

Endbericht

Energieeffizienzgespreizte Lkw-Maut

Implementierung von Effizienzklassen



Im Auftrag des
Bundesministeriums für
Verkehr und digitale Infra-
struktur

Prognos AG

Projektleitung:
Samuel Straßburg

Alex Auf der Maur
Dr. Alexander Piégsa
Stephan Kritzinger

FVT

Dr. Martin Rexeis
Prof. Stefan Hausberger
Antonius Kies

Basel, 24. August 2018

Das Unternehmen im Überblick

Geschäftsführer

Christian Böllhoff

Präsident des Verwaltungsrates

Gunter Blickle

Handelsregisternummer

Berlin HRB 87447 B

Rechtsform

Aktiengesellschaft nach schweizerischem Recht

Gründungsjahr

1959

Tätigkeit

Die Prognos AG berät europaweit Entscheidungsträger aus Politik, Wirtschaft und Gesellschaft. Auf Basis neutraler Analysen und fundierter Prognosen entwickeln wir praxisnahe Entscheidungsgrundlagen und Zukunftsstrategien für Unternehmen, öffentliche Auftraggeber sowie internationale Organisationen.

Arbeitssprachen

Deutsch, Englisch, Französisch

Hauptsitz

Prognos AG
St. Alban-Vorstadt 24
4052 Basel | Schweiz
Telefon +41 61 3273-310
Telefax +41 61 3273-300

Prognos AG
Domshof 21
28195 Bremen | Deutschland
Telefon +49 421 517046-510
Telefax +49 421 517046-528

Prognos AG
Schwanenmarkt 21
40213 Düsseldorf | Deutschland
Telefon +49 211 91316-110
Telefax +49 211 91316-141

Prognos AG
Nymphenburger Str. 14
80335 München | Deutschland
Telefon +49 89 9541586-710
Telefax +49 89 9541586-719

Internet

info@prognos.com
www.prognos.com

Weitere Standorte

Prognos AG
Goethestr. 85
10623 Berlin | Deutschland
Telefon +49 30 520059-210
Telefax +49 30 520059-201

Prognos AG
Résidence Palace, Rue de la Loi 155
1040 Brüssel | Belgien
Telefon +32 280 89-947

Prognos AG
Schnewlinstr. 6
79098 Freiburg | Deutschland
Telefon +49 761 7661164-810
Telefax +49 761 7661164-820

Prognos AG
Rotebühlplatz 9
70178 Stuttgart | Deutschland
Telefon +49 711 3209-610
Telefax +49 711 3209-609

Inhalt

1	Kurzfassung	1
2	Einleitung	9
3	Grundlagen zur energieeffizienzgespreizten Lkw-Maut	12
3.1	Ziele der Mautumstellung	12
3.2	Europäische Rahmenvorgaben zur Mautausgestaltung	12
3.3	Lkw-Maut in Deutschland	15
4	Energieeffizienz im Straßengüterverkehr	17
4.1	Einflussfaktoren für Energieeffizienz im Straßenverkehr	17
4.2	Definition des Maßes für Energieeffizienz	17
4.3	Effizienzvergleich innerhalb homogener Fahrzeuggruppen	19
4.4	Anreiz für Energieeffizienz durch optimierte Mautsatzspreizung	21
5	Ableitung möglicher Mautsätze für eine energieeffiziente Lkw-Maut	22
5.1	Externe Kosten der CO ₂ -Emissionen im Verkehr	22
5.2	Ableitung möglicher Mautsätze	23
6	Ausgestaltung der energieeffizienzgespreizten Lkw-Maut	26
6.1	Definition und Analyse von Mautkonzepten	26
6.1.1	Konzept 1: Maximierte Anlastung Externer Kosten	27
6.1.2	Konzept 2: Mautsatzfunktion als Integral über der Verteilungsfunktion	28
6.1.3	Konzept 3: stabile Effizienzklassen	29
6.1.4	Konzept 4: dynamische Effizienzklassen	32
6.2	Weitere Anmerkungen zur effizienzgespreizten Maut	33
6.2.1	Zukünftiger Umgang mit Schadstoffemissionen	34
6.2.2	Behandlung von Fahrzeugen ohne zertifizierten CO ₂ -Wert	35
6.2.3	Bonus-Systeme für technologiespezifische Förderung	36
6.2.4	Ausgewählte Mautkonzepte aus Sicht des Lkw-Halters	37
6.2.5	Ausgewählte Mautkonzepte aus Sicht der Bewilligungsbehörde	38
7	Bildung homogener Gruppen im Bestand und Fahrleistungsabschätzung nach homogenen Gruppen	39
7.1	Bildung von homogenen Gruppen im Bestand	39
7.1.1	Einteilung nach Anzahl der Achsen	40
7.1.2	Einteilung nach Fahrzeugklasse	41
7.1.3	Einteilung nach Zulässiger Gesamtmasse	42
7.1.4	Einteilung nach Nutzlastklassen	43
7.1.5	Einteilung nach Nutzlast und Zulässiger Gesamtmasse	44

7.1.6	Einteilung nach VECTO-Klassen	45
7.2	Prognose der Fahrleistungen nach VECTO-Klassen bis 2030	47
8	Untersuchung der Mautkonzepte anhand modellierter Effizienzverteilungen	52
8.1	Verteilungen nach spezifischen Emissionen als Grundlage zur Untersuchung der Mautkonzepte	52
8.1.1	Verteilung neu zugelassener Nutzfahrzeuge nach spezifischen CO ₂ -Emissionen im Jahr 2014	52
8.1.2	Mautfahrleistungsverteilung nach spezifischen CO ₂ -Emissionen im Jahr 2020 und 2030	56
8.1.3	Mautfahrleistung in den Jahren der Mautumstellung– Fahrleistung mit und ohne zertifizierte CO ₂ -Werte	59
8.2	Lkw-Maut in den Jahren 2020 und 2030: Mautsätze und Mautklassen	62
9	Wirkung auf Endenergieverbrauch und CO₂-Emissionen	70
9.1	CO ₂ Minderung bei Neukauf von Nutzfahrzeugen: Potenziale und Mehrkosten	70
9.2	CO ₂ -Minderung durch Einsatz von Aerodynamikpaketen bei Sattelzugaufliegern: Potenziale und Mehrkosten	75
9.2.1	Rechtliche Regelungen	76
9.2.2	Einsparpotenziale und Mehrkosten	77
9.3	Fahrzeugkostenrechnung	78
9.4	Energieeinsparung und Minderung von CO ₂ -Emissionen durch die Lkw-Maut	80
9.4.1	Mögliche Wirkungen der Lkw-Maut auf Energieverbrauch und CO ₂ -Emissionen sowie zeitliche Einordnung	81
9.4.2	Kostenoptimierte Investition in Energieeffizienz	82
9.4.3	Energieeffizienzwirkungen für Sattelzüge und Verteiler-Lkw in der Fahrzeugflotte	87
9.4.4	Effizienzwirkungen von Aerodynamikmaßnahmen an Sattelzugaufliegern	90
9.4.5	Energieeinsparung und Minderung von CO ₂ -Emissionen bei inländischen Fahrzeugen aller Fahrzeugklassen	92
9.4.6	Energieeinsparung und Minderung von CO ₂ -Emissionen bei inländischen Fahrzeugen und ausländischen Fahrzeugen aller Fahrzeugklassen im Inland	98
10	Roadmap zur Einführung der energieeffizienzgespreizten Lkw-Maut	102
11	Fazit	104
	Abkürzungsverzeichnis	107
	Literaturverzeichnis	108

**Anhang A: Technische Informationen zur Einführung der CO₂-Zertifizierung für
Schwere Nutzfahrzeuge**

112

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Effizienzverteilung der Mautfahrleistung in Abhängigkeit der spezifischen CO ₂ -Emissionen für Sattelzüge der VECTO-Klasse 5 und Mautsatzfunktion für das Konzept „stabile Effizienzklassen“ (Mautspreizungsoption 3) im Jahr 2020, schematische Darstellung	5
Abbildung 2-1: Übergang vom aktuellen Mautkonzept zur energieeffizienzgespreizten Lkw-Maut	11
Abbildung 3-1: Mautsätze der Lkw-Maut in Deutschland Status quo	16
Abbildung 5-1: Mautsätze für Sattelzugmaschinen mit Anhänger, nach Maut-Komponenten für drei unterschiedliche Optionen der Differenzierung nach Energieeffizienzklassen	24
Abbildung 6-1: Konzept „Maximiertes Mautaufkommen“ Mautsatzfunktion und Effizienzverteilung im Jahr 2020 in Abhängigkeit der spezifischen Emissionen für Sattelzüge	28
Abbildung 6-2: Konzept „Integral über Verteilungsfunktion“ Mautsatzfunktion und Effizienzverteilung im Jahr 2020 ¹⁸ in Abhängigkeit der spezifischen Emissionen für Sattelzüge	29
Abbildung 6-3: Konzept „stabile Effizienzklassen“ Mautsatzfunktion und Effizienzverteilung im Jahr 2020 ¹⁶ in Abhängigkeit der spezifischen Emissionen für Sattelzüge	30
Abbildung 6-4: Konzept „dynamische Effizienzklassen“ Mautsatzfunktion und Effizienzverteilung im Jahr 2020 ²¹ in Abhängigkeit der spezifischen Emissionen für Sattelzüge	32
Abbildung 6-5: Lkw-Maut abhängig von Effizienz- und Schadstoffklasse sowie Anzahl der Achsen	35
Abbildung 7-1: Bestand mautpflichtiger Fahrzeuge am 1. Januar 2015 nach Anzahl der Achsen, in Tsd. Fahrzeugen	40
Abbildung 7-2: Bestand mautpflichtiger Fahrzeuge am 1. Januar 2015 nach Fahrzeugklasse, in Tsd. Fahrzeugen	41
Abbildung 7-3: Bestand mautpflichtiger Fahrzeuge am 1. Januar 2015 nach zGM-Klasse, in Tsd. Fahrzeugen	42
Abbildung 7-4: Bestand mautpflichtiger Fahrzeuge am 1. Januar 2015 nach Nutzlast-Klasse, in Tsd. Fahrzeugen	43
Abbildung 7-5: Bestand mautpflichtiger Fahrzeuge am 1. Januar 2015 nach technischer zGM-Klasse und Nutzlastklasse, in Tsd. Fahrzeugen	44
Abbildung 7-6: Bestand mautpflichtiger Fahrzeuge am 1. Januar 2015 nach VECTO-Klasse, in Tsd. Fahrzeugen	46

Abbildung 7-7: Abgrenzungen unterschiedlicher Ebenen der Fahrleistung	47
Abbildung 7-8: Durchschnittliche Jahresfahrleistungen nach VECTO-Klasse	48
Abbildung 7-9: Mautfahrleistung in Deutschland nach Nationalität, 2007 bis 2014 und Prognose bis 2030, in Mrd. Fzkm	50
Abbildung 8-1: Verteilung der 2014 neu zugelassenen Sattelzüge der VECTO-Klasse 5 nach spezifischen CO ₂ -Emissionen, in g CO ₂ /tkm	55
Abbildung 8-2: Verteilung der 2014 neu zugelassenen Lkw der VECTO-Klasse 2 nach spezifischen CO ₂ -Emissionen, in g CO ₂ /tkm	56
Abbildung 8-3: Mautfahrleistung der Sattelzugmaschinen der VECTO-Klasse 5 im Jahr 2022 nach dem Erstzulassungsjahr	57
Abbildung 8-4: Effizienzverteilungen der Mautfahrleistungen für das Jahr 2022 und die Effizienzverteilung der im Jahr 2014 neu zugelassenen Sattelzugmaschinen der VECTO-Klasse 5	58
Abbildung 8-5: Effizienzverteilung der Mautfahrleistung der Sattelzugmaschinen der VECTO-Klasse 5 in den Jahren 2022 und 2030	58
Abbildung 8-6: Mautfahrleistung von Sattelzugmaschinen der VECTO-Klasse 5 im Jahr 2022 nach EURO-Schadstoffklasse und Anteil der Mautfahrleistung von Fahrzeugen mit bekannten individuellen CO ₂ -Werten	60
Abbildung 8-7: Mautfahrleistung von Verteiler-Lkw der VECTO-Klasse 2 im Jahr 2023 nach EURO-Schadstoffklasse sowie Anteil der Mautfahrleistung von Fahrzeugen mit bekannten individuellen CO ₂ -Werten	60
Abbildung 8-8: Mautfahrleistung von Sattelzugmaschinen der VECTO-Klasse 5 im Jahr 2022 nach Zulassungsjahr und Anteil der Mautfahrleistung von Fahrzeugen mit bekannten individuellen CO ₂ -Werten	61
Abbildung 8-9: Mautfahrleistung von Verteiler-Lkw der VECTO-Klasse 2 im Jahr 2023 nach Zulassungsjahr sowie Anteil der Mautfahrleistung von Fahrzeugen mit bekannten individuellen CO ₂ -Werten	61
Abbildung 8-10: Effizienzverteilung der Mautfahrleistung von Sattelzugmaschinen der VECTO-Klasse 5 im Jahr 2022 insgesamt sowie Anteil mit bekannten und unbekanntem CO ₂ -Werten	62
Abbildung 8-11: Mautsatz für Sattelzugmaschinen der VECTO-Klasse 5 nach Konzept „dynamische Effizienzklassen“ (sechs Quantile, linear ansteigender Mautsatz) für die Jahre 2020 (oben) und 2030 (unten) inklusive darunterliegendem Integral der Mautfahrleistung (gepunktet) sowie der Mautfahrleistung (blau)	64
Abbildung 8-12: Mautsatz für Sattelzugmaschinen der VECTO-Klasse 5 nach Konzept „stabile Effizienzklassen“ für die Jahre 2020 und 2030 inklusive darunterliegendem Integral der Mautfahrleistung (gepunktet) sowie der Mautfahrleistung (blau)	66

Abbildung 8-13: Vergleich der beiden Mautsatzkonzepte für Sattelzugmaschinen der VECTO-Klasse 5 jeweils für die Jahre 2020 und 2030	67
Abbildung 8-14: Vergleich der Jahre 2020 und 2030 für jeweils beide Mautsatzkonzepte für Sattelzugmaschinen der VECTO-Klasse 5	68
Abbildung 8-15: Vergleich der Jahre 2020 und 2030 für jeweils beide Mautsatzkonzepte für Verteiler-Lkw der VECTO-Klasse 2	69
Abbildung 9-1: Kumulierte Verteilung der Neuzulassungen (NZL) von Sattelzugmaschinen der VECTO-Klasse 5 (zweiachsige Zugmaschine mit Sattel-Auflieger 40 t) nach spezifischen CO ₂ -Emissionen in Gramm je Tonnenkilometer (g/tkm), im Jahr 2020	71
Abbildung 9-2: Kumulierte Verteilung der Neuzulassungen (NZL) von Verteiler-Lkw (12t) der VECTO-Klasse 2 nach spezifischen CO ₂ -Emissionen in Gramm je Tonnenkilometer (g/tkm), Verteilung der CO ₂ Emissionen, im Jahr 2020	71
Abbildung 9-3: Minderungskostenkurve für Effizienzmaßnahmen an Sattelzugmaschinen der VECTO-Klasse 5	73
Abbildung 9-4: Minderungskostenkurve für Effizienzmaßnahmen an Verteiler-Lkw der VECTO-Klasse 2	74
Abbildung 9-5: Aerodynamikmaßnahmen am Sattelzugauflieger	75
Abbildung 9-6: Fahrzeugbezogene Gesamtkosten, in Tsd. Euro/Jahr	80
Abbildung 9-7: Verteilung des Neuzulassungsanteils über den spezifischen Emissionen in Gramm CO ₂ pro Tonnenkilometer (g/tkm) bei neu zugelassenen Sattelzugmaschinen, aufgeteilt nach den drei Effizienzklassen grün: bis einschließlich 43,5 g CO ₂ /tkm; blau zwischen 43,5 und einschließlich 48,5 g CO ₂ /tkm; grün: über 48,5 g CO ₂ /tkm	83
Abbildung 9-8: Wirkung der Maut nach Mautspreizungsoptionen für Sattelzüge der VECTO-Klasse 5 und Verteiler-Lkw der VECTO-Klasse 2 auf die spezifischen Emissionen bei den Neuzulassungen im Jahr maximaler Wirkung, in %	84
Abbildung 9-9: Entwicklung des spezifischen Kraftstoffverbrauchs neu zugelassener Verteiler-Lkw der VECTO-Klasse 2 im Referenzfall und für unterschiedliche Mautspreizungsoptionen nach Zulassungsjahr	86
Abbildung 9-10: Entwicklung des spezifischen Kraftstoffverbrauchs neu zugelassener Sattelzugmaschinen der VECTO-Klasse 5 im Referenzfall und für unterschiedliche Mautspreizungsoptionen nach Zulassungsjahr	86
Abbildung 9-11: Fahrleistungsverteilung der Sattelzugmaschinen der VECTO-Klasse 5 nach Zulassungsjahr und Jahr (Kohorte)	87
Abbildung 9-12: Entwicklung des spezifischen Kraftstoffverbrauchs im Bestand für Lkw der VECTO-Klasse 2 mit und ohne Mautwirkung (inkl. Spreizungsoptionen) für die Jahr 2020 bis 2030	89

Abbildung 9-13: Entwicklung des spezifischen Kraftstoffverbrauchs im Bestand für Sattelzugmaschinen der VECTO-Klasse 5 mit und ohne Mautwirkung (inkl. Spreizungsoptionen) für die Jahr 2020 bis 2030	89
Abbildung 9-14: Entwicklung des spezifischen Kraftstoffverbrauchs für Sattelzugmaschinen der VECTO-Klasse 5 mit Mautwirkungsspreizung Option 3 und für die Referenzentwicklung, für neu zugelassene Fahrzeuge („NZL“, gepunktet), in der Fahrzeugflotte (durchgezogen und gestrichelt) und unter Berücksichtigung der Wirkung von Aerodynamikmaßnahmen an Sattelzugaufliegern (rote durchgezogene Kurve)	92
Abbildung 9-15: Inländerfahrleistung der mautpflichtigen Fahrzeuge nach VECTO-Klassen im Jahr 2020 in Deutschland, in Mrd. Fzkm	93
Abbildung 9-16: Inländerverbrauch der mautpflichtigen Fahrzeuge nach VECTO-Klassen im Jahr 2020 in Deutschland, in PJ	93
Abbildung 9-17: Einsparungen des Inländerverbrauchs der mautpflichtigen SNF, nach Mautspreizung gegenüber Referenz, 2018 – 2030, in PJ	96
Abbildung 9-18: CO ₂ -Minderung der inländischen mautpflichtigen SNF nach Mautspreizung gegenüber Referenz, 2020 – 2030, in Mio. t CO ₂	97
Abbildung 9-19: Inländerverbrauch versus Inlandsverbrauch der mautpflichtigen SNF im Referenzszenario im Jahr 2020	98
Abbildung 9-20: Einsparung des Inlandsverbrauches und des Inländerverbrauches der mautpflichtigen SNF nach Mautspreizung gegenüber Referenz, 2018 – 2030, in PJ	100
Abbildung 9-21: CO ₂ -Minderung der mautpflichtigen SNF im Inland nach Mautspreizung gegenüber Referenz, 2020 – 2030, in Mio. t CO ₂	101

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1-1: Spreizung der Mautsätze für Verteiler-Lkw und Sattelzüge für drei unterschiedliche Optionen der Mautsatzspreizung in EURO-Cent pro km	2
Tabelle 1-2: Definition von Effizienzklassen in Abhängigkeit der spezifischen CO ₂ -Emissionen und zugehörige Mautsätze für Sattelzüge der VECTO-Klasse 5 (Mautspreizungsoption 3) im Jahr 2022	6
Tabelle 4-1: Einteilung der mautpflichtigen Fahrzeuge in VECTO-Klassen	20
Tabelle 5-1: Spreizung der Mautsätze in ct. / km für Verteiler-Lkw und Sattelzüge für drei unterschiedliche Optionen der Mautsatzspreizung	25
Tabelle 7-1: Einteilung der mautpflichtigen Fahrzeuge in VECTO-Klassen	45
Tabelle 7-2: Mautfahrleistung nach VECTO-Klasse, Inländerfahrleistung und Inlandsfahrleistung mautpflichtiger Fahrzeuge für die Jahre 2015, 2020 und 2030, in Mio. Fzkm	51

Tabelle 8-1: Verbrauchsrelevante Kennwerte der simulierten Fahrzeuge der VECTO-Klasse 5 (Sattelzugmaschinen, Fernverkehr)	54
Tabelle 8-2: Verbrauchsrelevante Kennwerte der simulierten Fahrzeuge der VECTO-Klasse 2 (Verteiler-Lkw 10 bis 12 t zGM)	54
Tabelle 9-1: Kosten und Minderungspotenzial von Effizienzmaßnahmen für Sattelzugmaschine der VECTO-Klasse 5	72
Tabelle 9-2: Kosten und Minderungspotenzial von Effizienzmaßnahmen für Verteiler-Lkw der VECTO-Klasse 2	72
Tabelle 9-3: CO ₂ -Minderung und Kosten Aerodynamikpakete bei Sattelanhängern	77
Tabelle 9-4: Inputs zur Berechnung der fahrzeugbezogenen TCO-Kosten (mittlere Werte für: Jahresfahrleistung, Anteil Mautfahrleistung, Mautsatz und spezifischer Kraftstoffverbrauch)	79
Tabelle 9-5: Anteil Sattelanhänger mit Aerodynamikpaket an gesamter Sattelanhänger-Fahrleistung	91
Tabelle 9-6: Ableitung der Wirkung der Lkw-Maut für alle VECTO-Klassen	94
Tabelle 9-7: Inländerverbrauch der mautpflichtigen SNF, Referenz und nach Mautspreizung sowie Einsparung gegenüber Referenz, 2020 – 2030, in PJ und %	95
Tabelle 9-8: CO ₂ -Emissionen der inländischen mautpflichtigen SNF, Referenz und nach Mautspreizung sowie Minderung gegenüber Referenz, 2020 – 2030, in Mio. t CO ₂ und %	97
Tabelle 9-9: Inlandsverbrauch der mautpflichtigen SNF, Referenz und nach Mautspreizung sowie Einsparung gegenüber Referenz, 2020 – 2030, in PJ und %	99
Tabelle 9-10: CO ₂ -Emissionen der mautpflichtigen SNF im Inland, Referenz und nach Mautspreizung sowie Minderung gegenüber Referenz, 2020 – 2030, in Mio. t CO ₂ und %	101

1 Kurzfassung

Einleitung

Um den Energieverbrauch von Schweren Nutzfahrzeugen zu senken und die damit verknüpften Treibhausgase zu mindern, soll der Mautsatz zukünftig von der Energieeffizienz der Fahrzeuge abhängen.

In der vorliegenden Studie wird untersucht, wie die Abhängigkeit des Mautsatzes von der Energieeffizienz ausgestaltet werden kann. Zwei konkrete Konzepte – „stabile Effizienzklassen“ und „dynamische Effizienzklassen“ – werden hierfür entwickelt. Ziel ist es, einen möglichst hohen Anreiz für Energieeffizienz zu schaffen und zu gewährleisten, dass sich die Höhe der Mauteinnahmen an den Wegekosten orientiert (Aufkommensneutralität).

Daneben wird untersucht, ab wann die energieeffizienzgespreizte Lkw-Maut frühestens eingeführt werden kann und welche Wirkungen sich auf Endenergieverbrauch und CO₂-Emissionen¹ durch die Umstellung der Maut auf die folgend vorgestellten Konzepte ergeben.

Europäischer Rahmen

Die Eurovignettenrichtlinie, die den europarechtlichen Rahmen für die Lkw-Maut bestimmt, erlaubt nach aktuellem Stand keine Differenzierung der Mautsätze nach der Energieeffizienz oder den spezifischen CO₂-Emissionen der Fahrzeuge. Um über die deutsche Lkw-Maut einen Anreiz zur Steigerung der Effizienz zu schaffen, muss die Eurovignettenrichtlinie daher angepasst werden. Ein Vorschlag für eine Richtlinie zur Anpassung der Eurovignettenrichtlinie [2017/275/EU] befindet sich im Abstimmungsprozess [2017/0114/COD/EU]. Der Entwurf beinhaltet Rahmenvorgaben zur Einführung einer nach CO₂-Emissionen differenzierten Maut für Schwere Nutzfahrzeuge. Für die Umsetzung der Differenzierung weitere notwendige zukünftige Änderungen der Eurovignettenrichtlinie nehmen Einfluss auf die zukünftige Ausgestaltung der deutschen Lkw-Maut.

Anreiz für Energieeffizienz durch optimierte Mautspreizung

Der Anreiz für Energieeffizienz ist umso größer, je stärker der Mautsatz in Abhängigkeit von der Energieeffizienz variiert. Die mögliche Mautspreizung hängt vom EU-rechtlichen Rahmen ab. Für die aktuell mögliche Spreizung der Mautsätze nach Schadstoffklassen² erlaubt das geltende EU-Recht drei Arten der Differenzierung: die Spreizung der Infrastrukturkomponenten (Option

¹ Die vorgenommenen Untersuchungen zu Treibhausgasen beschränken sich auf CO₂-Emissionen, welche im Verkehrssektor einen Anteil von über 98% ausmachen.

² Zu diesen gehören Stickoxide (NO_x), Kohlenmonoxid (CO), Feinstaub (PM) und Kohlenwasserstoffe (HC) – Treibhausgase wie Kohlendioxid (CO₂) zählen nicht zu den Schadstoffen.

1), die Anrechnung von externen Kosten (Option 2) und die Kombination beider Möglichkeiten (Option 3). Diese bestehenden Möglichkeiten der Bemautung nach Schadstoffklassen könnten durch Anpassung des EU-Rechts auf Energieeffizienzklassen erweitert werden. Eine Differenzierung gemäß Option 1 wird im Rahmen des aktuellen Änderungsvorschlags explizit genannt (Art. 7g (4)). Die Optionen 2 und 3 verlangen zusätzliche Anpassungen der Eurovignettenrichtlinie – entweder durch eine Änderung des Vorschlags – oder durch eine weitere Änderungsrichtlinie. Durch die Anpassung würde eine Differenzierung der Mautsätze nach Effizienzwerten ermöglicht, so dass im Rahmen einer geänderten deutschen Lkw-Maut ein entscheidender Anreiz für Energieeffizienz geschaffen werden kann. Abhängig ist diese Mautsatzspreizung (bei den Optionen 2 und 3) dann von den externen Kosten, welche den CO₂-Emissionen zugeschrieben werden. Unter Annahme eines Kostensatzes von 80 Euro/t CO₂ und abhängig von den Annahmen zu den Emissionen der Fahrzeuge³ lassen sich konkrete Mautsatzspreizungen ableiten (Tabelle 1-1).

Tabelle 1-1: Spreizung der Mautsätze für Verteiler-Lkw und Sattelzüge für drei unterschiedliche Optionen der Mautsatzspreizung in EURO-Cent pro km

Fahrzeugklasse	Option 1	Option 2	Option 3
Verteiler-Lkw, VECTO-Klasse 2	5,4–10,8 Delta: 5,4	8,1–13,6 Delta: 5,5	5,4–16,3 Delta: 10,9
Sattelzug, VECTO-Klasse 5	7,8–15,6 Delta: 7,8	11,7–20,2 Delta: 8,5	7,8–24,1 Delta: 16,3

Quelle: eigene Berechnung

Maße für Energieeffizienz

Um den Mautsatz nach der Energieeffizienz der Fahrzeuge zu differenzieren, muss diese bewertet werden. Die Studie untersucht daher unterschiedliche Maße für Energieeffizienz. Wichtig hierfür ist die Verfügbarkeit der Daten, die notwendig sind, um für die Fahrzeuge den entsprechenden Effizienzwert abzuleiten. Zudem soll die abgebildete Energieeffizienz den Nutzwert im Verhältnis zum Energieverbrauch darstellen. Dafür bieten sich die Werte der spezifischen CO₂-Emissionen oder alternativ der spezifische Energieverbrauch an, welche ab 2019/2020 im Rahmen des EU-Zertifizierungsverfahrens bestimmt werden und dann für neu zugelassene Schwere Nutzfahrzeuge (SNF) sukzessive verfügbar sind. Da primär Diesel als Energieträger eingesetzt wird, sind die CO₂-Emissionen proportional zum Energieverbrauch und eignen sich im Verhältnis zur Verkehrsleistung als Maß für die Energieeffizienz. Durch Verwendung der spezifischen CO₂-Emissionen als

³ Für Fahrzeuge mit niedriger Effizienz wurde hier exemplarisch angenommen: Verteiler-Lkw der VECTO-Klasse 2: 6,8 g/100 km, Sattelzug der VECTO-Klasse 5: 11 g/100 km

Maß für Energieeffizienz wird zusätzlich ein Anreiz geschaffen, Energieträger mit geringen Emissionen einzusetzen. Im Rahmen des Änderungsvorschlages der Eurovignettenrichtlinie wird auf das CO₂-Zertifizierungsverfahren referenziert.

Homogene Fahrzeuggruppen

Je nach Fahrzeugklasse unterscheidet sich die Effizienz der Fahrzeuge. Die energieeffizienzgespreizte Maut hat nicht das Ziel, Verschiebungen zwischen Fahrzeugklassen zu bewirken – beispielsweise dahingehend, dass eher größere Fahrzeuge eingesetzt werden, wenn diese eine höhere Effizienz aufweisen. Vielmehr soll ein Anreiz geschaffen werden, in allen Fahrzeugklassen Technologien einzusetzen, welche Energieverbrauch und CO₂-Emissionen der Fahrzeuge reduzieren. Es werden deshalb Verfahren definiert und untersucht, nach denen die schweren Nutzfahrzeuge zunächst in möglichst homogene Fahrzeuggruppen eingeteilt und anschließend in Abhängigkeit von ihren spezifischen Emissionswerten Effizienzklassen zugeordnet werden können. Für die Einteilung in diese homogenen Gruppen eignet sich eine Klassendefinition abhängig vom Fahrzeugtyp, der zulässigen Gesamtmasse und der Achskonfiguration. Eine solche Differenzierung wird im Rahmen des EU-Zertifizierungsverfahrens vorgenommen und eignet sich auch für die Einteilung im Rahmen der effizienzgespreizten Lkw-Maut. SNF werden dabei in insgesamt 17 VECTO-Klassen eingeteilt. Die Fahrzeugklassen werden hinsichtlich ihrer Anteile an der Mautfahrleistung und am Energieverbrauch untersucht. Den Sattelzügen der VECTO-Klasse 5 (zweiachsige Sattelzugmaschinen) kommt mit einem Anteil von über 50 % am Energieverbrauch der mautpflichtigen Fahrzeuge eine besondere Bedeutung zu.

Aerodynamikmaßnahmen bei Sattelanhängern

Bei Sattelzügen und Gliederzügen hat die Aerodynamik des Anhängers einen wesentlichen Einfluss auf den Energieverbrauch. Insbesondere bei Sattelzügen, lohnt es sich, durch die Maut einen Anreiz für Aerodynamikmaßnahmen am Sattelanhänger zu schaffen. Dafür muss dessen Aerodynamik im Betrieb auf den Effizienzwert anrechenbar sein, sodass sich der Mautsatz je nach eingesetztem Anhänger unterscheidet. Im Rahmen des Änderungsvorschlages der Eurovignettenrichtlinie wird keine Einbeziehung von Aerodynamikmaßnahmen des Sattelanhängers vorgesehen. Der europarechtliche Rahmen dafür müsste – unter anderem durch Anpassung der Eurovignettenrichtlinie – geschaffen werden. Im Rahmen der in Kapitel 9 vorgenommenen Wirkungsabschätzungen auf Endenergieverbrauch und CO₂-Emissionen wird für die Zwecke dieser Studie davon ausgegangen, dass die notwendigen rechtlichen Rahmenbedingungen geschaffen werden.

Definition von Mautkonzepten

Für die Zuordnung der Fahrzeuge innerhalb der homogenen Gruppen zu Effizienzklassen werden zwei unterschiedliche Konzepte,

die mit „stabile Effizienzklassen“ und „dynamische Effizienzklassen“ bezeichnet werden, detailliert untersucht sowie in ihrer Wirkung auf die Effizienz der Fahrzeuge und die Praktikabilität der Umsetzung bewertet. Nach beiden Konzepten hängt der Mautsatz von der Effizienz der übrigen Fahrzeuge der homogenen Gruppe ab. Für Fahrzeuge mit überdurchschnittlich guten Effizienzwerten ist ein niedrigerer, für Fahrzeuge mit schlechterer Effizienz ein höherer Mautsatz zu zahlen. Um zu gewährleisten, dass mit zunehmender Effizienz der Fahrzeuge der Anreiz für Effizienzsteigerungen bestehen bleibt und die Wegekosten weiterhin mit den Maut-einnahmen gedeckt werden können, müssen die Maut-sätze regelmäßig an die Effizienz des Fahrzeugparks angepasst werden. Um die dafür notwendigen Daten zu ermitteln, kann im Rahmen der Mautstatistik zukünftig die Mautfahrleistung nach Effizienzwert aufgenommen werden. Damit wird bilanziert, wie viel Mautfahrleistung mit Fahrzeugen erbracht wird, die einen bestimmten Effizienzwert besitzen. Daraus lässt sich dann die Verteilung der Mautfahrleistung über das Effizienzmaß (Effizienzverteilung) ableiten (vgl. Abbildung 1-1).

