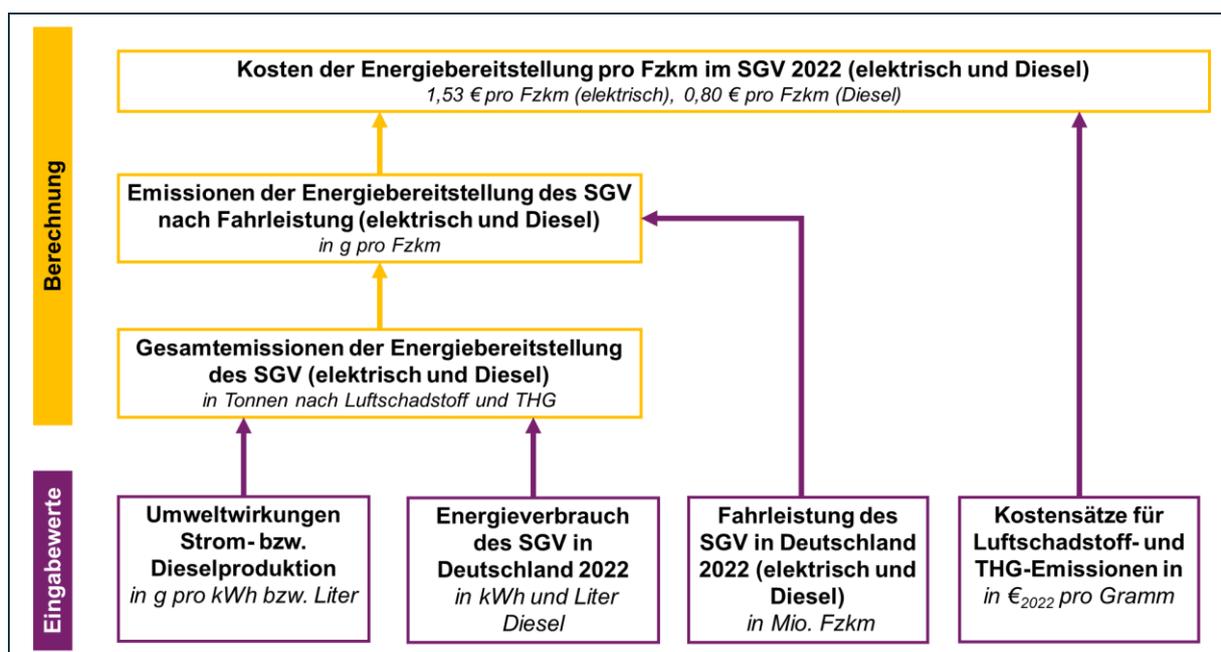


Abbildung 12: Berechnungsmethodik der externen Kosten der Energiebereitstellung des SGV in Deutschland 2022 pro Fzkm (eigene Darstellung)

Im Bericht zur *Ökologischen Bewertung von Verkehrsarten* wurde auf Basis von *TREMODO* eine Übersicht bereitgestellt, die angibt, wie viele Gramm der jeweiligen Luftschadstoffe oder THG pro verbrauchter Kilowattstunde (kWh) Strom beziehungsweise pro verbrauchtem Megajoule (MJ) Diesel emittiert werden. Für die Umrechnung von Diesel in Liter wurde ein Umrechnungsfaktor von 35,5 MJ pro Liter verwendet. (vgl. Allekotte u. a. 2020:55)

Da die angegebenen Umweltwirkungen der Stromproduktion auf dem Strommix von 2017 basieren, wurden, soweit möglich, aktualisierte Werte verwendet. Für die THG der Stromproduktion wurde auf die aktualisierten *TREMODO*-Daten zurückgegriffen. Dabei kam der aktuellstmögliche Wert aus dem Jahr 2021 zum Einsatz (vgl. Allekotte u. a. 2024:34). Hinsichtlich der Luftschadstoffemissionen im Zusammenhang mit der Stromproduktion standen keine aktualisierten Werte zur Verfügung, sodass in diesem Bereich weiterhin der Strommix von 2017 als Basis dient.

Das GEMIS-Modell (Global Emissions-Modell Integrierter Systeme), das vom UBA in der Berichterstattung teilweise herangezogen wird, modelliert ebenfalls die Entwicklung der

Emissionen und zeigt, dass die Luftschadstoffemissionen in der Stromproduktion über die Jahre gesunken sind. Allerdings reicht der aktuellste Bericht des GEMIS-Modells nur bis 2019 und weist leichte Abweichungen zu den *TREMOD*-Daten auf. Daher wurde auf die Verwendung dieser Werte verzichtet. Nichtsdestotrotz bestätigt das Modell, dass mit einem zunehmenden Anteil erneuerbarer Energien an der Stromproduktion die Luftschadstoffemissionen weiter zurückgehen (vgl. IINAS 2021).

Daraus lässt sich ableiten, dass die in dieser Arbeit verwendeten Emissionsfaktoren für Luftschadstoffe aus der Stromproduktion tendenziell zu hoch angesetzt sind. Dies impliziert, dass die berechneten externen Kosten der Energiebereitstellung im SGV mit elektrischer Traktion in Wirklichkeit etwas niedriger liegen dürften.

Wie in Abbildung 12 dargestellt, werden die Umweltwirkungen mit dem Energieverbrauch des SGV in Deutschland für das Jahr 2022, differenziert nach Diesel- und Stromtraktion, verrechnet. Die daraus resultierenden Gesamtemissionen von Luftschadstoffen und THG dienen als Grundlage, um mithilfe der Fahrleistungsdaten des SGV sowie der in Kapitel 4.3 und 4.4 dargestellten Kostensätze für die Emissionen von Luftschadstoffen und THG die externen Kosten pro Fahrzeugkilometer und Traktionsart zu berechnen.

Auf Basis dieser Berechnungen ergeben sich für den dieselbetriebenen SGV externe Kosten in Höhe von 0,80 Euro pro Fahrzeugkilometer, während für den elektrisch betriebenen SGV 1,53 Euro pro Fahrzeugkilometer ermittelt wurden.

### 4.5.2 Lebenszyklus der Fahrzeuge und Infrastruktur

Für die Berechnung der externen Kosten im Zusammenhang mit der Herstellung, Wartung und Entsorgung von Schienenfahrzeugen sowie der Bereitstellung, dem Betrieb, dem Unterhalt und der Entsorgung der Infrastruktur wurden die Gesamtemissionen aus dem Bericht zur *Ökologischen Bewertung von Verkehrsarten* herangezogen. Diese Daten beziehen sich auf das Jahr 2017 und umfassen, analog zur Energiebereitstellung, sowohl die Emissionen von THG als auch von Luftschadstoffen. Eine Differenzierung nach Traktionsart wurde in diesem Bericht nicht vorgenommen (vgl. Allekotte u. a. 2020:217)

Auf eine Fortschreibung der Emissionsdaten auf das Jahr 2022 wurde verzichtet, da sowohl die Flotte der Schienenfahrzeuge im SGV als auch die genutzte Infrastruktur generell geringen Veränderungen unterliegt. (vgl. Bundesregierung 2019:10 f.; vgl. Statista 2012)

Die Emissionsdaten wurden entsprechend der Methodik der Energiebereitstellung mit den Fahrleistungsdaten des SGV im Jahr 2022 verrechnet. Anschließend wurden die externen Kosten für die jeweiligen Kostenbereiche anhand der in Kapitel 4.3 und 4.4 dargestellten Kostensätze für Luftschadstoffe und THG berechnet.

Für den Lebenszyklus der Schienenfahrzeuge im SGV ergeben sich externe Kosten in Höhe von 0,40 Euro pro Fahrzeugkilometer, während für den Lebenszyklus der Infrastruktur externe Kosten von 1,50 Euro pro Fahrzeugkilometer ermittelt wurden.

### 4.5.3 Gesamtkosten vor- und nachgelagerte Prozesse

Die externen Kosten der Energiebereitstellung wurden mit den Kosten für die Herstellung, Wartung und Entsorgung der Schienenfahrzeuge sowie der Bereitstellung, dem Betrieb, dem Unterhalt und der Entsorgung der Infrastruktur summiert und im Kostenbereich „Vor- und nachgelagerte Prozesse“ zusammengefasst. Für den dieselbetriebenen SGV ergeben sich daraus externe Kosten von 2,70 Euro pro Fahrzeugkilometer, während für den elektrisch betriebenen SGV externe Kosten von 3,44 Euro pro Fahrzeugkilometer ermittelt wurden.

Die externen Kosten für den Lkw-Verkehr wurden aus der *Methodenkonvention 3.1 zur Ermittlung von Umweltkosten* des UBA übernommen. Da die dort angegebenen Kostensätze in Preisen von 2020 ausgewiesen sind, wurden diese inflationsbereinigt auf das Jahr 2022 fortgeschrieben. Für den Lkw-Verkehr werden externe Kosten von 0,082 Euro pro Fahrzeugkilometer für den Lebenszyklus der Infrastruktur und Fahrzeuge sowie 0,059 Euro pro Fahrzeugkilometer für die Energiebereitstellung veranschlagt. Insgesamt ergeben sich somit externe Kosten in den „Vor- und nachgelagerten Prozessen“ von 0,141 Euro pro Fahrzeugkilometer für den Lkw-Verkehr. (vgl. Matthey und Bünger 2020:28)

## 4.6 Lärmkosten

Auf nationaler Ebene werden keine spezifischen Daten zu den Lärmkosten des SGV erhoben und publiziert. Das UBA berechnet die Lärmkosten des Schienenverkehrs auf Basis der Daten die im Zuge der EU-Umgebungslärmrichtlinie erhoben werden. Diese enthalten Informationen über die Anzahl der von Schienenverkehrslärm betroffenen Personen in Deutschland, differenziert nach Pegelklassen. Mithilfe spezifischer Lärm-Kostensätze, die pro belästigter Person und Pegelstufe definiert sind, werden die Gesamtkosten des Schienenverkehrslärms für Deutschland ermittelt (vgl. Matthey und Bünger 2020:24 ff.).

Die Daten für Deutschland der EU-Umgebungslärmrichtlinie beziehen sich jedoch zum einen auf größere urbane Ballungsräume mit einer Gesamtbevölkerung von etwa 25 Millionen

Menschen. Somit weniger als einem Drittel der Gesamtbevölkerung. Zum anderen werden in der Datenbank Personen erfasst, die entlang von Hauptschienenwegen wohnen. Mit einer erfassten Schienenweglänge von etwa 12.600 Kilometern wird ebenfalls nur ein begrenzter Teil der Lärmbetroffenen berücksichtigt, was ein unvollständiges Bild der tatsächlichen Belastung liefert. (vgl. EEA, 2022)

Im Vergleich dazu wird im *Handbuch der EU-Kommission* dieselbe Datengrundlage verwendet, jedoch ergänzt durch Korrekturfaktoren, um bestehende Datenlücken zu schließen. Hierfür wurden die betroffenen Personen in nicht erfassten Bevölkerungsteilen extrapoliert. Zudem wird zwischen Stadt- und Landbevölkerung unterschieden, um die Auswirkungen des Lärms differenzierter zu bewerten. Für Personen in ländlichen Gebieten, die nicht in der ursprünglichen Statistik enthalten sind, jedoch theoretisch als betroffen gelten, wird ein um drei Dezibel geringeres Lärmniveau angenommen, basierend auf den vorhandenen Daten. Somit wird versucht ein Gesamtbild aller in Deutschland von (Schienen-) Verkehrslärm betroffenen Personen darzustellen. (van Essen u. a. 2019b:234 f.)

Da die Methodik des *Handbuchs der EU-Kommission* als umfassender und präziser eingestuft wird, basieren die Annahmen zu den Lärmkosten in dieser Arbeit auf dessen Ansatz. Eine schematische Übersicht der Berechnungsmethodik ist in Abbildung 13 dargestellt, während die ermittelten Lärmkostensätze für Schienenverkehrslärm in Tabelle 10 aufgeführt sind. Diese Werte repräsentieren europäische Durchschnittswerte; die spezifischen Kostensätze für Deutschland liegen geringfügig höher, wurden jedoch in den vorliegenden Berichten nicht detailliert dokumentiert. Die Einteilung der Pegelstufen erfolgt anhand des Lärmindex  $L_{den}$  (Day-Evening-Night Level), der den über alle Tage des Jahres gemittelten Dauerschallpegel in Dezibel (A) darstellt. Die Kostensätze werden in Euro pro betroffene Person und Jahr angegeben, wobei das Berichtsjahr 2016 ist.

*Tabelle 10: Kostensätze für Schienenverkehrslärm für die EU (pro Person, Jahr, nach Dezibelstufe (A), in €<sub>2016</sub>) (van Essen u. a. 2019b:95)*

<b>Pegelstufe <math>L_{den}</math> (dB(A))</b>	50-54	55-59	60-64	65-69	70-74	$\geq 75$
<b>Kostensatz in €<sub>2016</sub></b>	17	32	34	63	67	72

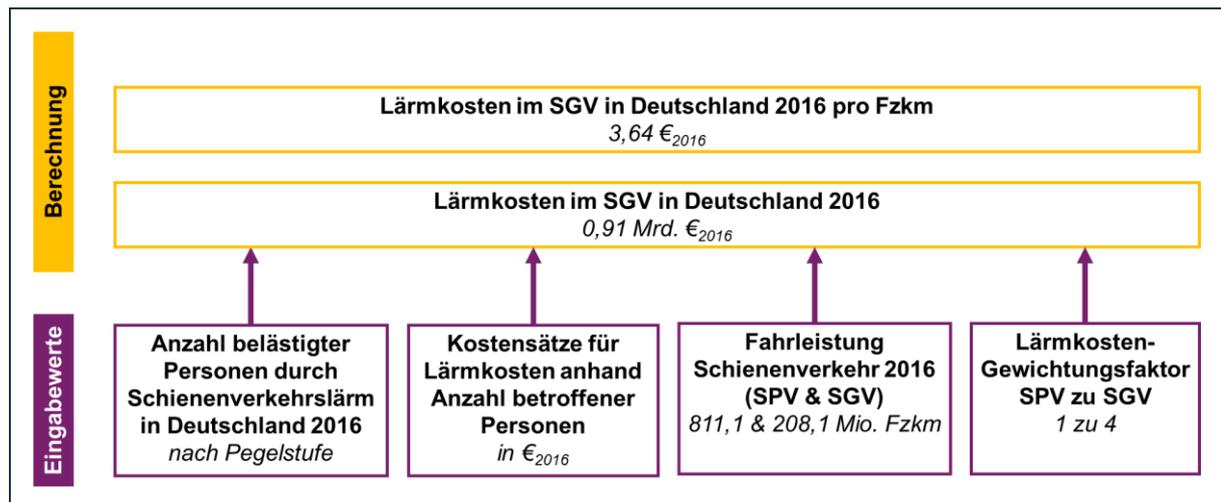


Abbildung 13: Berechnungsmethodik der externen Lärmkosten des SGV in Deutschland 2016 im Handbuch der EU-Kommission (eigene Darstellung nach van Essen et al., 2019b, S. 94 ff.)

Da die wahrgenommene Belästigung durch Lärm in Abhängigkeit vom emittierenden Verkehrsmittel variiert, werden zur Berücksichtigung dieser Unterschiede Gewichtungsfaktoren angewendet. Für den Schienenpersonenverkehr (SPV) wird eine einfache Gewichtung verwendet, während für den SGV ein vierfacher Gewichtungsfaktor angesetzt wird, da dieser generell als störender empfunden wird. (vgl. van Essen u. a. 2019b:95)

Die Berechnung der Gesamtlärmkosten des SPV und des SGV erfolgt auf Grundlage der Fahrleistung in Fahrzeugkilometern, differenziert nach den Verkehrstypen (vgl. Eurostat 2024b), sowie der entsprechenden Gewichtungsfaktoren. Für den SGV beliefen sich die Lärmkosten im Jahr 2016 auf 0,91 Milliarden Euro, was 3,64 Euro pro Fahrzeugkilometer entspricht.