Nach dem Konzept „stabile Effizienzklassen“ werden Effizienzklassen mit einer festen Klassenbreite und zeitlich stabilen Klassengrenzen auf dem Effizienzmaß definiert.⁴ Mit steigender Effizienz der Fahrzeuge erhöhen sich die Mautsätze für die Effizienzklassen unter Beibehaltung des mittleren Mautsatzes.

Nach dem Konzept „dynamische Effizienzklassen“ erfolgt die Zuordnung eines Fahrzeuges zu einer Effizienzklasse relativ zur Effizienz der anderen Fahrzeuge.⁵ Ein Fahrzeug wird beispielsweise der Effizienzklasse A zugeordnet, wenn es zu den 20 % effizientesten Fahrzeugen gehört. Die Mautsätze der einzelnen Effizienzklassen steigen linear an und sind zeitlich konstant. Die Zuordnung zur Effizienzklasse kann sich mit der Zeit ändern.

Stabile Effizienzklassen sind besser nachvollziehbar und leichter international abstimmbare, da die Zuordnung zu einer Klasse sich über die Lebensdauer eines Fahrzeugs nicht ändert. Ein Nachteil des Konzeptes ist, dass nur ein Anreiz für Effizienzmaßnahmen entsteht, durch die das Fahrzeug einer besseren Effizienzklasse zugeordnet wird.⁶ Dieser Nachteil schwächt sich mit steigender Anzahl von Effizienzklassen ab, weil dadurch bessere Effizienzklassen durch geringere Effizienzverbesserungen erreicht werden können.

Dynamische Effizienzklassen stellen für den Halter Transparenz bezüglich der Effizienz des eigenen Fahrzeugs gegenüber anderen Fahrzeugen her und darüber, wie sich dieses Verhältnis mit der Zeit ändert. Effizienzmaßnahmen lohnen sich auch dann,

⁴ Z. B. Effizienzklasse A: über 28 g CO₂/tkm–30 g CO₂/tkm, Effizienzklasse B: über 26 g CO₂/tkm–28 g CO₂/tkm etc.

⁵ Die Einteilung erfolgt gemäß den Quantilen der Verteilung der Mautfahrleistung nach dem Effizienzmaß.

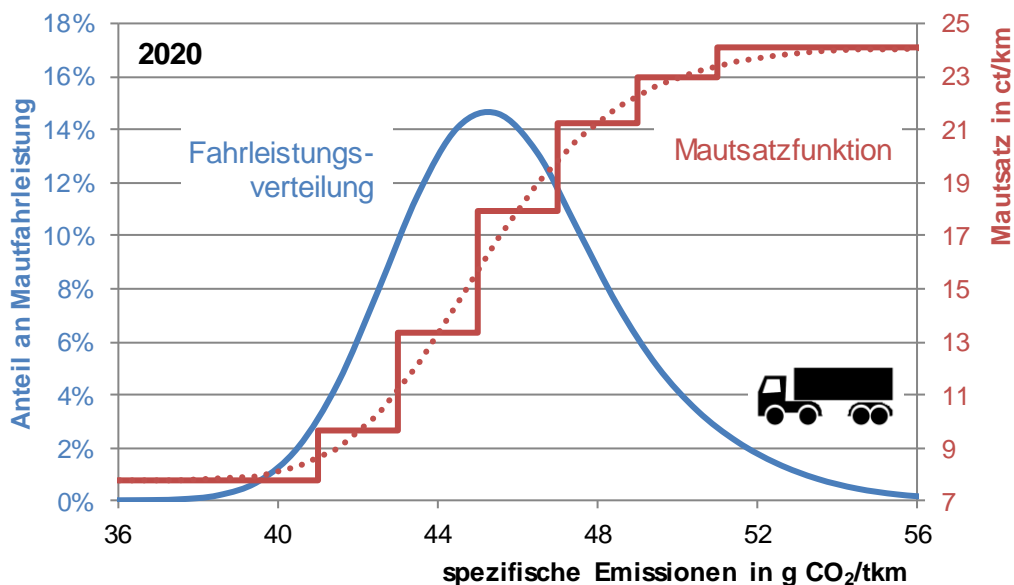
⁶ Wenn beispielsweise ein Fahrzeugmodell einen spezifischen Emissionswert von 44 g CO₂/tkm besitzt und Fahrzeuge zwischen 40 und 44 g CO₂/tkm einer Effizienzklasse zugeordnet werden, werden nur Effizienzmaßnahmen angereizt, durch die das Fahrzeug einen Effizienzwert besser als 40 g CO₂/tkm erreicht.

wenn das Fahrzeug zwar aktuell in derselben Effizienzklasse verbleibt, aber für die Zukunft davon ausgegangen werden kann, dass die Zuordnung zu einer schlechteren Effizienzklasse zu einem späteren Zeitpunkt erfolgen wird.

Untersuchung der Mautkonzepte anhand modellierter Effizienzverteilung

Um die Wirkungsweise der beiden Mautkonzepte zu untersuchen, werden für die Jahre 2020 und 2030 sowie für zwei Fahrzeugklassen Verteilungen der Mautfahrleistung nach spezifischen Emissionen modelliert und die daraus resultierenden Mautsatzfunktionen abgeleitet. Diese geben die Höhe des Mautsatzes in Abhängigkeit von den spezifischen Emissionen eines Fahrzeuges an. Für das Konzept „stabile Effizienzklassen“ bei Sattelzügen der VECTO-Klasse 5 im Jahr 2020 ist sie in Abbildung 1-1 dargestellt und in Beziehung zur zugehörigen Effizienzverteilung gesetzt. In Tabelle 1-2 werden die entsprechenden Effizienzklassen und zugehörigen Mautsätze tabellarisch angegeben.

Abbildung 1-1: Effizienzverteilung der Mautfahrleistung in Abhängigkeit der spezifischen CO₂-Emissionen für Sattelzüge der VECTO-Klasse 5 und Mautsatzfunktion für das Konzept „stabile Effizienzklassen“ (Mautspreizungsoption 3) im Jahr 2020, schematische Darstellung⁷



Quelle: eigene Berechnung, die Anteile beziehen sich jeweils auf eine Breite von 1 g CO₂/tkm, Klassenbreite festgelegt auf 2 g CO₂/tkm

⁷ Bei Erarbeitung der Mautkonzepte wurde davon ausgegangen, dass die Maut bereits im Jahr 2020 voll wirken kann. Die Entwicklung der Mautkonzepte wurde unter dieser Annahme für das Jahr 2020 durchgeführt. Nach Vorlage des Änderungsvorschlags für die Eurovignettenrichtlinie ist davon auszugehen, dass die energieeffizienzgespreizte Maut frühestens in den Jahren 2022/2023 eingeführt werden kann. Die Konzepte können analog auch entsprechend später eingeführt werden.

In den Jahren 2019 bis 2020 wird die Pflicht zur Ausweisung von spezifischen CO₂-Emissionen gemäß EU-Zertifizierungsverfahren für SNF sukzessive eingeführt. Unter Berücksichtigung des aktuellen Vorschlags zur Änderung der Eurovignettenrichtlinie ist nicht anzunehmen, dass eine Differenzierung des Mautsatzes nach spezifischen CO₂-Emissionen für Fahrzeuge der VECTO-Klasse 5 vor dem Jahr 2022 erfolgen kann. Bereits vor Änderung der Mautrichtlinien kann jedoch für Kunden ein Anreiz geschaffen werden, effiziente Fahrzeuge, die 2019 mit VECTO-Wert zugelassen werden, zu erwerben: Bei klarer Ankündigung der Mautumstellung ist damit zu rechnen, dass Fahrzeuge mit günstigeren CO₂-Werten bevorzugt nachgefragt werden, da für diese ab 2022 geringere Mautsätze zu entrichten sein werden.

Tabelle 1-2: Definition von Effizienzklassen in Abhängigkeit der spezifischen CO₂-Emissionen und zugehörige Mautsätze für Sattelzüge der VECTO-Klasse 5 (Mautspreizungsoption 3) im Jahr 2022

Effizienz- klasse	spezifische Emissionen in g CO ₂ /tkm		Mautsatz in ct/km
	≥	<	
1	51	max.	24,1
2	49	51	23,0
3	47	49	21,3
4	45	47	17,9
5	43	45	13,3
6	41	43	9,6
7	min.	41	7,8

Quelle: eigene Berechnung

Zum Zeitpunkt der Umstellung der Maut und in den Folgejahren wird ein Großteil der Fahrzeuge keinen zertifizierten VECTO-Wert für die spezifischen CO₂-Emissionen besitzen, da sie vor Einführung des Zertifizierungsverfahrens zugelassen wurden. Eine nachträgliche individuelle Bewertung von Bestandsfahrzeugen zum Zweck der Bemautung wird aufgrund des enormen Aufwandes pro Fahrzeug nicht machbar sein. Es wird stattdessen empfohlen, Fahrzeugen ohne CO₂-Zertifikat generische spezifische CO₂-Emissionen basierend auf ihrem Zulassungsjahr zuzuweisen.

Wirkung auf Endenergieverbrauch und CO₂-Emissionen für das Mautkonzept „stabile Effizienzklassen“

Abschließend wird untersucht, welche Wirkungen auf den Energieverbrauch und die CO₂-Emissionen des mautpflichtigen Güterverkehrs durch die Umstellung der Maut erzielt werden können. Dabei werden unterschiedlich stark ausgeprägte Mautsatzspreizungen für das Konzept „stabile Effizienzklassen“ untersucht, dessen Umsetzung wegen der leichteren internationalen Abstimmung und der besseren Nachvollziehbarkeit als wahrscheinlicher angesehen wird.

Die Ermittlung der Wirkungen der Mautumstellung basiert auf Fahrzeugkostenrechnungen für Modellfahrzeuge (je ein Verteiler-Lkw und eine Sattelzugmaschine) sowie Kosten und Minderungspotenzialen von unterschiedlichen Effizienzmaßnahmen. Es werden Statistiken zum Einsatz der Fahrzeuge berücksichtigt.

Im Rahmen der Fahrzeugkostenrechnung werden zunächst die Auswirkungen der gespreizten Maut auf die Fahrzeugkosten für die untersuchten Fahrzeugklassen Verteiler-Lkw (VECTO-Klasse 2) und Sattelzugmaschine (VECTO-Klasse 5) untersucht. Dabei werden die Halterkosten ohne Lohnkosten betrachtet. Je nach Fahrzeugkategorie, Jahres- und Mautfahrleistung sowie dem spezifischen Effizienzwert bzw. dem zugeordneten Mautsatz unterscheidet sich der Anteil der Mautkosten an den Gesamtkosten deutlich. Für Sattelzugmaschinen haben Mautkosten typischerweise einen Anteil von rund 7 % an den Fahrzeugkosten – der Anteil der Kraftstoffkosten liegt hingegen bei rund 55 %.

Für die zwei Fahrzeugklassen wird ermittelt, welche Effizienzmaßnahmen durch die Mautanpassung im Durchschnitt über die unterschiedlichen Einsatzprofile (abgeleitet über statistische Informationen zu den Verteilungen der Jahres- und Mautfahrleistungen) wirtschaftlich sind. Davon ausgehend werden für die übrigen VECTO-Fahrzeugklassen Effizienzsteigerungen abgeschätzt. Die Wirkungen werden zunächst für Endenergieverbrauch und CO₂-Emissionen der inländischen (deutschen) Fahrzeugflotte und in einem letzten Schritt für den Inlandsverkehr in Deutschland abgeleitet.

Die ermittelten Wirkungen auf Energieverbrauch und CO₂-Emissionen basieren auf konkreten Annahmen zu Rahmenbedingungen und zur Umsetzung der Lkw-Maut, und hängen von diesen ab. Die Möglichkeiten zur Umsetzung des Mautkonzeptes werden von der tatsächlichen Änderung der Eurovignettenrichtlinie beeinflusst – insbesondere davon, welche Mautsatzspreizungen erlaubt werden. Wird die Effizienzspreizung der Maut zu einem späteren Zeitpunkt eingeführt, (Annahme: Einführung einer energieeffizienzgespreizten Maut ab 2022/2023 je nach Fahrzeugklasse) und nicht frühzeitig in ihrer konkreten Ausgestaltung angekündigt, reduziert sich neben der zeitlichen Verzögerung auch ihre Wirkung auf Energieverbrauch und CO₂-Emissionen. Der durch Aerodynamikmaßnahmen an Sattelanhängern induzierte Wirkungsbeitrag

liegt bei 470 Tsd. t CO₂ und macht damit 30 % der gesamten Minderungswirkung aus. Er hängt von einer zukünftigen Anrechenbarkeit auf den Effizienzwert des Fahrzeugs ab.

Die Stabilität der Wirkung hängt von der regelmäßigen Anpassung der Mautsätze nach dem vorgestellten festgelegten Verfahren und der dafür notwendigen Erhebung der Mautstatistik nach Effizienzwerten ab.

Je nach Spreizung der Mautsätze kann unter den genannten Annahmen im Jahr 2030 eine Energieeinsparung von 22 bis 25 PJ bzw. eine Minderung von 1,4 bis 1,6 Mio. t CO₂ erreicht werden.

2 Einleitung

Die Bundesregierung hat im Rahmen des Klimaschutzplans 2050 bekräftigt, dass durch verkehrspolitische Maßnahmen ein ambitionierter Beitrag zum Erreichen der Klimaschutzziele geleistet werden soll [BMUB 2016]. Das Verkehrssystem in Deutschland soll bis zum Jahr 2050 nahezu unabhängig von Kraftstoffen mit fossilem Kohlenstoff und somit weitgehend treibhausgasneutral sein. Gemäß dem Zwischenziel des Klimaschutzplans müssen die Treibhausgasemissionen des Verkehrs bis 2030 auf 95 bis 98 Mio. t CO₂-Äquivalente (CO₂-Äq) gemindert werden. Dies entspricht einer Absenkung um 42 bzw. 40 % gegenüber dem Niveau von 1990. Im Jahr 2016 lagen die Treibhausgasemissionen gemäß nationalem Inventarbericht bei 167 Mio. t CO₂-Äq und damit leicht über dem Niveau von 1990 [UBA, 2018].

Im Rahmen des Energiekonzeptes der Bundesregierung aus dem Jahr 2010 wurde das Ziel gesetzt, die Treibhausgasemissionen sektorübergreifend bis zum Jahr 2020 um 40 % gegenüber 1990 zu mindern. Um dieses Ziel zu erreichen, wurde am 3. Dezember 2014 das „Aktionsprogramm Klimaschutz 2020“ verabschiedet, in dem für alle Sektoren konkrete Maßnahmen festgelegt wurden, um zusätzliche Treibhausgasemissionen zu mindern. Im Sektor Verkehr sollte dies unter anderem durch eine Änderung der Lkw-Maut erreicht werden. So heißt es dort: „Es wird angestrebt, die Lkw-Maut zukünftig entsprechend dem Energieverbrauch der Fahrzeuge aufkommensneutral zu staffeln.“

Bislang besteht keine EU-rechtliche Grundlage für eine Maut, die nach Energieeffizienzkriterien gestaffelt ist. Die Eurovignettenrichtlinie [1999/62/EU] sieht zwar die Einbeziehung von externen Kosten als Teil des Mautsatzes vor, nicht jedoch in Bezug auf Energieverbrauch oder CO₂-Emissionen.

Vor diesem Hintergrund hat das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) die Prognos AG und die Forschungsgesellschaft für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik mbH (FVT) beauftragt, die Ausgestaltung einer energieeffizienzgespreizten Maut zu untersuchen und die Wirkung eines solchen Mautkonzeptes auf Energieverbrauch und CO₂-Emissionen zu ermitteln. Ziel des Mautkonzeptes ist es, einen möglichst starken Anreiz für den Einsatz energieeffizienter Fahrzeuge und zur Minderung der CO₂-Emissionen zu schaffen. Gleichzeitig soll gewährleistet werden, dass sich die Mauteinnahmen an den Wegekosten orientieren (Aufkommensneutralität).

Die Anpassung der Eurovignettenrichtlinie ist Gegenstand eines aktuellen europäischen Gesetzgebungsverfahrens. Der Änderungsvorschlag sieht die Möglichkeit und Verpflichtung der Differenzierung der Lkw-Maut nach CO₂-Emissionswerten und damit

auch nach Energieeffizienz⁸ vor (vgl. Kapitel 3.2). Die Umsetzung eines der im vorliegenden Bericht vorgestellten Mautkonzepte (Konzept 3: stabile Effizienzklassen, Kap. 0) ist im Rahmen dieses Vorschlages prinzipiell möglich, hängt jedoch von der weiteren Entwicklung der aktuellen Anpassung der Eurovignettenrichtlinie sowie weiterer notwendiger Anpassungen der europäischen Rahmengesetzgebung ab.

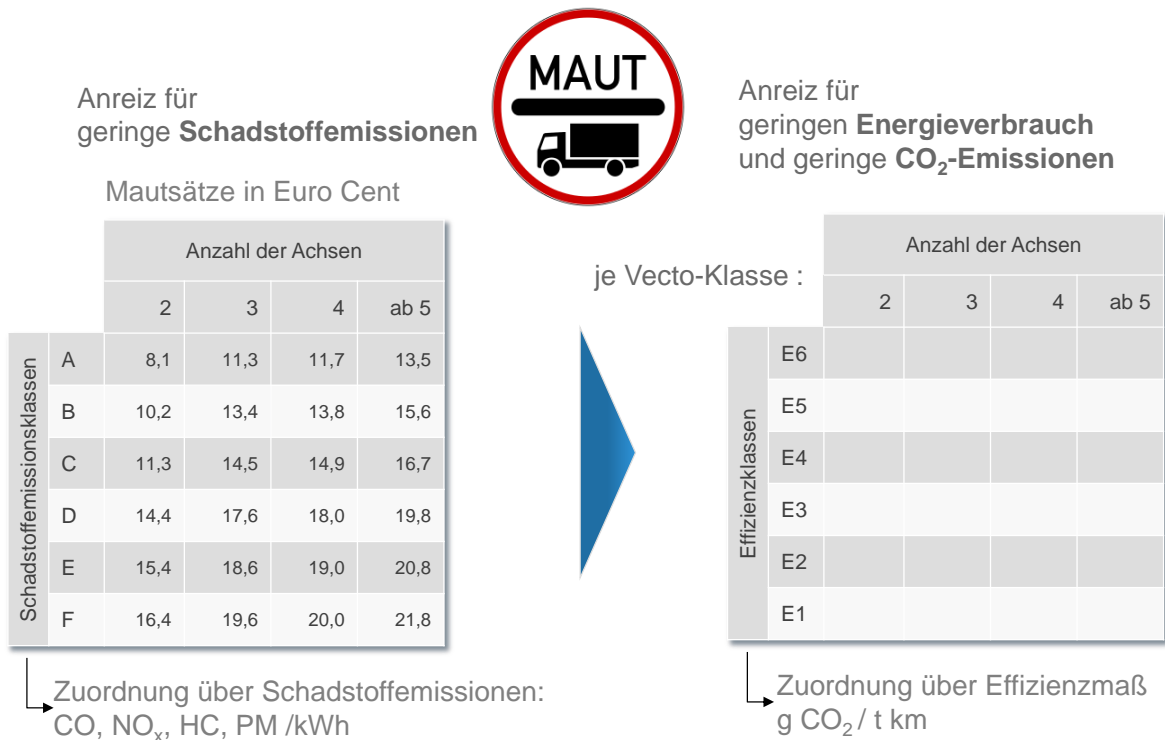
Im Laufe der vorliegenden Untersuchung wurden neben den Dokumenten zur Änderung der gesetzlichen Rahmenbedingungen neue Forschungsergebnisse zu Minderungspotenzialen und Kosten von Effizienzmaßnahmen für Schwere Nutzfahrzeuge (SNF) sowie die Ergebnisse der Fahrleistungserhebung 2014 veröffentlicht, die jeweils relevant für die Ermittlung der Wirkung des vorgestellten Mautkonzeptes sind; sie konnten in diesen Bericht einbezogen werden. Zur Ermittlung der Mautwirkung wurde unter anderem eine Fahrleistungsprognose differenziert nach VECTO-Fahrzeugklassen bis 2030 erstellt (vgl. Kapitel 7.2).

SNF werden im Unterschied zu Pkw und Leichten Nutzfahrzeugen (LNF) bislang nicht mit einem standardisierten Verfahren bezüglich ihrer Energieeffizienz bewertet. Derzeit wird auf europäischer Ebene ein CO₂-Zertifizierungsverfahren für SNF entwickelt, durch das zukünftig eine Basis für die Bewertung der Energieeffizienz solcher Fahrzeuge zur Verfügung steht. Für mautpflichtige Fahrzeuge liegt voraussichtlich ab den Zulassungsjahren 2019/20 sukzessive eine entsprechende Bewertung vor. Die FVT ist in Kooperation mit der TU Graz maßgeblich an der Entwicklung des zukünftigen CO₂-Zertifizierungssystems beteiligt und konnte für die Zwecke der vorliegenden Untersuchung entsprechende vorläufige Bewertungen der Energieeffizienz für ausgewählte Fahrzeuggruppen vornehmen. Dadurch konnte die Wirkung möglicher Mautkonzepte simuliert werden. Ein Übergang zu einer energieeffizienzgespreizten Maut ist frühestens ab 2022/23 möglich, wenn für SNF erste Effizienzwerte verfügbar sind⁹. Bei einer Mautumstellung 2022/23 werden bereits relevante Anteile der Mautfahrleistung mit Fahrzeugen mit eingetragenen Effizienzwerten erbracht. Bereits vor Einführung der energieeffizienzgespreizten Maut entsteht dabei ein Anreiz energieeffiziente Fahrzeuge zuzulassen, da für diese ab Umstellung der Maut niedrigere Mautkosten erwartet werden können.

⁸ In einem erweiterten Energieeffizienzbegriff können auch Emissionswerte, welche beim Verbrauch der Energie entstehen, bezogen auf einen damit bewirkten Nutzwert, als Maß für Energieeffizienz verwendet werden (z.B. CO₂-Emissionen pro km Fahrleistung, vgl. Kapitel 4.2).

⁹ vgl. Kapitel 3.2 und 10

Abbildung 2-1: Übergang vom aktuellen Mautkonzept zur energieeffizienzgespreizten Lkw-Maut



Quelle: eigene Darstellung

Der Übergang vom aktuellen Mautsystem zur energieeffizienzgespreizten Lkw-Maut ist in Abbildung 2-1 dargestellt. Während die aktuelle Lkw-Maut über gestufte Mautsätze einen Anreiz für den Einsatz von Fahrzeugen mit geringen Schadstoffemissionen schafft, wird mit der energieeffizienzgespreizten Maut ein Anreiz für den Einsatz von Fahrzeugen mit niedrigem Energieverbrauch und geringen CO₂-Emissionen gesetzt.

Wie im aktuellen Mautkonzept hängen auch im Rahmen der energieeffizienzgespreizten Maut die Mautsätze von Achsklassen ab – die aktuelle Differenzierung nach Schadstoffklassen wird dabei von einer Differenzierung nach Energieeffizienzklassen abgelöst.

Zentrales Ergebnis der vorliegenden Arbeit ist ein konkretes Konzept zur Differenzierung der Lkw-Maut nach Energieeffizienzklassen, bei dessen Umsetzung im Jahr 2020 einen Beitrag zur Minderung der CO₂-Emissionen zwischen 160 und 200 Tsd. t und im Zeitraum 2025 bis 2030 von bis zu 1,6 Mio. t CO₂ geleistet werden kann.

3 Grundlagen zur energieeffizienzgespreizten Lkw-Maut

In diesem Kapitel werden die Ziele der Mautumstellung sowie die gesetzlichen Rahmenbedingungen sowohl auf europäischer als auch auf deutscher Ebene aufgezeigt.

3.1 Ziele der Mautumstellung

Die Umstellung der Lkw-Maut zu einer energieeffizienzgespreizten Maut soll einen Beitrag dazu leisten, den **Endenergieverbrauch** im Verkehrssektor zu senken und die damit verknüpften **Treibhausgasemissionen** zu mindern.

Rund ein Viertel des Energieverbrauchs im Verkehrssektor entfällt auf den Straßengüterverkehr [Prognos, Fraunhofer ISI, TU München, Giger, 2016]. Darunter dominieren mautpflichtige Fahrzeuge mit einem Anteil von rund 75%. Während für den Motorisierten Individualverkehr ein Potential zur Minderung von Treibhausgasemissionen über Elektrifizierung gesehen wird, ist dieser Weg im Schweren Straßengüterverkehr wegen den hohen geforderten Energiedichten mit sehr viel mehr Aufwand verbunden. Auch das Minderungspotenzial durch Substitution mit Energieträgern mit geringeren spezifischen Emissionsfaktoren wie verflüssigtem Erdgas (LNG), Biokraftstoffen und strombasierten Kraftstoffen ist mittel- bis langfristig unsicher. Um mittelfristig Energieverbrauch und Treibhausgasemissionen im Verkehrssektor zu senken, spielt die Steigerung der Energieeffizienz im Schweren Güterverkehr deshalb eine wichtige Rolle. Eine Spreizung der Lkw-Maut nach Energieeffizienzklassen setzt Anreize für den Einsatz energieeffizienter Fahrzeuge im Straßengüterverkehr.

Das neue Mautkonzept soll **Aufkommensneutralität** gewährleisten. Dies bedeutet, dass die Unter- / Überdeckung der Wegekosten für die Nutzung der Infrastruktur möglichst gering ausfällt.

Das Mautkonzept soll grundsätzlich **technologiefreundlich** und aus Gründen der Umsetzbarkeit und Akzeptanz und **Praktikabilität** möglichst **einfach und transparent** sein.

3.2 Europäische Rahmenvorgaben zur Mautausgestaltung

Der europäische gesetzliche Rahmen für eine fahrleistungsabhängige Lkw-Maut ist durch die Wegekostenrichtlinie [1999/62/EU] – auch Eurovignettenrichtlinie genannt – zuzüglich nachträglicher Änderungen definiert. Die Lkw-Maut besteht zum einen aus einer Infrastrukturkomponente, welche sich an den tatsächlich entstandenen Wegekosten orientieren muss. Seit einer Änderung des EU-Rechts im Jahr 2011 [2011/76/EU] können daneben auch externe

Kosten für die Emissionen von Schadstoffen und Lärmemissionen zusätzlich angelastet werden.

Das Wegekostengutachten 2013 [Alfen Consult, 2014] enthält neben Berechnungen zu den Infrastrukturkosten auch Berechnungen zu den externen Kosten aus Luftverschmutzung und Lärmbelastung. Derzeit werden nur die Kosten der Luftverschmutzung mit Schadstoffen angelastet, weil die technischen Voraussetzungen für eine Anlastung der Lärmbelastungskosten noch nicht vorliegen. In der Änderungsrichtlinie [2011/76/EU] wird darüber hinaus das Ziel genannt, dass die Beförderungspreise auch Kosten für den Klimawandel widerspiegeln sollen. Eine Einbeziehung von externen Kosten bezüglich der Emission von Treibhausgasen oder eine Spreizung nach Energieeffizienz ist jedoch **nach geltendem EU-Recht nicht möglich** [GÖRG, 2015]. Für eine Einführung einer energieeffizienzgespreizten Lkw-Maut ist deshalb eine **Änderung der europäischen Wegekostenrichtlinie** [1999/62/EG] **erforderlich**. Ein Vorschlag für eine entsprechende Anpassung der Eurovignettenrichtlinie wurde von der europäischen Kommission angenommen und wird aktuell im Rat der Europäischen Union erörtert [2017/0114/COD/EU].

Der Änderungsvorschlag sieht vor, dass zukünftig die Infrastrukturgebühr unter Berücksichtigung der CO₂-Emissionswerte und der betreffenden Fahrzeugklasse differenziert wird. Danach darf analog zur aktuellen Differenzierung nach Schadstoffklassen der maximale Mautsatz 100% über dem Mautsatz für gleichwertige Fahrzeuge liegen, welche die niedrigsten Emissionen aufweisen¹⁰. Eine Möglichkeit zur Differenzierung der Mautsätze basierend auf den durch die verursachten CO₂-Emissionen induzierten externen Kosten - analog zur aktuellen Regelung für Schadstoffemissionen - ist nach aktuellem Stand nicht vorgesehen, könnte aber zukünftig ergänzt werden. Wäre eine Kombination beider Spreizungsoptionen möglich, könnte eine größere Differenzierung der Mautsätze nach Effizienzwerten und damit auch ein höherer Anreiz für Energieeffizienz erreicht werden. Es werden deshalb im Folgenden beide Optionen der Differenzierung nach Schadstoffklassen im Rahmen der aktuell geltenden Eurovignettenrichtlinie aufgezeigt.

Die aktuelle Wegekostenrichtlinie bietet zwei unterschiedliche Ansätze zur Differenzierung der Mautsätze nach Schadstoffemissionsklassen.

Erstens (Option 1) muss nach Wegekostenrichtlinie [Art. 7g Abs. 1 in 2011/76/EU] die Infrastrukturgebühr nach Schadstoffemissionsklassen differenziert werden. Diese Forderung bezieht sich auf die Wegekosten für die Infrastrukturnutzung exklusive externer Kosten für Schadstoff- und Lärmemissionen. Dabei wird die **Mautsatzspreizung der Infrastrukturkomponente** auf 100 % begrenzt,

¹⁰ Bei emissionsfreien Fahrzeugen werden die Infrastrukturgebühren um 75% gegenüber dem Höchstsatz verringert.

d.h. die höchste Mautgebühr darf für gleichwertige Fahrzeuge maximal 100 % über der Gebühr für Fahrzeuge mit vergleichsweise besserer Schadstoffklasse liegen.

Zweitens (Option 2) können die Mautsätze nach Schadstoffklassen differenziert werden, indem eine zusätzliche Gebühr für **externe Kosten** der Schadstoffemissionen gemäß Artikel 2bb erhoben wird. Die maximalen externen Kosten für die Emissionen von Schadstoffen sind abhängig von der Euroklasse begrenzt. Auf Fernstraßen sind für Fahrzeuge der Klasse Euro 0 maximal 12 ct / km erlaubt, für Euro 5-Fahrzeuge maximal 2 ct / km.

Im Fall von Option 2, wenn also die Maut externe Kosten für Schadstoffe einschließt, entfällt die Verpflichtung der Differenzierung der Infrastrukturkomponenten nach Schadstoffklassen. Insgesamt ist es möglich, über Option 1, über Option 2 oder eine **Kombination von Option 1 und Option 2** (nachfolgend Option 3 genannt) die Maut nach Schadstoffklassen zu differenzieren.

Option 1 ist anwendbar, auch wenn noch keine externen Kosten definiert sind, wie dies aktuell für CO₂-Emissionen der Fall ist. Für die konkrete Ausgestaltung der Mautsätze gilt die Rahmenvorgabe, dass die Über-/Unterdeckung der Infrastrukturkosten gleichwertiger Fahrzeuge möglichst gering ist. Der tatsächliche mittlere Mautsatz hängt dann davon ab, welcher Anteil der Fahrleistung von welcher Emissionsklasse tatsächlich erbracht wird. Um zu verhindern, dass mit der Verschiebung der Mautfahrleistung zu besseren Emissionsklassen der mittlere Mautsatz sinkt, müssen die Mautsätze regelmäßig angehoben werden.

Ein Vorteil von Option 2 besteht darin, dass die abgeschätzten externen Kosten bemaute und damit internalisiert werden. Die Internalisierung externer Kosten ist aus volkswirtschaftlicher Perspektive erwünscht. Der Kostensatz für Schadstoffemissionen hängt nicht von der Infrastrukturkomponenten ab, wodurch das Berechnungskonzept gegenüber Option 1 einfacher ist.

Ob durch Option 1 oder Option 2 die Mautspreizung nach den Emissionsklassen größer ist und damit ein höherer Anreiz zur Senkung der Emissionen erreicht wird, hängt von der Struktur der Fahrleistung nach Emissionsklassen, den externen Kosten und der Höhe der Infrastrukturkomponenten ab. Der höchste Anreiz auf eine Senkung der Schadstoffemissionen wird durch eine Kombination von Option 1 und Option 2 – im Folgenden Option 3 genannt – erreicht. Ein Nachteil von einer Kombination der beiden Optionen liegt in dem komplizierteren Berechnungsverfahren und damit einer geringeren Transparenz.

In Kapitel 5 wird abgeleitet, welche Mautsatzspreizungen sich ergeben, wenn die bestehenden Spreizungsoptionen für Schadstoffemissionen auch für die Differenzierung nach Energieeffizienz bzw. spezifischen CO₂-Emissionen ermöglicht werden.

Aus dem Anpassungsvorschlag zur Eurovignettenrichtlinie lassen sich neben den vorgestellten Rahmenbedingungen für die Mautsatzspreizungen auch darauf Rückschlüsse ziehen, wann eine energieeffizienzgespreizten Lkw-Maut frühestens eingeführt werden kann [2017/275/EU final, Artikel 7g (4), S. 30].

Innerhalb eines Jahres nach der Veröffentlichung der amtlichen CO₂-Emissionsdaten im Rahmen der CO₂-Zertifizierung [2017/0111/COD/EU, 2017/2400/EU] werden durch die Kommission Bezugswerte für CO₂-Emissionen und eine zweckmäßige Klasseneinteilung für die betreffenden Schwere Nutzfahrzeuge festgelegt. Weiter gilt, dass innerhalb eines Jahres nach dieser Festlegung die Mitgliedstaaten die Infrastrukturkosten unter Berücksichtigung der CO₂-Emissionen differenzieren.