In dieser Arbeit wird auf die zuvor genannten Lärmkosten pro Fahrzeugkilometer im SGV aus dem Jahr 2016 Bezug genommen. Die Kosten werden lediglich inflationsbereinigt auf das Jahr 2022 fortgeschrieben. Eine Anpassung an die Fahrleistung des Jahres 2022 erfolgt hingegen nicht, da dies zu einer Verknüpfung von Lärmkostendaten aus dem Jahr 2016 mit Fahrleistungswerten aus dem Jahr 2022 führen würde, was methodisch als nicht zweckmäßig erachtet wird. Für den SGV ergeben sich daraus inflationsbereinigte Lärmkosten von 4,19 Euro pro Fahrzeugkilometer.

Für den LKW-Verkehr wurden die Lärmkosten für Deutschland aus dem *Handbuch der EU-Kommission* übernommen und ebenfalls inflationsbereinigt auf das Jahr 2022 fortgeschrieben. Die Lärmkosten pro Fahrzeugkilometer belaufen sich auf 0,05 Euro pro Fahrzeugkilometer.

#### **4.7 Flächenverbrauch und Zerschneidung**

Die Berechnung der Kostenkategorie „Flächenverbrauch und Zerschneidung“ basiert auf Daten des UBA, welches die Berechnungsmethodik des Schweizerischen Bundesamtes für Raumentwicklung als Grundlage verwendet. (vgl. Matthey und Bünger 2020:23)

Zur Monetarisierung des Flächenverbrauchs und der Zerschneidung wird der sogenannte Ersatzkostenansatz herangezogen. Für den Flächenverbrauch werden die hypothetischen Kosten geschätzt, die für die Wiederherstellung der verlorenen Biotop- und Ökosystemflächen erforderlich wären. Im Fall der Zerschneidung werden die Kosten für Defragmentierungsmaßnahmen berücksichtigt, wie beispielsweise der Bau von Wildbrücken. Die daraus resultierenden Kostensätze pro Quadratmeter wurden vom UBA auf die deutschen Verkehrsflächen übertragen. Unter Berücksichtigung der durch verschiedene Verkehrsmittel generierten Fahrleistung in Fahrzeugkilometern kann ein durchschnittlicher Kostensatz abgeleitet werden. Für den SGV ergibt sich daraus für das Jahr 2020 ein Kostensatz von 1,30 Euro pro Fahrzeugkilometer. (vgl. Ecoplan & Infras 2014:325 ff.; Matthey & Bünger 2020:23)

Für eine Nutzung des Kostensatzes im Zuge dieser Arbeit wurde eine inflationsbereinigte Fortschreibung auf das Jahr 2022 vorgenommen. Für den SGV ergibt das externe Kosten für den Flächenverbrauch und die Zerschneidung von 1,44 Euro pro Fahrzeugkilometer.

Für den Lkw-Verkehr wurde die selbe Methodik verwendet und ein Kostensatz von 0,012 Euro pro Fahrzeugkilometer berechnet. (vgl. Matthey & Bünger 2020:23)

#### **4.8 Rangierbetrieb**

Die Berechnung externer Kosten für den Rangierbetrieb mittels eines Top-Down-Verfahrens ist aufgrund unzureichender Datenlage nicht möglich. Auch konnten auf Anfrage, wie bereits im Kapitel zum EKV beschrieben, keine Daten gewonnen werden, die eine durchschnittliche Betrachtung oder Verallgemeinerung ermöglichen.

Die ebenfalls erwähnte Studie des DLR in Zusammenarbeit mit Duisport untersuchte im Rahmen der Erforschung von Wasserstoff-Rangierlokomotiven Leistungsdaten von Rangierlokomotiven im Bereich des Duisburger Hafens und der umliegenden Region. Die Rangierlokomotiven von Duisport übernehmen dabei nicht nur Rangierdienste im Hafengelände, sondern auch Transportleistungen im Nahverkehr, insbesondere für angrenzende Industrie- und Chemieparks sowie Verkehre zum Rangierbahnhof Oberhausen. Die Studie dokumentierte zum einen Verbindungen des Regelbetriebs im Streckenregionalverkehr (Nahverkehr) und hinterlegte diese mit Streckenlängen. Zum

anderen wurde ein detailliertes Einsatzprotokoll der Rangierlokomotiven erstellt. Aus den erhobenen Daten geht hervor, dass Rangierfahrten einen hohen Anteil an Leerlaufzeiten aufweisen. Im Vor- und Nachlauf des Streckenregionalverkehrs wurden zusätzlich zwei bis fünf Fahrzeugkilometer für Rangiertätigkeiten erfasst. (vgl. Konrad u. a. 2022:19 ff.)

Im Rahmen dieser Arbeit wird darauf verzichtet, diese Daten für eine Berechnung externer Kosten zu verwenden oder zu verallgemeinern. Die Ergebnisse der Studie beziehen sich auf ein begrenztes Untersuchungsgebiet und sind stark durch regionale Besonderheiten geprägt, wie die hohe Industrieaffinität der Region. Diese Faktoren schränken die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf den SGV in ganz Deutschland ein.

#### **4.9 Umschlag von Ladeeinheiten**

Für den Umschlag von Ladeeinheiten im KV liegen keine ausreichenden Daten vor, um eine detaillierte Betrachtung der externen Kosten analog zu den vorangegangenen Kapiteln durchzuführen. Eine vergleichbare Analyse würde eine umfassende Datengrundlage erfordern, einschließlich einer Unfallstatistik, Untersuchungen zu den Emissionen von Luftschadstoffen durch Umschlaggeräte wie Reachstacker, den Lärmemissionen von Umschlaganlagen in Bezug auf die Anzahl der betroffenen Personen sowie einer Betrachtung des Flächenverbrauchs und der Zerschneidungswirkung, die durch Umschlaganlagen verursacht werden. Da diese Aspekte den Rahmen dieser Arbeit überschreiten, kann an dieser Stelle lediglich auf deren Relevanz verwiesen werden.

Es existieren jedoch bereits Studien, die den Energieverbrauch von Umschlaggeräten im KV analysieren. Auf Basis dieser Daten ist eine Bewertung der externen Kosten durch Klimaschäden im direkten Betrieb sowie durch vorgelagerte Prozesse der Energiebereitstellung möglich.

Eine Studie der TU Dortmund aus dem Jahr 2016 analysierte die CO<sub>2</sub>-Bilanz multimodaler Logistikknoten und untersuchte dabei unter anderem den Energieverbrauch von Umschlaggeräten. Ein zentrales Ergebnis dieser Studie sind die allokierten Verbrauchsdaten auf Containerebene, die den Energieverbrauch für den Umschlag einzelner Ladeeinheiten differenziert nach Containertypen beschreiben. (vgl. Clausen 2016:56)

Eine weitere Studie der Erasmus Universität Rotterdam und der TU Delft aus dem Jahr 2014, *A Top-Down Methodology to Calculate the CO<sub>2</sub> Footprint for Terminal Operations*, untersuchte einen ähnlichen Sachverhalt. Als Ergebnis wurde der durchschnittliche Energieverbrauch pro

Umschlag einer Ladeinheit differenziert nach Umschlaggerätetyp ermittelt. (vgl. Geerlings u. a. 2014:23 ff.) Eine Übersicht der Energieverbräuche ist in Tabelle 11 dargestellt:

*Tabelle 11: Energieverbrauch je Umschlagsgerätetyp (Geerlings u. a. 2014:24 f.).*

<b>Umschlagsgerät</b>	<b>Energieverbrauch pro Umschlag</b>
Kaikran	5,3 kWh
Schienenkran	5 kWh
Reachstacker	1,7 Liter Diesel

Da in dieser Arbeit keine Unterscheidung nach Ladeeinheitentypen vorgenommen wird, jedoch der Umschlag von Ladeeinheiten im Terminal nach Umschlaggerätetyp differenziert betrachtet wird, erweist sich die zuletzt genannte Studie als zielführender.

Auf Basis dieser Energieverbräuche kann eine Berechnung der externen Kosten durch Klimaschäden aus dem direkten Betrieb durchgeführt werden. Dies betrifft jedoch ausschließlich dieselbetriebene Umschlaggeräte, wie den Reachstacker. Analog zur Methodik in Kapitel 4.4 wurden die THG aus der Verbrennung von Diesel berechnet und mit den entsprechenden Kostensätzen multipliziert. Für den Reachstacker ergeben sich daraus externe Kosten von 0,97 Euro pro Umschlag einer Ladeinheit.

Für die vorgelagerten Prozesse können die externen Kosten der Energiebereitstellung auf Basis der Energieverbräuche berechnet werden, ähnlich der Methodik in Kapitel 4.5.1. Dabei werden die Umweltwirkungen der Strom- und Dieselproduktion, in Form von Luftschadstoffen und THG, mit den entsprechenden Kostensätzen multipliziert. Die sich daraus ergebenden externen Kosten durch die Energiebereitstellung sind in Tabelle 12 dargestellt.

*Tabelle 12: Externe Kosten des Umschlags von LE im KV in €<sub>2022</sub> pro Umschlag (eigene Darstellung)*

<b>Umschlaggerät</b>	<b>Vorgelagerte Prozesse</b>	<b>Klimakosten</b>	<b>Gesamtkosten</b>
<b>Containerbrücke</b>	0,62	0,00	<b>0,62</b>
<b>Schienenkran</b>	0,58	0,00	<b>0,58</b>
<b>Reachstacker</b>	0,26	0,97	<b>1,23</b>

Im nachfolgenden Kapitel werden die berechneten externen Kosten der Teilprozesse der Produktionssysteme des SGV noch einmal zusammengefasst.

#### 4.10 Übersicht externe Kostensätze

In Tabelle 13 sind die in den vorangegangenen Kapiteln berechneten durchschnittlichen externen Kosten für die jeweiligen Kostenbereiche in einer Übersicht zusammengefasst. Unterschieden wird dabei zwischen den Fahrzeugkategorien, SGV elektrisch, SGV Diesel und LKW Trailer 28-40 t, der noch zwischen den Streckenarten Außerorts, Innerorts und Autobahn unterteilt ist. Die externen Kostensätze für den Umschalung von Ladeeinheiten finden sich in Kapitel 4.9.

*Tabelle 13: Durchschnittliche externe Kosten der Fahrzeugkategorie in €<sub>2022</sub> pro Fahrzeugkilometer (eigene Darstellung)*

<b>Fahrzeug- kategorie</b>	<b>Strecken- art</b>	<b>Klima- schäden</b>	<b>Luft- versch- mutz- ung</b>	<b>Unfälle</b>	<b>Lärm</b>	<b>Vor- und nach- gelagerte Prozesse</b>	<b>Flächen- verbr. und Zerschn.</b>
<b>SGV elektrisch</b>	-	0,00	0,00	0,18	4,19	3,76	1,44
<b>SGV Diesel</b>	-	2,57	2,64	0,18	4,19	2,70	1,44
<b>LKW</b>	Außerorts	0,161	0,039	0,022	0,052	0,14	0,01
<b>Trailer 28- 40t</b>	Innerorts	0,216	0,103	0,017	0,052	0,14	0,01
	Autobahn	0,16	0,03	0,04	0,052	0,14	0,01

Im nachfolgenden Kapitel werden diese externen Kostensätze verwendet, um die externen Kosten für die jeweiligen Produktionssysteme zu berechnen.

## **5 Berechnungsmodell externer Kosten im SGV**

Auf Grundlage der im vorhergehenden Kapitel hergeleiteten und berechneten Kostensätze für den SGV in Deutschland können die externen Kosten für verschiedene Produktionssysteme ermittelt werden. Durch die Berücksichtigung der in Kapitel 3 herausgearbeiteten Parameter der Teilprozesse – wie Transportgewichte, Leerfahrten und Leerkapazitätsquoten, Streckenlängen und -kategorien sowie der Traktionsart – lassen sich praxisnahe Transportketten für die jeweiligen Produktionssysteme modellieren. Dies ermöglicht eine vergleichende Analyse der externen Kosten im SGV.

Im Folgenden werden Basisszenarien entwickelt, die den Regelbetriebsfall der Produktionssysteme bestmöglich abbilden. Anschließend werden Szenarien entworfen, die einerseits die Sensitivität gegenüber einem höheren CO<sub>2</sub>-Preis untersuchen und andererseits den Einfluss von Lärmkosten analysieren.

Wie bereits in Kapitel 3 ausgeführt, weisen die Transporte innerhalb der jeweiligen Produktionssysteme eine hohe Diversität auf und können in spezifischen Fällen stark voneinander abweichen. Diese Diversität ist eine charakteristische Eigenschaft des SGV und erschwert die Bestimmung allgemeingültiger Transportketten. Daher wurde in dieser Arbeit ein szenariobasierter Ansatz gewählt, der sich, soweit möglich, an Durchschnittswerten orientiert. Diese Durchschnittswerte sind mit den in Kapitel 3 erarbeiteten Modellen der Teilprozesse kompatibel.

Zusätzlich wurde versucht, die Streckenlängen zwischen den Szenarien zu harmonisieren. Dies ist insbesondere im Vergleich zwischen dem EWV und dem KV von Bedeutung, da die jeweiligen Teilprozesse unterschiedliche externe Kostensätze aufweisen. Beispielsweise würde eine Überrepräsentation der Fernfahrt im EWV durch längere Transportstrecken die externen Kosten aufgrund von Effizienzgewinnen reduzieren. Ein ähnlicher Effekt würde beim Hauptlauf im KV auftreten.

Eine allgemeingültige Aussage darüber, inwieweit zusätzliche Knotenpunkte und unterschiedliche Netzdichten zu längeren Transportstrecken führen und wie groß dieser Effekt ist, konnte im Rahmen dieser Arbeit nicht getroffen werden.

### **5.1 Basisszenario der Produktionssysteme**

Nachfolgend wird für die einzelnen Produktionssysteme ein Basisszenario gebildet, welches versucht einen durchschnittlichen Betriebsfall abzubilden.

### 5.1.1 Einzelwagenverkehr

Die in Kapitel 3.1 erarbeiteten Parameter zur Berechnung der externen Kosten im EWW werden nachfolgend spezifiziert und mit entsprechenden Daten belegt. Eine Übersicht der Parameter ist in Tabelle 14 dargestellt. Eine detaillierte Beschreibung der einzelnen Parameter und deren Zusammensetzung erfolgt im folgenden Abschnitt.

Da für die Rangiervorgänge in den ZBA keine Daten zur Verfügung stehen, können diese Teilprozesse im Zuge der Berechnung der externen Kosten nicht betrachtet werden.

#### **Transportstrecke**

Die Streckenlängen der Teilprozesse im EWW basieren auf verschiedenen Datenquellen. Laut der *Sondererhebung Einzelwagenverkehr* der Bundesnetzagentur beträgt die durchschnittliche Transportdistanz im EWW etwa 510 km, wobei jeweils 30 km auf den ersten und letzten Transportabschnitt (Teilprozesse Nahverkehr) entfallen. (vgl. Bundesnetzagentur 2022:9)

Eine ähnliche Einschätzung liefert die Studie der Universität Rom „La Sapienza“ aus dem Jahr 2015, die auf einer Umfrage unter verschiedenen EWW-Betreibern basiert. Hier wurde für den Nahverkehr eine Transportdistanz von unter 100 km angegeben, wobei ein Drittel der Befragten eine Distanz von unter 30 km nannte (vgl. Guglielminetti, u. a. 2015:84). Im Rahmen dieser Studie wurde zudem eine „Standardtransportkette“ erarbeitet, die die Transportkette in die fünf Teilprozesse unterteilt, welche auch dieser Arbeit zugrunde liegen. Dabei entfallen auf den Nahverkehr zusammen 12 % (jeweils 6 %) der Streckenlänge, auf die Übergabefahrten 26 % (jeweils 13 %), und auf die Fernfahrt 63 % (vgl. ebd., S. 119).

Auf Basis dieser Datengrundlagen wurden Annahmen zur Aufteilung der Streckenlänge getroffen. Die Gesamtstrecke von 510 km wurde entsprechend der prozentualen Verteilung auf die Teilprozesse aufgeteilt. Zusätzlich wurde der „Leerlauf“ für die Leerwagendistribution berücksichtigt, um die tatsächlichen Fahrstrecken der Teilprozesse abzubilden. Dabei wurde berücksichtigt, dass diese zum Teil vom Rangierbahnhof aus und zum Teil vom Satelliten aus stattfindet (siehe Tabelle 14).