Das Monitoring der CO₂-Emissionswerte soll zentral von der Europäische Umweltagentur (EUA) durchgeführt werden. In diesem Rahmen sollen von den Herstellern jeweils bis Februar des Folgejahres nach Zulassung die notwendigen Daten an die EUA gemeldet werden. Die Veröffentlichung der Daten durch die EUA ist nicht zeitlich geregelt [2017/0111/COD/EU].

Im Rahmen der EU-Verordnung 2017/2400/EU werden die Stichtage festgelegt, ab wann neu zugelassene oder produzierte SNF einen zertifizierten CO₂-Wert besitzen müssen. Die Stichtage hängen von der VECTO-Fahrzeugklasse (vgl. Kapitel 4.3, 7.1.6) ab. Die Verordnung und die Stichtage sind detailliert im Anhang A beschrieben.

Basierend auf dem aktuellen Gesetzgebungsverfahren zur Änderung der Eurovignettenrichtlinie [2017/0114/COD/EU] und den anderen aufgeführten Dokumenten ist davon auszugehen, dass eine energieeffizienzgespreizte Lkw-Maut für Fahrzeuge die vorwiegend im Fernverkehr eingesetzt werden (VECTO-Klassen 4, 5, 9, und 10) frühestens ab 2022 und für die VECTO-Klassen 1, 2, 3, 11, 12 und 16 frühestens ab dem Jahr 2023 eingeführt werden kann (vgl. Kapitel 10).

3.3 Lkw-Maut in Deutschland

Mautgebühren werden für Lkw in Deutschland seit 2005 erhoben. Gesetzliche Grundlage ist das Bundesfernstraßenmautgesetz [BFStrMG], das mit Wirkung vom 19. Juli 2011 das Autobahnmautgesetz für SNF ablöste und durch bislang vier Änderungsgesetze angepasst wurde.

Mautpflichtig sind Fahrten von Lkw und Sattelzügen ab einer zulässigen Gesamtmasse von 7,5 t auf Bundesautobahnen und ausgewählten Bundesstraßen. Durch das vierte Gesetz zur Änderung des BFStrMG [4. BFStrMGÄndG] wird die Lkw-Maut ab dem 1. Juli 2018 auf alle Bundesstraßen ausgedehnt.

Abbildung 3-1: Mautsätze der Lkw-Maut in Deutschland Status quo

Wegekosten (Infrastruktur)

		Anzahl der Achsen				
		2	3	4	ab 5	
Kosten für Luftverschmutzung	Schadstoffemissionsklassen	A	8,1	11,3	11,7	13,5
	B	10,2	13,4	13,8	15,6	
	C	11,3	14,5	14,9	16,7	
	D	14,4	17,6	18,0	19,8	
	E	15,4	18,6	19,0	20,8	
	F	16,4	19,6	20,0	21,8	

Mautsätze in Euro Cent

Quelle: [BFStrMG], eigene Darstellung

Der Mautsatz berechnet sich aktuell als Summe von einem **reinen Wegekostenanteil** (zwischen 8,1 ct/km und 13,5 ct/km) und einem **Kostensatz für die Luftverschmutzung** (zwischen 0 ct/km und 8,3 ct/km – vgl. Abbildung 3-1). Der Wegekostenanteil definiert sich abhängig von der Anzahl der Achsen des Gespanns. Der Kostensatz für die Luftverschmutzung hängt von der Euro-Schadstoffklasse ab. Er ist als externe Kostenkomponente in die Maut einbezogen (vgl. Kapitel 3.2, Option 2). Von der Spreizung der Infrastrukturkosten nach Euroklassen (vgl. Kapitel 3.2, Option 1), wurde in der Vergangenheit Gebrauch gemacht. Nach aktueller Gesetzeslage ist dies jedoch nicht mehr der Fall.

Die Infrastrukturkomponente der Lkw-Maut wird über die Anzahl der Achsen des Fahrzeuggespanns – also der Kombination von Zugfahrzeug und optionalem Anhänger definiert. Damit hängt der Mautsatz vom jeweiligen Einsatz ab und ist nicht ausschließlich durch das Zugfahrzeug definiert.

Die Einteilung in Schadstoffklassen erfolgt über die Einhaltung von Schadstoffemissionsgrenzwerten bezogen auf die verbrannte Menge Kraftstoff.

Unterschiedliche Konzepte zur Differenzierung der deutschen Lkw-Maut nach Energieeffizienz werden in Kapitel 6 vorgestellt und in den Kapiteln 8 und 9 untersucht.

4 Energieeffizienz im Straßengüterverkehr

In diesem Kapitel wird diskutiert, welche Faktoren Einfluss auf Energieeffizienz im Straßenverkehr nehmen. Anschließend folgt die Definition des Maßes für Energieeffizienz, wie es in den folgenden Kapiteln verwendet wird. Abschließend wird die Einteilung in homogene Gruppen ähnlicher Fahrzeuge beschrieben, innerhalb derer jeweils die Effizienz der Fahrzeuge bewertet wird.

4.1 Einflussfaktoren für Energieeffizienz im Straßenverkehr

Die Energieeffizienz von Transporten hängt von unterschiedlichen Einflussfaktoren ab. Dazu gehören einerseits technologische Eigenschaften des Fahrzeugs z.B. ob Leichtlaufreifen mit vergleichsweise geringeren Reibungsverlusten eingesetzt werden, wie effizient die eingesetzten Motoren sind und welche aerodynamischen Eigenschaften das Fahrzeug besitzt. Werden Motoren mit höheren Leistungen eingesetzt, sind größere Beschleunigungen und Steigungen möglich. Damit verbunden steigt andererseits der mittlere Energieverbrauch.

Auch die Größenkategorie des Fahrzeugs spielt eine entscheidende Rolle. Ein Sattelschlepper benötigt voll beladen weniger Energie, als wenn dieselbe Last mit vielen kleinen Lkw transportiert wird. Andererseits hat ein größeres Fahrzeug, das halb leer ist, eine geringere Effizienz als ein kleineres voll beladenes Fahrzeug mit derselben Last. Allerdings besteht unabhängig von der Maut generell ein ökonomischer Anreiz, Güter in Fahrzeugen passender Größe zu transportieren.

Die Maut hat nicht das Ziel, Verschiebungen innerhalb von Fahrzeuggrößenklassen zu bewirken. Vielmehr soll ein Anreiz gesetzt werden, Technologien einzusetzen, welche den Energieverbrauch des Fahrzeugs reduzieren.

Da der Schwerpunkt des Anreizes auf technologischen Verbesserungen liegen soll, wird im Folgenden die größenbedingte Effizienz von Fahrzeugen nicht in die Effizienzbewertung einbezogen. Dies kann erreicht werden, indem für jede Größenklasse getrennt Fahrzeuge bezüglich ihrer Effizienz bewertet werden und die Maut entsprechend gespreizt wird (vgl. Kapitel 4.3).

4.2 Definition des Maßes für Energieeffizienz

Energieeffizienz ist ein Maß für einen Energieaufwand bezogen auf einen dadurch bewirkten Nutzwert. In einem erweiterten Energieeffizienzbegriff können auch Emissionswerte, welche beim Verbrauch der Energie entstehen, bezogen auf einen damit bewirkten Nutzwert, als Maß für Energieeffizienz verwendet werden (z.B. CO₂-Emissionen pro km Fahrleistung). Werden ausschließlich

Fahrzeuge verglichen, welche mit einheitlichem Dieselmotorkraftstoff betrieben werden, lassen sich die Emissionen durch einen konstanten Faktor in den Energieinhalt oder das Volumen des Kraftstoffes (Liter Diesel) umrechnen. Beim Vergleich von Fahrzeugen, welche unterschiedliche Kraftstoffe verwenden, wird neben dem Anreiz für Energieeffizienz ein zusätzlicher Anreiz für den Einsatz von Kraftstoffen mit niedrigen Emissionsfaktoren gesetzt.

Im Rahmen des EU-Zertifizierungsverfahren werden zukünftig für Schwere Nutzfahrzeuge (SNF) die spezifischen Emissionen (die am Fahrzeug entstehenden CO₂-Emissionen bezüglich der Fahrleistung) im Verhältnis zur typischen Beladung (g CO₂/ km) / t ermittelt. Dieser Wert gibt gleichzeitig an, welche Emissionen im Mittel je Verkehrsleistung verursacht werden (g CO₂/ tkm). Er eignet sich gut zur Bewertung des Nutzwertes, und damit auch zur Bewertung der Energieeffizienz. Im Folgenden werden die **spezifische CO₂-Emissionen gemäß EU-Zertifizierungsverfahren** als Effizienzmaß verwendet. Die zugehörige Einheit ist g CO₂/tkm.

Die Ermittlung der spezifischen Emissionswerte erfolgt für unterschiedliche Fahrzyklen. Diese sind charakteristisch für unterschiedliche Anwendungsfälle. Es ist davon auszugehen, dass daneben ein Durchschnittswert über alle Anwendungsfälle zur Verfügung stehen wird.

Spezifische CO₂-Emissionen von Pkw und Leichten Nutzfahrzeugen (LNF) werden auf Rollprüfständen ermittelt. Weil sich einzelne neu zugelassene SNF sehr viel stärker bezüglich ihrer Modellkonfiguration unterscheiden, müssten für ein vergleichbares Vorgehen bei neu zugelassenen SNF sehr viel mehr unterschiedliche Modelle vermessen werden, was einen zu hohen Aufwand bedeuten würde. Deshalb erfolgt die Bewertung der Effizienz von SNF zukünftig mittels der Simulationssoftware VECTO. Die Forschungsgesellschaft für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik mbH (FVT) koordiniert mit der TU Graz die Entwicklung des CO₂-Zertifizierungsverfahrens für SNF und bearbeitet auch alle Teilbereiche des Verfahrens. In einem parallel für das BMVI durchgeführten Projekt [FVT, 2016] wurden durchschnittliche Emissionen für unterschiedliche Klassen mautpflichtiger Fahrzeuge ermittelt. Geplante Änderungen an der Simulationssoftware VECTO und Unsicherheiten darüber, welche Angaben von Seiten der Hersteller für die Bewertung bereitgestellt werden, führen dazu, dass die zu erwartende Höhe der spezifischen CO₂-Emissionen mit einer Unsicherheit von ca. 5 % behaftet ist¹¹. Die im Rahmen der Studie ausgewiesenen spezifischen CO₂-Emissionen eignen sich jedoch, um

¹¹ Für das Jahr 2018 sind Updates (unter anderem Überarbeitung des generischen Gangschaltmodells, Berücksichtigung von Fahrerassistenzsystemen) an der Simulationssoftware VECTO geplant. Diese könnten das absolute Niveau der Verteilung der ab 2019 ermittelten CO₂-Werte gegenüber der in FVT 2016 bestimmten Verteilung noch um bis zu ca. 5 % verschieben. Zusätzlich bestehen noch Unsicherheiten in den Absolutwerten aus der konkreten Umsetzung der Gesetzesbestimmungen durch die Fahrzeughersteller, bspw. wie viele individuelle Luftwiderstandswerte im Fahrzeugportfolio vermessen werden.

die Funktionsweise der erarbeiteten Mautkonzepte zu untersuchen.

Energieeffizienz kann unterschiedlich definiert werden. Im Rahmen des Forschungsauftrags wurden weitere unterschiedliche Maße für Energieeffizienz geprüft, jedoch gegenüber dem Maß nach EU-Zertifizierungsverfahren als nachteilhaft bewertet und deshalb im weiteren Verlauf nicht weitergehend analysiert.

In den Jahren 2019 bis 2020 wird die Ausweispflicht von spezifischen CO₂-Emissionen gemäß EU-Zertifizierungsverfahren für SNF sukzessive eingeführt (vgl. Anhang A).

4.3 Effizienzvergleich innerhalb homogener Fahrzeuggruppen

Zu den mautpflichtigen Fahrzeugen gehören sehr unterschiedliche Fahrzeuge von 7,5 t-Lkw bis zu schweren 40 t-Sattelzügen. Um zu verhindern, dass die Maut zu unerwünschten Verschiebungen zwischen unterschiedlichen Fahrzeugtypen führt, können jeweils ähnliche Fahrzeuge in homogenen Gruppen bezüglich ihrer Energieeffizienz verglichen werden. Es bietet sich ein zweistufiges Verfahren an:

- 1) Einteilung in Gruppen von bezüglich Fahrzeuggröße und Einsatz ähnlichen Fahrzeugen. Diese Gruppen werden im Folgenden homogene Fahrzeuggruppen genannt.
- 2) Einteilung in eine bestimmte Anzahl von Effizienzklassen innerhalb der homogenen Gruppen.

Die Methodik der Klassifizierung in homogene Gruppen und mögliche Segmentierungskriterien werden in Kapitel 7.1 beschrieben.

In Abstimmung mit dem Auftraggeber wird eine Einteilung in homogene Gruppen abhängig von dem Fahrzeugtyp, der zulässigen Gesamtmasse und der Achskonfiguration analog zur Einteilung im Rahmen des EU-Zertifizierungsverfahrens nach VECTO-Klassen (Tabelle 4-1) vorgenommen. Eine Bewertung der Fahrzeuge bezüglich ihrer Energieeffizienz erfolgt dann innerhalb der jeweiligen homogenen Gruppe.

Tabelle 4-1: Einteilung der mautpflichtigen Fahrzeuge in VECTO-Klassen

Anzahl Achsen	Achskonfiguration	Typ	Zulässige Gesamtmasse	VECTO-Klasse ¹²
2 Achsen	4x2	Lkw + (Sattelzug)	7,5t – 10t	1
		Lkw + (Sattelzug)	> 10t – 12t	2
		Lkw + (Sattelzug)	> 12t – 16t	3
		Lkw	> 16t	4
		Sattelzug	> 16t	5
	4x4	Lkw	7,5t – 16t	(6)
		Lkw	> 16t	(7)
		Sattelzug	> 16t	(8)
3 Achsen	6x2/2-4	Lkw	alle	9
		Sattelzug	alle	10
	6x4	Lkw	alle	11
		Sattelzug	alle	12
	6x6	Lkw	alle	(13)
		Sattelzug	alle	(14)
4 Achsen	8x2	Lkw	alle	(15)
	8x4	Lkw	alle	16
	8x6/8x8	Lkw	alle	(17)

Quelle: eigene Darstellung

An zwei konkreten Fahrzeugklassen den VECTO-Klassen 2 und 5 wird in Kapitel 7 die Wirkungsweise zweier vertieft untersuchter Mautkonzepte aufgezeigt. VECTO-Klasse 2 bezeichnet Lkw mit einer zulässigen Gesamtmasse zwischen 10 und 12 t und der Achskonfiguration 4x2 (zweiachsig ohne Allradantrieb). Sie werden überwiegend im Verteilverkehr ohne Anhänger eingesetzt. VECTO-Klasse 5 bezeichnet Sattelzüge mit einer zulässigen Gesamtmasse größer 16 t und ebenfalls der Achskonfiguration 4x2. Sie werden überwiegend im Langstreckenverkehr eingesetzt.

¹² In Klammer angeführte Lkw-Klassen werden aller Voraussicht nach von der CO₂-Zertifizierung ausgenommen. Grund ist, dass diese Fahrzeuge aufgrund der kleinen Stückzahlen nur einen sehr geringen Anteil an den CO₂-Emissionen der Nutzfahrzeuge haben und der Aufwand für die Erzeugung der CO₂-Werte in der Typprüfung (u.a. durch die Notwendigkeit von Komponententests) als unverhältnismäßig groß angesehen wird. Die Behandlung von Fahrzeugen ohne eingetragene Effizienzwerte wird in Kapitel 6.2.2 behandelt.

4.4 Anreiz für Energieeffizienz durch optimierte Mautsatzspreizung

Je größer die Spreizung der Mautsätze nach Energieeffizienz ausfällt, desto größer ist der Anreiz, energieeffiziente Fahrzeuge einzusetzen. Daneben ist für die Wirkung des Anreizes entscheidend, zwischen welchen Effizienzwerten sich der Mautsatz wie stark ändert. Der mittlere Anreiz für die Effizienz kann optimiert werden, indem der Mautsatz sich in Abhängigkeit von der Effizienz so ändert, dass der Mautsatzunterschied pro Effizienzänderung in denjenigen Bereichen der Effizienz groß ist, in welchen entsprechende Fahrzeuge viel Mautfahrleistung erbringen (vgl. dazu Kapitel 6.1.2). Dann ist der Anreiz beim Kauf eines Neufahrzeuges hoch, im Vergleich zu vielen anderen Fahrzeugen effizienter zu sein. Der Kauf eines entsprechend effizienteren Neufahrzeugs ist dann mit zukünftig geringeren laufenden Kosten verbunden. Daraus folgt umgekehrt, dass der Mautsatzunterschied in Bereichen der Effizienzskala klein ist, in denen wenig Mautfahrleistung erbracht wird und damit weniger Fahrzeuge betroffen sind. Wenn die effizienzgespreizte Maut für die Fahrzeughalter zusätzliche Transparenz über die Effizienz der eingesetzten Fahrzeuge schafft, kann dies ein weiterer Anreiz sein, energieeffiziente Fahrzeuge einzusetzen, da Kraftstoffkosten ein wesentlicher Kostenfaktor im Straßengüterverkehr sind.

5 Ableitung möglicher Mautsätze für eine energieeffiziente Lkw-Maut

Im folgenden Kapitel werden mögliche Konzepte zur Spreizung der Maut vorgestellt und die jeweils verbundenen Mautsätze abgeleitet. Eine Möglichkeit besteht darin, externe Kosten für Klimaschäden in die Maut zu internalisieren. Deshalb folgt zunächst in Kapitel 5.1 ein kurzer Überblick zum Thema externe Kosten für CO₂-Emissionen im Verkehr.

5.1 Externe Kosten der CO₂-Emissionen im Verkehr

Bislang wurden weder auf europäischer noch auf nationaler Ebene externe Kosten für CO₂-Emissionen im Verkehrssektor abgestimmt. In einem Gutachten des Umweltbundesamtes wird für externe Kosten im Verkehrssektor ein Satz von 80 Eur/t CO₂ vorgeschlagen [UBA, 2012]. Im Rahmen der Schwerverkehrsabgabe der Schweiz werden externe Kosten von 107 CHF/t CO₂ (ca. 98 Eur/t CO₂) angesetzt [Ecoplan/Infras, 2014].

Externe Kosten pro Mautkilometer ergeben sich als Produkt der Externen Kosten pro t CO₂ und den spezifischen CO₂-Emissionen pro Mautkilometer. Ausgehend von den spezifischen CO₂-Emissionen pro Fahrleistung und typischer Beladung lassen sich die spezifischen CO₂-Emission pro Fahrleistung über die klassentypischen mittleren Beladungen ableiten. Letztere gehen im Rahmen des EU-Zertifizierungsverfahrens bei der Modellierung der spezifischen Emissionswerte explizit in die Berechnung ein und sind deshalb bekannt.

Für einen Lkw mit zulässiger Gesamtmasse zwischen 10 und 12 t und einem spezifischen Emissionswert von 150 g CO₂/tkm lassen sich die externen Kosten für CO₂-Emissionen wie folgt ableiten. Aus der klassentypischen Beladung von 4,55 t folgt ein spezifischer Emissionswert pro Fahrleistung von 680 g/km – dies entspricht einem spezifischen Dieselverbrauch von 26 Litern/100 km. Unter Anrechnung von externen Kosten von 80 Eur/t CO₂ folgt ein externer Kostensatz von 5,5 ct / km. Analog ergibt sich für ein Sattelzugfahrzeug mit spezifischen Emissionen von 55 g/tkm ein Kostensatz von 8,5 ct/km. Für ein effizienteres Sattelzugfahrzeug mit spezifischen Emissionen von 42 g/tkm ergibt sich entsprechend ein externer Kostensatz von 6,5 ct/km.

Die spezifischen CO₂-Emissionen und damit auch die verbundenen externen Kosten hängen insbesondere vom spezifischen Verbrauch der Fahrzeuge ab. Damit unterscheiden sie sich deutlich nach Fahrzeuggröße. Um die externen Kosten durch CO₂-Emissionen für jedes Fahrzeug passgenau anzulasten, können jeweils die spezifischen Emissionen des einzelnen Fahrzeugs zugrunde gelegt werden (vgl. Kapitel 6.1.1). Dies bedeutet jedoch,

dass der Mautsatz nicht mehr durch Zugehörigkeit zu einer Energieeffizienzklasse bestimmt wird, sondern funktional vom spezifischen Verbrauchswert abhängt. Damit wird die Maut insbesondere aus der Perspektive der Lkw-Halter komplizierter und weniger transparent.

Alternativ bietet sich zunächst eine Einteilung in homogene Gruppen ähnlicher Fahrzeuge an (vgl. Kapitel 4.3) und innerhalb dieser eine Zuordnung zu Effizienzklassen (vgl. Kapitel 6), für welche jeweils die mittlere spezifische CO₂-Emissionen für die Berechnung der externen Kosten verwendet werden.

5.2 Ableitung möglicher Mautsätze

Für eine Differenzierung der Lkw-Maut nach Energieeffizienz bietet sich eine Spreizung des Infrastrukturmautsatzes (vgl. Kapitel 3.2, Option 1), eine Mautsatzkomponente für CO₂-Emissionen als externe Kosten (vgl. Kapitel 3.2, Option 2) oder eine Kombination von Option 1 und Option 2 (Kapitel 3.2, Option 3) an.

Bei Option 1 muss sichergestellt werden, dass auch mit steigender Effizienz der Fahrzeuge sich das Mautaufkommen an den Wegekosten orientiert. Für die im Rahmen der Studie im Detail untersuchten Mautkonzepte („stabile Effizienzklassen“ und „dynamische Effizienzklassen“, vgl. Kapitel 6.1.3 und 0) werden Verfahren zur Definition der Effizienzklassen und zur Definition der Mautsätze nach Effizienzklasse entwickelt, welche dies gewährleisten.

Bei Option 2 ergibt sich die Mautsatzdifferenzierung über die Variation der externen Kosten gemäß Kapitel 5.1 welche zur Infrastrukturkomponente addiert werden. Auch bei einer hohen Spreizung der Effizienzwerte von 25 % würde das Verfahren zu einer nur geringen Spreizung des Mautsatzes von etwa 10 % führen. Um den Anreiz auf Effizienz zu erhöhen, wird deshalb davon ausgegangen, dass die angelasteten externen Kosten für die beste Effizienzklasse auf 0 abgesenkt wird und nur für die schlechteste Effizienzklasse voll angelastet wird.

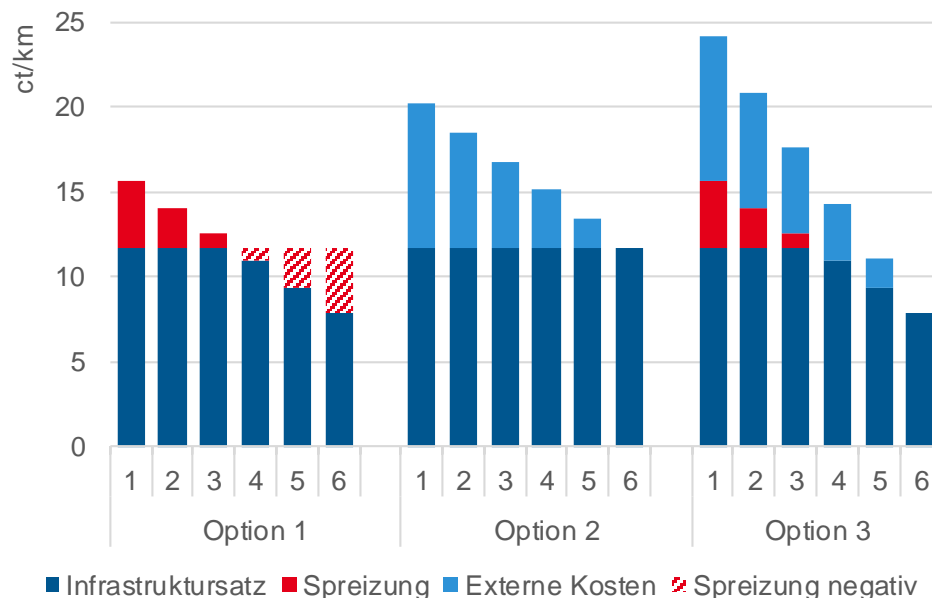
Option 1 wird durch den aktuellen Vorschlag zur Anpassung der Eurovignettenrichtlinie abgedeckt. Die Optionen 2 und 3 sind an den aktuellen Rahmenbedingungen für die Spreizung nach Schadstoffemissionen angelehnt und verlangen weitere Anpassungen der Rahmengesetzgebung. Die größte Spreizung der Mautsätze ist durch Option 3 erreichbar, wenn Option 1 und Option 2 kombiniert werden.

Bei Option 2 und 3 wird ein höherer durchschnittlicher Mautsatz erzielt, da zusätzlich zu den Infrastrukturkosten externe Kosten für die CO₂-Emissionen angelastet werden. Bei Sattelzügen liegt er unter den genannten Annahmen bei 15,9 anstelle von 11,7 ct/km. Die Spreizung bei den Optionen 2 hängt von den angesetzten externen Kosten für CO₂-Emissionen, die Spreizung von Option 1 von der erlaubten Spreizung der Infrastrukturkomponente ab.

Auch im Rahmen der Optionen 1 und 2 könnten höhere Mautsatzspreizungen erreicht werden. Dafür müssten bei Option 2 höhere externe Kosten für CO₂-Emissionen angesetzt werden und bei Option 1 eine höhere Spreizung der Infrastrukturkomponente erlaubt werden¹³. So wäre beispielsweise denkbar festzulegen, dass der höchste Mautsatz maximal 100% über den mittleren induzierten Infrastrukturkosten je Fahrzeug liegen darf.

stellt für Sattelzüge¹⁴ resultierende Mautsätze für die Optionen 1 bis 3 unter der Annahme von sechs Effizienzklassen mit linear ansteigendem Mautsatz dar. Daneben sind entsprechende Spreizungen der Mautsätze für Sattelzüge und für Verteiler-Lkw¹⁵ Abbildung 5-1 angegeben.

Abbildung 5-1: Mautsätze für Sattelzugmaschinen mit Anhänger, nach Maut-Komponenten für drei unterschiedliche Optionen der Differenzierung nach Energieeffizienzklassen



Quelle: eigene Berechnung, „Spreizung negativ“ ist nicht Teil des Mautsatzes und stellt die Reduzierung ausgehend von der Infrastrukturkomponente dar.

¹³ Für Sattelzüge ist eine Spreizung von 16,3 ct/km auch bei den Optionen 1 und 2 wie bei der vorgestellten Option 3 möglich. Dafür müssten für Mautoption 2 die externen Kosten jedoch mit 154 Eur/t CO₂ deutlich höher angesetzt werden. Im Rahmen von Option 1 ist eine Spreizung von 16,3 ct/km möglich, wenn die erlaubte Mautspreizung 460 % (3,6 bis 20 ct/km) beträgt.

¹⁴ Fahrzeug der VECTO-Klasse 5, Sattelzug mit Anhänger, insgesamt 4 Achsen

¹⁵ Fahrzeug der VECTO-Klasse 2, Lkw 10-12 t zGM, 2 Achsen ohne Anhänger

Tabelle 5-1: Spreizung der Mautsätze in ct. / km für Verteiler-Lkw und Sattelzüge für drei unterschiedliche Optionen der Mautspreizung

Fahrzeugklasse	Option 1	Option 2	Option 3
Verteiler-Lkw, VECTO-Klasse 2	5,4–10,8 Delta: 5,4	8,1–13,6 Delta: 5,5	5,4–16,3 Delta: 10,9
Sattelzug, VECTO-Klasse 5	7,8–15,6 Delta: 7,8	11,7–20,2 Delta: 8,5	7,8–24,1 Delta: 16,3

Quelle: eigene Berechnung

Unabhängig von der gewählten Option zur Spreizung nach Energieeffizienz ist eine Spreizung des Mautsatzes zwischen einem minimalem und maximalem Mautsatz als Anreiz für Energieeffizienz möglich. Die in Kapitel 6.1 vorgestellten Mautkonzepte beziehen sich jeweils auf den Unterschied zwischen minimalem und maximalem Satz (in Tabelle 5-1 mit Delta bezeichnet) und lassen sich an alle drei Spreizungsoptionen anpassen.

6 Ausgestaltung der energieeffizienzgespreizten Lkw-Maut

In den vorangegangenen Kapiteln wurden die Ziele und Rahmenbedingungen für eine energieeffizienzgespreizte Maut untersucht. Eine entsprechende Bemautung kann durch sehr unterschiedliche Konzepte erreicht werden. Bei der Erarbeitung der Mautkonzepte wurde davon ausgegangen, dass eine energieeffizienzgespreizte Maut bereits im Jahr 2020 eingeführt werden kann. Entsprechend wurde die exemplarische Untersuchung der Mautkonzepte im Rahmen dieses Kapitels für das Jahr 2020 vorgenommen. Durch die Veröffentlichung des Vorschlags zur Anpassung der europäischen Eurovignettenrichtlinie und die damit verbundene Konkretisierung des Zeitplans, lässt sich inzwischen ableiten, dass eine energieeffizienzgespreizte Maut frühestens in den Jahren 2022 / 2023 eingeführt werden kann¹⁶. Die Schlussfolgerungen des Kapitels sind auch bei einer späteren Umstellung der Maut gültig.

In Kapitel 6.1 werden vier konkrete Ausgestaltungsmöglichkeiten einer energieeffizienzgespreizten Lkw-Maut vorgestellt und bezüglich ihrem Anreiz zur Steigerung der Energieeffizienz und ihrer Praktikabilität untersucht und bewertet.

In Kapitel 6.2 werden weitere relevante Aspekte untersucht, welche im Rahmen der Umstellung der Lkw-Maut von Bedeutung sind. Es wird der Umgang mit Fahrzeugen ohne eingetragenen Effizienzwert und Optionen für den Umgang mit Schadstoffemissionen im Rahmen der neuen Maut untersucht. Das Kapitel schließt mit einer Beschreibung der Wirkung der beiden ausgewählten Mautkonzepte auf Fahrzeughalter und die Mautbehörde.

6.1 Definition und Analyse von Mautkonzepten

Der Effizienzmautsatz kann über eine **Einteilung in Effizienzklassen** abhängig vom Effizienzwert oder in funktionaler Abhängigkeit vom Effizienzwert definiert werden. Der Mautsatz ergibt sich im zweiten Fall als Funktion des individuellen spezifischen Emissionswertes und nicht über die Zugehörigkeit zu einer Effizienzklasse. Der wesentliche Nachteil eines funktionalen Zusammenhangs liegt in der schlechteren Nachvollziehbarkeit des Mautsatzes und der aufwendigeren Bestimmung für den Lkw-Halter. Die Mautsätze sind nur über sehr umfangreiche Tabellen darstellbar.

Im Rahmen der Untersuchung wurden weitere Mautkonzepte vorgestellt, als nachteilhaft bewertet und deshalb von einer weitergehenden Untersuchung ausgeschlossen. Aus den vorgestellten Konzepten wurden in Abstimmung mit dem Auftraggeber die zwei

¹⁶ vgl. Kapitel 3.2 und 10

Konzepte „zeitlich stabile Effizienzklassen“ und „dynamische Effizienzklassen“ für eine vertiefte Analyse ausgewählt (Kapitel 6.1.3, Kapitel 7, Kapitel 8).

Nachfolgend werden zwei funktionale Mautkonzepte „Maximierte Anlastung Externer Kosten“ und „Mautsatzfunktion als Integral der Verteilungsfunktion“ dargestellt. Sie sind für die Herleitung der folgenden Mautkonzepte hilfreich und werden deshalb einleitend vorgestellt. Im Rahmen des Projekts wurden sie jedoch als nicht praktikabel bewertet und werden deshalb nicht im Rahmen der vertieften Untersuchung berücksichtigt.

Die im Folgenden vorgestellten Mautkonzepte 2 (Kapitel 6.1.2) und 3 (Kapitel 6.1.3) erfordern eine regelmäßige Anpassung der Mautsätze basierend auf der Mautfahrleistung nach spezifischen CO₂-Werten. Dies bedeutet einen Aufwand, ist jedoch unabhängig vom Mautkonzept notwendig, sobald eine Differenzierung nach Effizienzklassen vorliegt, sich die Effizienz der Fahrzeuge verbessert und das Mautaufkommen stabil bleiben soll.

6.1.1 Konzept 1: Maximierte Anlastung Externer Kosten

Nach diesem Konzept wird der Mautsatz als lineare Funktion der spezifischen CO₂-Emissionen definiert. Aus einem Kostensatz für die Emissionen einer Tonne CO₂ lassen sich jedem Effizienzwert verbundene externe Kosten in ct/km zuordnen und als externe Kosten anrechnen (vgl. Kapitel 5.1). Die Spreizung des Mautsatzes ist damit über die Spreizung der externen Kosten definiert. Für einen Sattelzug der VECTO-Klasse 5 ist der entsprechende Mautsatz (ausschließlich Satz für die externen Kosten für CO₂-Emissionen - exklusive des Mautsatzes für die Nutzung der Infrastruktur) als Funktion der spezifischen Emissionen in Abbildung 6-1 (in Rot) dargestellt. Zwischen den spezifischen Emissionswerten von 35 bis 55 g CO₂/tkm wächst der Mautsatz von rund 5,5 auf 8,5 ct/km. Zusätzlich ist die Verteilung der Mautfahrleistung nach spezifischen Emissionen im Jahr 2020¹⁷ (in blau) angegeben (vgl. Kapitel 8.1.2). Der wesentliche Teil der Mautfahrleistung wird im Jahr 2020 bei Effizienzwerten zwischen 42 und 51 g CO₂/tkm erbracht. Der mittlere Externe-Kosten-Mautsatz berechnet sich als Produkt von Fahrleistungsverteilung und Mautsatzfunktion zu 7,1 ct/km.