#### **Güterwagen und Ladung**

Die Anzahl der Güterwagen im Nahverkehr und in den Übergabefahrten kann in der Praxis stark variieren. Für das Basisszenario dieser Arbeit wurden verschiedene Quellen herangezogen und Annahmen getroffen.

Die Studie zum EWW in Europa gibt für die Beispieltransportkette folgende Werte an: 8 Güterwagen im Nahverkehr, 20 Güterwagen auf den Übergabefahrten und 24 Güterwagen auf der Fernfahrt. Dabei wird angenommen, dass jeweils die Hälfte der Güterwagen leer ist. Hinsichtlich des Gewichts geht die Studie von einem Bruttogewicht pro beladenem Güterwagen von 75 Tonnen aus, wovon 25 Tonnen das Leergewicht und 50 Tonnen die Beladung ausmachen. (vgl. Guglielminetti, u. a. 2015:118 f.)

Diese Annahmen wurden übernommen und mit Angaben der DB Cargo verglichen. Da keine allgemeinen Angaben zur durchschnittlichen Anzahl von Güterwagen im EWW vorlagen, wurden die Werte der Studie beibehalten. Hinsichtlich der Leerquote (Anteil leerer Güterwagen im Zug) bestätigte die DB Cargo die Angaben für den Nahverkehr und die Übergabefahrten. Für die Fernfahrt wurde hingegen angepasst, dass nur etwa ein Drittel der Güterwagen leer ist, im Gegensatz zur Hälfte, wie in der Studie angenommen. Für den „Leerlauf“ wurden die gleichen Parameter wie im „Lastlauf“ angesetzt (50 % beladen hin und zurück, Austausch der Güterwagen). (vgl. Interviews DB Cargo vom 15.10. und 24.11.2024)

Das Nettogewicht des Zuges, also ausschließlich die Beladung, wird aus diesen Parametern berechnet, da es für die Analyse der externen Kosten pro Gewichtseinheit relevant ist. Zusätzlich wird das Bruttozuggewicht (inklusive Eigengewicht der Güterwagen und der Traktionseinheit) angegeben, um die Praxistauglichkeit der Werte zu überprüfen. Dabei wird ein Eigengewicht von 25 Tonnen pro Güterwagen, 79 Tonnen für eine Rangierlok im Nahverkehr und 90 Tonnen für eine Streckenlok im Fernverkehr angesetzt (vgl. DB Cargo o. J.; Guglielminetti, u. a. 2015:118 f.). Das Bruttozuggewicht hat jedoch keine direkte Relevanz für die Berechnung der externen Kosten im Zuge dieser Arbeit.

Zusätzlich wurden von der DB Cargo im Rahmen einer kleinen Anfrage im Bundestag durchschnittliche Bruttozuggewichte für den Zeitraum 2010 bis 2018 angegeben. Diese betragen im Mittel 1.059 Tonnen und zeigten im betrachteten Zeitraum nur geringe Schwankungen mit einer maximalen Abweichung von 28 Tonnen (vgl. Bundesregierung 2019:8).

### **Traktion**

Die Angaben zur Traktionsart basieren auf Informationen der DB Cargo. Im Nahverkehr erfolgt die Traktion nahezu ausschließlich mit Diesellokomotiven, weshalb ein Anteil von 100 % Dieseltraktion angesetzt wurde. Für die Übergabefahrten wurde ein Anteil von 20 % elektrischer Traktion angenommen, da einige Fahrten bereits elektrisch durchgeführt werden. Im Fernverkehr werden, mit Ausnahme weniger nicht elektrifizierter Strecken, nahezu

ausschließlich elektrische Lokomotiven eingesetzt, sodass hier ein Anteil von 99 % elektrischer Traktion angenommen wurde. (vgl. Interviews DB Cargo vom 15.10. und 24.11.2024)

### Übersicht der Parameter

Eine Übersicht der Parameter für das Basisszenario ist in Tabelle 14 dargestellt.

*Tabelle 14: Parameter für das Basisszenario EWW (eigene Darstellung)*

Transportabschnitt / Parameter		Nahverkehr	Übergabe	Fernfahrt	Übergabe	Nahverkehr
Anzahl Güterwagen		8	20	28	20	8
Anteil leere Güterwagen (%)		50%	50%	33%	50%	50%
Nettogewicht pro Güterwagen beladen (t)		50	50	50	50	50
Nettozuggewicht (t)		200	500	938	500	200
Bruttozuggewicht (t)		479	1079	1717	1079	479
Streckenlänge (km)	Lastlauf	30	60	330	60	30
	Leerlauf	30	60	-	-	30
Anteil Traktionsart	Diesel	100%	80%	1%	80%	100%
	Elektrisch	0%	20%	99%	20%	0%

### Externe Kosten

Auf Basis der zuvor erarbeiteten Parameter und dem Gerüst der externen Kosten im SGV können nun die externen Kosten für das Basisszenario im EWW berechnet werden. Eine Übersicht der Kosten ist in Tabelle 15 abgebildet. Diese Kosten beziehen sich auf die singuläre Betrachtung eines jeden Teilprozesses und sind somit vorerst unabhängig von der transportierten Lademenge.

Tabelle 15: Externe Kosten des EWV nach Teilprozess und Kostenbereich – Basisszenario (eigene Darstellung)

Teilprozess EWV	Externe Kosten der Teilprozesse in € <sub>2022</sub> (Kosten pro Fzkm)						Gesamt
	Klima- schäden	Luft- versch- mutzung	Unfälle	Lärm	Vor- und nach- gelagerte Proz.	Flächen- verbr. und Zerschn.	
1. Nahverkehr	154,0	158,2	10,5	251,5	162,3	86,3	<b>823</b>
1. Übergabe- fahrt	246,4	253,1	21,1	503,0	341,0	172,6	<b>1.537</b>
Fernfahrt	8,5	8,7	57,9	1.383	1.116,4	474,5	<b>3.049</b>
2. Übergabe- fahrt	123,2	126,6	10,5	251,5	170,5	86,3	<b>769</b>
2. Nahverkehr	154,0	158,2	10,5	251,5	162,3	86,3	<b>823</b>
<b>Gesamt</b>	<b>686</b>	<b>705</b>	<b>111</b>	<b>2.641</b>	<b>1.953</b>	<b>906</b>	<b>7.000</b>

Für die Kontextualisierung relativ zur Lademenge wurde eine weitere Übersicht erstellt, die die externen Kosten für die jeweiligen Transportabschnitte ins Verhältnis zur jeweils transportierten Lademenge setzt (siehe Tabelle 16).

Tabelle 16: Externe Kosten des EWV nach Teilprozess, Tonnage und Transportleistung – Basisszenario (eigene Darstellung)

Teilprozess EWV	Externe Kosten nach Ladung	
	€ <sub>2022</sub> pro Tonne	€-cent <sub>2022</sub> pro Tkm
1. Nahverkehr	4,11	13,71
1. Übergabe- fahrt	3,07	5,12
Fernfahrt	3,25	0,98
2. Übergabe- fahrt	1,54	2,56
2. Nahverkehr	4,11	13,71
<b>Gesamt</b>	<b>16,09</b>	<b><u>3,15</u></b>

Die externen Kosten des Basisszenarios liegen im EWV bei 3,15 €-cent pro Tkm. Dabei variieren sie stark innerhalb der Teilprozesse. Die externen Kosten im Nahverkehr liegen unter anderem aufgrund ihrer geringen Auslastung, ihrem Leerwagendistribution sowie der Dieseltraktion bei 13,71 €-cent pro Tkm. In den Übergabefahrten sorgt eine bessere Auslastung und der höhere Anteil der Elektrotraktion für geringere externe Kosten pro Tkm. Weiterhin finden weniger Leerwagendistributionen über Übergabefahrten statt, was die

unterschiedlichen externen Kosten zwischen den zwei Übergabefahrten zeigen. Die Fernfahrt verursacht mit 0,98 €-cent pro Tkm die mit Abstand geringsten externen Kosten was Großteils an der sehr effizienten Auslastung, der elektrischen Traktion sowie der Tatsache, dass kein zusätzlicher Leerlauf entsteht, liegt.

### 5.1.2 Kontinentaler Kombiniertes Verkehr

Die in Kapitel 3.2 definierten Parameter zur Ermittlung der externen Kosten im KV werden im Folgenden weiter präzisiert und mit relevanten Daten belegt. Eine Übersicht der verwendeten Parameter ist in den Tabellen 17 und 18 unter dem Gliederungspunkt *Übersicht der Parameter* dargestellt. Eine ausführliche Erläuterung der Zusammensetzung der einzelnen Parameter erfolgt im nachstehenden Abschnitt. Für den maritimen KV wird eine separate Berechnung vorgenommen, wobei sich viele Parameter mit denen des kontinentalen KV überschneiden.

Da für die Rangiervorgänge in den Umschlagterminals keine entsprechenden empirischen Daten vorliegen, müssen diese Teilprozesse bei der Berechnung der externen Kosten unberücksichtigt bleiben.

### **Transportstrecke**

Die Längen der Transportabschnitte im KV variieren in der Praxis erheblich, was vergleichbar mit dem EKV ist. Zur Analyse einer Beispielrelation wurden verschiedene Datenquellen herangezogen, die nachfolgend erläutert werden.

Die UIRR (Union Internationale pour le Transport Combiné Rail-Route), die europäische Vereinigung für den KV Schiene-Straße, gibt im Statistikbericht 2023 an, dass die durchschnittliche Transportdistanz im Hauptlauf auf der Schiene im europäischen KV bei etwa 800 km liegt, wobei die Distanz je nach Strecke zwischen 300 km für kurze Relationen und über 1000 km für längere Verkehre variiert (vgl. UIRR 2023:32).

Eine weitere Studie des Fraunhofer IML und der TU Dortmund mit dem Titel *Integrierte Maßnahmen zur Verlagerung von Straßengüterverkehren auf den Kombinierten Verkehr und den Schienengüterverkehr* aus dem Jahr 2019, analysierte ähnlich der Zielstellung dieser Arbeit eine beispielhafte Transportroute für den KV. Auf Basis von Daten des Statistischen Bundesamtes wurde darin eine durchschnittliche Transportdistanz im Hauptlauf des KV-Schiene von 510 km berechnet. (vgl. Clausen u. a. 2019:70 ff.)

Aufgrund des nationalen Kontextes dieser Arbeit und der guten Vergleichbarkeit mit der Transportdistanz im EKV wurde der Wert von 510 km für den Hauptlauf herangezogen.

Der Vorlauf und Nachlauf im KV wurden unter anderem in der *Verkehrsverflechtungsprognose 2030* aus dem Jahr 2014 analysiert. Dabei ergab sich eine durchschnittliche Streckenlänge von 26,5 km für den Vorlauf und 30,5 km für den Nachlauf (vgl. Intraplan 2014:116). Eine ähnliche Einschätzung liefert die zuvor erwähnte Studie des Fraunhofer IML und der TU Dortmund, die für beide Teilprozesse eine durchschnittliche Transportdistanz von 30 km berechnet hat (vgl. Clausen u. a. 2019:70). Aufgrund der Übereinstimmung dieser Ergebnisse wurde für die vorliegende Arbeit eine vereinfachte Annahme von 30 km für sowohl den Vorlauf als auch den Nachlauf angesetzt. Der Anteil des LKW-Verkehres nach Streckentyp ergibt sich aus den Annahmen zur Emissionsberechnung des UBA. (vgl. Matthey und Bünger 2020:21)

### **Anzahl Ladeeinheiten, Zuglänge und Gewicht**

Hinsichtlich des durchschnittlichen Gewichts von Ladeeinheiten wurde in Gesprächen mit KV-Operateuren ein durchschnittliches Gewicht einer Ladeeinheit von 19 Tonnen ermittelt. Abzüglich des Eigengewichts der Ladeeinheit (ca. 2 Tonnen für einen 20-Fuß-Container, 4 Tonnen für einen 40-Fuß-Container und 6,7 Tonnen für einen Sattelaufleger) ergibt sich ein durchschnittliches Nettogewicht der Ladung von 15 Tonnen. Eine ähnliche Schätzung findet sich in der Studie von Clausen et al. (2019), die ein Nettogewicht der Ladung von 14,7 Tonnen annehmen (vgl. Clausen et al., 2019, S. 70).

Die Anzahl der transportierten Ladeeinheiten im KV wird wesentlich durch das maximale Gewicht und die maximale Länge des Zuges bestimmt. Infrastrukturelle oder fahrzeugtechnische Grenzwerte können hierbei limitierende Faktoren sein. So kann eine Überladung mit schweren Einheiten dazu führen, dass Stellplätze im Zug ungenutzt bleiben, da das Maximalgewicht erreicht ist. Andererseits kann eine Überzahl an leichten oder leeren Ladeeinheiten dazu führen, dass der Zug unterausgelastet ist und sein Potenzial nicht vollständig ausschöpft (vgl. Stuhr u. a. 2023:131). Die Aufgabe des KV-Operators besteht daher darin, einen optimalen Mix an Ladeeinheiten zu erstellen, um die Effizienz des Zuges zu maximieren.

Züge im KV können in der Regel nicht vollständig mit beladenen Einheiten ausgelastet werden. Neben nicht belegten Stellplätzen werden auch leere Ladeeinheiten transportiert. Angaben von KV-Operateuren bestätigen, dass im Durchschnitt 10 % der Stellplätze ungenutzt und 20 % der Ladeeinheiten leer sind. Diese Werte stimmen mit den Annahmen der Studie des Fraunhofer IML und der TU Dortmund überein und werden auch in dieser Arbeit verwendet. (vgl. Clausen u. a. 2019:80).

Auf Grundlage dieser Daten sowie zusätzlicher Angaben eines in Deutschland tätigen KV-Operators wurden exemplarische Züge für den maritimen und kontinentalen KV zusammengestellt. Der durchschnittliche Grenzwert für die maximale Zuglänge liegt im betrachteten Szenario bei 700 Metern, und das maximale Zuggewicht beträgt 1.600 Tonnen.

### **Traktion**

Im Hauptlauf des KV wird, mit Ausnahme weniger nicht elektrifizierter Strecken, nahezu ausschließlich elektrische Traktion verwendet. Daher wird analog zum EWV ein Anteil von 99 % elektrischer Traktion angesetzt (vgl. Interview HUPAC vom 03.01.2025).

Für den Lkw-Verkehr wird in dieser Arbeit keine Differenzierung nach Antriebsarten vorgenommen, da der Schwerpunkt auf dem SGV liegt. Eine tiefergehende Analyse, die etwa zwischen Diesel-Lkw (Euro IV, V) und E-Lkw differenziert, hätte den Rahmen dieser Arbeit überschritten. Folglich wird für die Berechnung ein durchschnittlicher Diesel-Lkw herangezogen.

### **Zugkomposition**

Für den kontinentalen KV wurde ein Zug gewählt, der ausschließlich mit Sattelaufliegern beladen ist, der gängigsten Ladeeinheit im kontinentalen KV. Die Parameter orientieren sich an der Studie des Fraunhofer IML und der TU Dortmund. Der Zug besteht aus 20 Taschenwagen vom Typ Sdggmrss, die jeweils zwei Sattelaufleger transportieren können. Der Zug hat eine Länge von 700 Metern und ein Eigengewicht von 780 Tonnen (ohne Ladeeinheiten). Ein leerer Sattelaufleger wiegt durchschnittlich 7 Tonnen. (vgl. Clausen u. a. 2019:80).

Für den Vor- und Nachlauf transportiert jeder Lkw jeweils einen Sattelaufleger. Der Transport der leeren Einheiten wird gemäß der Parameter für Last- und Leerlauf berechnet. Das Leergewicht eines gesamten Sattelzugs (bestehend aus Sattelaufleger und Zugmaschine) liegt bei 16 Tonnen (vgl. ebd.).

### **Umschläge**

Für den Umschlag wird basierend auf dem gängigen Umschlagequipment in den deutschen Terminals ein Umschlag mit einem ReachStacker und ein Umschlag mit einem Portalkran durchgeführt (vgl. SGKV 2024a). Da es sich um Sattelaufleger handelt, die nicht gestapelt werden, wird kein weiterer Zwischenhub angenommen.

## Übersicht der Parameter

Eine Übersicht der Parameter des Hauptlaufs sowie der Vor- und Nachläufe ist in Tabelle 17 dargestellt. Die Übersicht zu den Umschlägen findet sich in Tabelle 18.

*Tabelle 17: Parameter der Zug- und LKW-Fahrten für das Basisszenario kontinentaler KV (eigene Darstellung)*

Parameter / Transportabschnitt		Vorlauf	Hauptlauf	Nachlauf
Kapazität Sattelaufleger (Anzahl)		1	40	1
Geladene Sattelaufleger (Anzahl)		1	32	1
Anteil leere Sattelaufleger (%)		-	20%	-
Nettogewicht pro Ladung (t)		15	15	15
Nettogewicht Zug / LKW (t)		15	480	15
Bruttogewicht Zug / LKW (t)		31	1443	31
Zuglänge (m)		-	700	-
Streckenlänge (km)	Lastlauf	30	510	30
	Leerlauf	30	-	30
Streckentyp (anteilig)	Autobahn	61%	-	61%
	Außerorts	25%	-	25%
	Innerorts	14%	-	14%
Traktionsart (anteilig)	Diesel	-	1%	-
	Elektrisch	-	99%	-

*Tabelle 18: Parameter der Umschläge für das Basisszenario kontinentaler KV*

Parameter	Umschlag Straße - Schiene	Umschlag Schiene - Straße
Umschlaggerät	Reachstacker	Portalkran
Anzahl Hübe im Umschlagterminal	1	1

## Externe Kosten

Auf Grundlage der erarbeiteten Parameter und der Methodik zur Berechnung externer Kosten im SGV wurden die externen Kosten für das Basisszenario des kontinentalen KV berechnet. Eine Übersicht der externen Kosten für die einzelnen Teilprozesse ist in Tabelle 19 dargestellt. Diese Berechnung bezieht sich auf die singuläre Betrachtung eines jeden Teilprozesses und ist vorerst unabhängig von der transportierten Lademenge.

Tabelle 19: Externe Kosten des kontinentalen KV nach Teilprozess und Kostenbereich – Basisszenario (eigene Darstellung)

Teilprozess KV	Externe Kosten der Teilprozesse in € <sub>2022</sub> (Kosten pro Fzkm)						Gesamt
	Klimaschäden	Luftverschmutzung	Unfälle	Lärm	Vor- und nachgelagerte Proz.	Flächenverbr. und Zerschn.	
Vorlauf	9,9	2,6	2,0	3,1	8,5	0,7	<b>26,9</b>
Umschlag	0,00	-	-	-	0,58	-	<b>0,58</b>
Hauptlauf	13,1	13,4	89,5	2137,6	1725,7	733,4	<b>4713</b>
Umschlag	0,97	-	-	-	0,26	-	<b>1,23</b>
Nachlauf	9,9	2,6	2,0	3,1	8,5	0,7	<b>26,9</b>
<b>Gesamt</b>	<b>33,9</b>	<b>18,7</b>	<b>93,6</b>	<b>2144</b>	<b>1744</b>	<b>734,8</b>	<b>4768</b>

Für die Kontextualisierung relativ zur Lademenge wurde eine weitere Übersicht erstellt, die die externen Kosten für die jeweiligen Transportabschnitte ins Verhältnis zur jeweils transportierten Lademenge setzt:

Tabelle 20: Externe Kosten des kontinentalen KV nach Teilprozess, Tonnage und Transportleistung – Basisszenario (eigene Darstellung)

Teilprozess Kontinentaler KV	Externe Kosten nach Ladung	
	€ <sub>2022</sub> pro Tonne	€-cent <sub>2022</sub> pro Tkm
Vorlauf	1,79	6,0
Umschlag 1	0,05	-
Hauptlauf	9,82	1,9
Umschlag 2	0,11	-
Nachlauf	1,79	6,0
<b>Gesamt</b>	<b>13,57</b>	<b><u>2,38<sup>1</sup></u></b>

Tabelle 20 zeigt, dass für den kontinentalen KV 2,38 Euro-cent pro Tkm anfallen. Dabei verursacht der Vor- und Nachlauf mit 6 Euro-cent pro Tkm wesentlich mehr externe Kosten als der Hauptlauf mit 1,9 Euro-cent pro Tkm. Aufgrund der kurzen Distanzen fällt Vor- und Nachlauf aber wenig ins Gewicht. Die externen Kosten des Umschlags der Ladeinheit werden

<sup>1</sup> Die Kosten für den Umschlag sind mit eingepreist.

im Preis pro Tonnenkilometer mit eingepreist, fallen jedoch aufgrund ihrer Geringfügigkeit kaum ins Gewicht.

### 5.1.3 Maritimer Kombiniertes Verkehr

Für den maritimen KV werden ein Großteil der Parameter aus dem Basisszenario des Kontinentalen KV genutzt. Gleich geblieben sind die Streckenlängen, die Traktionsart, der Streckentyp für den Lkw-Verkehr sowie die Grenzwerte für die Zuglänge und das Zuggewicht. Verändert hat sich die Komposition der verwendeten Güterwagen.

#### **Zugkomposition**

So besteht der exemplarische Zug im Fall des maritimen KV aus 10 Standard-Containertragwagen (Sgmmns(s) 40') mit der Kapazität von jeweils 2 TEU sowie 20 Doppel-Containertragwagen (Sggrs(s) 80') mit der Kapazität von jeweils 4 TEU. Inklusive Lokomotive besitzt der Zug damit ein Eigengewicht von 815 Tonnen und hat eine Länge von circa 690 Metern (vgl. VTG o. J.). Für die jeweilige Anzahl an 20- und 40-Fuß-Containern wurde sich am Ladeeinheitenmix in Deutschland orientiert (SGKV 2024f:8). Für diesen Zug wird, bei einer Kapazität von 100 TEU und unter Einbezug der leeren Stellplätze von 10%, von einer Beladung von 10 TEU sowie 40 FEU ausgegangen. Also insgesamt 50 Ladeeinheiten auf dem Zug.

#### **Umschläge**

Im maritimen KV kommt es in den Terminals zu Zwischenhüben, die nicht der direkten Wechsel zwischen den Verkehrsträgern betreffen. Für Container in Terminals in Deutschland wird von circa zwei Hüben pro Container und Terminal ausgegangen, was aus einer Nachfrage bei der SGKV herauskam.

Für die maritime Seite der Transportkette wird vom Umschlag mit einer Containerbrücke ausgegangen, wobei ein weiterer Umschlag mittels Portalkran stattfindet. Im Hinterland der zweifache Umschlag mittels eines Portalkrans (vgl. SGKV 2024a). Nachfolgend werden die Parameter des maritimen KV zusammengefasst.

#### **Übersicht der Parameter**

Die verbleibenden Parameter ergeben sich anhand der zuvor (Kapitel 5.1.2) getroffenen Annahmen und sind in der nachfolgenden Tabelle 21 dargestellt. Ein FEU (40-Fuß-Container) entspricht dabei zwei TEU.

*Tabelle 21: Parameter der Zug- und LKW-Fahrten für das Basisszenario maritimer KV (eigene Darstellung)*

Parameter / Transportabschnitt	Hauptlauf	Vor- oder Nachlauf
Kapazität TEU / FEU	100 / 50	1
Anzahl geladene TEU	10	1
Anzahl geladene FEU	40	
Anzahl geladene Ladeeinheiten gesamt	50	-
Anteil leere Ladeeinheiten (%)	20	-
Nettogewicht pro Ladung (t)	15	15
Nettogewicht Zug / LKW (t)	600	15
Bruttogewicht Zug / LKW (t)	1577	34
Zuglänge (m)	690	-
Streckenlänge (km)	Lastlauf	510
	Leerlauf	-
Traktionsart (anteilig)	Diesel	1%
	Elektrisch	99%
Streckentyp (anteilig)	Autobahn	-
	Außerorts	-
	Innerorts	-
		61%
		25%
		14%

*Tabelle 22: Parameter der Umschläge für das Basisszenario maritimer KV (eigene Darstellung)*

Parameter	Umschlag Maritim - Schiene	Umschlag Schiene - Straße
Umschlaggerät	Containerbrücke	Portalkran
Anzahl Hübe im Umschlagterminal	2	2

## Externe Kosten

Auf Grundlage der erarbeiteten Parameter und der Methodik zur Berechnung externer Kosten im SGV wurden die externen Kosten für das Basisszenario des maritimen KV berechnet. Eine Übersicht der externen Kosten für die einzelnen Teilprozesse ist in Tabelle 23 dargestellt. Diese Berechnung bezieht sich auf die singuläre Betrachtung eines jeden Teilprozesses und ist vorerst unabhängig von der transportierten Lademenge.

Tabelle 23: Externe Kosten des maritimen KV nach Teilprozess und Kostenbereich – Basisszenario (eigene Darstellung)

Teilprozess KV	Externe Kosten der Teilprozesse in € <sub>2022</sub> (Kosten pro Fzkm)						Gesamt
	Klima-schäden	Luft-versch-mutung	Unfälle	Lärm	Vor- und nach-gelagerte Proz.	Flächen-verbr. und Zerschn.	
1. Umschlag	0,00	-	-	-	1,19	-	<b>1,2</b>
Hauptlauf	13,09	13,45	89,50	2.137,58	1.725,70	733,38	<b>4.713</b>
2. Umschlag	0,00	-	-	-	1,15	-	<b>1,2</b>
Nachlauf	9,93	2,62	2,05	3,10	8,48	0,71	<b>26,9</b>
<b>Gesamt</b>	<b>23,0</b>	<b>16,1</b>	<b>91,5</b>	<b>2.141</b>	<b>1.737</b>	<b>734,1</b>	<b>4.742</b>

Für die Kontextualisierung relativ zur Lademenge wurde eine weitere Übersicht erstellt, die die externen Kosten für die jeweiligen Transportabschnitte ins Verhältnis zur jeweils transportierten Lademenge setzt.

Tabelle 24: Externe Kosten des maritimen KV nach Teilprozess, Tonnage und Transportleistung – Basisszenario (eigene Darstellung)

Teilprozess Kontinentaler KV	Externe Kosten nach Ladung	
	€ <sub>2022</sub> pro Tonne	€-cent <sub>2022</sub> pro Tkm
1. Umschlag	0,08	-
Hauptlauf	7,85	1,50
2. Umschlag	0,08	-
Vor- oder Nachlauf	1,79	6,00
<b>Gesamt</b>	<b>9,80</b>	<b><u>1,82</u><sup>2</sup></b>

Tabelle 24 zeigt, dass für den maritimen KV 1,82 Euro-cent pro Tkm anfallen. Dabei verursacht der Vor- oder Nachlauf mit 6 Euro-cent pro Tkm wesentlich mehr externe Kosten als der Hauptlauf mit 1,5 Euro-cent pro Tkm. Aufgrund der kurzen Distanzen fällt der Vor- oder Nachlauf aber wenig ins Gewicht. Die externen Kosten des Umschlags der Ladeeinheit werden im Preis pro Tonnenkilometer mit eingepreist, fallen jedoch aufgrund ihrer Geringfügigkeit kaum ins Gewicht.

<sup>2</sup> Die Umschläge sind eingepreist.

### 5.1.4 Ganzzugverkehr

Die in Kapitel 3.3 definierten Parameter zur Berechnung der externen Kosten im GV werden nachfolgend konkretisiert und durch entsprechende Daten untermauert. Eine Übersicht der verwendeten Parameter ist in Tabelle 26 unter dem Gliederungspunkt *Zugkomposition* dargestellt. Die detaillierte Beschreibung der einzelnen Parameter und deren Zusammensetzung erfolgt im anschließenden Abschnitt.

#### **Streckenlänge**

Zur Sicherstellung der Vergleichbarkeit mit den Parametern des EWW und des KV wurde für die Streckenlänge im GV eine Distanz von 500 km festgelegt. Da im GV keine komplexe Teilprozessstruktur mit unterschiedlichen Nettogewichten existiert, hat die Streckenlänge nur einen begrenzten Einfluss auf die relativen externen Kosten je transportierter Ladung. Gleiches gilt für den Leerlauf: Da in diesem Abschnitt keine Güter transportiert werden, kann dieser keinem transportierten Volumen zugeordnet werden. Somit fließt der Leerlauf ausschließlich als zusätzlicher Streckenabschnitt in die Berechnung ein (siehe Tabelle 26).

#### **Güterwagen und Ladung**

Das charakteristische Merkmal des GV ist der Transport kompletter Züge, die ausschließlich mit einer bestimmten Gutart beladen sind (siehe Kapitel 3.3). Dies beeinflusst maßgeblich die Wahl der verwendeten Güterwagen sowie deren Beladung.

Die im GV transportierten Güter bestehen überwiegend aus Massengütern. Clausen und Geiger nennen dabei vor allem Kohle, Erz, Mineralöl sowie Fahrzeuge der Automobilindustrie als dominierende Güterarten (vgl. Clausen und Geiger 2013:169). Auch die Studie von Roland Berger hebt Erz, Kohle, Stahl und Mineralöl als zentrale Gütergruppen hervor (vgl. Roland Berger 2021:40). Ergänzend nennen Stuhr et al. weitere Güterarten wie Stammholz und Kalisalze (vgl. Stuhr u. a. 2023:193 f.).

Da in der Literatur keine praxisnahen Beispiele für vollständige GV-Zusammenstellungen verfügbar sind, wurde im Rahmen dieser Arbeit drei typische GV-Züge konstruiert. Diese basieren auf den genannten Stammbereichen und umfasst exemplarisch den Transport von Schüttgütern (Erz, Kohle), Flüssiggütern (Mineralöl) und Stückgütern (Automobilfahrzeuge). Damit wird versucht den GV-Markt realitätsnah abzubilden und verschiedene Wagentypen mit unterschiedlichen Zuladungen berücksichtigt (siehe Tabelle 25).

Tabelle 25: Beispielhafte Güterwagen im GV (eigene Darstellung nach DB Cargo, o. J.b; GATX, o. J.)

Transportgut	Güterwagen	Typ	Länge in m	Gewicht in t	Max. Zuladung	Lade-raum
Erz und Kohle (Schüttgut)	offene Schüttgutwagen	Facs 124	19,04	25	55	70 m <sup>3</sup>
Automobile	Autotransportwagen	Laaeffrs 561	33	36,5	35,5	12 PKW
Mineralöl (Flüssiggut)	Mineralöl-Kesselwagen	Zans / GATX Typ 1693	16,5	23,6	66,4	95 m <sup>3</sup>

Für die Konstruktion der Ganzzüge wurde eine maximale Zuglänge von 700 m angesetzt, analog zu den im KV verwendeten Werten. Züge im GV können beim Transport von schweren Massengütern auf einer Länge von 700 m *theoretisch* ein viel höheres Gewicht erreichen, da sie aufgrund der hohen Dichte des Transportgutes eine hohe Längenmasse aufweisen. Stuhr et al. geben für einen Kohlezug mit 700 m ein theoretisches Gewicht von 4.830 Tonnen an (vgl. Stuhr u. a. 2023:131). Allerdings verhindern infrastrukturelle- sowie fahrzeugtechnische Grenzwerte, dass solche Züge eingesetzt werden können. Unter Betrachtung von verschiedenen Grenzlasten auf deutschen Schienenstrecken und wurde im Rahmen dieser Arbeit ein maximales Zuggewicht von 2.400 Tonnen angesetzt (vgl. DB InfraGO 2024).

### Traktion

Für den GV wird, analog zu den Annahmen im EWW und KV, eine Verteilung der Traktionsarten von 99 % elektrischer Traktion und 1 % Dieseltraktion angenommen. Diese Annahme basiert auf der üblichen Verwendung von Streckenlokomotiven im Fernverkehr (vgl. Stuhr u. a. 2023:195)

Weiterhin ist für die Traktion von Zügen mit einer Zugmasse größer als 2.000 Tonnen eine in der Regel eine weitere Lokomotive nötig (vgl. ebd., S. 130). Das Szenario der Doppeltraktion wurde bei den entsprechenden Zügen berücksichtigt und die externen Kostensätze entsprechend angepasst. Die Kostensätze dazu befinden sich im Anhang (Tabelle 40).