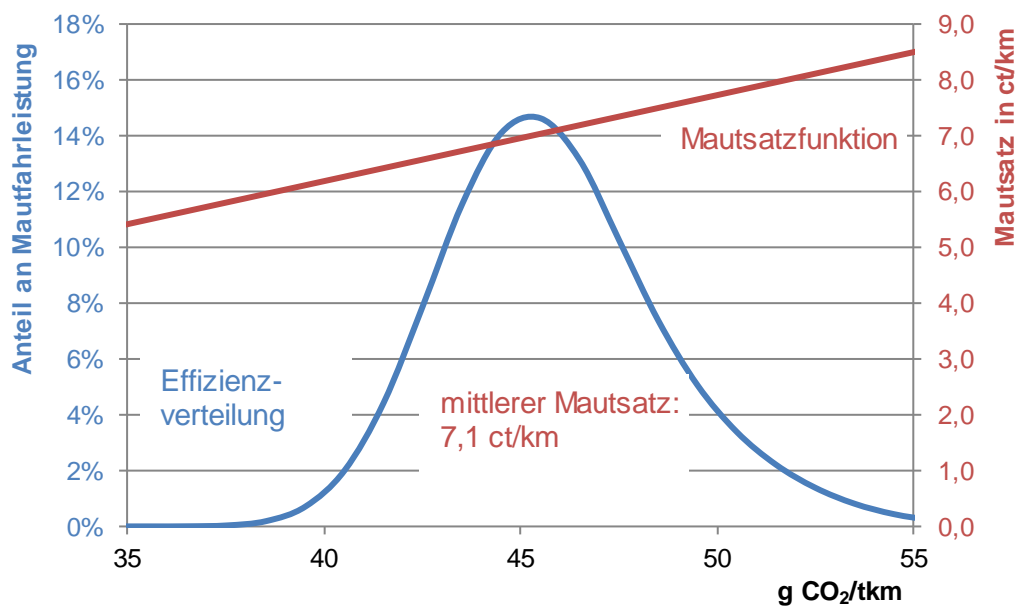
Der Gesamt-Mautsatz ergibt sich als Summe der Infrastrukturkomponente (ohne Spreizung) zuzüglich der jeweils maximal anrechenbaren externen Kosten für CO₂-Emissionen (vgl. Kapitel 5.2, Option 2).

Ein wesentlicher Nachteil des Konzepts „Maximiertes Mautaufkommen“ ist die begrenzte Mautsatzspreizung und der dadurch geringe Anreiz, effiziente Fahrzeuge einzusetzen. Um den Anreiz zu

¹⁷ Exemplarische Betrachtung für das Jahr 2020. Es ist davon auszugehen, dass eine energieeffizienzgespreizte Lkw-Maut frühestens in den Jahren 2022 / 2023 eingeführt werden kann (vgl. Kapitel 3.2 und 10).

stärken, kann zunächst der externe Kostensatz für die Fahrzeuge mit niedrigen spezifischen Emissionswerten auf 0 ct / km abgesenkt werden. Ein Großteil der Mautsatzspreizung differenziert aber auch dann Bereiche auf der Effizienzskala, in welchen kaum Fahrzeuge vorhanden sind.

Abbildung 6-1: Konzept „Maximiertes Mautaufkommen“ Mautsatzfunktion und Effizienzverteilung im Jahr 2020 in Abhängigkeit der spezifischen Emissionen für Sattelzüge



Quelle: eigene Berechnung, der Anteil an der Mautfahrleistung bezieht sich jeweils auf eine Breite von 1 g CO₂/tkm

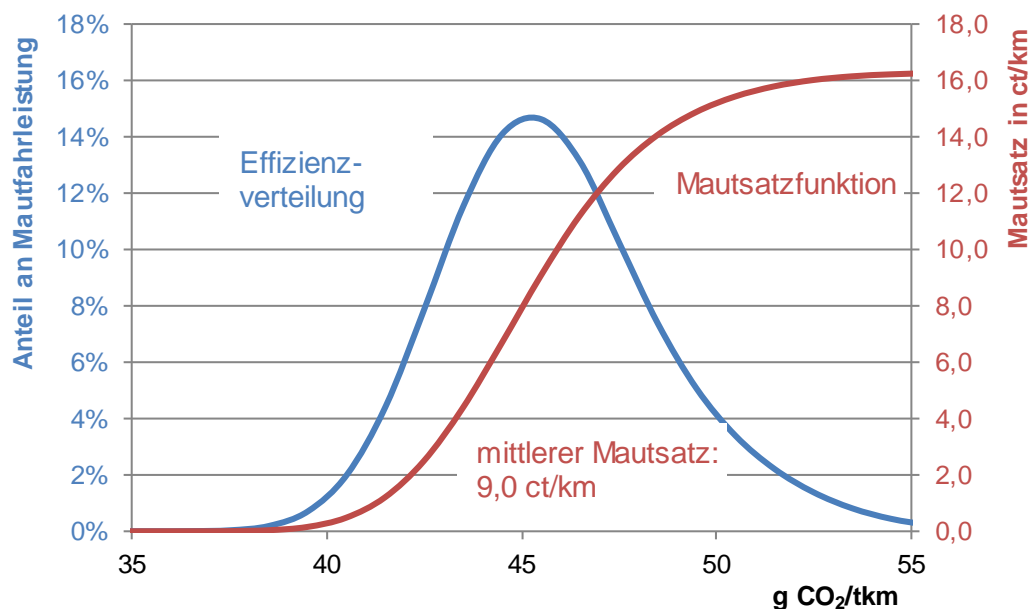
6.1.2 Konzept 2: Mautsatzfunktion als Integral über der Verteilungsfunktion

Um den Effizianzreiz gegenüber Konzept 1 effektiver zu gestalten, kann die Mautsatzspreizung gezielt in Bereichen der Effizienzwerte erhöht werden, in denen viel Mautfahrleistung erbracht wird und dafür in Bereichen mit wenig Mautfahrleistung abgesenkt werden (vgl. Kapitel 4.4). Dieses wird erreicht, wenn die Steigung der Mautsatzfunktion proportional zur Verteilung ist. Umso mehr Mautfahrleistung in einem bestimmten Effizienzbereich erbracht wird, umso stärker ändert sich die Mautsatzfunktion in Abhängigkeit von Effizienzverbesserungen. Mathematisch ist dann die **Mautsatzfunktion** als „Integral der Verteilungsfunktion“ gegeben. Das heißt, dass der Mautsatz proportional zu dem Anteil der Fahrzeuge ist, welche niedrigere Emissionswerte als das betrachtete Fahrzeug haben. Für einen Sattelzug der VECTO-Klasse 5 ist die resultierende Mautsatzspreizung als Funktion der spezifischen Emissionen in Abbildung 6-2 dargestellt. Zusätzlich ist die Verteilung der Mautfahrleistung nach spezifischen Emissionen im Jahr

2020¹⁸ angegeben (vgl. Kapitel 8.1.2). Der Höchst-Mautsatz wurde (abweichend von Konzept 1) über die maximale Differenzierung des Mautsatzes nach Energieeffizienz (vgl. Kapitel 5.2 Option 3) definiert¹⁹.

Das Konzept „Integral über Verteilungsfunktion“ geht davon aus, dass die Verteilung der betroffenen Fahrzeuge – oder besser der betroffenen Mautfahrleistung – bekannt ist und macht den Mautsatz von dieser abhängig. Zukünftig kann die Verteilung in jährlichem Rhythmus angepasst und aus der entsprechenden Verteilung des Vorjahrs abgeleitet werden, welche im Rahmen der Mautstatistik erhoben werden kann. Alternativ können die entsprechenden Verteilungen modellgestützt abgeschätzt werden.

Abbildung 6-2: Konzept „Integral über Verteilungsfunktion“ Mautsatzfunktion und Effizienzverteilung im Jahr 2020¹⁸ in Abhängigkeit der spezifischen Emissionen für Sattelzüge



Quelle: eigene Berechnung, der Anteil an der Mautfahrleistung bezieht sich jeweils auf eine Breite von 1 g CO₂/tkm

6.1.3 Konzept 3: stabile Effizienzklassen

Im Rahmen dieses Mautkonzepts erfolgt eine zeitlich stabile Einteilung der Fahrzeuge in Energieeffizienzklassen. Die Effizienzklasse kann in diesem Fall direkt in die Fahrzeugpapiere aufgenommen werden. Für einen Sattelzug der VECTO-Klasse 5 ist die

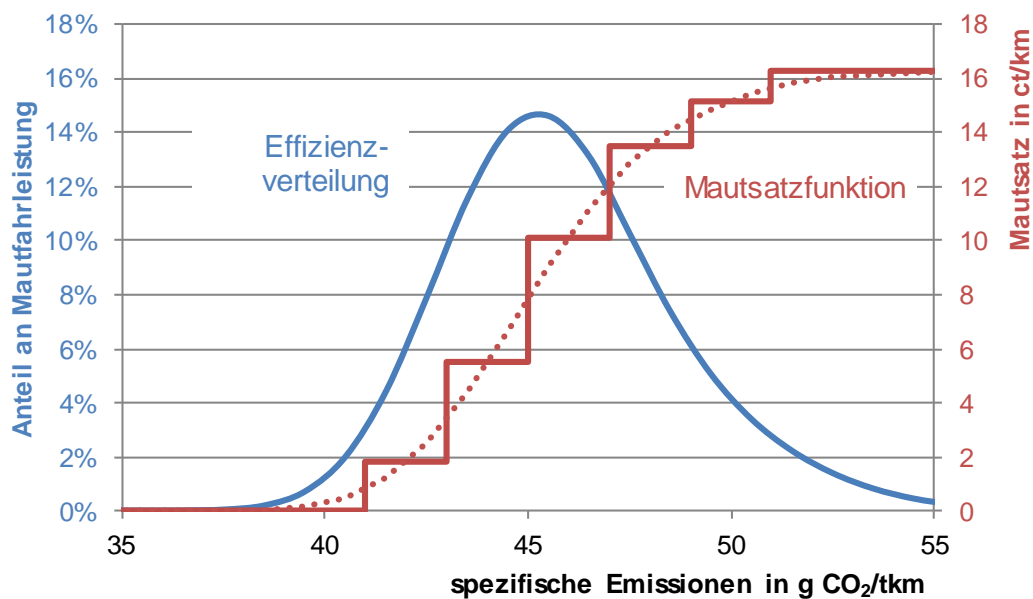
¹⁸ Exemplarische Betrachtung für das Jahr 2020. Es ist davon auszugehen, dass eine energieeffizienzgespreizte Lkw-Maut frühestens in den Jahren 2022 / 2023 eingeführt werden kann (vgl. Kapitel 3.2 und 10). Die Mautsatzfunktion kann entsprechend für das Jahr der Einführung angepasst werden.

¹⁹ Diese wird durch Spreizung der Infrastrukturkomponenten zuzüglich differenziert angerechneter externer Kosten erreicht.

resultierende Mautsatzspreizung als Funktion der spezifischen Emissionen in Abbildung 6-3 dargestellt. Zusätzlich ist die Verteilung der Mautfahrleistung nach spezifischen Emissionen im Jahr 2020²⁰ angegeben (vgl. Kapitel 8.1.2).

Die Effizienzklassen sind so gewählt, dass sie dabei jeweils gleich groß sind und dass in etwa sechs Klassen den Großteil der Mautfahrleistungsverteilung abdecken. Die Höhe der Mautsätze wird so festgelegt, dass der mittlere Mautsatz für jede Effizienzklass dem mittleren Mautsatz nach dem Konzept „Integral über Verteilungsfunktion“ entspricht (vgl. Kapitel 6.1.2, Abbildung 6-2). Darüber ist ein eindeutiger Mechanismus definiert, um die Mautsätze ausgehend von der Mautfahrleistung nach Effizienzwerten anzupassen, welcher eine hohe Aufkommensneutralität und einen hohen Anreiz für Energieeffizienz sicherstellt.

Abbildung 6-3: Konzept „stabile Effizienzklassen“ Mautsatzfunktion und Effizienzverteilung im Jahr 2020¹⁶ in Abhängigkeit der spezifischen Emissionen für Sattelzüge



Quelle: eigene Berechnung, die Anteile beziehen sich jeweils auf eine Breite von 1g CO₂/tkm, Klassenbreite festgelegt auf 4 g CO₂/tkm

Werden die Fahrzeuge mit der Zeit im Durchschnitt effizienter, werden die Mautsätze angehoben und neue Effizienzklassen mit Klassengrenzen für niedrigere Emissionen eingeführt. Dies entspricht dem bisherigen Vorgehen bezüglich Schadstoffklassen.

Die Fahrleistung der einzelnen Effizienzklassen unterscheidet sich dabei deutlich. Insbesondere ist die typische Entfernung des einzelnen Effizienzwertes zur nächstbesseren Effizienzklassengrenze

²⁰ Exemplarische Betrachtung für das Jahr 2020. Es ist davon auszugehen, dass eine energieeffizienzgespreizte Lkw-Maut frühestens in den Jahren 2022 / 2023 eingeführt werden kann (vgl. Kapitel 3.2 und 10). Die Mautsatzfunktion kann entsprechend für das Jahr der Einführung angepasst werden.

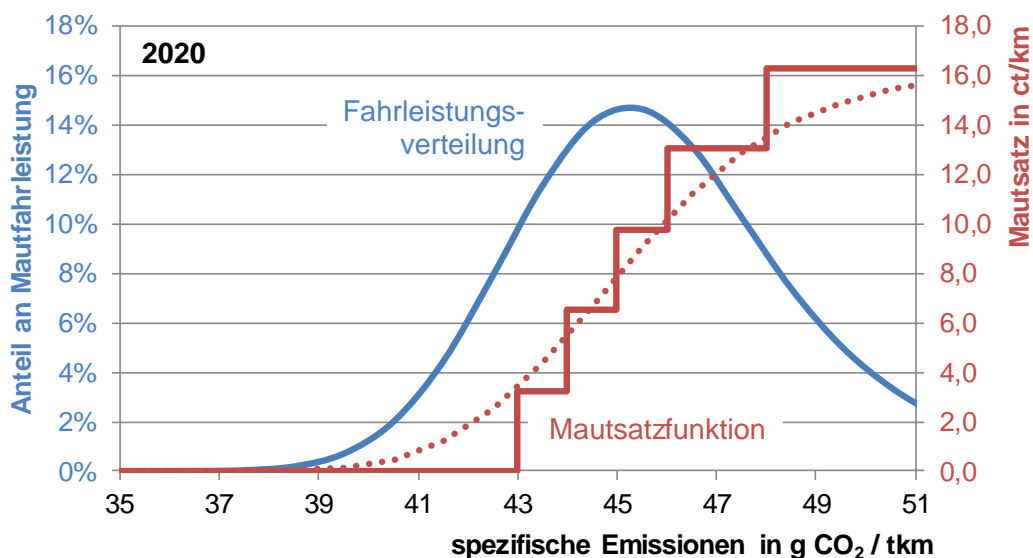
unabhängig von dem Anteil der Fahrleistung der jeweiligen Effizienzklasse. Dies stellt einen Nachteil bezüglich des Anreizes für Energieeffizienz dar. Die Effizienzpreizung nach diesem Konzept führt nur dann zu einem Anreiz in ein vergleichsweise effizienteres Fahrzeug zu investieren, wenn dadurch eine bessere Effizienzklasse erreicht wird. Dieser Nachteil des Mautkonzeptes 3 ist umso kleiner, je enger die Effizienzklassen definiert sind.

Nach dem aktuellen Vorschlag zur Anpassung der Eurovignettenrichtlinie (vgl. Kapitel 3.2) ist geplant, dass die Effizienzklassenzuteilung auf europäischer Ebene definiert werden sollen. Dies ist mit dem Konzept stabile Effizienzklassen vereinbar.

6.1.4 Konzept 4: dynamische Effizienzklassen

Effizienzklassen können alternativ zum Konzept stabile Effizienzklassen zeitlich dynamisch definiert sein. Im Unterschied zu statischen Effizienzklassen werden nicht die Mautsätze nach Klasse angepasst, sondern die Klassengrenzen, ab welchem Emissionswert ein Fahrzeug einer bestimmten Effizienzkategorie zugeordnet wird. Dabei werden die Klassengrenzen abhängig von der gegebenen Effizienzverteilung über eine Aufteilung in Quantile definiert. Für einen Sattelzug der VECTO-Klasse 5 ist die resultierende Mautsatzspreizung als Funktion der spezifischen Emissionen in Abbildung 6-4 dargestellt. Zusätzlich ist die Verteilung der Mautfahrleistung nach spezifischen Emissionen im Jahr 2020²¹ angegeben (vgl. Kapitel 8.1.2).

Abbildung 6-4: Konzept „dynamische Effizienzklassen“ Mautsatzfunktion und Effizienzverteilung im Jahr 2020²¹ in Abhängigkeit der spezifischen Emissionen für Sattelzüge



Quelle: eigene Berechnung, die Anteile beziehen sich jeweils auf eine Breite von 1g CO₂/tkm, Klassenbreite in Modellrechnung beschränkt auf Vielfache von 1 g CO₂/tkm

Vorstellbar ist beispielsweise eine Aufteilung in sechs Quantile – sogenannte Sextile. Dies bedeutet, dass die effizientesten 17 % der Fahrzeuge mit den niedrigsten spezifischen Emissionen den niedrigsten Mautsatz – umgekehrt die 17 % mit den höchsten spezifischen Emissionen den höchsten Mautsatz entrichten. Mit steigender durchschnittlicher Effizienz wechseln Fahrzeuge zu schlechteren Effizienzklassen. Die Grenzen der Effizienzklassen werden über die Effizienzverteilung und deren Einteilung in Quantile definiert. Genauer wird nicht von der Effizienzverteilung des Bestandes sondern der Effizienzverteilung der Mautfahrleistung

²¹ Exemplarische Betrachtung für das Jahr 2020. Es ist davon auszugehen, dass eine energieeffizienzgespreizte Lkw-Maut frühestens in den Jahren 2022 / 2023 eingeführt werden kann (vgl. Kapitel 3.2 und 10).

ausgegangen. Damit ist ein eindeutiger Mechanismus festgelegt, um die Mautsätze ausgehend von der Mautfahrleistungsverteilung nach Effizienz anzupassen, welcher eine hohes Maß an Aufkommensneutralität und einen hohen Anreiz für Energieeffizienz sicherstellt.

Ein Vorteil des Konzepts „dynamische Effizienzklassen“ gegenüber dem Konzept „stabile Effizienzklassen“ liegt darin, dass für mehr Fahrzeuge und mehr Maßnahmen ein Effizienzanreiz besteht. Die Definition gewährleistet, dass für möglichst viele Fahrzeuge auch mit schon kleinen Effizienzverbesserungen eine möglichst hohe Mautsatzsenkung verbunden ist. Mit steigender Effizienz der übrigen Fahrzeuge ist es möglich, dass ein Fahrzeug, welches beim Kauf der höchsten Effizienzkategorie zugeordnet war, in eine schlechtere Effizienzkategorie verdrängt wird, da es dann eben nicht mehr zu dem effizientesten Sechstel der Fahrzeuge gehört. Es lohnt sich deshalb auch innerhalb einer Effizienzkategorie vergleichsweise effizient zu sein, da dann größere Sicherheit besteht, länger in einer günstigen Effizienzkategorie zu verbleiben.

Wesentlicher Nachteil des Konzept ist die geringere Transparenz für Fahrzeughalter. Insbesondere stellt sich für Fahrzeughalter die Frage, ab wann ein Fahrzeug die Effizienzkategorie wechselt. Mit dem Wechsel in eine schlechtere Effizienzkategorie ändert sich für den Halter der Mautsatz sprunghaft und nicht kontinuierlich von Jahr zu Jahr wie nach dem Konzept 3 „stabile Effizienzklassen“. Für den Fahrzeughalter führt der mögliche Wechsel der zugeordneten Effizienzkategorie zu einer höheren Transparenz darüber, wie effizient das Fahrzeug im Vergleich zu anderen Fahrzeugen ist. Nach dem aktuellen Vorschlag zur Anpassung der Eurovignettenrichtlinie (vgl. Kapitel 3.2) ist geplant, dass die Effizienzklassenzuteilung auf europäischer Ebene definiert werden sollen. Dies ist nicht mit der Anpassung der Klassengrenzen basierend auf der nationalen Effizienzverteilung kompatibel.

6.2 Weitere Anmerkungen zur effizienz- gespreizten Maut

Nachfolgend werden die Mautkonzepte „stabile Effizienzklassen“ und „dynamische Effizienzklassen“ weitergehend untersucht. In Kapitel 6.2.1 werden Möglichkeiten aufgezeigt, wie zukünftig mit den Schadstoffemissionen im Rahmen der Maut umgegangen werden kann. Kapitel 6.2.2 geht auf den Umgang mit Fahrzeugen ein, für welche spezifische CO₂-Emissionen nicht bekannt sind und Kapitel 6.2.3 untersucht Möglichkeiten zur Anrechnung von Nachrüstungen zur Steigerung der Effizienz. Die Kapitel 6.2.4 und 6.2.5 beschreiben die Wirkung der beiden Mautkonzepte auf Fahrzeughalter und aus der Sicht der Bewilligungsbehörde.

6.2.1 Zukünftiger Umgang mit Schadstoffemissionen

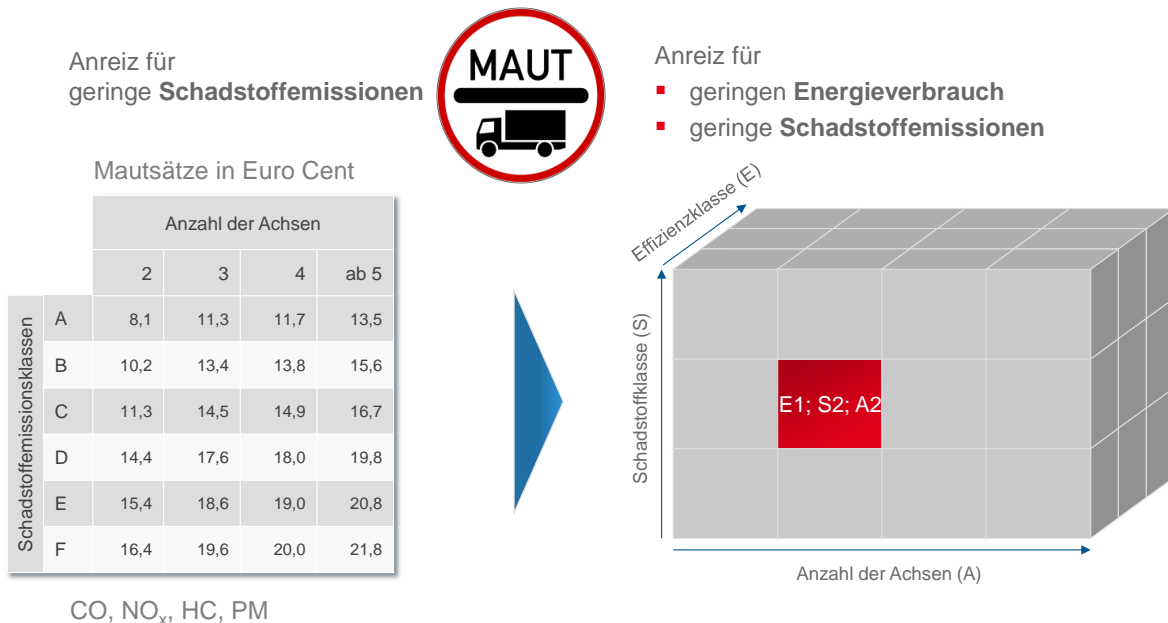
Die Maut wird aktuell nach Schadstoffklassen und Achsklassen erhoben. Dank Zulassungsbegrenzungen und dem ökonomischen Anreiz durch die schadstoffabhängige Maut, konnten die Schadstoffemissionen bei Straßenfahrzeugen insgesamt deutlich reduziert werden. Strengere Schadstoff-Abgasnormen können aber auch Auswirkungen auf den spezifischen Energieverbrauch und die CO₂-Emissionen eines Fahrzeuges haben. Bei der Entwicklung des spezifischen Verbrauchs von Lkw, lässt sich folgendes feststellen: Die Einführung der Euro 3-Norm im Jahr 2001, die erstmals eine Reduktion der NO_x-Emissionen festlegte, ließ das Absenken der spezifischen Kraftstoffverbräuche stagnieren. Mit der Einführung der Euro 4-Norm im Jahr 2006 sind die spezifischen Kraftstoffverbräuche in allen Lkw-Fahrzeugkategorien kurzfristig sogar angestiegen. Dies deutet auf einen **Trade-off zwischen Schadstoff-Emissionen und Energieverbrauch und die damit verbundenen Treibhausgasemissionen** hin.

Im Rahmen des zukünftigen Mautkonzeptes muss gewährleistet werden, dass Effizienzsteigerungen nicht mit höheren Schadstoffemissionen verbunden sind. Entsprechende Effekte sind jedoch durch die Vorgaben für Schadstoffemissionen bei Neuzulassungen begrenzt. Seit Januar 2014 müssen neu zugelassene SNF der Euro 6-Norm – und damit der aktuell schärfsten Euro-Klasse – entsprechen [2011/582/EU]. Einen Einfluss kann die Maut deshalb nur noch auf Nutzung und Stilllegung von alten Fahrzeugen haben, welche noch nicht der Euro 6-Norm entsprechen. Der Anteil der Mautfahrleistung der Euro 6-Klasse wird bei Sattelzügen der VECTO-Klasse 5 voraussichtlich bis zum Jahr der Umstellung auf die energieeffizienzgespreizte Maut 2022 auf über 92 % anwachsen (vgl. Kapitel 10).

Die Bedeutung der Differenzierung der Maut nach Schadstoffklassen nimmt damit in Zukunft ab. Mit dem Wechsel zur effizienzabhängigen Lkw-Maut kann zukünftig die Differenzierung nach Schadstoffklassen aufgehoben werden. Im Rahmen der europäischen Rahmengesetzgebung ist aktuell vorgesehen, dass die Pflicht zur Differenzierung nach Schadstoffemissionsklassen nur bis zum 31.12.2020 gelten soll [2017/0114/COD/EU].

Andererseits emittieren auch zukünftig Fahrzeuge Schadstoffe und verursachen damit externe Kosten. Im aktuellen Mautkonzept werden diese Kosten durch die additive Mautsatzkomponente in die Maut (vgl. Kapitel 3.2, Option 2) einbezogen. Dies ist auch im Rahmen einer zukünftigen effizienzgespreizten Lkw-Maut möglich. In diesem Fall ergibt sich ein Mautsatz, welcher von Anzahl der Achsen, Schadstoffklasse und Effizienzklasse abhängig ist gemäß Abbildung 6-5.

Abbildung 6-5: Lkw-Maut abhängig von Effizienz- und Schadstoffklasse sowie Anzahl der Achsen



Quelle: eigene Darstellung

6.2.2 Behandlung von Fahrzeugen ohne zertifizierten CO₂-Wert

Durch die CO₂-Zertifizierung von Schwere Nutzfahrzeugen werden zukünftig spezifische CO₂-Emissionswerte zur Bewertung der Effizienz der Fahrzeuge zur Verfügung stehen. Für Sattelzugmaschinen der VECTO-Klasse 5 betrifft dies den Großteil der Fahrzeuge, welche ab dem Jahr 2019 neu zugelassen werden – für Verteiler-Lkw der VECTO-Klasse 2 neu zugelassene Fahrzeuge ab 2020. Für Fahrzeuge, die vor diesen Zeitpunkten zugelassen werden, sind auch zukünftig keine spezifischen CO₂-Emissionswerte verfügbar.

Neben Fahrzeugen, die vor Einführung des EU-Zertifizierungssystems zugelassen werden, sind Fahrzeuge bestimmter VECTO-Klassen (z.B. Allrad-Lkw) auch längerfristig von der Zertifizierung ausgenommen. Damit stehen für sämtliche Fahrzeuge dieser Klassen auf absehbare Zeit keinen individuellen Werte aus VECTO zur Verfügung.

Für die Bemaßung der betroffenen Fahrzeuge bieten sich in einem energieeffizienzgespreiztem Mautsystem aus derzeitiger Sicht folgende zwei Optionen an:

Fahrzeuge ohne eingetragenem CO₂-Wert können von der Differenzierung nach Effizienzklassen ausgenommen werden²². Statt-

²² Für den Fall, dass in die Höhe des Mautsatzes externe Kosten für CO₂-Emissionen einbezogen werden, könnten möglicherweise einheitliche klassentypische Kostensätze angelastet werden,.

dessen kann die bisherige Differenzierung nach Schadstoffemissionsklassen für diese Fahrzeuge fortgesetzt werden. Dies führt zu einem fließenden Übergang ausgehend vom bestehenden System. Das neue, erweiterte Mautsystem wird dabei zunächst auf einen begrenzten Teil der Fahrzeuge angewendet. Nach dem Änderungsvorschlag der Eurovignettenrichtlinie [2017/0114/COD/EU] soll die Pflicht zur Differenzierung der Lkw-Maut nach Schadstoffemissionsklassen bereits Ende 2020 und damit vor Einführung einer energieeffizienzgespreizten Maut auslaufen.

Alternativ können spezifische CO₂-Emissionswerte abhängig vom Zulassungsjahr oder nach Schadstoffklasse und generischen Änderungsraten für die Energieeffizienz gegenüber einem Referenz-Zulassungsjahr und einem Referenz CO₂-Wert verwendet werden. Da zum Zeitpunkt der Mautumstellung nur noch ein kleiner Anteil der Mautfahrleistung von Fahrzeugen erbracht wird, welche nicht der besten EURO-Schadstoffklasse entsprechen, würde durch eine Zuordnung von generischen Werten basierend auf dem Zulassungsjahr eine differenziertere Bewertung erfolgen als über eine Zuordnung basierend auf der EURO-Schadstoffklasse (vgl. Kapitel 3.2). Für die in der VECTO-Zertifizierung erfassten Fahrzeugklassen bietet sich als Referenz der Durchschnittswert erhoben für die Fahrzeuge des ersten Jahrgangs mit eingetragenen CO₂-Wert (z.B. 2019 für Klasse 5 Sattelzugmaschinen) an. Für die Ermittlung der generischen Effizienzwerte früherer Zulassungsjahre können als Änderungsraten dann entweder die im Rahmen des Beratungsprojektes „EVO - Ertüchtigung von VECTO zur Berechnung des Energieverbrauches von Nutzfahrzeugen vor Erstzulassung 2018“ [FVT, 2016] ermittelten Werte verwendet werden oder alternativ als einfachere und robustere Methode ein fixer Prozentsatz je Jahr (z.B. 1 % Aufschlag je Zulassungsjahr vor dem Jahr des Referenzwertes).²³ Für Fahrzeugklassen die in der EU-Zertifizierung nicht erfasst sind, könnten als Referenzwert die in [FVT, 2016] nach Lkw-Klasse für das Zulassungsjahr 2018 ermittelten Absolutwerte für die spezifischen CO₂-Emissionen dienen.²⁴

6.2.3 Bonus-Systeme für technologiespezifische Förderung

Die vorgestellten Mautkonzepte sind grundsätzlich technologieoffen gestaltet. Die Effizienz der Fahrzeuge wird unabhängig von der verwendeten Technologie ausschließlich über die spezifischen CO₂-Emissionen des Fahrzeugs bei Neuzulassung bewertet.

Die Effizienz der Fahrzeuge lässt sich auch im Nachhinein durch Nachrüstungen verbessern. Im Rahmen des Beratungsauftrags wurde untersucht, wie entsprechende Effizienzmaßnahmen im

²³ Der Wert von 1 % Verbrauchsabsenkung pro Zulassungsjahr entspricht sowohl ungefähr dem Durchschnitt der in [FVT, 2016] berechneten Verbrauchsabsenkungen von EURO I bis EURO VI als auch den von ACEA publizierten Werten. Aufgrund der unsicheren Datenlage zu Altfahrzeugen sind die in [FVT, 2016] nach Zulassungsjahren bzw. Schadstoffklassen aufgeschlüsselten zeitlichen Verläufe mit Unsicherheiten behaftet.

²⁴ Aufgrund seit 2016 vorgenommener methodischer Änderungen sowohl in VECTO als auch in der CO₂-Gesetzgebung wären die in [FVT, 2016] ermittelten Absolutwerte für g CO₂/tkm zu überprüfen und ggf. zu überarbeiten.

Rahmen eines Förderprogramms für energieeffiziente Lkw bewertet werden können. Für Nachrüstungen zur Steigerung der Effizienz eignen sich insbesondere Leichtlaufreifen und Aerodynamik-Pakete.