### Zugkomposition

Für Schüttgut- und Kesselwagen wurde eine vollständige Ausnutzung der maximalen Zuladung angenommen. Beim Autotransportwagen wurde das durchschnittliche Gewicht eines Neufahrzeugs in Deutschland von 1,6 Tonnen zugrunde gelegt (vgl. UBA 2022) Unter

Berücksichtigung der Bruttogewichte und Längen der Waggonen wurden exemplarische Züge unter Einhaltung der zulässigen Grenzlaster zusammengestellt (siehe Tabelle 26).

Tabelle 26: Parameter der Zugfahrten für das Basisszenario GV (eigene Darstellung)

Zugart/ Parameter		Schüttgutzug	Automobilzug	Flüssiggutzug
Anzahl Güterwagen		28	20	20
Eigengewicht Zug (inkl. Lok) (t)		860	810	750
Nettogewicht pro Güterwagen beladen (t)		55	30	66
Nettozuggewicht (t)		1540	600	1650
Bruttozuggewicht (t)		2400	1410	2400
Zuglänge (m)		552	679	431
Streckenlänge (km)	Lastlauf	550	550	550
	Leerlauf	550	550	550
Anteil Traktionsart	Diesel	1%	1%	1%
	Elektrisch	99%	99%	99%

### Externe Kosten

Auf Grundlage der definierten Parameter wurden die externen Kosten für die drei Beispielzüge im GV berechnet (siehe Tabelle 27). Aufgrund der notwendigen Doppeltraktion im beim Schüttgut- und Flüssiggutzug und dieser Sachverhalt im Bereich Klimaschäden, Luftverschmutzung und Vor- und nachgelagerten Prozessen durch veränderte Kostensätze eingepreist. Eine Übersicht der aktualisierten Kostensätze befindet sich im Anhang.

Tabelle 27: Externe Kosten des GV nach Zugarten und Kostenbereich – Basisszenario (eigene Darstellung)

Zugart GV	Externe Kosten der Teilprozesse in € <sub>2022</sub> (Kosten pro Fzkm)						Gesamt
	Klima- schäden	Luft- versch- mutzung	Unfälle	Lärm	Vor- und nach- gelagerte Proz.	Flächen- verbr. und Zerschn.	
Schütt- gut	56,5	58,0	193,0	4.610,5	5.448,6	1.581,8	<b>11.948</b>
Auto- mobil	28,2	29,0	193,0	4.610,5	2.982,6	1.581,8	<b>9.425</b>
Flüssig- gut	56,5	58,0	193,0	4.610,5	5.448,6	1.581,8	<b>11.948</b>

Zur differenzierten Bewertung der externen Kosten im GV wurde eine weitere Analyse durchgeführt, bei der die externen Kosten der betrachteten Zugarten in Relation zur jeweils transportierten Lademenge gesetzt wurden. Diese Darstellung ermöglicht eine Einschätzung der Umweltwirkungen bezogen auf die transportierte Masse sowie auf die erbrachte Transportleistung.

*Tabelle 28: Externe Kosten des GV nach Zugarten, Tonnage und Transportleistung – Basisszenario (eigene Darstellung)*

Zugart GV	Externe Kosten nach Ladung	
	€ <sub>2022</sub> pro Tonne	€-cent <sub>2022</sub> pro Tkm
Schüttgut	7,76	1,41
Automobil	15,71	2,86
Flüssiggut	7,24	1,32

Die Ergebnisse in Tabelle 28 zeigen, dass bei den externen Kosten pro Tonnenkilometer der Automobiltransport mit 2,86 Euro-Cent pro Tkm mehr als doppelt so teuer ist als der Transport von Schüttgütern (1,41 Euro-Cent pro Tkm) und Flüssiggütern (1,31 Euro-Cent pro Tkm). Dies verdeutlicht, dass Massengütertransporte aufgrund höherer Auslastung und effizienterer Güterwagen geringere Umweltwirkungen pro Transporteinheit aufweisen.

#### 5.1.5 Zusammenfassung der externen Kosten - Basisszenario

Zur abschließenden Bewertung der externen Kosten im SGV wurden die zuvor berechneten Werte der unterschiedlichen Produktionssysteme zusammengefasst. Die nachfolgende Tabelle 29 gibt einen Überblick über die externen Kosten pro transportierter Tonne sowie pro Tonnenkilometer (€-Cent/Tkm) für den EWV, den kontinentalen und maritimen KV sowie den GV mit verschiedenen Transportgütern.

*Tabelle 29: Übersicht der externen Kosten der Produktionssysteme im Kontext der Transportmenge und -leistung im Basisszenario (eigene Darstellung)*

Produktionssysteme	€ <sub>2022</sub> pro transportierte Tonne	€-cent <sub>2022</sub> pro Tkm
EWV	16,09	3,15
Kontinentaler KV	13,57	2,38

Maritimer KV	9,80	1,82
GV Schüttgut	7,76	1,41
GV Automobil	15,71	2,86
GV Flüssiggut	7,24	1,32

Die Analyse verdeutlicht, dass der GV, insbesondere bei Massengütern, die geringsten externen Kosten aufweist. Der EWV hingegen verursacht aufgrund seiner geringeren Auslastung die höchsten externen Kosten. Der KV liegt kostenmäßig zwischen diesen beiden Produktionssystemen, wobei der maritime KV gegenüber dem kontinentalen KV durch einen Vor- bzw. Nachlauf weniger günstiger abschneidet.

Nachfolgend wird die Sensitivität des Basisszenarios bezüglich eines erhöhten CO<sub>2</sub>-Preises überprüft.

## 5.2 Szenario 2: höherer CO<sub>2</sub>-Preis

Die Berechnung der externen Kosten der verschiedenen Produktionssysteme im SGV basiert auf zahlreichen Annahmen. Eine der maßgeblichen Einflussgrößen für die Berechnung der externen Kostensätze in Kapitel 4 ist der zugrunde gelegte CO<sub>2</sub>-Preis von 214,89 Euro pro Tonne emittiertem CO<sub>2</sub>-Äquivalent. Wie in Kapitel 4.4 erläutert, beruht dieser Wert auf einer angenommenen reinen Zeitpräferenzrate (RZPR) von 1 %. Dies impliziert, dass die zukünftigen Schäden durch heute ausgestoßene THG mit der Zeit als weniger gravierend bewertet werden. Konkret bedeutet dies, dass die Auswirkungen heutiger THG-Emissionen in 60 Jahren lediglich noch mit 55 % ihres ursprünglichen Schadenspotenzials berücksichtigt werden.

Da dieser Bewertungsansatz wissenschaftlich umstritten ist, wird in der Fachliteratur empfohlen, im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse auch einen CO<sub>2</sub>-Preis auf Basis einer RZPR von 0 % zu betrachten. Bei einer RZPR von 0 % werden zukünftige Schäden durch heutige Emissionen als ebenso gravierend wie gegenwärtige Schäden eingestuft. Der inflationsbereinigte CO<sub>2</sub>-Preis beträgt in diesem Fall 749,36 Euro pro Tonne emittiertem CO<sub>2</sub>-Äquivalent. Die Veränderung von 214,89 Euro auf 749,36 Euro entspricht dabei einem Anstieg um das 3,5-fache. (vgl. Matthey und Bünger 2020:8)

In den folgenden Kapiteln werden die externen Kosten der Produktionssysteme unter Berücksichtigung dieses alternativen CO<sub>2</sub>-Preises neu berechnet. Die Ergebnisse werden anschließend in Relation zur transportierten Ladungsmenge und zur erbrachten Transportleistung gesetzt. Dies ermöglicht einen erneuten, differenzierten Vergleich der Produktionssysteme unter veränderten Rahmenbedingungen und liefert Erkenntnisse hinsichtlich der Sensitivität der externen Kosten gegenüber der Wahl des CO<sub>2</sub>-Preises.

### 5.2.1 Einzelwagenverkehr

Die Auswirkungen des erhöhten CO<sub>2</sub>-Preises auf die externen Kosten im Verhältnis zur Ladung sowie zur Transportleistung im E WV ist in Tabelle 30 dargestellt. Die vollständige externe Kostenberechnung der Teilprozesse des E WV befindet sich im Anhang (Tabelle 41).

*Tabelle 30: Externe Kosten des E WV nach Teilprozess, Tonnage und Transportleistung - Szenario höherer CO<sub>2</sub>-Preis (eigene Darstellung)*

Teilprozess E WV	Externe Kosten nach Ladung		Veränderung gegenüber Basisszenario (%)
	€ <sub>2022</sub> pro Tonne	€-cent <sub>2022</sub> pro Tkm	
1. Nahverkehr	7,58	25,3	+ 84
1. Übergabe- fahrt	5,64	9,4	+ 83
Fernfahrt	5,78	1,8	+ 83
2. Übergabe- fahrt	2,82	4,7	+ 83
2. Nahverkehr	7,58	25,3	+ 84
<b>Gesamt</b>	<b>29,40</b>	<b>5,76</b>	<b>+ 83</b>

Die Berechnungen zeigen, dass sich alle Teilprozesse des E WV fast gleichermaßen um 83 bzw. 84 % erhöhen, trotz unterschiedlicher Anteile der Traktionsarten. Das ist darauf zurückzuführen, dass zwar im Nahverkehr und der Übergabefahrt die Kosten im Bereich „Klimaschäden“ aufgrund der (teilweise) Traktion mit Diesellokomotiven stark ansteigen, der Kostenbereich „Vor- und nachgelagerten Prozesse“ bei der Fernfahrt jedoch ebenso ansteigt, wodurch sich diese Diskrepanz wieder ausgleicht.

Im Kontext der generell hohen Abhängigkeit von CO<sub>2</sub>-intensiven Kraftstoffen im Verkehrssektor zeigen die Ergebnisse eine moderate Sensitivität der externen Kosten des E WV gegenüber der Erhöhung im CO<sub>2</sub>-Preis.

## 5.2.2 Kontinentaler und maritimer Kombiniertes Verkehr

Die Auswirkungen des erhöhten CO<sub>2</sub>-Preises auf die externen Kosten im Verhältnis zur Ladung sowie zur Transportleistung im kontinentalen sowie maritimen KV sind in Tabelle 31 und Tabelle 32 dargestellt. Die externen Kosten wurden unter Berücksichtigung des erhöhten CO<sub>2</sub>-Preises neu berechnet und mit dem Basisszenario verglichen. Die vollständige externe Kostenberechnung der Teilprozesse des KV befindet sich im Anhang (Tabellen 42 und 43).

*Tabelle 31: Externe Kosten des kontinentalen KV nach Teilprozess, Tonnage und Transportleistung – Szenario höherer CO<sub>2</sub>-Preis (eigene Darstellung)*

Teilprozess Kontinentaler KV	Externe Kosten nach Ladung		Veränderung gegenüber Basisszenario (%)
	€ <sub>2022</sub> pro Tonne	€-cent <sub>2022</sub> pro Tkm	
Vorlauf	4,20	14,0	+ 134
Umschlag 1	0,12	-	+ 212
Hauptlauf	17,45	3,4	+ 78
Umschlag 2	0,28	-	+ 243
Nachlauf	4,20	14,0	+ 134
<b>Gesamt</b>	<b>26,24</b>	<b>4,60<sup>3</sup></b>	<b>+ 94</b>

*Tabelle 32: Externe Kosten des maritimen KV nach Teilprozess, Tonnage und Transportleistung - Szenario höherer CO<sub>2</sub>-Preis (eigene Darstellung)*

Teilprozess Maritimer KV	Externe Kosten nach Ladung		Veränderung gegenüber Basisszenario (%)
	€ <sub>2022</sub> pro Tonne	€-cent <sub>2022</sub> pro Tkm	
Umschlag 1	0,26	-	+ 226
Hauptlauf	13,96	2,7	+ 78
Umschlag 2	0,25	-	+ 225
Vor- oder Nachlauf	4,20	14,0	+ 134
<b>Gesamt</b>	<b>18,66</b>	<b>3,46<sup>4</sup></b>	<b>+ 90</b>

Die Berechnungen zeigen, dass bei Betrachtung der Teilprozesse kaum Unterschiede zwischen dem maritimen und kontinentalen KV hinsichtlich der Sensitivität gegenüber dem CO<sub>2</sub>-Preis besteht. Weiterhin zeigt sich, dass der Umschlag die höchste Sensitivität gegenüber der Erhöhung des CO<sub>2</sub>-Preises aufweist, die fast komplett der Erhöhung des CO<sub>2</sub>-Preises entspricht. Dies ist auf die fehlenden externen Kostensätze der anderen Teilbereiche

<sup>3</sup> Die Umschläge sind eingepreist.

<sup>4</sup> Die Umschläge sind eingepreist.

zurückzuführen, wodurch ausschließlich jene Kostenbereiche eingepreist werden, die durch den CO<sub>2</sub>-Preis bestimmt werden.

Weiterhin zeigt sich, dass der Vor- und Nachlauf vom erhöhten CO<sub>2</sub>-Preis stärker betroffen ist als der Hauptlauf. Dies ist auf die elektrische Traktion im Hauptlauf zurückzuführen, während der Vor- und Nachlauf mit dieselbetriebenen LKW durchgeführt wird. Dadurch entsteht auch die Diskrepanz zwischen dem kontinentalen und maritimen KV, da der maritime KV einen Vor- oder Nachlauf weniger innehat.

Mit einem Anstieg von 94% im kontinentalen KV und 90% im maritimen KV zeigen die Ergebnisse, analog zum EWW eine moderate Sensitivität der externen Kosten des EWW gegenüber der Erhöhung im CO<sub>2</sub>-Preis, wenn der Kontext der generell hohen Abhängigkeit von CO<sub>2</sub>-intensiven Kraftstoffen im Verkehrssektor hergestellt wird.

### 5.2.3 Ganzzugverkehr

Die Auswirkungen des erhöhten CO<sub>2</sub>-Preises auf die externen Kosten im Verhältnis zur Ladung sowie zur Transportleistung im GV ist in Tabelle 33 dargestellt. Die externen Kosten wurden unter Berücksichtigung des erhöhten CO<sub>2</sub>-Preises neu berechnet und mit dem Basisszenario verglichen. Die vollständige externe Kostenberechnung der Teilprozesse des GV befindet sich im Anhang (Tabelle 44).

*Tabelle 33: Externe Kosten des GV nach Zugarten, Tonnage und Transportleistung – Szenario höherer CO<sub>2</sub>-Preis (eigene Darstellung)*

Zugart GV	Externe Kosten nach Ladung		Veränderung gegenüber Basisszenario (%)
	€ <sub>2022</sub> pro Tonne	€-cent <sub>2022</sub> pro Tkm	
Schüttgut	16,02	2,91	+ 106
Automobil	25,36	4,61	+ 61
Flüssiggut	14,95	2,72	+ 107

Die Ergebnisse zeigen, dass der Schüttgut- und Flüssiggutzug deutlich empfindlicher auf die Erhöhung des CO<sub>2</sub>-Preises reagiert als der Automobilzug. Dies liegt an der eingesetzten Doppeltraktion bei schweren Zügen. Der geringere Anstieg bei Automobiltransporten resultiert aus der geringeren Zugmasse und damit niedrigeren energiebezogenen Kosten.

## 5.2.4 Zusammenfassung der externen Kosten – Szenario höherer CO<sub>2</sub>-Preis

Tabelle 34: Übersicht der externen Kosten der Produktionssysteme im Kontext der Transportmenge und -leistung – Szenario höhere CO<sub>2</sub>-Preis (eigene Darstellung)

Produktionssysteme	€ <sub>2022</sub> pro Tonne	€-cent <sub>2022</sub> pro Tkm	Veränderung gegenüber Basisszenario (%)
EWV	29,40	5,76	+83
Kontinentaler KV	26,24	4,60 <sup>5</sup>	+94
Maritimer KV	18,66	3,46 <sup>5</sup>	+90
GV Schüttgut	16,02	2,91	+106
GV Automobil	25,36	4,61	+61
GV Flüssiggut	14,95	2,72	+107

Die Analyse der externen Kosten im Szenario eines erhöhten CO<sub>2</sub>-Preises (Tabelle 34) zeigt deutliche Unterschiede in der Betroffenheit der einzelnen Produktionssysteme des SGV. Besonders stark betroffen sind der Schüttgut- und Flüssiggut-GV, deren externe Kosten pro Tonnenkilometer trotz der niedrigsten absoluten Werte infolge des hohen Energiebedarfs und der Doppeltraktion erheblich ansteigen.