Sobald eine einheitliche Bewertung der Maßnahmen vorliegt, ist es möglich, diese nachzuweisen und auch im Rahmen der Lkw-Maut bei der Bewertung der Effizienz der Fahrzeuge anzurechnen. Ein entsprechender Nachweis und die Überprüfung, für welchen Zeitraum die Maßnahmen wirken, bedeuten einen zusätzlichen Aufwand. Wenn sehr viele unterschiedlicher Maßnahmen auf den zertifizierten CO₂-Wert anrechenbar sind, insbesondere wenn Maßnahmen mit Verschleißteilen wie Leichtlaufreifen eingesetzt werden, wird die Überprüfung des tatsächlichen Einsatzes sehr aufwändig. Die Praktikabilität eines entsprechenden Systems muss geprüft werden.

Im Rahmen der Wirkungsabschätzung (vgl. Kapitel 9.2 und 9.4.4) wird deshalb davon ausgegangen, dass ausschließlich von außen erkennbare Aerodynamikmaßnahmen am Sattelanhänger angerechnet werden können. Dies bedeutet, dass bei jeder Fahrt in die Onboard-Unit eingegeben werden muss, ob die Fahrt mit aerodynamisch optimiertem Anhänger erfolgt oder nicht. In ähnlicher Weise wird aktuell für die Festlegung des Mautsatzes angegeben, ob Sattelzugmaschinen mit oder ohne Sattelanhänger fahren.

6.2.4 Ausgewählte Mautkonzepte aus Sicht des Lkw-Halters

Die Mautsätze differenzieren sich nach Achsklassen und Energieeffizienzklassen.

Nach dem Konzept „**zeitlich stabile Effizienzklassen**“ wird die Zuordnung zur Effizienzklasse bei Neuzulassung des Fahrzeuges bestimmt und bleibt über die Lebensdauer stabil. Die Mautsätze der Effizienzklassen ändern sich jährlich und hängen dabei davon ab, wie viele Fahrzeuge mit welcher Effizienz Mautfahrleistung erbringen. Je niedriger die spezifischen CO₂-Emissionen eines Fahrzeuges im Vergleich zu den anderen Fahrzeugen sind, desto niedriger ist auch der Mautsatz. Mit sich verbessernder mittlerer Effizienz der Fahrzeuge, steigt der Mautsatz für ein bestimmtes Fahrzeug mit der Zeit kontinuierlich an.

Nach dem Konzept „**dynamische Effizienzklassen**“ geben die Effizienzklassen direkt an, wie effizient ein Fahrzeug im Vergleich zur übrigen Mautfahrleistung ist. Für den Halter folgt aus der zugeordneten Effizienzklasse die Information: „Mein Fahrzeug gehört fahrleistungsgewichtet zu dem effizientesten Sechstel aller Sattelzugfahrzeuge“. Die Zuordnung zur Effizienzklasse erfolgt jährlich aufgrund des spezifischen CO₂-Wertes und der zeitlich veränderlichen Klassengrenzen. Vorstellbar ist, dass der Halter z.B. mittels eines Internetaccounts die Zuteilung zur geltenden Effizienzklasse transparent nachvollziehen kann. Beim dynamischen Konzept bleiben die Mautsätze für die Effizienzklassen zeitlich konstant. Mit

sich verbessernder mittlerer Effizienz der übrigen Fahrzeuge kann sich die Effizienzklasse eines bestimmten Fahrzeug mit der Zeit ändern und somit auch der Mautsatz für ein Fahrzeug.

6.2.5 Ausgewählte Mautkonzepte aus Sicht der Bewilligungsbehörde

Zur Gewährleistung der Aufkommensneutralität erfolgt in beiden Konzepten jährlich eine Anpassung der Mautsätze bzw. Mautklassen aufgrund der Mautfahrleistungsstatistik des Vorjahres. Für eine effizienzoptimierte Anpassung der Bemautung wird die Mautfahrleistungsverteilung nach VECTO-Fahrzeugklasse und Effizienzwert erhoben. Daraus lassen sich je VECTO-Klasse die Mautfahrleistungsverteilungen nach Effizienzwert ableiten. Im Rahmen des Forschungsauftrags wurden entsprechende Verteilungen für die Jahre 2020 und 2030 für Sattelzüge der VECTO-Klasse 5 modelliert (vgl. Kapitel 8.1.2).

Im Rahmen des Konzepts **zeitlich „stabile Effizienzklassen“** wird je VECTO-Klasse gemäß dem Konzept „Integral über der Verteilungsfunktion“ (vgl. Kapitel 6.1.2) eine kontinuierliche Mautsatzfunktion basierend auf der Fahrleistungsverteilung nach spezifischem CO₂-Emissionswert gebildet. Für jede Effizienzklasse wird der mittlere Mautsatz nach dem Konzept kontinuierliche Mautsatzverteilung übernommen.

Im Rahmen des Konzepts **„dynamische Effizienzklassen“** erfolgt jährlich eine Aufteilung der Mautfahrleistung nach Effizienz in sechs gleich große Klassen. Die daraus resultierenden Klassengrenzen bieten die Grundlage der jährlichen Zuteilung der Fahrzeuge in die Effizienzklassen.

7 Bildung homogener Gruppen im Bestand und Fahrleistungsabschätzung nach homogenen Gruppen

In diesem Kapitel werden unterschiedliche Kriterien vorgestellt, um Fahrzeuge in homogene Gruppen einzuteilen. Im Kapitel 7.1.6 wird beschrieben, weshalb die Klassifizierung nach VECTO-Klassen gewählt wird. In Kapitel 7.2 wird die Fahrleistung nach VECTO-Klassen für die Jahre 2015, 2020 und 2030 ermittelt.

7.1 Bildung von homogenen Gruppen im Bestand

Das Fahrzeugsegment der SNF ist bezüglich der Fahrzeugeigenschaften stark heterogen geprägt. Ein zukünftiges Mautkonzept soll die Energieeffizienz von vergleichbaren Fahrzeugen bewerten und bemauten. Der Anreiz der Maut soll in erster Linie darin bestehen, die Fahrzeugeffizienz innerhalb einer gegebenen Struktur zu verbessern. Um Verschiebungseffekte zwischen Fahrzeugklassen zu vermeiden, sollten deshalb jeweils ähnliche Fahrzeuge bezüglich ihrer Energieeffizienz verglichen werden (vgl. Kapitel 4.3).

Die untersuchte Gruppierung in homogene Klassen soll dabei nicht die Einteilung der Fahrzeuge in Achsklassen zur Bewertung der Wegekosten bezüglich der Infrastruktur ersetzen. Die Gruppierung dient nicht dazu, die Fahrzeuge anhand der Gruppierungsmerkmale bezüglich ihrer Effizienz zu bewerten (z.B. kleine Fahrzeuge sind weniger effizient, d. h. wenn Fahrzeuge klein sind, wird ihnen ein schlechter Effizienzwert zugeordnet). Umgekehrt erfolgt die Einteilung in Effizienzklassen innerhalb und nach der Einteilung in homogene Gruppen ähnlicher Fahrzeuge.

Die Einteilung der Fahrzeuge in homogene Gruppen kann bezüglich unterschiedlicher Merkmale erfolgen. In diesem Kapitel werden verschiedene Segmentierungsmerkmale diskutiert und jeweils Vor- und Nachteile abgewogen. Folgende Fahrzeugmerkmale wurden dabei untersucht:

- Anzahl der Achsen
- Fahrzeugklasse
- Zulässige Gesamtmasse
- Nutzlast

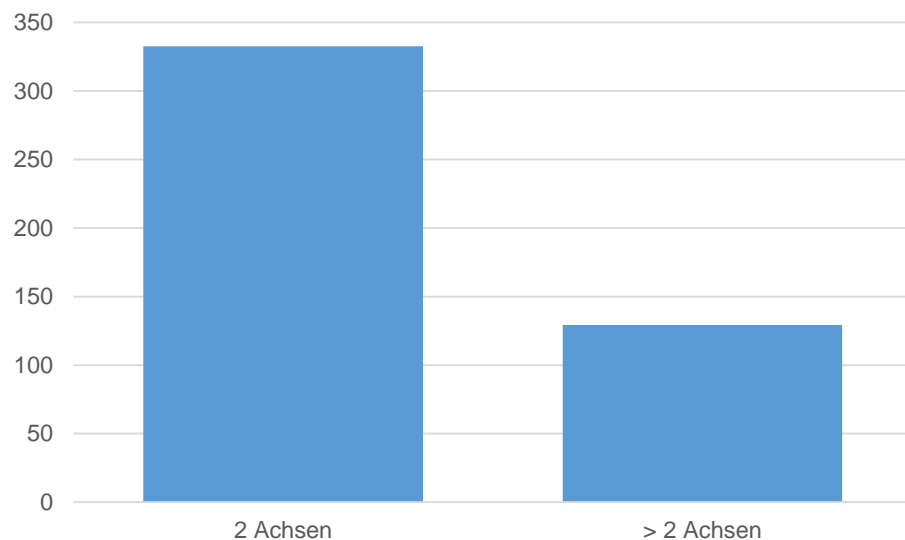
Im Projektverlauf stellte sich heraus, dass eine Einteilung der Fahrzeuge abweichend von der VECTO-Klassifizierung deutliche Nachteile mit sich zieht, weshalb der Fokus auf der Klassifizierung nach VECTO-Klassen liegt. Nachfolgend wird die Segmentierung des Bestandes nach unterschiedlichen Merkmalen vorgestellt.

In Kapitel 7.1.6 wird erläutert, weshalb sich eine Klassifizierung nach VECTO-Klassen eignet.

7.1.1 Einteilung nach Anzahl der Achsen

Tendenziell kann davon ausgegangen werden, dass der Energieverbrauch mit der Anzahl der Achsen zunimmt. Allerdings sind die Differenzierungsmöglichkeiten beim Kriterium Achsen begrenzt. Über 72 % der Zugfahrzeuge (Lkw und Sattelzugmaschinen) haben zwei Achsen (vgl. Abbildung 7-1). In dieser Kategorie befinden sich sowohl schwere Sattelzugmaschinen wie auch leichte Lkw (mit z.B. 12 t zGM). Innerhalb einer homogenen Gruppe sollen ähnliche Fahrzeuge bezüglich ihrer Effizienz verglichen werden. Dies ist bei alleiniger Betrachtung der Achszahl beim Zugfahrzeug nicht gegeben. Als zusätzliches Kriterium bei der Bildung der homogenen Gruppen, wie es bei der VECTO-Klassifizierung auch der Fall ist (siehe Kapitel 7.1.6), eignet sich das Merkmal Achszahl jedoch gut.

Abbildung 7-1: Bestand mautpflichtiger Fahrzeuge am 1. Januar 2015 nach Anzahl der Achsen, in Tsd. Fahrzeugen



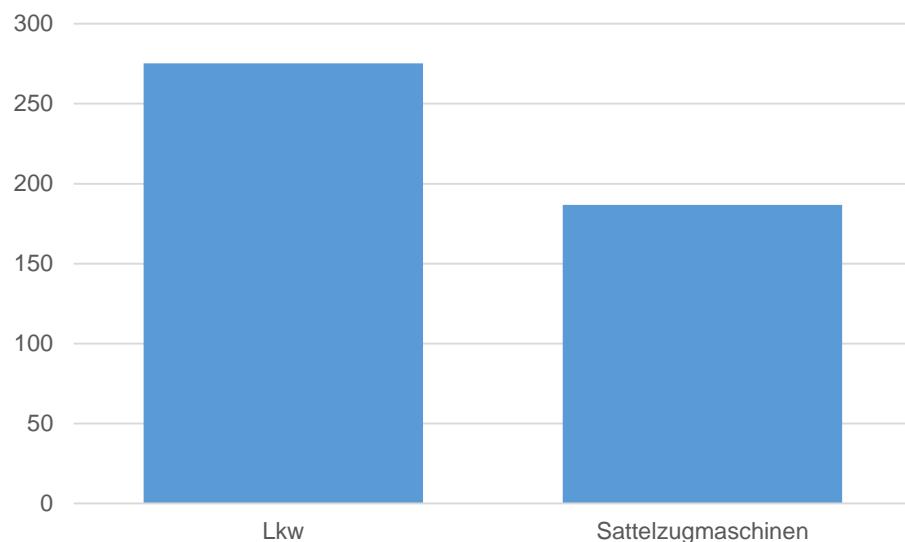
Quelle: [KBA, 2015b], eigene Darstellung

Im Rahmen der Infrastrukturkomponente der Lkw-Maut hängt der Mautsatz von der Anzahl der Achsen des Fahrzeuggespanns (Zugfahrzeug und Auflieger) ab. Die Zuordnung zu den Effizienzklassen muss jedoch alleine vom Zugfahrzeug – ohne Anhänger – erfolgen, da sonst abhängig vom Einsatz unterschiedliche Effizienzklassenzuordnungen notwendig wären, was einen zu hohen Aufwand bedeuten würde.

7.1.2 Einteilung nach Fahrzeugklasse

Die mautpflichtigen Fahrzeugen lassen sich in Lkw und Sattelzugmaschinen unterteilen. Bei Sattelzugmaschinen ist der spezifische Energieverbrauch stark vom Gespann (mit / ohne Anhänger) abhängig, demgegenüber kann bei Lastkraftwagen über die Fahrzeugigenschaften vergleichsweise gut der spezifische Energieverbrauch bestimmt werden. Für beide Fahrzeugklassen hat die Tonnage einen bedeutenden Einfluss auf den spezifischen Energieverbrauch.

Abbildung 7-2: Bestand mautpflichtiger Fahrzeuge am 1. Januar 2015 nach Fahrzeugklasse, in Tsd. Fahrzeugen



Quelle: [KBA, 2015b], eigene Darstellung

Zur Einteilung in homogene Gruppen ist es sinnvoll, zwischen Lkw und Zugmaschinen zu unterscheiden, da die beiden Fahrzeugkonzepte sehr unterschiedlich sind und sie sich deshalb bezüglich Energieeffizienz schlecht miteinander vergleichen lassen. Jedoch ist das Kriterium Fahrzeugklasse alleine, durch das sich die Fahrzeuge in nur zwei Gruppen aufteilen, nicht hinreichend differenziert, um homogene Gruppen zu erreichen, innerhalb deren sich die Fahrzeuge gut bezüglich ihrer Effizienz vergleichen lassen. Wie auch bei der Achszahl ist die alleinige Betrachtung der Fahrzeugklasse, für die Bildung von homogenen Gruppen nicht geeignet.

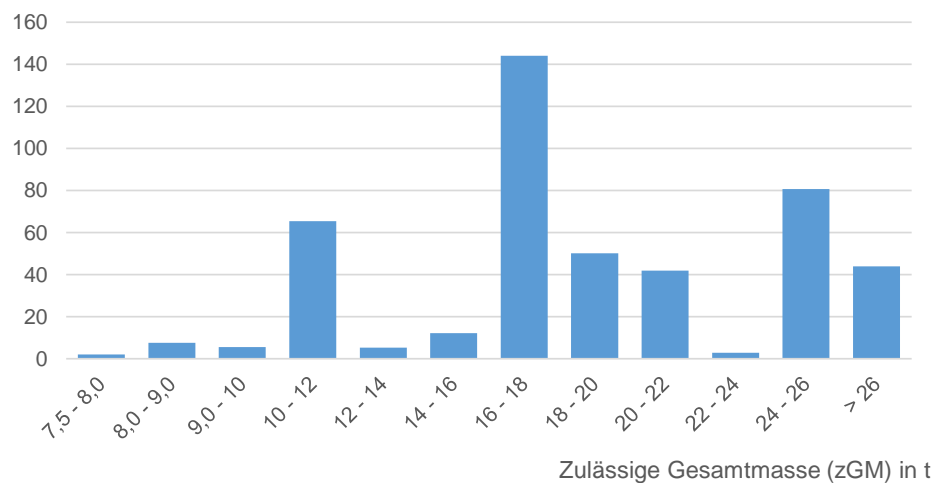
Nutzfahrzeuge größer 7,5 t technischer zGM sind überwiegend Lkw – der Anteil der Sattelzüge (40% im Jahr 2015) fällt demgegenüber geringer aus (vgl. Abbildung 7-2).

7.1.3 Einteilung nach Zulässiger Gesamtmasse

Die zulässige Gesamtmasse (zGM) ist die Summe aus Leergewicht und maximaler Zuladung eines Kraftfahrzeuges oder einer Fahrzeugkombination. Die Segmentierung in zGM-Klassen ist eine Möglichkeit, die Nutzfahrzeuge nach Größe zu gruppieren. Tendenziell steigt der Energieverbrauch mit steigender Fahrzeuggröße, wohingegen der Energieverbrauch bezogen auf die typische Nutzlast sinkt.

Im Gegensatz zur Achszahl oder zur Fahrzeugklasse, ist die zulässige Gesamtmasse ein kontinuierliches Maß, so dass darüber der Bestand differenziert in Klassen eingeteilt werden kann. Auch kann man prinzipiell davon ausgehen, dass mit steigender zGM der Energieverbrauch steigt. Die Verteilung des Nutzfahrzeugbestandes nach zGM-Klassen gemäß KBA-Statistik ist in Abbildung 7-3 dargestellt.

Abbildung 7-3: Bestand mautpflichtiger Fahrzeuge am 1. Januar 2015 nach zGM-Klasse, in Tsd. Fahrzeugen



Quelle: [KBA, 2015b], eigene Darstellung

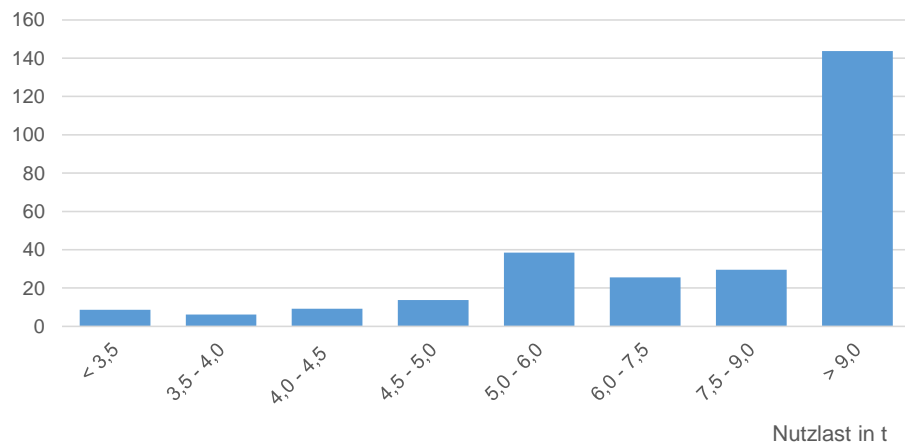
Die Gruppe der Lkw und Sattelzugmaschinen zwischen 16 und 18 t zGM ist mit einem Anteil von 31 % am größten. Ein Anteil von 9 % der mautpflichtigen Fahrzeugen hat eine zulässige Gesamtmasse von mehr als 26 t, während die kleinsten Fahrzeuge (7,5 bis 8 t) nur 0,4 % des Bestands ausmachen. Die Klassifizierung gemäß KBA-Statistik führt damit zu Gruppen mit sehr unterschiedlichen Anteilen am Gesamtbestand.

7.1.4 Einteilung nach Nutzlastklassen

Die Nutzlast ist die Last, die ein Fahrzeug aufnehmen kann, bis die maximal zulässige Gesamtmasse erreicht ist. Sie entspricht der Masse der Zuladung, die mit dem Fahrzeug transportiert werden kann.

Fahrzeuge mit einer hohen Nutzlast haben dementsprechend das Potenzial, viel Tonnage zu transportieren. Der Anreiz sollte darin bestehen, Fahrzeuge mit hoher Nutzlast und geringem Leergewicht zu nutzen. Da bei der alleinigen Betrachtung der Nutzlast das Leergewicht der Fahrzeuge unbeachtet bleibt, ist die zGM (welche Nutzlast und Leergewicht vereint) gegenüber den Nutzlastklassen als Segmentierungskriterium geeigneter. Gemäß KBA-Statistik wird die Nutzlast in 13 Klassen unterteilt (Abbildung 7-4). Über 50 % der mautpflichtigen Fahrzeuge haben dabei eine Nutzlast von mehr als 9 t.

Abbildung 7-4: Bestand mautpflichtiger Fahrzeuge am 1. Januar 2015 nach Nutzlast-Klasse, in Tsd. Fahrzeugen

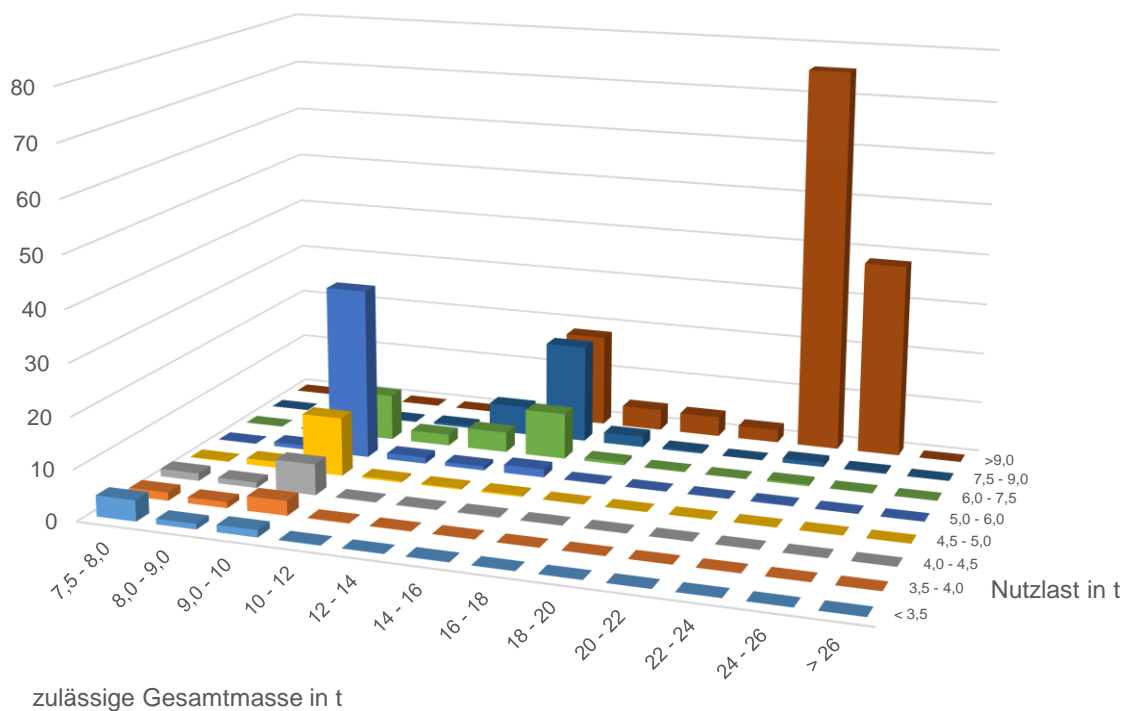


Quelle: [KBA, 2015b], eigene Darstellung

7.1.5 Einteilung nach Nutzlast und Zulässiger Gesamtmasse

Denkbar ist auch eine Gruppierung der Fahrzeuge nach mehreren Dimensionen, bspw. kann auf der ersten Ebene nach der Fahrzeugklasse differenziert werden und zusätzlich auf zweiter Ebene nach Nutzlast. Eine entsprechende Aufteilung ist in Abbildung 7-5 dargestellt.

Abbildung 7-5: Bestand mautpflichtiger Fahrzeuge am 1. Januar 2015 nach technischer zGM-Klasse und Nutzlastklasse, in Tsd. Fahrzeugen



Quelle: [KBA, 2015b], eigene Darstellung

7.1.6 Einteilung nach VECTO-Klassen

Eine alternativ mögliche Klassifizierung der Schweren Nutzfahrzeuge (SNF) in homogene Gruppen stellt die Klassifizierung in VECTO-Klassen dar. Im Rahmen der CO₂-Zertifizierung von Schweren Nutzfahrzeugen erfolgt die Bestimmung der spezifischen CO₂-Emissionen – und damit auch der spezifischen Kraftstoffverbräuche – mit Hilfe der Modellierungssoftware „VECTO“ (Vehicle Energy Consumption Calculation Tool). Dabei wird die Lkw-Flotte in 17 Klassen eingeteilt, mit ähnlichen Eigenschaften bezüglich des spezifischen Verbrauchs. Die Klassifizierung erfolgt nach Achsformel, Fahrzeugart und gesetzlich zulässiger Gesamtmasse und ist in Tabelle 7-1 dargestellt. Je VECTO-Klasse gelten in der Zertifizierung einheitliche Bestimmungen - unter anderem für simulierte Fahrzeugkonfiguration (z.B. Kennwerte eines evtl. zugewiesenen Anhängers), Fahrzyklen und Beladungen.

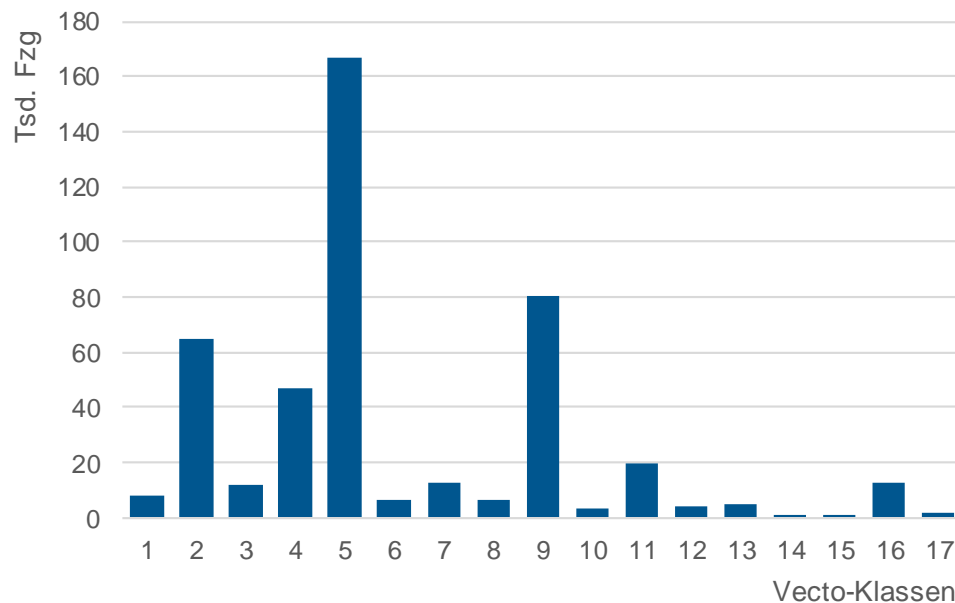
Tabelle 7-1: Einteilung der mautpflichtigen Fahrzeuge in VECTO-Klassen

Anzahl Achsen	Achskonfiguration	Typ	zulässige Gesamtmasse	VECTO-Klasse
2 Achsen	4x2	Lkw + (Sattelzug)	7,5 t – 10 t	1
		Lkw + (Sattelzug)	> 10 t – 12 t	2
		Lkw + (Sattelzug)	> 12 t – 16 t	3
		Lkw	> 16 t	4
		Sattelzug	> 16 t	5
		4x4	Lkw	7,5 t – 16 t
	Lkw		> 16 t	(7)
	Sattelzug		> 16 t	(8)
	3 Achsen	6x2/2-4	Lkw	alle
Sattelzug			alle	10
6x4		Lkw	alle	11
		Sattelzug	alle	12
6x6		Lkw	alle	(13)
		Sattelzug	alle	(14)
4 Achsen	8x2	Lkw	alle	(15)
	8x4	Lkw	alle	16
	8x6/8x8	Lkw	alle	(17)

Quelle: eigene Darstellung

Die Verteilung der in Deutschland zugelassenen mautpflichtigen Fahrzeuge nach VECTO-Klassen ist in Abbildung 7-6 dargestellt. Den größten Anteil haben mit 37% die vorwiegend im Fernverkehr eingesetzten 2-achsigen Zugmaschinen aus Klasse 5.

Abbildung 7-6: Bestand mautpflichtiger Fahrzeuge am 1. Januar 2015 nach VECTO-Klasse, in Tsd. Fahrzeugen



Quelle: [KBA 2016], eigene Auswertung und Darstellung

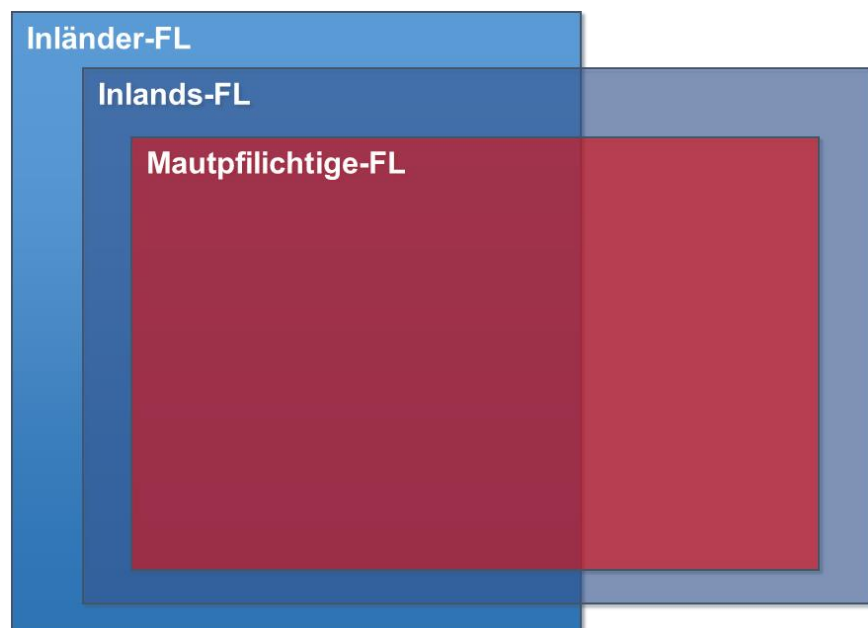
Um die Energieeffizienz verschiedener Fahrzeuge anhand der CO₂-Werte aus der Zertifizierung aussagekräftig vergleichen zu können, stellt die Einteilung des Bestandes gemäß der VECTO Gruppen die naheliegendste und robusteste Methode dar. Innerhalb dieser Klassen gelten per Definition identische Verhältnisse für alle verbrauchsrelevanten Rahmenbedingungen (Zyklen, Belastungen, etc.), was eine direkte Vergleichbarkeit der Verbrauchs- bzw. CO₂-Emissionswerte ermöglicht.

7.2 Prognose der Fahrleistungen nach VECTO-Klassen bis 2030

Energieverbrauch, CO₂-Emissionen und Mautaufkommen hängen von der Fahrleistung ab. Nach den vorgeschlagenen Mautkonzepten erfolgt die Bewertung der Fahrzeuge nach Effizienz innerhalb homogener Fahrzeugklassen (vgl. Kapitel 4.3). Die relevante Fahrzeugsegmentierung sind die VECTO-Klassen, wie im Kapitel 7.1 beschrieben wird. Für Abschätzungen der Wirkung der Lkw-Maut auf Energieverbrauch und CO₂-Emissionen und der Mauteinnahmen ist deshalb eine Differenzierung der Fahrleistungen nach VECTO-Klassen von Interesse.

In diesem Kapitel wird die Fahrleistung der einzelnen VECTO-Klassen sowie ihre jeweiligen Anteile auf Mautstrecken abgeschätzt. Dabei muss zwischen den Fahrleistungsebenen der Inländerfahrleistung, der Inlandsfahrleistung und der mautpflichtigen Fahrleistung²⁵ unterschieden werden (Abbildung 7-7). Da die Systematik der Maut für die Zukunft untersucht wird, wird das Fahrleistungsgerüst bis 2030 mittels der WTR-Fahrleistungsprognose [Prognos, 2016b] abgeleitet.