Generell weisen alle Produktionssysteme eine signifikante Sensitivität gegenüber dem steigenden CO<sub>2</sub>-Preis auf. Dies ist vor allem auf den weiterhin hohen Anteil der Dieseltraktion in Teilprozessen des EWV sowie auf CO<sub>2</sub>-Emissionen aus der fossilen Stromerzeugung zurückzuführen.

Ein verstärkter Einsatz von elektrischen Lokomotiven in Kombination mit einem höheren Anteil erneuerbarer Energien in der Stromproduktion könnte diese Sensitivität erheblich senken. Im KV würde darüber hinaus die Integration von elektrischen Lkw im Vor- und Nachlauf zur weiteren Reduzierung der CO<sub>2</sub>-bedingten externen Kosten beitragen.

Nachfolgend wird die Sensitivität des Basisszenarios bezüglich eines veränderten Lärmkostensatzes überprüft.

<sup>5</sup> Die Umschläge sind eingepreist.

### 5.3 Szenario 3: geringere Lärmkosten

Wie in den vorangegangenen Kapiteln dargestellt, stellen die Lärmkosten den größten Anteil an den externen Kosten im SGV dar. Die von Güterzügen ausgehenden Lärmemissionen resultieren aus verschiedenen technischen und betrieblichen Einflussfaktoren. Zu den wesentlichen Quellen zählen Maschinengeräusche der Lokomotiven, Rollgeräusche durch den Kontakt zwischen Rad und Schiene, aerodynamische Geräusche bei hohen Geschwindigkeiten sowie Geräusche beim Rangierbetrieb in Bahnhöfen und beim Einsatz der Reibungsbremse. (vgl. Stuhr u. a. 2023:146)

Ein bedeutender Treiber der Lärmentwicklung im SGV war der lange Zeit vorherrschende Einsatz von Bremsklötzen aus Grauguss bei Güterwagen. Diese führten zu einer verstärkten Rauheits- und Wellenbildung auf den Radlaufflächen, wodurch sich die Schallabstrahlung selbst bei regulärer Fahrt erheblich erhöhte. Stuhr et al. geben an, dass der Schallpegel dadurch um bis zu 10 dB(A) ansteigen kann, was einer Verdopplung der wahrgenommenen Lautstärke entspricht (vgl. ebd.).

Um diesem Problem entgegenzuwirken, wurden die Graugussbremsklötze in den letzten Jahren durch sogenannte Flüsterbremsen aus Verbundwerkstoffen ersetzt, die die Entstehung von Rauigkeiten verhindern. Laut Angaben der DB Cargo wurde die vollständige Umrüstung auf Flüsterbremsen bis Ende 2020 abgeschlossen. (vgl. DB o. J.)

Da die der Berechnung zugrunde liegenden Lärmkosten auf Daten aus dem Jahr 2016 basieren, ist infolge der Umrüstung auf leisere Bremssysteme von einer signifikanten Reduktion der Lärmemissionen und damit auch der Lärmkosten auszugehen. Zusätzlich werden weitere lärmindernde Maßnahmen, wie der Bau zusätzlicher Lärmschutzwände, umgesetzt, die den Schienenverkehrslärm weiter reduzieren sollen. (vgl. EBA 2024)

Vor diesem Hintergrund wird im Rahmen dieses Szenarios ein um 50 % reduzierter Lärmkostensatz angenommen. Der ursprüngliche Kostensatz von 4,19 Euro pro Fahrzeugkilometer wurde entsprechend auf 2,10 Euro pro Fahrzeugkilometer gesenkt.

In den nachfolgenden Kapiteln werden die externen Kosten der betrachteten Produktionssysteme unter Berücksichtigung des reduzierten Lärmkostensatzes neu berechnet. Die Ergebnisse werden in Relation zur transportierten Ladungsmenge sowie zur erbrachten Transportleistung gesetzt, um einen differenzierten Vergleich der Produktionssysteme unter den veränderten Rahmenbedingungen zu ermöglichen. Dies liefert Erkenntnisse zur Auswirkung lärmindernder Maßnahmen auf die externen Kosten des SGV.

Die vollständige externe Kostenberechnung der Teilprozesse der Produktionssystem befindet sich im Anhang.

### 5.3.1 Einzelwagenverkehr

Die Auswirkungen der halbierten Lärmkosten durch Schienenlärm im EWW sind in Tabelle 35 dargestellt. Die externen Kosten wurden unter Berücksichtigung des reduzierten Lärmkostensatzes neu berechnet und mit dem Basisszenario verglichen.

*Tabelle 35: Externe Kosten des EWW nach Teilprozess, Tonnage und Transportleistung - Szenario geringere Lärmkosten (eigene Darstellung)*

Teilprozess EWW	Externe Kosten nach Ladung		Veränderung gegenüber Basisszenario (%)
	€ <sub>2022</sub> pro Tonne	€-cent <sub>2022</sub> pro Tkm	
1. Nahverkehr	3,49	11,62	-15,2
1. Übergabe- fahrt	2,57	4,29	-16,3
Fernfahrt	2,51	0,76	-22,6
2. Übergabe- fahrt	1,29	2,14	-16,3
2. Nahverkehr	3,49	11,62	-15,2
<b>Gesamt</b>	<b>13,35</b>	<b>2,62</b>	<b>-17,0</b>

Die Berechnungen zeigen, dass insbesondere die Fernfahrt mit einer Reduktion der externen Kosten um 22,6 % am stärksten von den halbierten Lärmkosten profitiert. Im Vergleich dazu fallen die Einsparungen im Nahverkehr und bei den Übergabefahrten mit etwa 15–16 % geringer aus. Dies ist darauf zurückzuführen, dass in diesen Teilprozessen ein höherer Anteil an Diesellokomotiven eingesetzt wird, was die externen Kosten durch höhere Klima- und Luftschadstoffkosten zusätzlich belastet. Dadurch relativiert sich der Einfluss der Lärmkosten auf die Gesamtkosten in diesen Abschnitten.

Durch die Reduzierung des Lärmkostensatzes verstärkt sich zudem der Unterschied zwischen der Fernfahrt und den anderen Teilprozessen. Während der Nahverkehr im Basisszenario etwa das 14-fache der Fernfahrt ausmachte, beträgt dieser Faktor im aktuellen Szenario nun über das 15-fache.

Der Rückgang der externen Kosten um 17 % auf 13,35 Euro pro Tonne und 2,62 Euro-Cent pro Tonnenkilometer unterstreicht den signifikanten Einfluss von Lärmschutzmaßnahmen im EWW.

### 5.3.2 Kontinentaler und Maritimer KV

Die Auswirkungen der halbierten Lärmkosten durch Schienenlärm im kontinentalen sowie maritimen KV sind in Tabelle 36 und Tabelle 37 dargestellt. Die externen Kosten wurden unter Berücksichtigung des reduzierten Lärmkostensatzes neu berechnet und mit dem Basisszenario verglichen.

*Tabelle 36: Externe Kosten des kontinentalen KV nach Teilprozess, Tonnage und Transportleistung – Szenario geringere Lärmkosten (eigene Darstellung)*

Teilprozess Kontinentaler KV	Externe Kosten nach Ladung		Veränderung gegenüber Basisszenario (%)
	€ <sub>2022</sub> pro Tonne	€-cent <sub>2022</sub> pro Tkm	
Vorlauf	1,79	5,97	0
Umschlag 1	0,04	-	0
Hauptlauf	7,60	1,49	-22,6
Umschlag 2	0,08	-	0
Nachlauf	1,79	5,97	0
<b>Gesamt</b>	<b>11,30</b>	<b>1,98</b>	<b>-16,4</b>

*Tabelle 37: Externe Kosten des maritimen KV nach Teilprozess, Tonnage und Transportleistung - Szenario geringere Lärmkosten (eigene Darstellung)*

Teilprozess Maritimer KV	Externe Kosten nach Ladung		Veränderung gegenüber Basisszenario (%)
	€ <sub>2022</sub> pro Tonne	€-cent <sub>2022</sub> pro Tkm	
Umschlag 1	0,08	-	0
Hauptlauf	6,08	1,19	-22,6
Umschlag 2	0,08	-	0
Vor- oder Nachlauf	1,79	5,97	0
<b>Gesamt</b>	<b>8,03</b>	<b>1,49</b>	<b>-18,1</b>

Die Berechnungen zeigen, dass nur der Hauptlauf im KV von den veränderten Lärmkostensätzen profitiert. Was zu erwarten war, da im KV nur hier ein Schienentransport stattfindet. Der Rückgang der externen Kosten im Hauptlauf beträgt sowohl im kontinentalen als auch im maritimen KV jeweils 22,6 %, was den erheblichen Einfluss von Lärmkosten auf die Gesamtkosten dieser Produktionssysteme bestätigt.

Im kontinentalen KV verringern sich die externen Gesamtkosten um 16,4 % auf 11,30 Euro pro Tonne bzw. 1,98 Euro-Cent pro Tonnenkilometer. Im maritimen KV fällt der Rückgang mit 18,1 % auf 8,03 Euro pro Tonne bzw. 1,49 Euro-Cent pro Tonnenkilometer stärker aus. Diese Differenz ist darauf zurückzuführen, dass im maritimen KV der Hauptlauf einen höheren Anteil

an den Gesamtkosten hat, da entweder Vor- oder Nachlauf in diesem Produktionssystem entfallen. Dieser Rückgang der externen Kosten unterstreicht den signifikanten Einfluss von schienenseitigen Lärmschutzmaßnahmen im KV.

### 5.3.3 Ganzzugverkehr

Die Auswirkungen der halbierten Lärmkosten durch Schienenlärm im GV sind in Tabelle 38 dargestellt. Die externen Kosten wurden unter Berücksichtigung des reduzierten Lärmkostensatzes neu berechnet und mit dem Basisszenario verglichen

*Tabelle 38: Externe Kosten des GV nach Zugarten, Tonnage und Transportleistung – Szenario geringere Lärmkosten (eigene Darstellung)*

Zugart GV	Externe Kosten nach Ladung		Veränderung gegenüber Basisszenario (%)
	€ <sub>2022</sub> pro Tonne	€-cent <sub>2022</sub> pro Tkm	
Schüttgut	6,26	1,14	-19,3
Automobil	11,87	2,16	-24,4
Flüssiggut	5,84	1,06	-19,3

Die Berechnungen verdeutlichen, dass die Reduzierung der Lärmkostensätze einen stärkeren Einfluss auf die externen Gesamtkosten des Automobil-GV hat als auf den Schüttgut- und Flüssiggut-GV. Dies ist auf die notwendige Doppeltraktion bei den schwereren Schütt- und Flüssiggutzügen zurückzuführen, die höheren externe Kosten in anderen Bereichen, insbesondere bei den vor- und nachgelagerten Prozessen, verursacht. Dadurch relativiert sich der Einfluss der Lärmkosten auf die Gesamtkosten dieser Zugarten.

Dennoch zeigt sich bei allen drei GV-Varianten ein signifikanter Rückgang der externen Kosten infolge der halbierten Lärmkosten. Für den Schüttgut- und Flüssiggut-GV beträgt die Reduktion 19,3 %, während der Automobil-GV eine noch stärkere Senkung um 24,4 % aufweist. Dies unterstreicht den hohen Einfluss von Lärmemissionen auf die externen Gesamtkosten im GV. Zudem wird deutlich, dass der ohnehin vergleichsweise geringe externe Kosten aufweisende GV durch gezielte Lärminderungsmaßnahmen seine Umweltbilanz weiter verbessern und noch effizienter gestaltet werden kann.

### 5.3.4 Zusammenfassung der externen Kosten – Szenario höhere Lärmkosten

Tabelle 39 fasst die externen Kosten der verschiedenen Produktionssysteme unter Annahme des halbierten Lärmkostensatzes noch einmal zusammen:

*Tabelle 39: Übersicht der externen Kosten der Produktionssysteme im Kontext der Transportmenge und -leistung - Szenario geringere Lärmkosten (eigene Darstellung)*

<b>Produktionssysteme</b>	<b>€<sub>2022</sub> pro Tonne</b>	<b>€-cent<sub>2022</sub> pro Tkm</b>	<b>Veränderung gegenüber Basisszenario (%)</b>
EWV	13,35	2,62	-17,0
Kontinentaler KV	11,30	1,98	-16,4
Maritimer KV	8,03	1,49	-18,1
GV Schüttgut	6,26	1,14	-19,3
GV Automobil	11,87	2,16	-24,4
GV Flüssiggut	5,84	1,06	-19,3

Die Analyse verdeutlicht, dass der GV am stärksten von der Reduzierung des Lärmkostensatzes und damit von Lärmschutzmaßnahmen im Hinblick auf die externen Kosten profitiert. Auch der kontinentale und maritime KV sowie der EWV verzeichnen signifikante Kostensenkungen, wobei sich deren Reduktionspotenziale auf einem vergleichbaren Niveau bewegen.

Diese Ergebnisse unterstreichen die Relevanz gezielter Lärminderungsmaßnahmen zur Verringerung der externen Kosten im gesamten SGV. Vor diesem Hintergrund erscheint eine aktualisierte und detaillierte Untersuchung der Lärmemissionen im SGV notwendig, die die Berechnung eines aktualisierten externen Lärmkostensatzes zulässt. Dies ist besonders relevant, da die verbesserten Rahmenbedingungen einen erheblichen Einfluss auf die Berechnung und Bewertung der externen Kosten im SGV haben.

Durch den angepassten CO<sub>2</sub>-Preis im vorherigen Kapitel 5.2 und das Szenario reduzierter Lärmkosten in diesem Kapitel wurde die Sensitivität der externen Kosten gegenüber zwei wesentlichen Einflussfaktoren analysiert. Im folgenden Kapitel werden diese Szenarien, das Basisszenario sowie das in Kapitel 4 angewandte methodische Vorgehen zur Berechnung der Lärmkostensätze einer kritischen Bewertung unterzogen.

## 6 Diskussion

Die Zielsetzung dieser Arbeit, ein Modell zur Berechnung der externen Kosten des SGV differenziert nach Produktionssystemen zu entwickeln, konnte grundsätzlich erfüllt werden. Nachfolgend werden die Berechnungsmethodik der externen Kostensätze, die Annahmen für das Basisszenario sowie die Ergebnisse kritisch reflektiert.

### 6.1 Diskussion der Berechnungsmethodik der externen Kostensätze

Die Nutzung der externen Durchschnittskosten erwies sich als zielführend, da dadurch einerseits die gesuchten Daten aggregiert werden konnten als auch eine vergleichende Betrachtung der Produktionssysteme möglich ist.

Die Bewertung der externen Kosten auf Basis der Leistungseinheit *Fahrzeugkilometer* erwies sich als sinnvoll, stellte jedoch eine methodische Herausforderung dar. Bisherige Studien zu externen Kosten im Verkehrssektor basierten überwiegend auf *Tonnenkilometern*. Diese Abweichung erforderte eine eigenständige Berechnung nahezu aller Kostenbereiche auf Basis vielfältiger Datenquellen. Mehrfach waren Abstimmungen mit Mitarbeitenden des UBA notwendig, um methodische Unsicherheiten zu klären.

An einigen Stellen mussten Annahmen getroffen werden, für die keine gesicherten Daten vorlagen. Beispielsweise wurde der Anteil der Fahrzeugkilometer mit Dieseltraktion aus dem Anteil der Transportleistung übernommen. Eine statistische Erhebung zu diesem Thema könnte zukünftige Berechnungen präzisieren. Zudem basieren die verwendeten Lärmkostensätze auf Daten aus dem Jahr 2016. Angesichts technischer Fortschritte, insbesondere der Umrüstung der Güterwagenflotte auf Flüsterbremsen, erscheinen diese Daten veraltet. Dieser Umstand wurde in Kapitel 5.3 durch eine Sensitivitätsanalyse mit reduzierten Lärmkosten berücksichtigt (vgl. van Essen u. a. 2019b:91).

Weiterhin kann der Ansatz eines Top-Down-Verfahrens zur Berechnung der externen Kosten in der Praxis zu erheblichen Abweichungen führen. Somit konnte beispielsweise keine differenzierte Berücksichtigung des erhöhten Energiebedarfs bei steilen Strecken oder bei schweren Transportgütern – mit Ausnahme der Doppeltraktion im GV – stattfinden.

Auch konnte der Einfluss vom Rangierbetrieb auf die externen Kosten mangels Datenverfügbarkeit nicht in die Berechnung einfließen. Dies hätte aller Voraussicht nach die externen Kosten des Produktionssystems EWW am stärksten beeinflusst, da dieser durch das mehrmalige Zugbilden in den ZBA, die meisten Rangierleistungen aufweist (siehe Kapitel

3.1). Eine gezielte Untersuchung der Umweltwirkungen von Rangieranlagen könnte die Berechnung der externen Kosten weiter präzisieren.

Auch die Berechnung der externen Kosten des Umschlags im KV ist unvollständig. Bisherige Studien erfassen lediglich den Energieverbrauch von Umschlaganlagen, nicht jedoch Lärmemissionen, Luftverschmutzung, die vor- und nachgelagerten Prozesse der Infrastruktur und Fahrzeugbereitstellung sowie den Flächenverbrauch von Umschlaganlagen. Eine umfassende Analyse wäre wünschenswert, um die externen Kosten vollständig abzubilden.

Trotz dieser Einschränkungen sind die berechneten externen Kostensätze für die Beantwortung der Forschungsfrage als ausreichend belastbar zu bewerten. Die Vergleichbarkeit mit anderen Studien zu externen Kosten im SGV, wie in Kapitel 6.3 dargestellt, bestätigt diese Einschätzung.

## **6.2 Diskussion der Annahmen des Basisszenarios**

Die getroffenen Annahmen für die Basisszenarien der Produktionssysteme sind insgesamt als plausibel einzustufen und bieten eine fundierte Grundlage für die Abbildung typischer Transportprozesse. Dennoch ist zu beachten, dass in der Praxis erhebliche Abweichungen von den definierten Szenarien auftreten können.

Für den EWW lagen umfangreiche Daten vor, ergänzt durch mehrere Interviews mit Mitarbeitenden der DB Cargo. Dies ermöglichte eine detaillierte Darstellung der Teilprozesse, abgesehen von der fehlenden Berücksichtigung des Rangierbetriebs. Zukünftig könnte der wachsende Einsatz von Zweikraftlokomotiven den Anteil elektrischer Traktion im Nahbereich erhöhen (vgl. Interview DB Cargo, 24.10.2024). Zudem übernimmt der EWW Aufgaben wie die Leerwagenrückführung, die Zuführung von Schadwagen zu Werkstätten und den Transport von Überlaufmengen aus dem GV und KV (vgl. Bundesregierung 2019:11). Dies beeinflusst die statistische Auslastung des EWW ins negative, hilft dem GV und KV jedoch zu Effizienzgewinnen.

Für den KV stand ebenfalls eine solide Datenbasis zur Verfügung. Weiterhin konnte durch Interviews mit Mitarbeitenden von zwei großen KV-Operateuren (*Contargo* und *HUPAC*) sowie Gesprächen mit Mitarbeitern der *Studiengesellschaft für den Kombinierten Verkehr (SGKV)* weitere Informationen aggregiert werden, die ein fundiertes Bild der Teilprozesse des KV sowie dessen Annahmen im Basisszenario erlauben.

Für den GV war die Informationslage deutlich schwächer. Die Literatur behandelt den GV, vermutlich aufgrund seiner geringeren Komplexität, oft nur oberflächlich. Um diese Lücke zu schließen, wurden drei verschiedene Zugtypen modelliert. Die fehlende Datenbasis zu den tatsächlich transportierten Gütern erforderte Annahmen auf Grundlage einzelner Literaturangaben. Die im Modell gewählte Grenzlast von 2.400 Tonnen könnte vereinzelt zu niedrig sein, da die Infrastruktur teilweise höhere Lasten zulässt (vgl. DB InfraGO 2024).

### **6.3 Diskussion des Ergebnisses**

Die berechneten externen Kosten pro Tonnenkilometer im Basisszenario dieser Arbeit (Kapitel 5.1) stimmen mit den Ergebnissen der aktuellsten umfassenden Studie zu den externen Kosten des Verkehrs in Deutschland von Infras (2019) überein. Diese ermittelte externe Durchschnittskosten des SGV von 2,04 (inflationsbereinigt 2,33 Euro-Cent<sub>2022</sub>) pro Tkm (vgl. Bieler und Sutter 2019:27). Die in dieser Arbeit berechneten Werte für die Produktionssysteme – EWV: 3,15 Euro-Cent, KV (gewichtet): 2,1 Euro-Cent, GV (gewichtet): 1,86 Euro-Cent – ergeben bei Berücksichtigung der bereits beschriebenen Marktanteile (GV: 39,5 %, KV: 43,5 %, EWV: 17 %) einen durchschnittlichen Wert von 2,12 Euro-Cent pro Tkm. Dieser Wert liegt sehr nah am Ergebnis der Infras-Studie und unterstreicht die Validität der vorliegenden Berechnungen.

Die Ergebnisse liefern somit eine fundierte Grundlage für die differenzierte Betrachtung der Umwelt- und Gesundheitsbelastungen durch die Produktionssysteme im SGV. Damit kann die Forschungsfrage dieser Arbeit beantwortet werden. Die Ergebnisse verdeutlichen zudem die Relevanz der Produktionssysteme für die externen Kosten des SGV.

## 7 Fazit

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde untersucht, inwieweit sich die drei Produktionssysteme des SGV in Deutschland – der EWW, der KV und der GV – hinsichtlich ihrer Umwelt- und Gesundheitsbelastungen unterscheiden.

Zur Beantwortung dieser Fragestellung wurde der Ansatz der externen Kosten gewählt. Dabei wurden relevante Kostenbereiche identifiziert und die Produktionssysteme in ihre Teilprozesse zerlegt, um diese operationalisierbar zu machen. Auf Grundlage dieser Strukturierung konnten spezifische Leistungsparameter bestimmt werden, die eine Berechnung der externen Kosten ermöglichten. Durch die Verknüpfung dieser Parameter mit den berechneten externen Kostensätzen und der Anwendung praxisnaher Basisszenarien konnten die externen Kosten pro Leistungseinheit für die einzelnen Produktionssysteme des SGV ermittelt werden. Die daraus resultierenden Ergebnisse liefern ein fundiertes Bild über die Unterschiede in der Umweltbelastung der jeweiligen Produktionssysteme.

Diese Ergebnisse erlauben eine kritische Reflexion des oft vertretenen Arguments, dass der SGV per se als besonders nachhaltiges Verkehrsmittel gilt. Dies ist eines der Argumente, welche die Grundlage für das politische Ziel der Verkehrsverlagerung auf die Schiene bildet und somit auch für die damit einhergehende staatliche Förderung des SGV. Die differenzierte Betrachtung der externen Kosten zeigt jedoch, dass dieser Anspruch nicht in gleichem Maße für alle Produktionssysteme des SGV gilt.

Die Berechnungen belegen deutliche Unterschiede in der Umweltbelastung: Der EWW verursacht mit 3,15 Euro-Cent pro Tkm rund 70 % mehr externe Kosten als der GV (gewichtet 1,86 Euro-Cent pro Tkm) und etwa 46 % mehr als der KV (gewichtet 2,16 Euro-Cent pro Tkm). Diese Differenzen sind primär auf die unterschiedliche Effizienz in der Nutzung der vorhandenen Kapazitäten zurückzuführen. Während der GV und KV ihre Kapazitäten weitgehend optimal auslasten, zeigt der EWW, insbesondere im Nahverkehr, erhebliche Effizienzdefizite.

Besonders deutlich wird dies bei der Differenzierung nach Teilprozessen: Der EWW verursacht auf der Fernfahrt lediglich 0,98 Euro-Cent pro Tkm – den niedrigsten Wert aller Teilprozesse im SGV. Im Nahverkehr hingegen steigen die externen Kosten auf 13,71 Euro-Cent pro Tkm, was die Einsparungen der Fernfahrt überkompensiert und die Gesamtbilanz des EWW deutlich verschlechtert.

Der KV weist trotz effizienter Ressourcennutzung höhere externe Kosten als der GV auf. Dies ist vor allem auf den vor- und nachgelagerten Straßentransport mit dem LKW zurückzuführen, der im Vor- und Nachlauf knapp 6 Euro-Cent pro Tkm an externen Kosten verursacht – deutlich mehr als der Transport auf der Schiene.

Vergleicht man diese Werte mit dem Lkw-Verkehr, der laut der Studie von Infrac (Bezugsjahr 2017, inflationsbereinigt auf 2022) externe Durchschnittskosten von 5,1 Euro-Cent pro Tkm verursacht (vgl. Bieler und Sutter 2019:27), wird die Umweltvorteilhaftigkeit des SGV deutlicher. Der GV und KV verursachen nur etwa 36 % bzw. 42 % der externen Kosten des Lkw-Verkehrs, während der EKV mit 62 % deutlich näher an den Kosten des Straßengüterverkehrs liegt.

Selbst bei sinkenden Lärmemissionen durch technische Verbesserungen (z. B. Umrüstung auf Flüsterbremsen) bleiben die Differenzen zwischen den Produktionssystemen bestehen. Zwar sinken die externen Kosten insgesamt, doch profitieren alle Systeme nahezu gleichermaßen, sodass sich die relativen Unterschiede nicht wesentlich verändern. Ähnlich sähe das Szenario eines höheren CO<sub>2</sub>-Preises aus, da die Sensitivität der Produktionssysteme des SGV gegenüber dieser Maßnahme ähnlich sind, wodurch ebenfalls die Differenz der externen Kosten zwischen den Produktionssystemen bestehen bleiben würde.

Vor diesem Hintergrund erscheint eine gleichmäßige Förderung aller Produktionssysteme im SGV kritisch hinterfragbar. Die externen Kosten – und damit die Umweltbelastung – sind jedoch nur ein Aspekt unter vielen, die staatliche Fördermaßnahmen rechtfertigen. Diese Arbeit liefert somit einen wichtigen Beitrag zur differenzierten Bewertung der Produktionssysteme im SGV. Die gewonnenen Erkenntnisse bieten eine fundierte Grundlage für eine gezielte und nachhaltige Verkehrspolitik, die insbesondere die Förderung derjenigen Produktionssysteme stärkt, die ökologisch und ökonomisch besonders effizient sind.

## 8 Literaturverzeichnis

- Allekotte, Michael, Fabian Bergk, Kirsten Biemann, Carolin Deregowski, Wolfram Knörr, Hans-Jörg Althaus, Daniel Sutter, und Thomas Bergmann. 2020. *Ökologische Bewertung von Verkehrsarten - Abschlussbericht*. Dessau-Roßlau: UBA - Umweltbundesamt.
- Allekotte, Michael, Kirsten Biemann, Marie Colson, Christoph Heidt, Jan Kräck, und Wolfgang Knörr. 2024. *2024-Bericht: Aktualisierung TREMOD/TREMOD- MM und Ermittlung der Emissionsdaten des Verkehrs nach KSG im Jahr 2023 - Endbericht*. Heidelberg: Ifeu - Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH.
- Bieler, Cuno, und Daniel Sutter. 2019. *Externe Kosten des Verkehrs in Deutschland - Straßen-, Schienen-, Luft- und Binnenschiffverkehr 2017*. Zürich: infras.
- BMDV. 2017. *Masterplan Schienengüterverkehr*. Berlin: Bundesministerium für digitales und Verkehr.
- BMDV. 2024a. „Betriebskostenförderung im Einzelwagenverkehr“. *Bundesministerium für Digitales und Verkehr*. Abgerufen 28. Dezember 2024 (<https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Artikel/E/schiene-schienueterverkehr/betriebskostenfoerderung-im-einzelwagenverkehr.html>).
- BMDV. 2024b. „Klimaschutz im Verkehr – Schienengüterverkehr“. *Bundesministerium für Digitales und Verkehr*. Abgerufen 28. Dezember 2024 (<https://bmdv.bund.de/DE/Themen/Mobilitaet/Klimaschutz-im-Verkehr/Schienueterverkehr/schienueterverkehr.html>).
- BMDV. 2024c. „Richtlinie zur Förderung von Umschlaganlagen des Kombinierten Verkehrs“. *Bundesministerium für Digitales und Verkehr*. Abgerufen 28. Dezember 2024 (<https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Artikel/G/umschlaganlagen-foerderrichtlinie.html>).
- BMUV. 2020. „Auf dem Weg zur Nachhaltigen Mobilität“. *Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz*. Abgerufen 28. Dezember 2024 (<https://www.bmuv.de/themen/verkehr/nachhaltige-mobilitaet>).
- BMWK. 2023. „Schienengüterverkehr – Anteilige Finanzierung der genehmigten Trassenentgelte (af-TP)“. *Förderdatenbank BMWK*. Abgerufen 28. Dezember 2024 (<https://www.foerderdatenbank.de/FDB/Content/DE/Foerderprogramm/Bund/BMVI/anteilige-trassenentgelte-af-tp-bund.html>).
- Bundesnetzagentur. 2022. *Sondererhebung Einzelwagenverkehr - Marktstrukturen und Wirtschaftlichkeit*. Bonn.
- Bundesregierung. 2019. „Drucksache 19/15100 - Weiterentwicklung des Einzelwagenverkehrs“.
- Clausen, Uwe. 2016. *CO2-Bilanz – Multimodale Logistikknoten: Erweiterung des Methodenbaukastens CO2-Bilanz zur exakteren Ermittlung und Zuordnung von Umwelteffekten in Multimodalen Logistikknoten. Studie*. Dortmund: TU Dortmund.
- Clausen, Uwe, und Christiane Geiger. 2013. *Verkehrs- und Transportlogistik*. 2. Auflage. Dortmund: Springer Vieweg.

- Clausen, Uwe, Achim Klukas, Sebastian Stütz, Agnes Eiband, David Rüdiger, Patrick Zimmermann, Heike Flämig, Christiane Waßmann-Krohn, Nina Schulte, Wiebke Rüter, und Helge Banthin. 2019. *Integrierte Maßnahmen zur Verlagerung von Straßengüterverkehren auf den Kombinierten Verkehr und den Schienengüterverkehr*. Dortmund: Fraunhofer IML, TU Hamburg-Harburg.
- DB. o. J. „Flüsterbremse“. *Deutsche Bahn*. Abgerufen 16. Dezember 2024 (<https://nachhaltigkeit.deutschebahn.com/de/massnahmen/fluesterbremse>).
- DB Cargo. o. J. „Güterwagenkatalog“. Abgerufen 30. September 2024 (<https://gueterwagenkatalog.dbcargo.com/katalog/nach-gattung>).
- DB InfraGO. 2024. „Trassenfinder“. *Trassenfinder*. Abgerufen 12. Dezember 2024 (<https://trassenfinder.de/>).
- DESTATIS. 2024. „Verbraucherpreisindex: Deutschland, Jahre“. *DESTATIS - Statistisches Bundesamt*. Abgerufen 1. Oktober 2024 (<https://www-genesis.destatis.de/datenbank/online/url/97dad3f0>).
- DLR. 2024. *Verkehr in Zahlen 2023/2024*. DLR - Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
- EBA. 2024. „Lärmaktionsplanung“. *Eisenbahnbundesamt*. Abgerufen ([https://www.eba.bund.de/DE/Themen/Laerm\\_an\\_Schienenwegen/Laermaktionsplanung/laermaktionsplanung\\_node.html](https://www.eba.bund.de/DE/Themen/Laerm_an_Schienenwegen/Laermaktionsplanung/laermaktionsplanung_node.html)).
- Ecoplan und Infras. 2014. *Externe Effekte des Verkehrs 2010 - Monetarisierung von Umwelt-, Unfall- und Gesundheitseffekten. Schlussbericht*. Bern: Bundesamt für Raumentwicklung Schweiz.
- EEA. 2022. *Noise data reported under Environmental Noise Directive (END)*. EEA - European Environment Agency.
- van Essen, Huib, Lisanne van Wijngaarden, Arno Schroten, Daniel Sutter, Cuno Bieler, Silvia Maffii, Marco Brambilla, Davide Fiorello, Francesca Fermi, Riccardo Parolin, und Kareen El Beyrouty. 2019a. *Annexes - Handbook on the external costs of transport - Version 2019 - 1.1. Studie*. Delft: CE Delft.
- van Essen, Huib, Lisanne van Wijngaarden, Arno Schroten, Daniel Sutter, Cuno Bieler, Silvia Maffii, Marco Brambilla, Davide Fiorello, Francesca Fermi, Riccardo Parolin, und Kareen El Beyrouty. 2019b. *Handbook on the external costs of transport - Version 2019 – 1.1. Studie*. Delft: CE Delft.
- Europäische Kommission. 2008. „Internalisierung externer Transportkosten“. *Europäische Union*. Abgerufen (<https://eur-lex.europa.eu/DE/legal-content/summary/internalisation-of-external-transport-costs.html?fromSummary=32>).
- Eurostat. 2024a. „Rail accidents victims by type of accident and category of persons involved“.
- Eurostat. 2024b. „Train traffic performance by train category and source of energy“. Abgerufen 21. November 2024 ([https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/rail\\_tf\\_traveh/default/table?lang=en&category=rail.rail\\_tf](https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/rail_tf_traveh/default/table?lang=en&category=rail.rail_tf)).