Abbildung 7-7: Abgrenzungen unterschiedlicher Ebenen der Fahrleistung



Quelle: eigene Darstellung

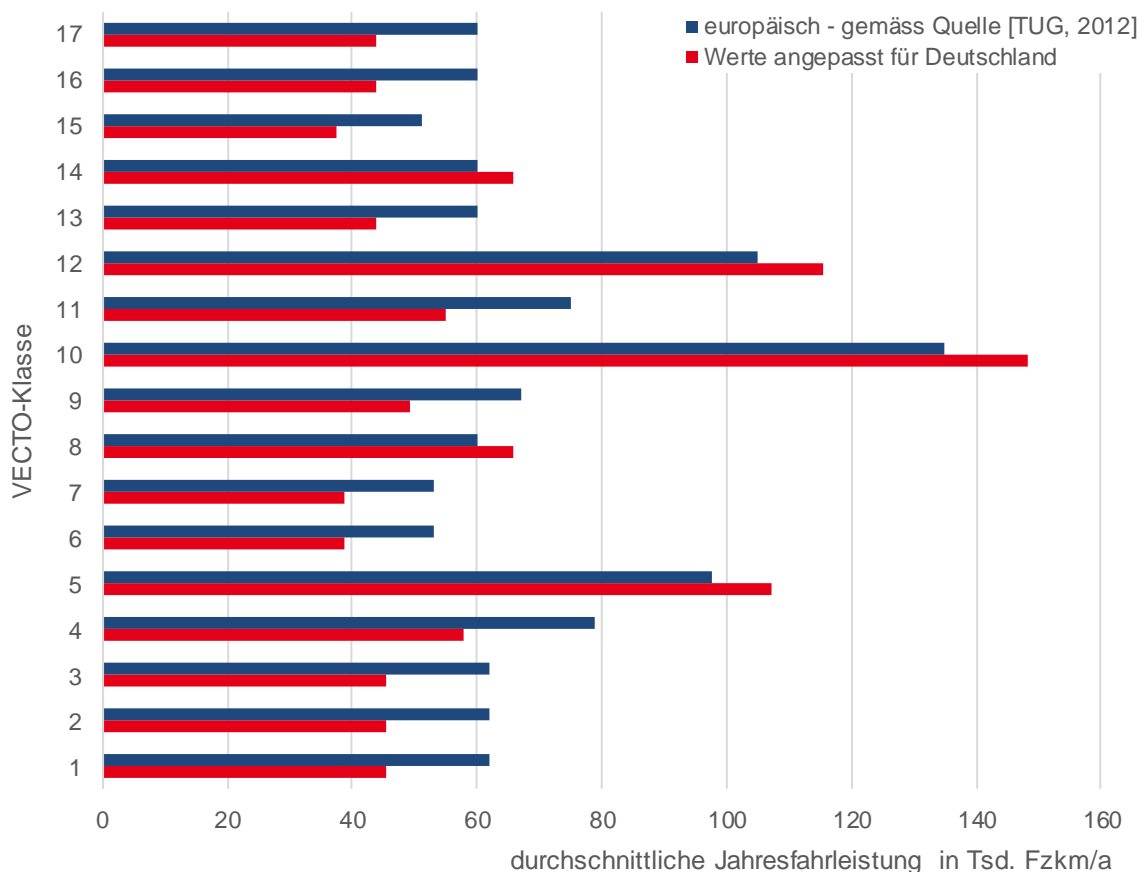
Als relevante Datenquellen zur Abschätzung der Fahrleistung für Straßengüterfahrzeuge können die Fahrleistungserhebungen 2014 (FLE 2014) zu Inländerfahrleistung und Inlandsfahrleistungen –

²⁵ Inländer-Fahrleistung: Fahrleistung von Fahrzeugen, welche in Deutschland gemeldet sind.
Inlands-Fahrleistung: Fahrleistung auf deutschem Gebiet
Mautpflichtige-Fahrleistung: Fahrleistung von mautpflichtigen Fahrzeugen auf Mautstrecken.

der Bundesanstalt für Straßenwesen genutzt werden [BASt, 2017a&b]. Die Inländerfahrleistungserhebung weist die Fahrleistung der Lkw > 3,5 t zGM sowie die Fahrleistung der Sattelzugmaschinen für das Jahr 2014 aus. Die Umrechnung in die Fahrleistung mautpflichtiger Fahrzeuge (ab 7,5 t zGM) erfolgt über eine Bestandsanalyse nach Größenklassen. Für das Jahr 2014 ergibt sich eine Inländerfahrleistung mautpflichtiger Fahrzeuge von 32,5 Mrd. Fahrzeugkilometern.

Die Segmentierung der Fahrleistung nach VECTO-Klassen erfolgt ausgehend von den Fahrzeugbeständen und den durchschnittlichen Jahresfahrleistungen nach VECTO-Klassen. Die Bestände nach VECTO-Klassen wurden über eine Auswertung der Bestandsdaten des KBA bestimmt. Für die durchschnittlichen Jahresfahrleistungen europäischer schwerer Nutzfahrzeuge nach VECTO-Klassen liegt eine Abschätzung vor [TUG, 2012]. Diese Jahresfahrleistungen sind in Abbildung 7-8 blau dargestellt.

Abbildung 7-8: Durchschnittliche Jahresfahrleistungen nach VECTO-Klasse



Quelle: TUG, 2012 und eigene Berechnungen

Die oben dargestellten jährlichen Fahrleistungen gelten nicht spezifisch für Deutschland. Multipliziert mit dem Fahrzeugbestand

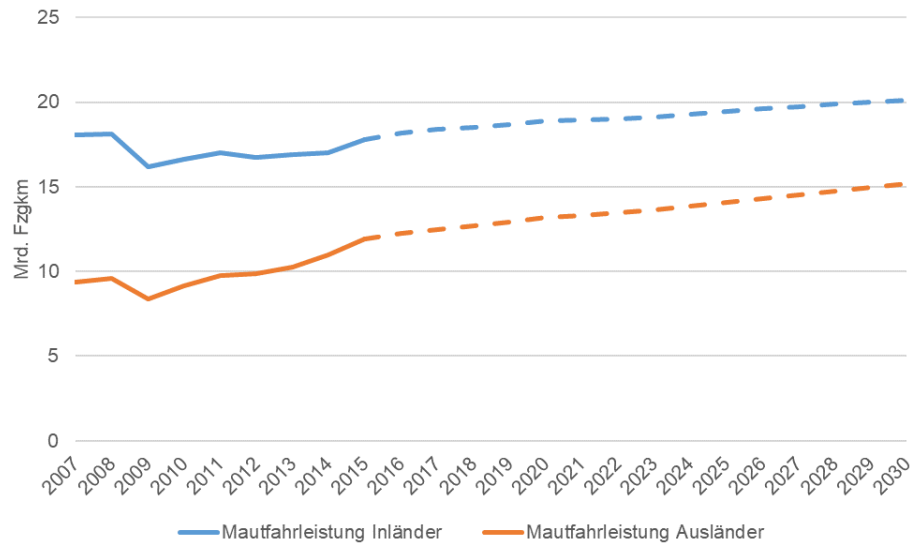
nach VECTO-Klassen (vgl. Kapitel 7.1.6) ergibt sich eine gegenüber FLE 2014 etwas höhere Inländerfahrleistung. Die Summe der Inländerfahrleistungen für Lkw und Sattelzugmaschinen sollen für die nach VECTO-Klassen differenzierten Fahrleistungen mit der FLE 2014 übereinstimmen. Die durchschnittlichen Jahresfahrleistungen werden deshalb dahingehend angepasst, dass die resultierenden Inländerfahrleistungen mit der FLE 2014, unter Beibehaltung der Verhältnisse der durchschnittlichen Jahresfahrleistungen gemäß [TUG, 2012] übereinstimmt (rote Balken).

Die Struktur der Fahrleistung nach VECTO-Klassen für das Jahr 2014 wird in der Zeitreihe 2007 bis 2030 weitergeführt. Dabei werden aktuelle Verkehrsprognosen verwendet, getrennt für Lkw > 3,5 t zGM und Sattelzugmaschinen. Die Prognosen sind kompatibel mit der Verflechtungsprognose (Matrix 2030).

Als nächster Schritt wird die Inländerfahrleistung in Fahrleistungsanteile im Inland- und Ausland getrennt. Auch dieser Schritt erfolgt für Lkw und Sattelzugmaschinen getrennt und basiert auf den Ergebnissen der Inlandsfahrleistungserhebung der BASt [BASt, 2017b]. Für das Jahr 2014 wird bei Lkw ein Anteil der Fahrleistung im Ausland an der Inländerfahrleistung von 1,8 % und bei Sattelzugmaschinen von 6,3 % ermittelt. Mit diesen Anteilen werden die Inlandsfahrleistungen der Inländer für die VECTO-Klassen gerechnet. Bei den Prognosewerten werden die Anteile als konstant angenommen.

Um die Mautfahrleistung zu isolieren, wird das Fahrleistungsgerüst zusätzlich nach Straßenkategorien aufgespalten. Dabei können interne Daten genutzt werden, welche hauptsächlich auf den Veröffentlichungen der BASt (Straßenverkehrszählungen für die Jahre 2005 und 2010) beruhen. Mit der Aufteilung der Fahrleistung nach Straßenkategorien ist die mautrelevante Fahrleistung bekannt (die Aufteilung in bemaute und nicht bemaute Bundesstraßen wurde auf Basis der Netzkilometer abgeschätzt). Die Mautfahrleistung der Inländer wird für die Jahre 2007 bis 2014 mit der Mautstatistik abgeglichen. Auf Basis der Mautstatistik wird auch die Fahrleistung nach Nationalität [Inländer, Ausländer] differenziert und für den Zeithorizont bis 2030 fortgeschrieben. Die Entwicklung der Mautfahrleistung nach Nationalität ist in Abbildung 7-9 dargestellt.

Abbildung 7-9: Mautfahrleistung in Deutschland nach Nationalität, 2007 bis 2014 und Prognose bis 2030, in Mrd. Fzkm



Quelle: BAG, 2016 und eigene Berechnungen

Zur Prognose der Mautfahrleistung nach Nationalität wurde die Entwicklung gemäß World Transport Report 2015/2016 [Prognos, 2016b] für Deutschland verwendet. Nach der Mautstatistik liegt der Fahrleistungsanteil ausländischer Halter 2015 bei 40 %. Nach der vorliegenden Abschätzung steigt der Anteil bis zum Jahr 2030 auf 43 % an. Die Mautfahrleistung in ihrer Entwicklung bis 2030 ist differenziert nach VECTO-Fahrzeugklassen in Tabelle 7-2 angegeben.

Tabelle 7-2: Mautfahrleistung nach VECTO-Klasse, Inländerfahrleistung und Inlandsfahrleistung mautpflichtiger Fahrzeuge für die Jahre 2015, 2020 und 2030, in Mio. Fzkm

Fahrleistung schwerer Straßengüterfahrzeuge		2015	2020	2030
Mautfahrleistung nach VECTO-Klassen				
2	2 Achsen (4x2); Lkw (+Sattelzug); > 10t – 12t	1.639	1.603	1.620
3	2 Achsen (4x2); Lkw (+Sattelzug); > 12t – 16t	508	505	518
4	2 Achsen (4x2); Lkw; > 16t	2.566	2.534	2.580
5	2 Achsen (4x2); Sattelzug; > 16t	17.299	19.621	22.442
7	2 Achsen (4x4); Lkw; > 16t	472	466	475
9	3 Achsen (6x2/2-4); Lkw; alle	3.717	3.671	3.738
11	3 Achsen (6x4); Lkw; alle	1.009	996	1.014
16	4 Achsen (8x4); Lkw; alle	505	499	508
	Restliche	1.998	2.168	2.398
Insgesamt Mautfahrleistung		29.713	32.063	35.294
Insgesamt Inländerfahrleistung		32.812	35.395	38.119
Insgesamt Inlandsfahrleistung		45.125	48.989	53.867

Quelle: eigene Berechnung

Zur Beurteilung der energetischen Wirkung der energieeffizienzgepreizten Maut ist neben Fahrleistung und Energieverbrauch auf mautpflichtigen Straßen (Mautfahrleistung) auch entscheidend, welche Fahrleistung die mautpflichtigen Fahrzeuge auf inländischen Straßen erbringen, auf denen keine Maut erhoben wird und welcher Energieverbrauch damit verbunden ist. Dabei sind neben inländischen Fahrzeugen auch ausländische Fahrzeuge zu betrachten. In der FLE 2014 wird die Fahrleistung der ausländischen Kfz je Fahrzeugkategorie angegeben. Im Jahr 2014 beträgt sie nach Inlandsfahrleistungserhebung [BASt, 2017b] für Lkw mit einer Gesamtmasse größer 3,5 Tonnen 6,55 Mrd. Kilometer und für Sattelzugmaschinen 8,33 Mrd. Kilometer. Zusammen mit der Inländerfahrleistung im Inland resultiert schließlich die Inlandsfahrleistung für mautpflichtige Fahrzeuge nach VECTO-Klassen.

8 Untersuchung der Mautkonzepte anhand modellierter Effizienzverteilungen

In diesem Kapitel wird für die Mautkonzepte „stabile Effizienzklassen“ und „dynamische Effizienzklassen“ die Berechnung der Mautsätze und Effizienzklassen anhand von zwei ausgewählten VECTO-Fahrzeugklassen simuliert und auch in der zeitlichen Entwicklung dargestellt. Dafür werden in Kapitel 8.1 die Verteilung der Mautfahrleistung nach spezifischen Emissionen dieser beiden VECTO-Klassen abgeleitet. In Kapitel 8.2 werden daraus die Mautsätze und Effizienzklassen gemäß der Mautkonzepte abgeleitet.

8.1 Verteilungen nach spezifischen Emissionen als Grundlage zur Untersuchung der Mautkonzepte

In diesem Kapitel werden die Verteilungen der neu zugelassenen Fahrzeuge im Jahr 2014 nach spezifischen CO₂-Emissionen ermittelt und dargestellt. Davon ausgehend werden die Verteilungen der Mautfahrleistungen für die Jahre 2020 und 2030 ermittelt (Kapitel 8.1.2). Kapitel 8.1.3 geht auf den Anteil der Mautfahrleistungsverteilung im Jahr 2020 ein, für welchen Effizienzwerte bekannt sind. Zukünftig können entsprechende Verteilungen im Rahmen der Mautstatistik erhoben werden. Alternativ ist auch eine Modellierung der Verteilungen denkbar.

8.1.1 Verteilung neu zugelassener Nutzfahrzeuge nach spezifischen CO₂-Emissionen im Jahr 2014

Für die Untersuchung der verschiedenen Mautkonzepte wurden möglichst realitätsnahe Verteilungen der CO₂-Emissionen, wie sie sich aus der zukünftigen CO₂-Zertifizierung ergeben werden, benötigt. Diese Verteilungen wurden beispielhaft für folgende VECTO-Klassen erstellt:

- Klasse 5: Sattelzugmaschinen von typischen 40 t, Fernverkehrs-Lkw
- Klasse 2: Lkw mit einer höchstzulässigen Gesamtmasse (zGM) zwischen 10 und 12 t, vorwiegend im Verteilerverkehr eingesetzt.

Diese beiden VECTO-Klassen wurden ausgewählt, weil sie erstens in der Flotte sehr häufige vorkommende Fahrzeuge abdecken (siehe dazu auch Abbildung 7-6) und zweitens sehr unterschiedlich bezüglich der Fahrzeugkonfiguration (z.B. Motorisierung, Antriebsstrang und Beladung) sind. Um die Verteilung der Verbrauchs- und CO₂-Werte zu erzeugen, wurden Simulationsrechnungen mit VECTO gemäß dem aktuellen Entwurf der europäi-

schen CO₂-Gesetzgebung durchgeführt. Die verwendeten Eingabedaten für VECTO stammen zum Großteil aus den Arbeiten zur Entwicklung der CO₂-Gesetzgebung im Auftrag der europäischen Kommission, zB. [TUG, 2012b] sowie der Studie [Ifeu/IVT, 2015].

Bei der Erstellung der Verteilungen wurde wie folgt vorgegangen:

1. Es wurden die wichtigsten fahrzeugspezifischen Einflussgrößen identifiziert, die in der zukünftigen CO₂-Gesetzgebung eine Varianz des CO₂-Emissionswerts der Lkw innerhalb einer VECTO Klasse bewirken. Diese sind:
 - i. Fahrzeugleergewicht
 - ii. Motornennleistung
 - iii. Motorwirkungsgrad
 - iv. Luftwiderstandsbeiwert
 - v. Rollwiderstand der Reifen
 - vi. Technologien der Fahrzeugnebenverbraucher (z.B. Typ des Ventilators für die Motorkühlung oder Technologie des Luftpressers)
 - vii. Gesamtübersetzung des Antriebsstrangs (Gangschaltgetriebe und Achse)
 - viii. Wirkungsgrade im Antriebsstrang
2. Es wurde für jede Lkw-Klasse ein Basisfahrzeug definiert, welches bezüglich der einzelnen Einflussgrößen dem häufigsten in der Fahrzeugflotte vorkommenden Wert entspricht.
3. Für jede CO₂-relevante Einflussgröße wurde eine Wahrscheinlichkeitsverteilung der Größe innerhalb des Fahrzeugbestandes ermittelt (z.B. für Leergewicht und Motornennleistung aus einer Auswertung der KBA-Statistik) bzw. anhand von Recherchen in technischen Datenblättern sowie Expertenbefragungen abgeschätzt.
4. Zur Ermittlung der CO₂-Werte der verschiedenen Fahrzeugkonfigurationen wurde in den VECTO-Simulationen - jeweils ausgehend vom Basisfahrzeug - eine einzelne Einflussgröße auf den CO₂-minimalen sowie den CO₂-maximalen Wert aus den in 3. erzeugten Wahrscheinlichkeitsverteilungen gesetzt²⁶ und die resultierenden CO₂-Werte mit dem des Basisfahrzeugs verglichen. Anhand dieser Differenz wurde der Einfluss auf den CO₂-Emissionswert des Gesamtfahrzeugs, ausgehend von der einzelnen Einflussgröße, abgeschätzt und in guter Nähe-

²⁶ Dabei wurden die 2,5 % sowie die 97,5 % Perzentilwerte aus den Wahrscheinlichkeitsverteilungen verwendet.

zung über eine lineare Skalierung auf die gesamte Verteilung angewendet.²⁷ Tabelle 8-1 und Tabelle 8-2 zeigen die in den Simulationsrechnungen mit VECTO verwendeten fahrzeugspezifischen Kennwerte.

Tabelle 8-1: Verbrauchsrelevante Kennwerte der simulierten Fahrzeuge der VECTO-Klasse 5 (Sattelzugmaschinen, Fernverkehr)

verbrauchsrelevante Kennwerte		Basiswert gemäß häufigster Fahrzeugkonfiguration	Fahrzeugvariante mit niedrigstem CO ₂ -Ausstoß	Fahrzeugvariante mit höchstem Kraftstoffverbrauch
Leergewicht	[kg]	7.900	6.600	8.600
Motornennleistung	[kW]	324	260	375
Motorwirkungsgrad	[-]	Basiskennfeld 12 l Hubraum	Kraftstoffverbrauch um 3% gesenkt	Kraftstoffverbrauch um 3% erhöht
Luftwiderstand	[m ²]	5,3	4,8	8,9
Rollwiderstandsbeiwert	[kg/t]	5.5-5.5-3x5.5	4.5-4.5-3x5.5	6.5-6.5-3x5.5
Nebenverbraucher mech.	[kW]	3,29	2,31	6,19
Nebenverbraucher elektr.	[kW]	1,20	1,15	1,20
Achsübersetzung	[-]	2,64	2,31	3,71
Wirkungsgrade im Antriebsstrang	[-]	Gang / Gang dir. / Retard. / Achse 0.972 / 0.981 / 0.988 / 0.960	Gang / Gang dir. / Retard. / Achse 0.978 / 0.985 / 0.988 / 0.968	Gang / Gang dir. / Retard. / Achse 0.944 / 0.961 / 0.988 / 0.937

Quelle: eigene Berechnung

Tabelle 8-2: Verbrauchsrelevante Kennwerte der simulierten Fahrzeuge der VECTO-Klasse 2 (Verteiler-Lkw 10 bis 12 t zGM)

verbrauchsrelevante Kennwerte		Basiswert gemäß häufigster Fahrzeugkonfiguration	Fahrzeugvariante mit niedrigstem CO ₂ -Ausstoß	Fahrzeugvariante mit höchstem Kraftstoffverbrauch
Leergewicht	[kg]	4.650	3.500	5.300
höchstzul. Gesamtgewicht	[kg]	10.500	11.990	11.990
Motornennleistung	[kW]	175	130	220
Motorwirkungsgrad	[-]	Basiskennfeld 7 l Hubraum	Kraftstoffverbrauch um 3% gesenkt	Kraftstoffverbrauch um 3% erhöht
Luftwiderstand	[m ²]	4,83	4,35	7,40
Rollwiderstandsbeiwert	[kg/t]	D, E	C, D	E, F
Nebenverbraucher mech.	[kW]	2,19	1,70	2,99
Nebenverbraucher elektr.	[kW]	1,20	1,15	1,20
Achsübersetzung	[-]	4,18	2,85	5,33
Wirkungsgrade im Antriebsstrang	[-]	Gang / Gang dir. / Achse 0.968 / 0.985 / 0.956	Gang / Gang dir. / Achse 0.974 / 0.988 / 0.965	Gang / Gang dir. / Achse 0.926 / 0.970 / 0.869

Quelle: eigene Berechnung

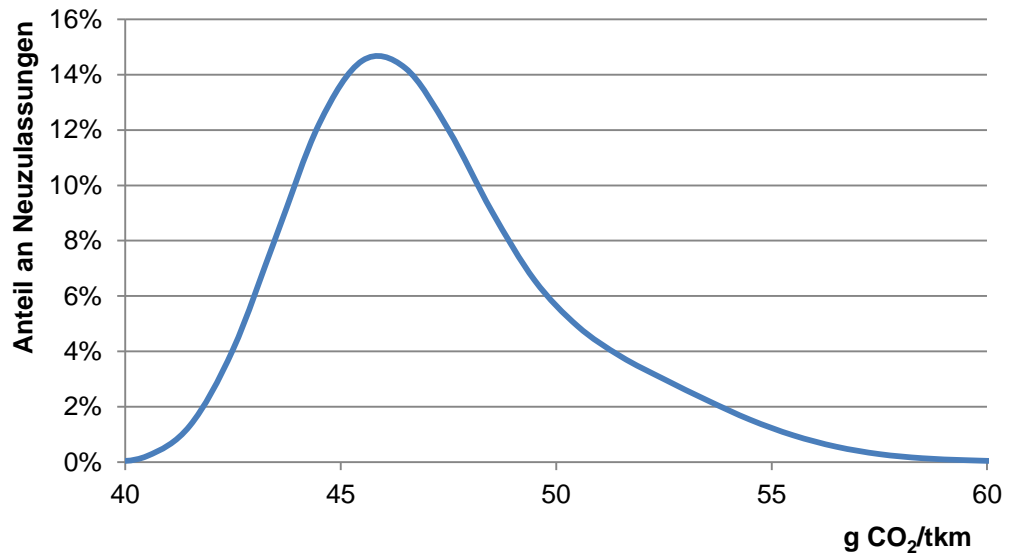
- Mittels Zufallsgenerator wurden in einem letzten Schritt aus den vorgegebenen Wahrscheinlichkeitsverteilungen für die einzelnen CO₂-relevanten Einflussgrößen einzelne Werte ausgewählt, zu kompletten Fahrzeugen „zusammengebaut“ und deren CO₂-Wert in der Einheit „Gramm je Tonnenkilometer“ mittels der Daten aus 4. ermittelt. Diese für eine große Anzahl an Fahrzeugen berechneten CO₂-Werte wurden zu den finalen Verteilungen der spez. CO₂-Emissionen für die neu zugelassenen Nutzfahrzeuge zusammengeführt.

Die in dieser Arbeit erzeugten Datensätze wurden für das Fahrzeug Zulassungsjahr 2014 erstellt. Abbildung 8-1 zeigt die Verteilung

²⁷ In dieser Arbeit wurden nur die CO₂-Werte aus dem vorwiegend aus Autobahnfahrt bestehenden Long-Haul Zyklus verwendet. In der zukünftigen CO₂-Gesetzgebung werden mit VECTO je nach Fahrzeugklasse auch weitere Zyklen simuliert, z.B. für einen Klasse 2 12 Tonner noch der „Regional Delivery“ und der „Urban Delivery“ Zyklus. Es gibt allerdings derzeit noch keinen Ansatz im Entwurf der CO₂-Gesetzgebung, die CO₂-Werte aus verschiedenen Zyklen zu einem repräsentativen Gesamtwert zusammenzuführen.

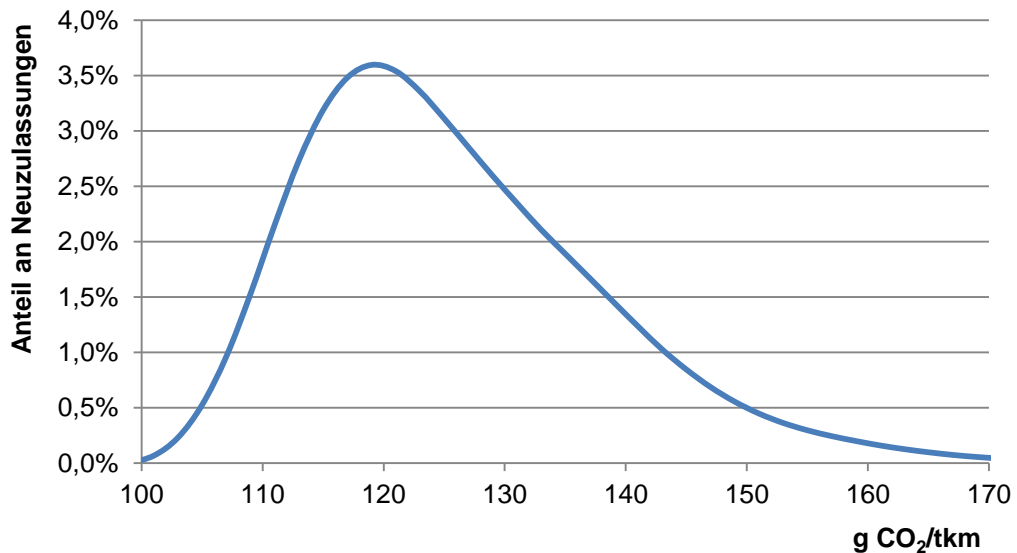
lung der CO₂ Werte der Klasse-5-Sattelzugmaschinen. Der häufigste CO₂-Wert liegt bei rund 45 g/tkm wobei sich die Verteilung von ca. 40 bis 60 g/tkm erstreckt. Abbildung 8-2 zeigt die entsprechenden Werte für die Klasse-2-Verteiler-Lkw. Hauptsächlich verursacht durch das ungünstigere Verhältnis von Nutzlast zu Gesamtgewicht ergeben sich für diese Fahrzeuge deutlich höhere spezifische CO₂ Werte im Bereich von ca. 100 bis 170 g/tkm. Die Verteilung der CO₂ Werte der Klasse 2 Fahrzeuge streut unter anderem dadurch mehr als die der Klasse-5-Fahrzeuge, weil die Nutzlast der Klasse-2-Fahrzeuge in VECTO als Funktion des höchstzulässigen Gesamtgewichts definiert ist, während für Klasse 5 eine fixe Zuladung verwendet wird.

Abbildung 8-1: Verteilung der 2014 neu zugelassenen Sattelzüge der VECTO-Klasse 5 nach spezifischen CO₂-Emissionen, in g CO₂/tkm



Quelle: eigene Berechnung, die Anteile beziehen sich jeweils auf eine Breite von 1g CO₂/tkm

Abbildung 8-2: Verteilung der 2014 neu zugelassenen Lkw der VECTO-Klasse 2 nach spezifischen CO₂-Emissionen, in g CO₂/tkm



Quelle: eigene Berechnung, die Anteile beziehen sich jeweils auf eine Breite von 1 g CO₂/tkm

8.1.2 Mautfahrleistungsverteilung nach spezifischen CO₂-Emissionen im Jahr 2020 und 2030

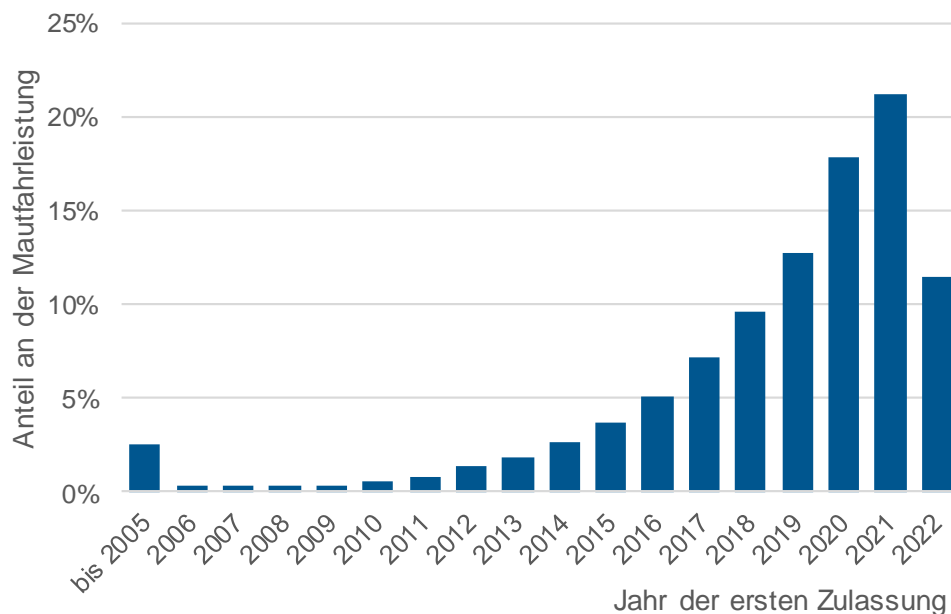
Zur Ableitung der zukünftigen Mautfahrleistungen des Gesamtbestands mautpflichtiger Fahrzeuge wird in einem ersten Schritt die Effizienzverteilung für alle neu zugelassenen Fahrzeuge aus Kapitel 8.1.1 modifiziert. Es wird dabei berücksichtigt, dass Fahrzeuge in Abhängigkeit von ihrer Effizienz unterschiedlich viel auf mautpflichtigen Straßen verkehren. Fahrzeuge mit einem hohen Verbrauch fahren tendenziell kürzere Strecken und insgesamt weniger auf Autobahnen. Diese Korrektur führt im Wesentlichen zu einer ähnlichen Verteilung, jedoch mit niedrigeren Anteilen bei hohen spezifischen Verbräuchen. Es resultiert die Verteilung der Mautfahrleistung der im Stichjahr 2014 neu zugelassenen Nutzfahrzeuge nach spezifischen CO₂-Emissionen. Im Folgenden wird diese Verteilung **Effizienzverteilung der Neuzulassungen** genannt.

Um analoge Verteilungen auch für Stichjahre vor und nach 2014 zu schätzen, wird die Verteilung für 2014 entlang der Abszisse (entspricht der spezifischen CO₂-Emission je Tonnenkilometer Fahrleistung) um 0,5 % pro Jahr „verschlechtert“ bzw. um 1 % pro Jahr „verbessert“, je nachdem, ob das Stichjahr vor oder nach 2014 liegt. Diese Transformation ist iterativ und wird schrittweise für jedes Stichjahr basierend auf dem Vorgängerstichjahr bestimmt. Beispielsweise ergibt sich die Verteilung neu zugelassener

Nutzfahrzeuge für das Jahr 2013, indem alle Einträge der Verteilung des Jahres 2014 (welche bereits bekannt ist) einzeln um den Faktor 0,5 % „verschlechtert“ werden, d.h. bildlich gesprochen nach rechts hin zu größeren CO₂-Emissionswerten verschoben werden. Die Verteilung des Jahres 2012 geht aus derjenigen des Jahres 2013 hervor, und so fort.

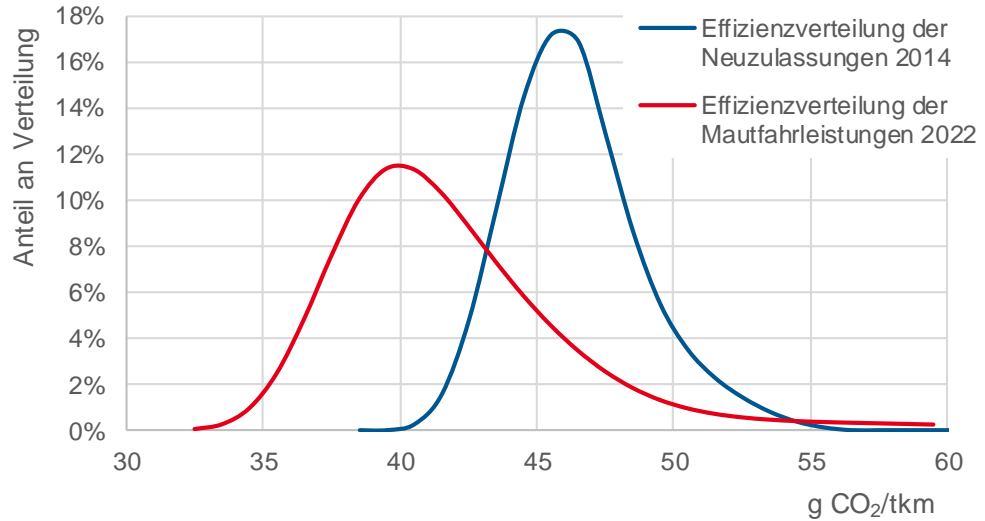
Neben den beschriebenen **Effizienzverteilungen der Neufahrzeuge** wird die Verteilung der Mautfahrleistung nach Zulassungsjahr herangezogen. Diese wird mittels eines Kohortenmodells der FVT nach dem Erstzulassungsjahr der Fahrzeuge modelliert und ist exemplarisch für das Jahr 2022 in Abbildung 8-3 dargestellt. Sie ermöglicht, die zuvor abgeleiteten Effizienzverteilungen der Neuzulassungen über alle relevanten Stichjahre gewichtet zu addieren. Dies resultiert in der **Effizienzverteilung der Mautfahrleistung**. Sie ist exemplarisch für das Jahr 2022 in der Abbildung 8-4 der Effizienzverteilung der im Jahr 2014 neu zugelassenen Fahrzeugen gegenübergestellt. In Abbildung 8-5 sind die Effizienzverteilungen der Mautfahrleistung für die Jahre 2022 und 2030 dargestellt.

Abbildung 8-3: Mautfahrleistung der Sattelzugmaschinen der VECTO-Klasse 5 im Jahr 2022 nach dem Erstzulassungsjahr



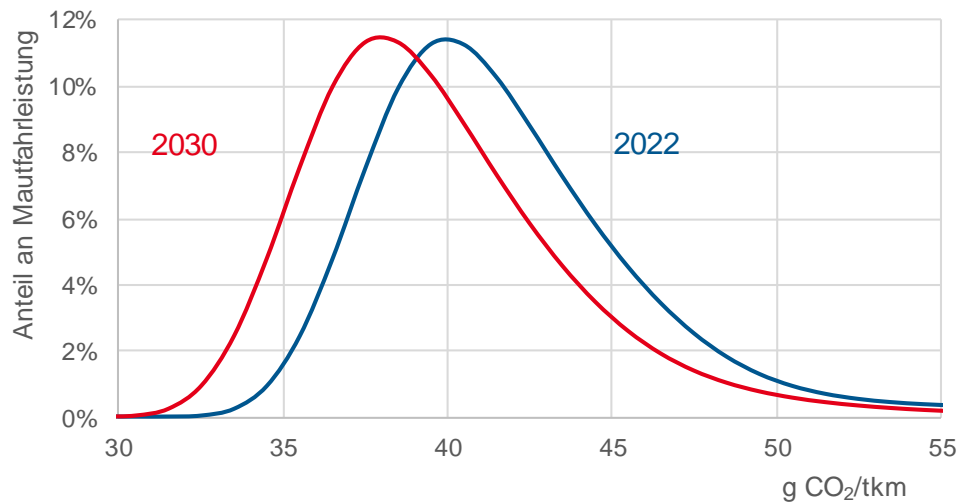
Quelle: eigene Berechnung

Abbildung 8-4: Effizienzverteilungen der Mautfahrleistungen für das Jahr 2022 und die Effizienzverteilung der im Jahr 2014 neu zugelassenen Sattelzugmaschinen der VECTO-Klasse 5



Quelle: eigene Berechnung, die Anteile beziehen sich jeweils auf eine Breite von 1g CO₂/tkm

Abbildung 8-5: Effizienzverteilung der Mautfahrleistung der Sattelzugmaschinen der VECTO-Klasse 5 in den Jahren 2022 und 2030



Quelle: eigene Berechnung

8.1.3 Mautfahrleistung in den Jahren der Mautumstellung– Fahrleistung mit und ohne zertifizierte CO₂-Werte

Zum Zeitpunkt der Mautumstellung wird nur ein Teil der Mautfahrleistung mit Fahrzeugen erbracht, welche zertifizierte CO₂-Werte besitzen. In Kapitel 6.2.2 wird deshalb vorgeschlagen, diesen Fahrzeugen zukünftig generische CO₂-Werte basierend auf entweder ihrer Schadstoffklasse oder ihrem Zulassungsjahr zuzuordnen²⁸.

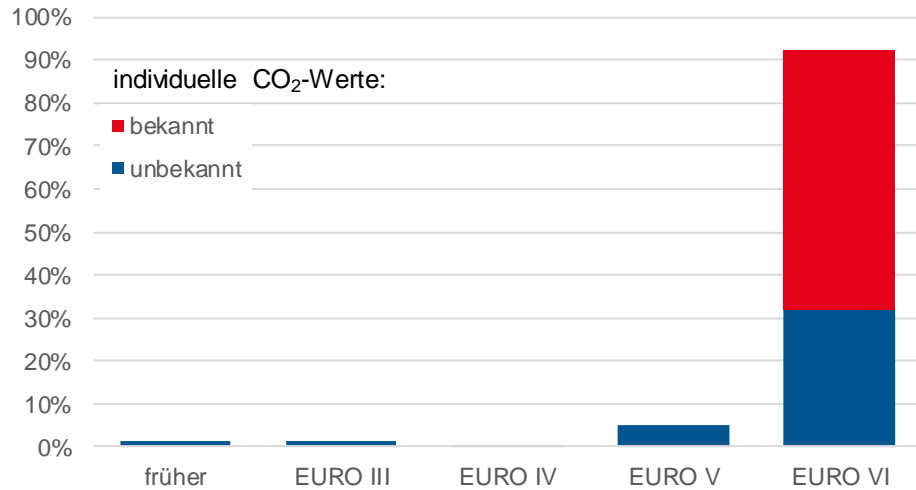
Unter Annahme des Zeitplans gemäß Kapitel 10 und unter Einbeziehung der aktuellen europäischen Rahmengesetzgebung, wird für Fahrzeuge der VECTO-Klassen 4, 5, und 9 angenommen, dass 75 % im Jahr 2019 und 100% der Fahrzeuge ab 2020 mit zertifizierten CO₂-Werten zugelassen werden (vgl. Anhang A, Kapitel 3.2). Es wird weiter angenommen, dass für diese Fahrzeuge die energieeffizienzgespreizte Lkw- Maut ab dem Jahr 2022 eingeführt wird. Für Fahrzeuge der VECTO-Klassen 1, 2, 3, wird angenommen, dass für alle ab 2020 zugelassenen Fahrzeuge zertifizierte CO₂-Werte zur Verfügung stehen und die Maut ab dem Jahr 2023 für alle Fahrzeugklassen differenziert nach Energieeffizienzklassen erhoben wird.

Basierend auf den ermittelten Mautfahrleistungen nach Zulassungsjahr lässt sich ableiten, welcher Anteil der Mautfahrleistung im Jahr der Mautumstellung von Fahrzeugen mit zertifizierten CO₂-Werten erbracht wird. Für Fahrzeuge der VECTO-Klasse 5 werden demnach im Jahr der Mautumstellung (2022) 60 % der Mautfahrleistung von Fahrzeugen mit zertifizierten CO₂-Werten erbracht. Für Fahrzeuge der VECTO-Klasse 2 werden im Jahr der Mautumstellung (2023) 38 % der Mautfahrleistung von Fahrzeugen mit zertifiziertem CO₂-Wert erbracht.

In Abbildung 8-6 und Abbildung 8-7 wird für Fahrzeuge der VECTO-Klassen 5 und 2 für das Jahr der Einführung der energieeffizienzgespreizten Lkw-Maut dargestellt, wie sich die Mautfahrleistung auf die unterschiedlichen EURO-Schadstoffklassen aufteilt. Da der Großteil der Mautfahrleistung bereits zu Beginn der energieeffizienzgespreizten Maut von Fahrzeugen der besten Schadstoffklasse erbracht wird, eignen sich diese weniger um den Fahrzeugen generische CO₂-Emissionen zuzuweisen. Eine feinere Differenzierung der Mautfahrleistung von Fahrzeugen ohne zertifizierte CO₂-Werte wird hingegen erreicht, wenn den Fahrzeugen basierend auf ihr Zulassungsjahr ein generischer CO₂-Wert zugeordnet wird, da dadurch eine feinere Differenzierung der Mautfahrleistung vorliegt (siehe Abbildung 8-8 und Abbildung 8-9).

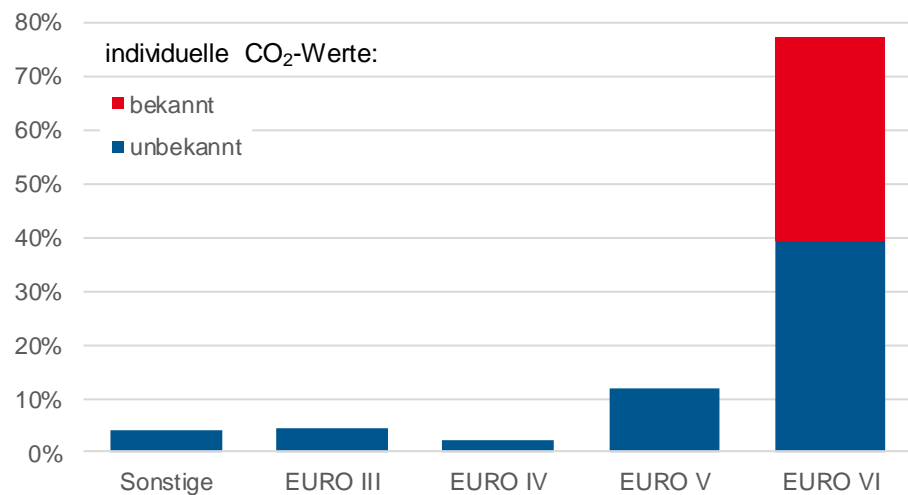
²⁸Dabei ist zu berücksichtigen, dass in diesem Fall aus den vielen identischen Standardwerten Spitzen in der ansonsten glatten Verteilung der Mautfahrleistung entstehen und mit diesen im Rahmen der Definition der Mautsätze umgegangen werden muss. Diese entstehen dadurch, dass beispielsweise allen Fahrzeugen des Jahrgangs 2006 oder der Euro-Klasse III ein einheitlicher Effizienzwert zugeordnet wird, der dann in der Effizienzverteilung eine Spitze bildet.

Abbildung 8-6: Mautfahrleistung von Sattelzugmaschinen der VECTO-Klasse 5 im Jahr 2022 nach EURO-Schadstoffklasse und Anteil der Mautfahrleistung von Fahrzeugen mit bekannten individuellen CO₂-Werten



Quelle: eigene Berechnung

Abbildung 8-7: Mautfahrleistung von Verteiler-Lkw der VECTO-Klasse 2 im Jahr 2023 nach EURO-Schadstoffklasse sowie Anteil der Mautfahrleistung von Fahrzeugen mit bekannten individuellen CO₂-Werten



Quelle: eigene Berechnung

Abbildung 8-8: Mautfahrleistung von Sattelzugmaschinen der VECTO-Klasse 5 im Jahr 2022 nach Zulassungsjahr und Anteil der Mautfahrleistung von Fahrzeugen mit bekannten individuellen CO₂-Werten

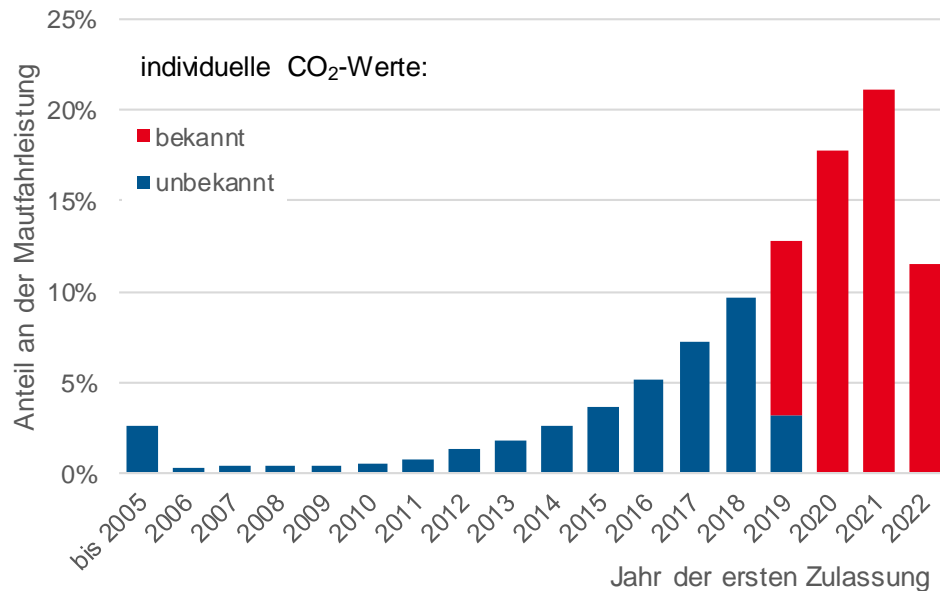


Abbildung 8-9: Mautfahrleistung von Verteiler-Lkw der VECTO-Klasse 2 im Jahr 2023 nach Zulassungsjahr sowie Anteil der Mautfahrleistung von Fahrzeugen mit bekannten individuellen CO₂-Werten

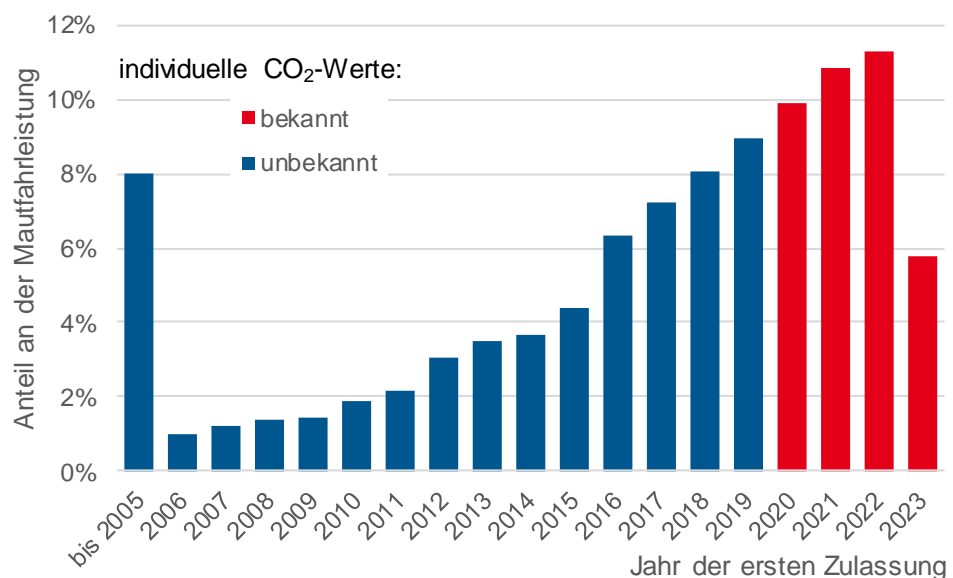
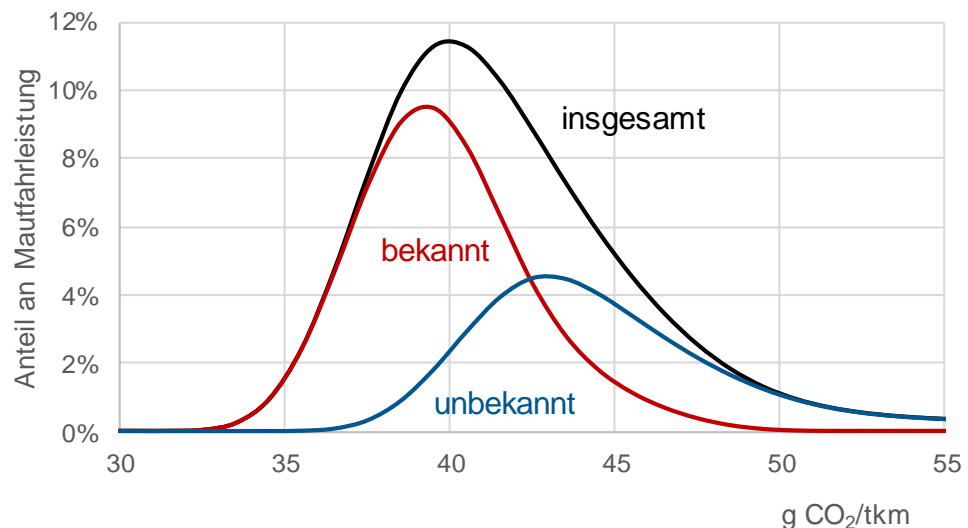


Abbildung 8-10 gibt die Effizienzverteilung der Mautfahrleistung für Sattelzugmaschinen im Jahr der Einführung der energieeffizienzgespreizten Lkw-Maut an und zeigt an, welcher Anteil der Effizienzverteilung von Fahrzeugen mit bekannten zertifizierten CO₂-

Werten erbracht wird und welcher Anteil von Fahrzeugen erbracht wird, die vor Einführung des CO₂-Zertifizierung zugelassen wurden.

Abbildung 8-10: Effizienzverteilung der Mautfahrleistung von Sattelzugmaschinen der VECTO-Klasse 5 im Jahr 2022 insgesamt sowie Anteil mit bekannten und unbekanntem CO₂-Werten



Quelle: eigene Berechnung, die Anteile beziehen sich jeweils auf eine Breite von 1g CO₂/tkm

8.2 Lkw-Maut in den Jahren 2020²⁹ und 2030: Mautsätze und Mautklassen

Im Folgenden werden zwei Konzepte zur Definition der Maut von Nutzfahrzeugen vorgestellt. Beiden gemein ist die Idee, die Mautsätze über das Integral der effizienzabhängigen Mautfahrleistung zu definieren, um so den Marktakteuren einen im Hinblick auf den gesamten Treibhausgasausstoß optimierten Anreiz zu Verbesserungen der Effizienz zu geben (vgl. Kapitel 6.1.2).

Dabei wird im Folgenden ausschließlich der Anteil des Mautsatzes betrachtet, welcher abhängig von der Effizienz der Fahrzeuge differenziert wird. Der volle Mautsatz ergibt sich jeweils durch Addition des minimalen Satzes für die Infrastrukturnutzung abhängig von der Achsklasse. Dieser Minimalersatz entspricht der Infrastrukturkomponente abzüglich der Spreizung der Infrastrukturkomponente (vgl. Kapitel 5.2). Mögliche Höhen für Minimal- und Maximalsätze werden im Kapitel 5.2 diskutiert. Zusätzlich können externe Kostenkomponenten für Schadstoffemissionen (gemäß aktuellem Konzept) und ggfs. Lärmemissionen integriert werden (vgl. Kapitel 3.2). Die hier verwendeten Sätze stellen in Anlehnung an

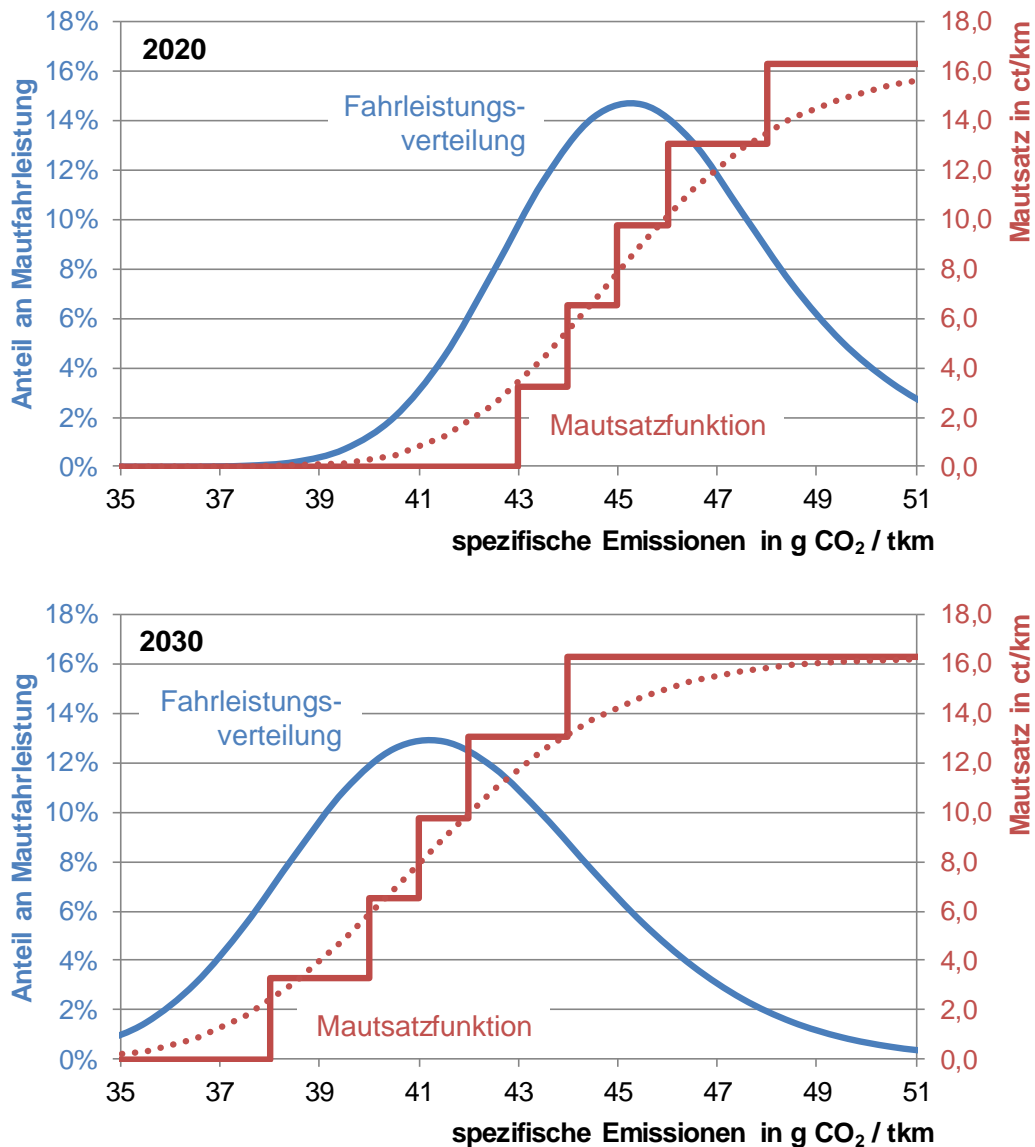
²⁹ Exemplarische Betrachtung für das Jahr 2020. Es ist davon auszugehen, dass eine energieeffizienzgespreizte Lkw-Maut frühestens in den Jahren 2022 / 2023 eingeführt werden kann (vgl. Kapitel 3.2 und 10). Die Mautsatzfunktion kann entsprechend für das Jahr der Einführung abgeleitet werden.

die heutige EU-Rahmengesetzgebung mögliche maximale Mautspreizungen dar (vgl. Kapitel 5.2).

Bei der Erarbeitung der Mautkonzepte wurde davon ausgegangen, dass eine energieeffizienzgespreizte Lkw-Maut bereits im Jahr 2020 eingeführt werden kann. Entsprechend wurde die exemplarische Untersuchung der Mautkonzepte im Rahmen dieses Kapitels für die Jahre 2020 und 2030 vorgenommen. Durch die Veröffentlichung des Vorschlags zur Anpassung der europäischen Eurovignettenrichtlinie und die damit verbundene Konkretisierung des Zeitplans lässt sich inzwischen ableiten, dass eine energieeffizienzgespreizte Maut frühestens in den Jahren 2022 / 2023 eingeführt werden kann (vgl. Kapitel 3.2 und 10). Die Schlussfolgerungen des Kapitels sind gleichwohl auch bei einer späteren Umstellung der Lkw-Maut gültig.

Das Konzept „**dynamische Effizienzklassen**“ teilt die Integralverteilung der Mautfahrleistung in sechs Quantile und belegt jedes Quantil mit einem linear ansteigenden Satz, beginnend von 0 bis hin zu einer Obergrenze M_{max} (16,3 ct/km für Sattelzugmaschinen; 10,9 ct/km für Verteiler-Lkw). Für das Prinzip der Mautsatzberechnung ist die Anzahl der Quantile unerheblich; die Wahl fiel auf sechs Klassen, weil derzeit ebenso viele EURO-Schadstoffklassen existieren. Die Einteilung der Effizienzklassen nach Quantilen führt zu der Tatsache, dass jede Klasse den gleichen Anteil an der Mautfahrleistung erbringt (per definitionem). Aus dieser Definition folgt, dass die Klassengrenzen dynamisch an die zugrundeliegende (und bekannte) Effizienzverteilung der Mautfahrleistung aller zugelassenen Nutzfahrzeuge angepasst werden, d.h. die Anzahl der Klassen bleibt unverändert und die Klassen „wandern“ mit der Verteilung entlang der Effizienz-Achse (Abbildung 8-11).

Abbildung 8-11: Mautsatz für Sattelzugmaschinen der VECTO-Klasse 5 nach Konzept „dynamische Effizienzklassen“ (sechs Quantile, linear ansteigender Mautsatz) für die Jahre 2020³⁰ (oben) und 2030 (unten) inklusive darunterliegendem Integral der Mautfahrleistung (gepunktet) sowie der Mautfahrleistung (blau)



Quelle: eigene Berechnung, die Anteile beziehen sich jeweils auf eine Breite von 1g CO₂/tkm

Das Mautkonzept „**stabile Effizienzklassen**“ verwendet fixe Klassengrenzen, welche die Integralverteilung der Mautfahrleistung unterteilt. Mit einer Klassenbreite von 4 g CO₂/tkm ergeben sich näherungsweise ebenfalls sechs befüllte Klassen. Der Mautsatz der einzelnen Klassen orientiert sich daran, welche Mautfahrleistung

³⁰ Exemplarische Betrachtung für das Jahr 2020. Es ist davon auszugehen, dass eine energieeffizienzgespreizte Lkw-Maut für Sattelzugfahrzeuge der VECTO-Klasse 5 frühestens 2022 eingeführt werden kann (vgl. Kapitel 3.2 und 10). Die Mautsatzfunktion kann entsprechend für dieses Jahr abgeleitet werden.

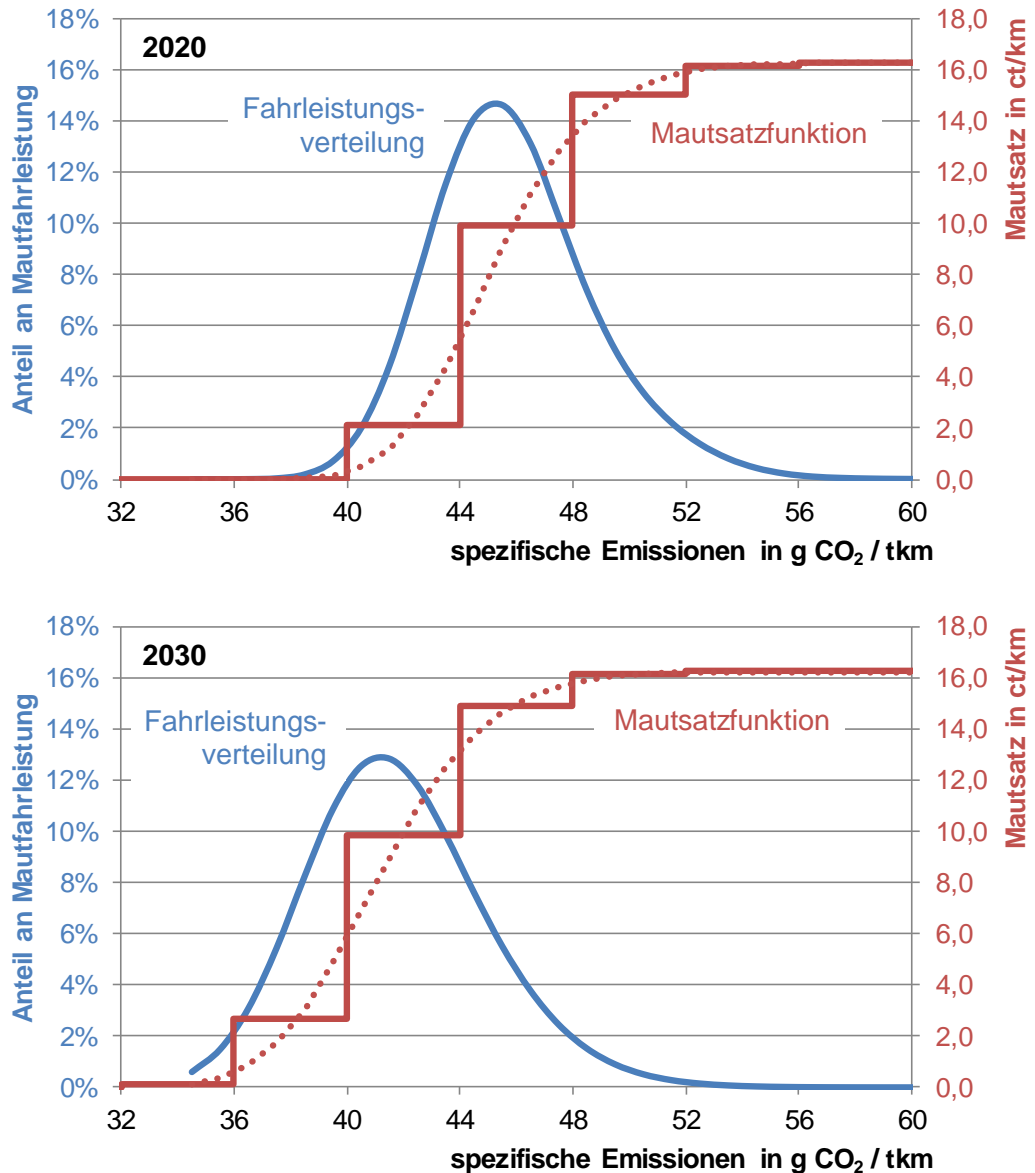
mit Fahrzeugen der entsprechenden Effizienzklasse geleistet wird. Er ändert sich dynamisch mit dem Anteil des von einer Mautklasse abgedeckten Integrals der Effizienzverteilung der Mautfahrleistung und ist deshalb abhängig von der gewählten Klassenbreite und der zugrundeliegenden Verteilung der Mautfahrleistung (Abbildung 8-12). Dieses Verhalten ist komplementär zu dem in Konzept „**dynamische Effizienzklassen**“, bei welchem die Höhe des Mautsatzes konstant ist und sich statt dessen die Klassengrenzen dynamisch ändern. Eine Eigenschaft des Konzepts „**stabile Effizienzklassen**“ ist es, mit zunehmend effizienter werdendem Bestand neue, zuvor nicht relevante Klassen einzuführen sowie alte, dann nicht mehr benötigte Klassen herauszunehmen.

Der direkte Vergleich beider Konzepte zeigt die sich jeweils unterscheidenden Mautsätze und Klassengrenzen (Abbildung 8-13 und Abbildung 8-14). Das auf die Anzahl der Nutzfahrzeuge normierte Gesamtaufkommen liegt nahezu konstant bei etwas über dem halben Maximalsatz, d.h. der mittlere Mautbeitrag jedes einzelnen Nutzfahrzeuges liegt rund bei $M_{max}/2$, geringe Abweichungen von $M_{max}/2$ liegen in der Histogrammierung³¹ der Daten begründet³². Das Gesamtaufkommen beträgt somit $M_{max}/2$ mal der Anzahl Nutzfahrzeuge, unabhängig von der Wahl des Mautkonzepts.

³¹ Die Daten liegen nicht als Volldatensatz aller Effizienzwerte vor, sondern in der Angabe wie viele Fahrzeuge beispielsweise einen Effizienzwert zwischen 40,0 und 40,5 g/tkm aufweisen.

³² Bei einer symmetrischen Verteilung der Mautfahrleistung wäre der mittlere Mautbeitrag jedes Nutzfahrzeugs exakt $M_{max}/2$. Jedoch führt der etwas größere Ausläufer der Mautfahrleistungsverteilung bei hohen Effizienzen zu einem leichten Übergewicht der höheren Mautsätze und damit zu einem leicht höheren Niveau des mittleren Mautsatzes.

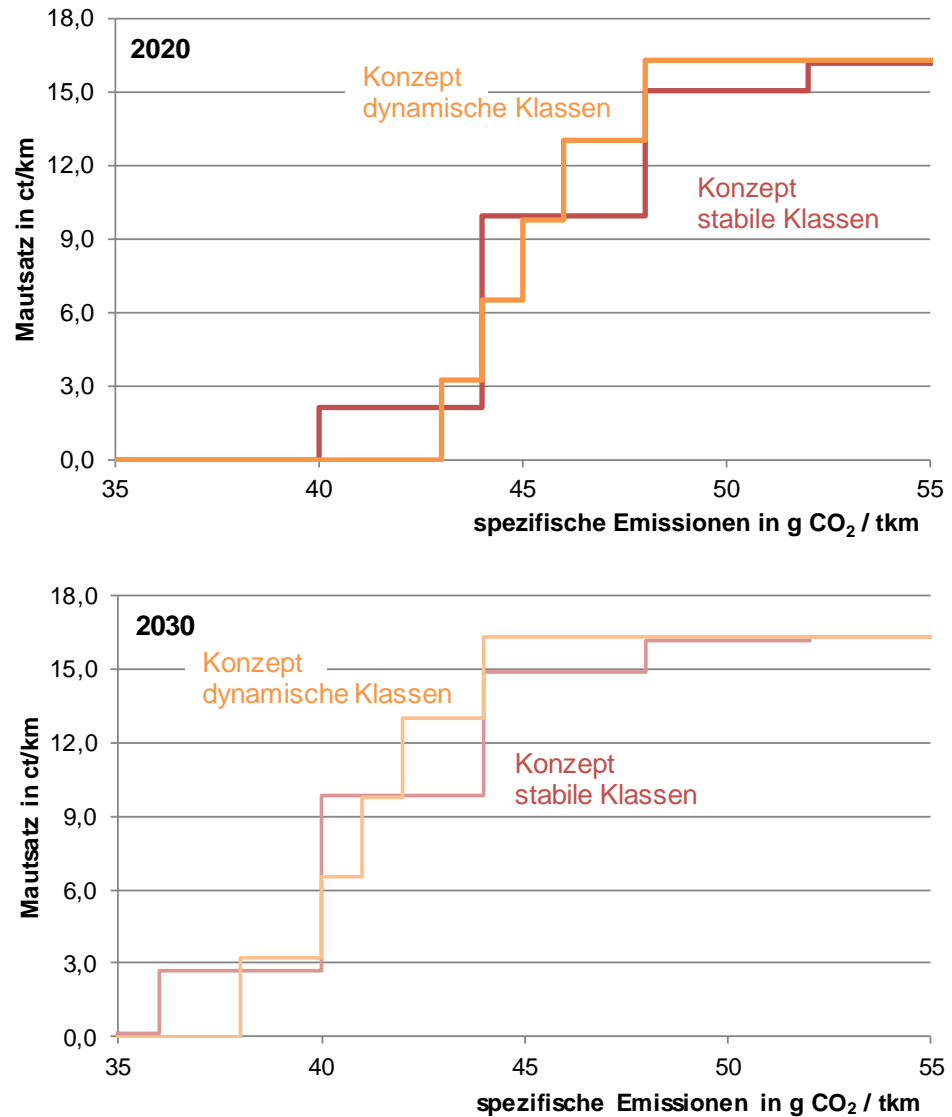
Abbildung 8-12: Mautsatz für Sattelzugmaschinen der VECTO-Klasse 5 nach Konzept „stabile Effizienzklassen“ für die Jahre 2020³³ und 2030 inklusive darunterliegendem Integral der Mautfahrleistung (gepunktet) sowie der Mautfahrleistung (blau)



Quelle: eigene Berechnung, die Anteile beziehen sich jeweils auf eine Breite von 1g CO₂/tkm, fixe Klassenbreite von 4 g CO₂/tkm

³³ Exemplarische Betrachtung für das Jahr 2020. Es ist davon auszugehen, dass eine energieeffizienzgespreizte Lkw-Maut für Sattelzugfahrzeuge der VECTO-Klasse 5 frühestens 2022 eingeführt werden kann (vgl. Kapitel 3.2 und 10). Die Mautsatzfunktion kann entsprechend für dieses Jahr abgeleitet werden.