- FIS. 2023. „Positive externe Effekte“. *FIS - Forschungsinformationssystem*. Abgerufen 10. September 2024 (<https://www.forschungsinformationssystem.de/servlet/is/328934/>).
- Friedl, Christa, und Ruth Blanck. 2021. „Mobilität neu steuern - Ein Steuer- und Abgabekonzept für klimaschonenden und sozial gerechten Verkehr bis 2050“.
- GATX. o. J. „Öl & Petrochemiewagen - Zans / GATX Typ 1693“. Abgerufen 18. Dezember 2024 (<https://www.gatx.eu/de/waggon/zans-gatx-typ-1693/>).
- Geerlings, Harry, Ron van Duin, Tiuri van Rossum, und Robert Heij. 2014. *Green and Effective Operations at Terminals and in Ports - A top-down methodology to calculate the CO2 - footprint for terminal operations; the 6-step approach*.
- Guglielminetti, Paolo, France Lagraulet, Diego Artuso, Emiliano Lunadei, Antonio Musso, Gaetano fusco, Riccardo Licciardello, Cristiana Piccioni, und Flavia Seno. 2015. *Study on Single Wagonload Traffic in Europe – challenges, prospects and policy options - Final Report*. Studie. PwC Advisory (IT), Rome University “La Sapienza”.
- Ifeu - Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH. 2024. *TREMODO 6.53*. Heidelberg.
- IINAS. 2021. *GEMIS - Globales Emissions-Modell Integrierter Systeme*. 5.0. IINAS - Internationales Institut für Nachhaltigkeitsanalysen und -strategien.
- Intraplan. 2014. *Verkehrsverflechtungsprognose 2030 - Schlussbericht*. München: Intraplan Consult GmbH.
- Knörr, Wolfgang, Christoph Heidt, Sabine Gores, und Bergk. 2016. *2016-Anhang: „Aktualisierung „Daten- und Rechenmodell: Energieverbrauch und Schadstoffemissionen des motorisierten Verkehrs in Deutschland 1960-2035“ (TREMODO) für die Emissionsberichterstattung 2016 (Berichtsperiode 1990-2014) - ANHANG*. Heidelberg: Ifeu - Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH.
- KombiConsult und pwc. 2022. *Comparative evaluation of transshipment technologies for intermodal transport and their cost*. KombiConsult, pwc.
- Konrad, Marcel, Johannes Pagenkopf, Victoria Jäger, Holger Dittus, Georg Dura, Alexander Garbar, und Jan-Christoph Maaß. 2022. *Vorstudie Wasserstoffrangierlokomotive Duisport*. DLR - Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
- Matthey, Astrid, und Björn Bünger. 2020. *Kostensätze - Methodenkonvention 3.1 zur Ermittlung von Umweltkosten (Stand 12/2020)*. Dessau-Roßlau: UBA - Umweltbundesamt.
- Pachl, Jörn. 2018. *Systemtechnik des Schienenverkehrs - Bahnbetrieb planen, steuern und sichern*. 9. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Rogall, Holger. 2013. *Volkswirtschaftslehre für Sozialwissenschaftler*. 2. Auflage. Wiesbaden: Springer VS.
- Roland Berger. 2021. *Gutachten zum Schienengüterverkehr in Deutschland bis 2030*. München.

- Scheufen, Marc. 2019. „Marktversagen und Wirtschaftspolitik“. in *Angewandte Mikroökonomie und Wirtschaftspolitik*. Berlin Heidelberg: Springer.
- SGKV. 2024a. „Intermodal Map“. Abgerufen 10. Dezember 2024 ([www.intermodal-map.de/](http://www.intermodal-map.de/)).
- SGKV. 2024b. „Marktsegmente des Kombinierten Verkehrs“. *Intermodal Info*. Abgerufen 10. Oktober 2024 (<https://www.intermodal-info.com/marktsegmente-des-kombinierten-verkehrs/>).
- SGKV. 2024c. „Terminals im KV“. *Intermodal Info*. Abgerufen 10. Oktober 2024 (<https://www.intermodal-info.com/terminals-im-kv/>).
- SGKV. 2024d. „Umschlagsysteme“. *Intermodal Info*. Abgerufen 10. Dezember 2024 (<https://www.intermodal-info.com/umschlagsysteme/>).
- SGKV. 2024e. „Verkehrsmittel im KV“. *Intermodal Info*. Abgerufen 12. Dezember 2024 (<https://www.intermodal-info.com/verkehrstraeger/>).
- SGKV. 2024f. *Zahlen und Fakten des KV 2023*. Berlin.
- Statista. 2012. „Durchschnittliches Alter der Bahninfrastruktur in Deutschland im Vergleich der Jahre 2005 und 2011“. *Statista*. Abgerufen 1. Dezember 2024 (<https://de.statista.com/statistik/daten/studie/250110/umfrage/alter-der-bahninfrastruktur-in-deutschland/>).
- Stuhr, Helge, Philipp Schneider, und Stefan Karch. 2023. *Schienengüterverkehr - Marktumfeld, Produktion, Technik und Innovation*. Wiesbaden: Springer Gabler.
- Tiedtke, Benjamin. 2013. „EXTERNE KOSTEN DES VERKEHRS UND SOZIALE GERECHTIGKEIT“.
- UBA. 2022. „Durchschnittsgewicht Neufahrzeuge und Altfahrzeuge in Deutschland“. *Umweltbundesamt*. Abgerufen 15. Dezember 2024 (<https://www.umweltbundesamt.de/bild/durchschnittsgewicht-neufahrzeuge-altfahrzeuge-in>).
- UBA. 2024. „Gesellschaftliche Kosten von Umweltbelastungen“. *Umweltbundesamt*. Abgerufen 28. Dezember 2024 (<https://www.umweltbundesamt.de/daten/umwelt-wirtschaft/gesellschaftliche-kosten-von-umweltbelastungen>).
- UIRR. 2023. *UIRR Report 2022-23*. Brüssel.
- UNECE. 2001. *Terminologie des Kombinierten Verkehrs*. New York & Genua.
- Voll, Robert. 2014. *Methoden der mathematischen Optimierung zur Planung taktischer Wagenrouten im Einzelwagenverkehr. Dissertation*. Dortmund: TU Dortmund.
- VTG. o. J. „Intermodalwagen“. Abgerufen 2. November 2024 (<https://www.vtg.de/produkte-und-leistungen/flotte/flottenuuebersicht/intermodalwagen/>).

## 9 Anhang

Tabelle 40: Durchschnittliche externe Kosten der Fahrzeugkategorie in €<sub>2022</sub> pro Fahrzeugkilometer bei Doppeltraktion (eigene Darstellung)

Fahrzeugkategorie	Klimaschäden	Luftverschmutzung	Unfälle	Lärm	Vor- und nachgelagerte Prozesse	Flächenverbr. und Zerschn.
<b>SGV elektrisch</b>	0,00	0,00	0,18	4,19	4,79	1,44
<b>SGV Diesel</b>	5,13	5,27	0,18	4,19	3,50	1,44

Tabelle 41: Externe Kosten des EWV nach Teilprozess und Kostenbereich – Szenario höherer CO<sub>2</sub>-Preis (eigene Darstellung)

Teilprozesse EWV	Externe Kosten der Teilprozesse in € <sub>2022</sub> (Kosten pro Fzkm)						Gesamt
	Klimaschäden	Luftverschmutzung	Unfälle	Lärm	Vor- und nachgelagerte Proz.	Flächenverbr. und Zerschn.	
1. Nahverkehr	537,1	158,2	10,5	251,5	473,1	86,3	<b>1.517</b>
1. Übergabefahrt	859,3	253,1	21,1	503,0	1.010	172,6	<b>2.819</b>
Fernfahrt	29,5	8,7	57,9	1.383	3.466	474,5	<b>5.419</b>
2. Übergabefahrt	429,7	126,6	10,5	251,5	504,8	86,3	<b>1.409</b>
2. Nahverkehr	537,1	158,2	10,5	251,5	473,1	86,3	<b>1.517</b>
<b>Gesamt</b>	<b>2.393</b>	<b>705</b>	<b>111</b>	<b>2.641</b>	<b>5.926</b>	<b>906</b>	<b>12.681</b>

Tabelle 42: Externe Kosten des kontinentalen KV nach Teilprozess und Kostenbereich – Szenario höherer CO<sub>2</sub>-Preis (eigene Darstellung)

Externe Kosten der Teilprozesse in € <sub>2022</sub> (Kosten pro Fzkm)							
Teilprozess KV	Klimaschäden	Luftverschmutzung	Unfälle	Lärm	Vor- und nachgelagerte Proz.	Flächenverbr. und Zerschn.	Gesamt
Vorlauf	34,4	2,6	2,0	3,1	20,1	0,7	<b>63,0</b>
Umschlag	-	-	-	-	1,9	-	<b>1,9</b>
Hauptlauf	45,7	13,4	89,5	2.138	5.356	733,4	<b>8.375</b>
Umschlag	3,4	-	-	-	0,8	-	<b>4,2</b>
Nachlauf	34,4	2,6	2,0	3,1	20,1	0,7	<b>63,0</b>
<b>Gesamt</b>	<b>117,9</b>	<b>18,7</b>	<b>93,6</b>	<b>2.144</b>	<b>5.399</b>	<b>734,8</b>	<b>8.507</b>

Tabelle 43: Externe Kosten des maritimen KV nach Teilprozess und Kostenbereich – Szenario höherer CO<sub>2</sub>-Preis (eigene Darstellung)

Externe Kosten der Teilprozesse in € <sub>2022</sub> (Kosten pro Fzkm)							
Teilprozess KV	Klimaschäden	Luftverschmutzung	Unfälle	Lärm	Vor- und nachgelagerte Proz.	Flächenverbr. und Zerschn.	Gesamt
1. Umschlag	-	-	-	-	3,9	-	<b>3,9</b>
Hauptlauf	45,7	13,4	89,5	2.138	5.356	733,4	<b>8.375</b>
2. Umschlag	-	-	-	-	3,7	-	<b>3,7</b>
Nachlauf	34,4	2,6	2,0	3,1	20,1	0,7	<b>63,0</b>
<b>Gesamt</b>	<b>80,1</b>	<b>16,1</b>	<b>91,5</b>	<b>2.141</b>	<b>5.384</b>	<b>734,1</b>	<b>8.446</b>

Tabelle 44: Externe Kosten des GV nach Zugarten und Kostenbereich – Szenario höherer CO<sub>2</sub>-Preis (eigene Darstellung)

Zugart GV	Externe Kosten der Teilprozesse in € <sub>2022</sub> (Kosten pro Fzkm)						Gesamt
	Klima- schäden	Luft- versch- mutzung	Unfälle	Lärm	Vor- und nach- gelagerte Proz.	Flächen- verbr. und Zerschn.	
Schütt- gut	196,9	58,0	193,0	4.610,5	18.030,0	1.581,8	<b>24.670</b>
Auto- mobil	98,5	29,0	193,0	4.610,5	8.702,4	1.581,8	<b>15.215</b>
Flüssig- gut	196,9	58,0	193,0	4.610,5	18.030,0	1.581,8	<b>24.670</b>

Tabelle 45: Externe Kosten des EWV nach Teilprozess und Kostenbereich – Szenario geringere Lärmkosten (eigene Darstellung)

Teilprozess EWV	Externe Kosten der Teilprozesse in € <sub>2022</sub> (Kosten pro Fzkm)						Gesamt
	Klima- schäden	Luft- versch- mutzung	Unfälle	Lärm	Vor- und nach- gelagerte Proz.	Flächen- verbr. und Zerschn.	
1. Nahverkehr	154,0	158,2	10,5	126,0	162,3	86,3	<b>697</b>
1. Übergabe- fahrt	246,4	253,1	21,1	252,0	341,0	172,6	<b>1286</b>
Fernfahrt	8,5	8,7	57,9	693,0	1116,4	474,5	<b>2359</b>
2. Übergabe- fahrt	123,2	126,6	10,5	126,0	170,5	86,3	<b>643</b>
2. Nahverkehr	154,0	158,2	10,5	126,0	162,3	86,3	<b>697</b>
<b>Gesamt</b>	<b>686</b>	<b>705</b>	<b>111</b>	<b>1323</b>	<b>1953</b>	<b>906</b>	<b>5683</b>

Tabelle 46: Externe Kosten des kontinentalen KV nach Teilprozess und Kostenbereich – Szenario geringere Lärmkosten (eigene Darstellung)

Externe Kosten der Teilprozesse in € <sub>2022</sub> (Kosten pro Fzkm)							
Teilprozess KV	Klimaschäden	Luftverschmutzung	Unfälle	Lärm	Vor- und nachgelagerte Proz.	Flächenverbr. und Zerschn.	Gesamt
Vorlauf	9,9	2,6	2,0	3,1	8,5	0,7	<b>26,9</b>
Umschlag	0,00	-	-	-	0,58	-	<b>0,58</b>
Hauptlauf	13,1	13,4	89,5	1071,0	1725,7	733,4	<b>3646,1</b>
Umschlag	0,97	-	-	-	0,26	-	<b>1,23</b>
Nachlauf	9,9	2,6	2,0	3,1	8,5	0,7	<b>26,9</b>
<b>Gesamt</b>	<b>33,9</b>	<b>18,7</b>	<b>93,6</b>	<b>1077,2</b>	<b>1743,5</b>	<b>734,8</b>	<b>3701,7</b>

Tabelle 47: Externe Kosten des maritimen KV nach Teilprozess und Kostenbereich – Szenario geringere Lärmkosten (eigene Darstellung)

Externe Kosten der Teilprozesse in € <sub>2022</sub> (Kosten pro Fzkm)							
Teilprozess KV	Klimaschäden	Luftverschmutzung	Unfälle	Lärm	Vor- und nachgelagerte Proz.	Flächenverbr. und Zerschn.	Gesamt
1. Umschlag	0,00	-	-	-	1,19	-	<b>1,2</b>
Hauptlauf	13,09	13,45	89,50	1071,00	1725,70	733,38	<b>3646,1</b>
2. Umschlag	0,00	-	-	-	1,15	-	<b>1,2</b>
Nachlauf	9,93	2,62	2,05	3,10	8,48	0,71	<b>26,9</b>
<b>Gesamt</b>	<b>23,0</b>	<b>16,1</b>	<b>91,5</b>	<b>1074,1</b>	<b>1736,5</b>	<b>734,1</b>	<b>3675,4</b>

Tabelle 48: Externe Kosten des GV nach Zugarten und Kostenbereich – Szenario geringere Lärmkosten (eigene Darstellung)

Zugart GV	Externe Kosten der Teilprozesse in € <sub>2022</sub> (Kosten pro Fzkm)						Gesamt
	Klima- schäden	Luft- versch- mutzung	Unfälle	Lärm	Vor- und nach- gelagerte Proz.	Flächen- verbr. und Zerschn.	
Schütt- gut	196,9	58,0	193,0	4.610,5	18.030,0	1.581,8	<b>24.670</b>
Auto- mobil	98,5	29,0	193,0	4.610,5	8.702,4	1.581,8	<b>15.215</b>
Flüssig- gut	196,9	58,0	193,0	4.610,5	18.030,0	1.581,8	<b>24.670</b>