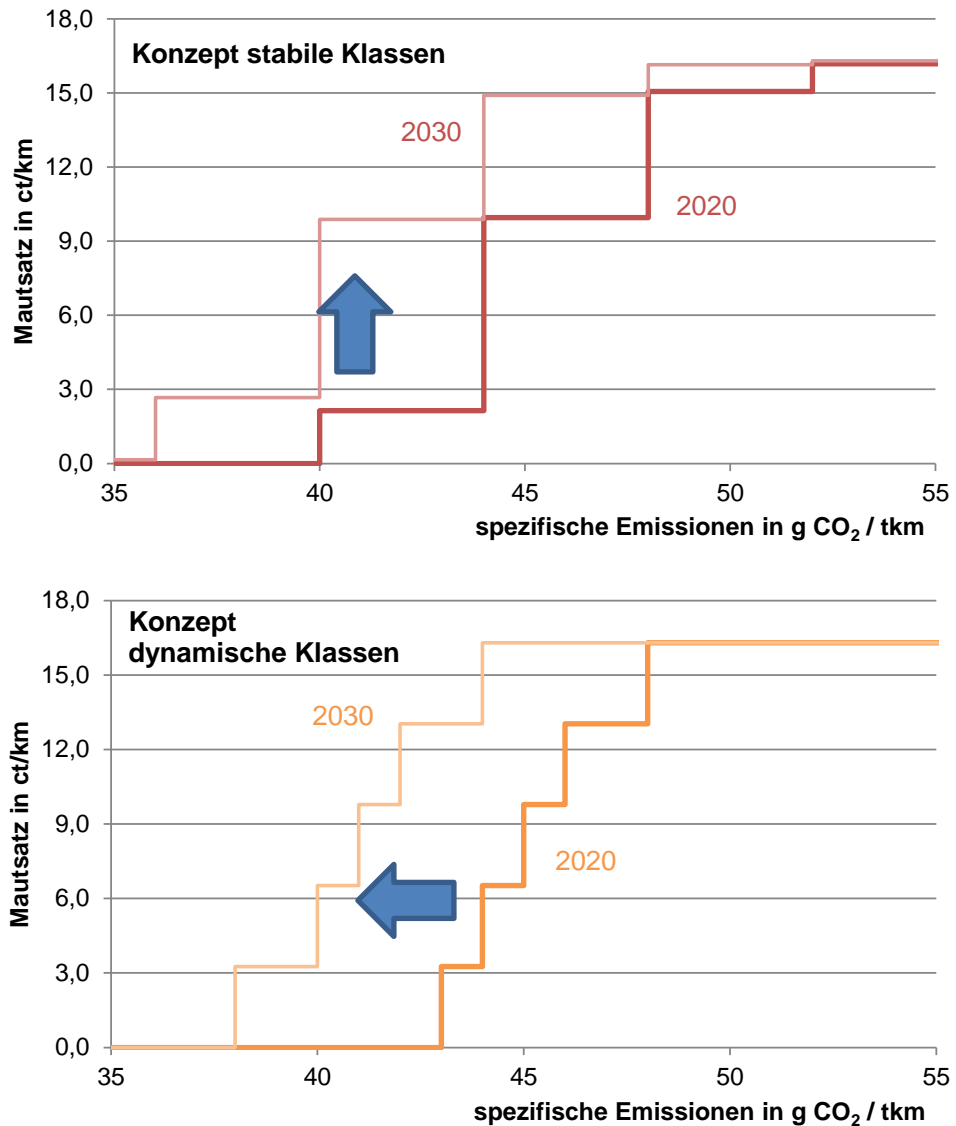
Abbildung 8-13: Vergleich der beiden Mautsatzkonzepte für Sattelzugmaschinen der VECTO-Klasse 5 jeweils für die Jahre 2020³⁴ und 2030



Quelle: eigene Berechnung

³⁴ Exemplarische Betrachtung für das Jahr 2020. Es ist davon auszugehen, dass eine energieeffizienzgespreizte Lkw-Maut für Sattelzugfahrzeuge der VECTO-Klasse 5 frühestens 2022 eingeführt werden kann (vgl. Kapitel 3.2 und 10). Die Mautsatzfunktionen können entsprechend für diese Jahre abgeleitet werden.

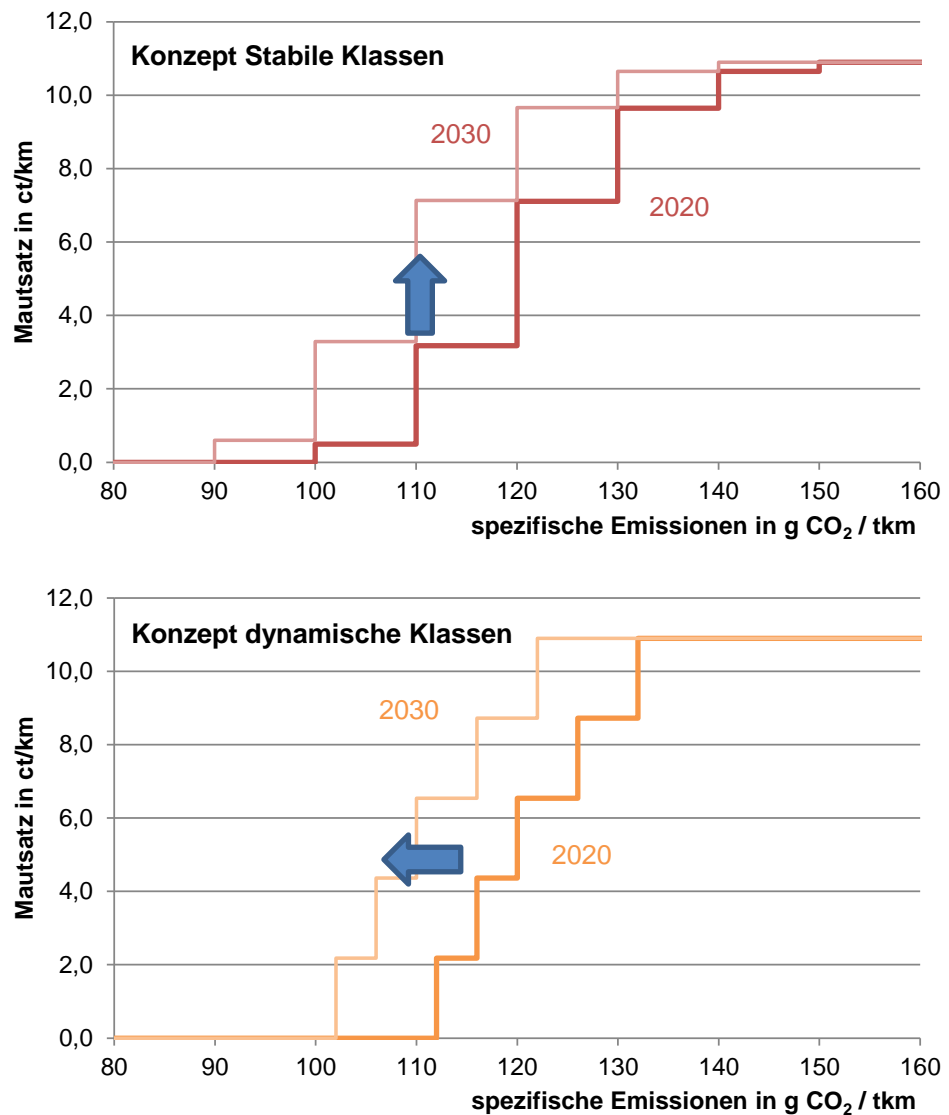
Abbildung 8-14: Vergleich der Jahre 2020³⁵ und 2030 für jeweils beide Mautsatzkonzepte für Sattelzugmaschinen der VECTO-Klasse 5



Quelle: eigene Berechnung

³⁵ Exemplarische Betrachtung für das Jahr 2020. Es ist davon auszugehen, dass eine energieeffizienzgespreizte Lkw-Maut für Sattelzugfahrzeuge der VECTO-Klasse 5 frühestens 2022 eingeführt werden kann (vgl. Kapitel 3.2 und 10). Die Mautsatzfunktionen können entsprechend für dieses Jahr abgeleitet werden.

Abbildung 8-15: Vergleich der Jahre 2020³⁶ und 2030 für jeweils beide Mautsatzkonzepte für Verteiler-Lkw der VECTO-Klasse 2



Quelle: eigene Berechnung

³⁶ Exemplarische Betrachtung für das Jahr 2020. Es ist davon auszugehen, dass eine energieeffizienzgespreizte Lkw-Maut für Verteiler-Lkw der VECTO-Klasse 2 frühestens 2023 eingeführt werden kann (vgl. Kapitel 3.2 und 10). Die Mautsatzfunktionen können entsprechend für dieses Jahr abgeleitet werden.

9 Wirkung auf Endenergieverbrauch und CO₂-Emissionen

In diesem Kapitel wird die Wirkung der Lkw-Maut auf Endenergieverbrauch und CO₂-Emissionen³⁷ der mautpflichtigen Schwere Nutzfahrzeuge (SNF) ermittelt. Ausgehend von der Analyse der Minderungskosten bei neuen Kraftfahrzeugen (9.1) und Sattelanhängern (Kapitel 9.2) und Fahrzeugkostenrechnungen für Musterfahrzeuge (Kapitel 9.3) werden Effizienzsteigerung und resultierende Endenergieeinsparungen und CO₂-Minderungen abgeleitet.

9.1 CO₂ Minderung bei Neukauf von Nutzfahrzeugen: Potenziale und Mehrkosten

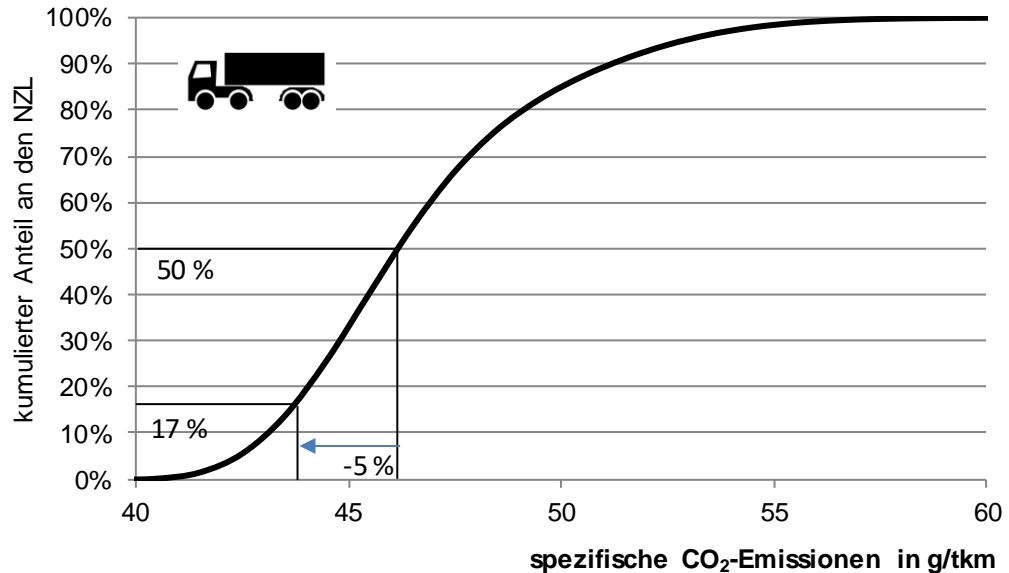
Aus vorhandenen Studien zur Treibhausgasminderung von Nutzfahrzeugen [IFEU/IVT, 2015], [Ricardo/ICCT, 2017] sowie aktuellen Zahlen aus einem derzeit laufenden Projekt für die Europäische Kommission wurden für die Fahrzeugmodelle Sattelzugmaschine (Szm, VECTO Klasse 5 Fahrzeug entsprechend Sattelzugmaschinen von typischem 40 t Fernverkehrs-Sattelzug) und Verteiler-Lkw 12 t die Werte für Reduktionspotentiale und Mehrkosten für die zusätzlichen Komponenten übernommen. Die Verbrauchsminderungspotentiale wurden in den Studien mit dem zukünftigen CO₂-Zertifizierungstool VECTO für SNF berechnet, indem die Fahrzeuge mit unterschiedlichen Technologien abgebildet wurden.

Um die mögliche Anreizwirkung einer Maut mit CO₂-Staffelung bewerten zu können, wurde eine vereinfachte Abschätzung erarbeitet, die aufzeigt, wie hoch die Aufpreise für Effizienzmaßnahmen zum Erreichen bestimmter Reduktionsziele wären. Aus den in Kapitel 7 berechneten Verteilungen der kumulierten CO₂-Emissionen wurde die CO₂-Differenz von der mittleren zur besten Effizienzklasse³⁸ entnommen (siehe Abbildung 9-1 und Abbildung 9-2).

³⁷ Die vorgenommenen Untersuchungen zu Treibhausgasen beschränken sich auf CO₂-Emissionen, welche im Verkehrssektor einen Anteil von über 98% ausmachen.

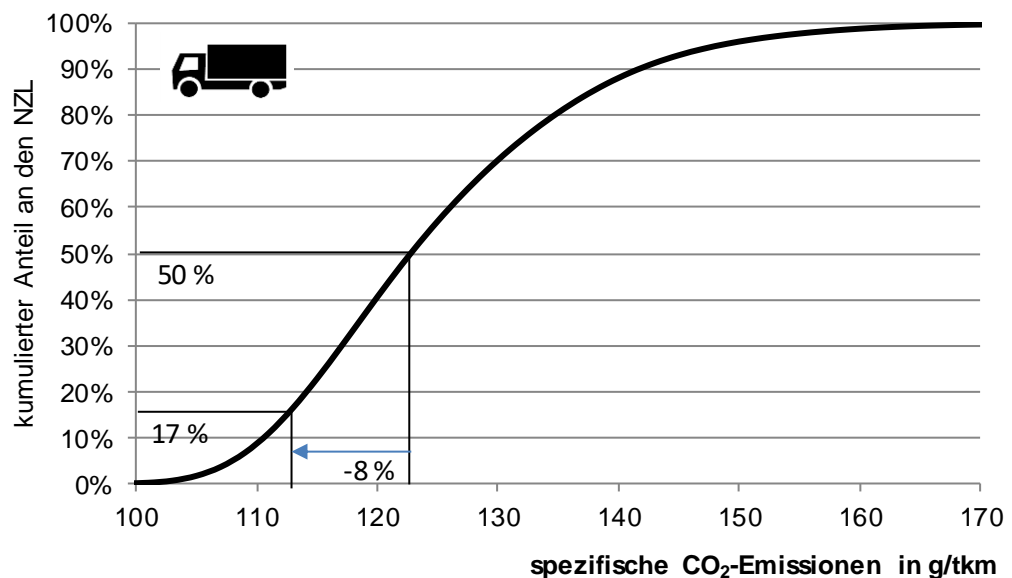
³⁸ beste Klasse: 0 bis 33 % Anteil an CO₂ Emissionen, mittlere: 33 bis 66 %, schlechteste: 66 bis 100 %

Abbildung 9-1: Kumulierte Verteilung der Neuzulassungen (NZL) von Sattelzugmaschinen der VECTO-Klasse 5 (zweiachsige Zugmaschine mit Sattel-Auflieger 40 t) nach spezifischen CO₂-Emissionen in Gramm je Tonnenkilometer (g/tkm), im Jahr 2020



Quelle: eigene Berechnung

Abbildung 9-2: Kumulierte Verteilung der Neuzulassungen (NZL) von Verteiler-Lkw (12t) der VECTO-Klasse 2 nach spezifischen CO₂-Emissionen in Gramm je Tonnenkilometer (g/tkm), Verteilung der CO₂ Emissionen, im Jahr 2020



Quelle: eigene Berechnung

Um bei Sattelzugmaschinen von der mittleren in die beste CO₂ Klasse zu gelangen, ist demnach eine Minderung von ca. 5 % erforderlich, beim Verteiler-Lkw sind es ca. 8 %.

Im nächsten Schritt wurden die Sparmaßnahmen nach absteigender Kosteneffizienz, dem Verhältnis von CO₂-Minderung zu Aufpreis, geordnet. Weiter wurde definiert, welche Technologien in den typischen Fahrzeugen der Effizienzklassen „bestes“, „durchschnittliches“ und „schlechtes“ Fahrzeug bereits standardmäßig zum Einsatz kommen bzw. mit Mehrkosten verbunden sind (siehe Tabelle 9-1 und Tabelle 9-2).

Tabelle 9-1: Kosten und Minderungspotenzial von Effizienzmaßnahmen für Sattelzugmaschine der VECTO-Klasse 5

Effizienzmaßnahmen	Aufpreis Kfz-Anschaffung in Euro	CO ₂ -Minderung in %	Minderungskosten in Tsd. Euro / %-Punkt	schlechteste Effizienzklass e	durchschnittliche Effizienzklass e	beste Effizienzklass e
1. Rollwiderstandsarme Reifen (nur Szm) Aufpreis 1	53	3,36%	16	Mehrkosten	Standard	Standard
2. Leichtlauföle	23	1,00%	23	Mehrkosten	Standard	Standard
3. Rollwiderstandsarme Reifen (nur Szm) Aufpreis 2	105	3,36%	31	nicht sinnvoll	Mehrkosten	Mehrkosten
4. Variable Ölpumpe (Dieselmotor)	90	1,00%	90	Mehrkosten	Standard	Standard
5. Bypass-Ölkühler (Dieselmotor)	25	0,20%	125	Mehrkosten	Standard	Standard
6. Variable Kühlmittelpumpe (Dieselmotor)	90	0,50%	180	Mehrkosten	Standard	Standard
7. Predictive Cruise Control	640	2,00%	320	nicht sinnvoll	Standard	Standard
8. Verbesserte Aerodynamik (nur Szm) Paket 1	460	1,36%	338	Mehrkosten	Mehrkosten	Standard
9. Elektrischer Kühlerlüfter	180	0,50%	360	Mehrkosten	Mehrkosten	Standard
10. Verbesserter Dieselmotor	1.050	2,50%	420	Mehrkosten	Mehrkosten	Standard
11. Verbesserte Aerodynamik (nur Szm) Paket 2	1.840	2,64%	697	nicht sinnvoll	Mehrkosten	Mehrkosten
12. Optimierter Antriebsstrang	1.500	1,50%	1.000	Mehrkosten	Mehrkosten	Standard
13. Leichtbau Paket 1	113	0,10%	1.123	Mehrkosten	Mehrkosten	Mehrkosten
14. Elektrische Lenkhilfpumpe	360	0,28%	1.286	Mehrkosten	Mehrkosten	Mehrkosten
15. Leichtbau Paket 2	4.950	1,24%	4.005	nicht sinnvoll	Mehrkosten	Mehrkosten
16. Parallel-Hybrid	40.000	3,70%	10.811	nicht sinnvoll	Mehrkosten	Mehrkosten

Quelle: eigene Berechnung

Tabelle 9-2: Kosten und Minderungspotenzial von Effizienzmaßnahmen für Verteiler-Lkw der VECTO-Klasse 2

Effizienzmaßnahmen	Aufpreis Kfz-Anschaffung in Euro	CO ₂ -Minderung in %	Minderungskosten in Tsd. Euro / %-Punkt	schlechteste Effizienzklass e	durchschnittliche Effizienzklass e	beste Effizienzklass e
1. Leichtlauföle	12	2,00%	6	Mehrkosten	Standard	Standard
2. Rollwiderstandsarme Reifen (nur Lkw) Aufpreis 1	41	2,24%	18	Mehrkosten	Standard	Standard
3. Rollwiderstandsarme Reifen (nur Lkw) Aufpreis 2	82	2,24%	36	Mehrkosten	Mehrkosten	Mehrkosten
4. Bypass-Ölkühler (Dieselmotor)	25	0,50%	50	Mehrkosten	Mehrkosten	Standard
5. Variable Ölpumpe (Dieselmotor)	90	1,50%	60	Mehrkosten	Mehrkosten	Standard
6. Variable Kühlmittelpumpe (Dieselmotor)	90	0,80%	112	Mehrkosten	Mehrkosten	Standard
7. Elektrischer Kühlerlüfter	90	0,50%	180	Mehrkosten	Mehrkosten	Standard
8. Mild-Hybrid	1.160	4,30%	270	Mehrkosten	Mehrkosten	Mehrkosten
9. Automatisiertes Schaltgetriebe	2.300	5,00%	460	Mehrkosten	Standard	Standard
10. Verbesserter Dieselmotor	1.050	1,99%	527	Mehrkosten	Mehrkosten	Mehrkosten
11. Predictive Cruise Control	640	1,20%	533	nicht sinnvoll	Mehrkosten	Standard
12. Elektrische Lenkhilfpumpe	180	0,28%	643	Mehrkosten	Mehrkosten	Mehrkosten
13. Verbesserte Aerodynamik (nur Lkw) Paket 1	460	0,68%	676	nicht sinnvoll	Mehrkosten	Mehrkosten
14. Leichtbau Paket 1	930	0,90%	1.033	Mehrkosten	Mehrkosten	Mehrkosten
15. Verbesserte Aerodynamik (nur Lkw) Paket 2	1.840	1,32%	1.394	nicht sinnvoll	Mehrkosten	Mehrkosten
16. Parallel-Hybrid	23.840	5,50%	4.335	Mehrkosten	Mehrkosten	Mehrkosten

Quelle: eigene Berechnung

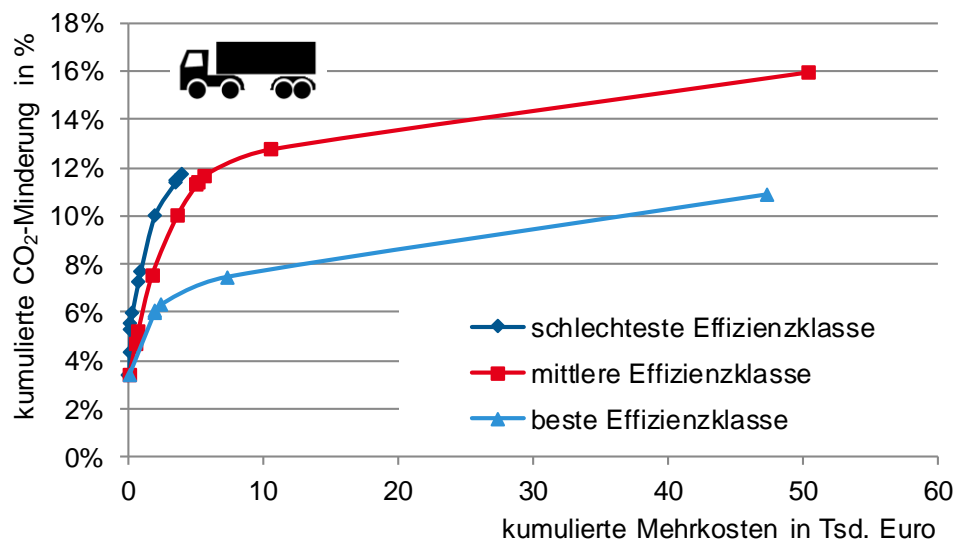
Die Annahme ist, dass bei den Fahrzeugmodellen der besten Effizienzklassen diejenigen Sparmaßnahmen bereits eingeschlossen sind, deren kumulierte CO₂-Minderung der Reduktion im Vergleich zur mittleren Klasse entspricht. Das heißt bei den Sattelzugmaschinen der besten Klasse sind die Maßnahmen 8, 9, 10 und 12 (zusammen ca. 5 %) und bei den sparsamsten Verteiler Lkw die Maßnahmen 4 bis 7 sowie 11 (zusammen ca. 8 %) bereits in den

Fahrzeugen vorhanden. Für die Modelle der besten Klassen bleiben somit bei den Sattelzugmaschinen nur die Maßnahmen 3, 11 und 13 bis 16 bzw. beim Verteiler Lkw die Maßnahmen 3, 8, 10 und 12 bis 16 zur Steigerung der Energieeffizienz übrig.³⁹

Für die Modelle der schlechtesten Effizienzklassen wurden für die Sattelzugmaschinen die Maßnahmen 3, 7, 11, 15 und 16 sowie für den Verteiler-Lkw 11, 13 und 15 als nicht sinnvoll umsetzbare Technologien angenommen. Da in der schlechtesten Effizienzklasse vorwiegend Lkw mit geringem Autobahnanteil erwartet werden (Baustellen-Lkw, Kommunalfahrzeugen, etc.) wurden für diese Klasse nur diejenigen Technologien in der Kostenkurve berücksichtigt, die bei diesen Anwendungen auch relevante Verbrauchsvorteile in realen Betrieb bieten würden.

Die sich aus diesen Annahmen ergebenden Kostenkurven sind in Abbildung 9-3 und Abbildung 9-4 dargestellt.

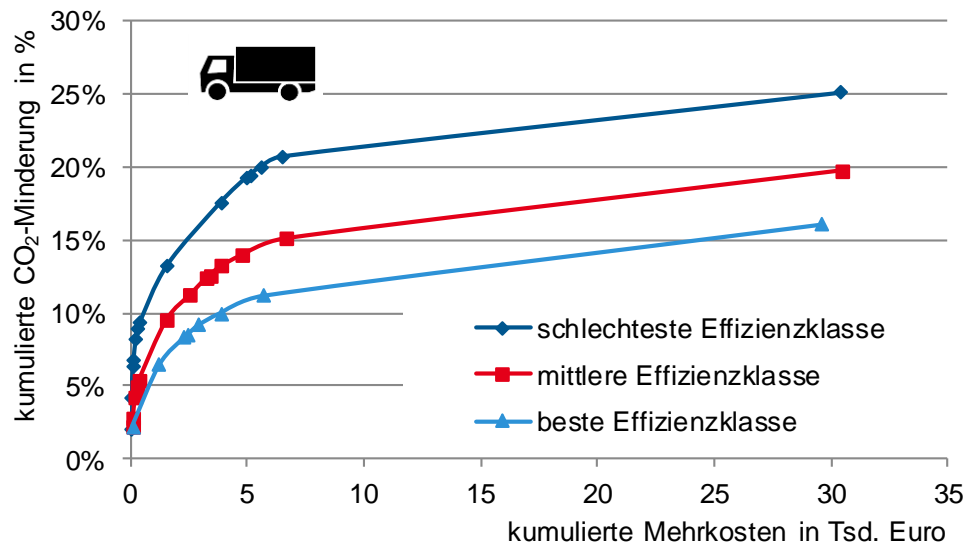
Abbildung 9-3: Minderungskostenkurve für Effizienzmaßnahmen an Sattelzugmaschinen der VECTO-Klasse 5



Quelle: eigene Berechnung

³⁹ Die Ursache dafür, dass teilweise kostengünstigere Maßnahmen nicht standardmäßig in den Fahrzeugen verbaut sind liegt an der unterschiedlichen Akzeptanz des Marktes gegenüber einzelnen Technologien (z.B. rollwiderstandsreduzierten Reifen).

Abbildung 9-4: Minderungskostenkurve für Effizienzmaßnahmen an Verteiler-Lkw der VECTO-Klasse 2



Quelle: eigene Berechnung

Es ist ersichtlich, dass bei Fahrzeugen mit mittlerem und hohem Verbrauch schon mit vergleichsweise kostengünstigen Maßnahmen eine merkliche Reduzierung der CO₂ Emissionen erreicht werden kann. Bei bereits sparsamen Fahrzeugen wird eine weitere Minderung der Emissionen wesentlich teurer.

Zu erwähnen ist, dass bei dem Sattelzug nur Maßnahmen am Zugfahrzeug berücksichtigt wurden, da die CO₂-Zertifizierung mit VECTO vorerst die Sattelanhänger nicht einschließt. Ohne einen Effizienzwert für die Sattelanhänger können diese auch nicht in der Maut berücksichtigt werden. Speziell Aerodynamik und Reifenwahl an Anhängern und Sattelanhängern haben jedoch auch ein erhebliches und kostengünstiges CO₂-Minderungspotenzial.

9.2 CO₂-Minderung durch Einsatz von Aerodynamikpaketen bei Sattelzugaufliegern: Potenziale und Mehrkosten

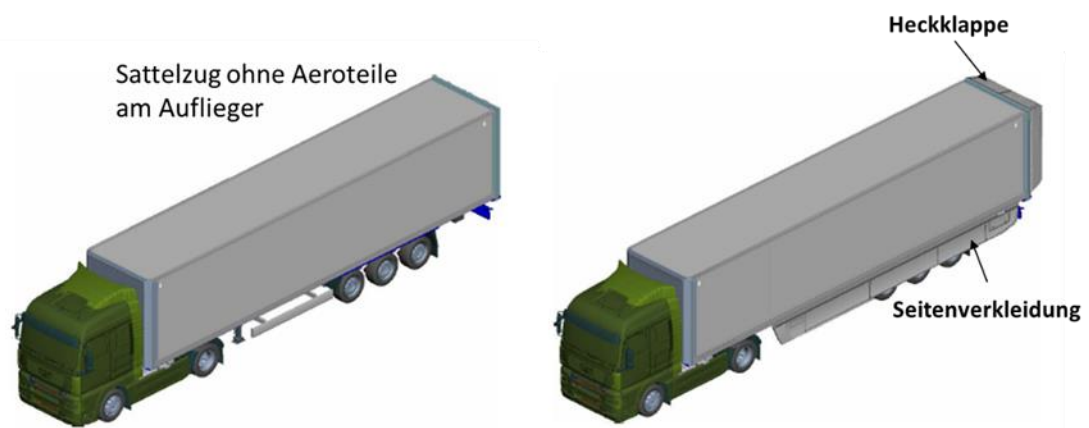
Aerodynamische Anbauteile mit signifikanter Wirkung auf den Kraftstoffverbrauch bzw. CO₂-Ausstoß sind von Herstellerseite bereits seit mehreren Jahren für Sattelanhänger im Boxbody-Design (d.h. quaderförmiger Aufbau, z. B. Trockenkoffer, Planenaufleger oder Kühl-Sattelanhänger) verfügbar. Diese Technologien werden derzeit aber von den Fahrzeugbetreibern so gut wie nicht nachgefragt. Als Gründe dafür kommen vielfältige Aspekte infrage, unter anderem:

- die derzeit unübersichtliche genehmigungsrechtliche Situation im europäischen fahrzeugtechnischen Regelwerk im Zusammenhang mit den Anforderungen zum Unterfahrschutz und Sicherheitsaspekten,
- die Scheu vor zusätzlichen Investitionskosten,
- die Skepsis gegenüber den Angaben zu den Verbrauchseinsparungen,
- mögliche Einschränkungen im Be-/Entladebetrieb durch die zusätzlichen Anbauteile,
- sowie die Besitzverhältnisse (großer Anteil an Leasingfahrzeugen).

Für eine Berücksichtigung im Mautsatz kommen grundsätzlich zwei unabhängige aerodynamische Eigenschaften eines Boxbody-Sattelanhängers in Frage (siehe Abbildung 9-5):

- 1) Seiten- und Unterbodenverkleidungen
- 2) Heckklappen („Boat-tails“)

Abbildung 9-5: Aerodynamikmaßnahmen am Sattelzugauflieger



Quelle: FAT

Für eine praktische Umsetzung wären sowohl für 1) als auch 2) Mindestanforderungen für eine Berücksichtigung im Mautsatz zu

definieren (z.B. Seitenverkleidung: Mindestfläche, Boat-tail: Mindestlänge, Anforderungen an das Material und die Stabilität). Für Fahrzeuge, die mit einer Palettenbox ausgerüstet sind (diese hat aerodynamisch bereits teilweise die Wirkung einer Seitenverkleidung) wären gesonderte Kriterien zu erarbeiten.

Für andere Sattelanhänger-Bauformen (z.B. Tankfahrzeuge, Pritschenfahrzeuge) sind sinnvolle aerodynamischen Maßnahmen wesentlich schwieriger standardisierbar, da die Bauformen im Gegensatz zu Boxbodies eine sehr große Vielfalt aufweisen. Der Bestandsanteil dieser Fahrzeuge liegt bei ca. 40% [AEA, 2011], der Fahrleistungsanteil dürfte noch geringer sein. Daher wäre es nahe liegend sich bei einer Berücksichtigung von aerodynamischen Anbauteilen an Sattelanhängern im Mautsatz zuerst auf Boxbodies zu konzentrieren.

9.2.1 Rechtliche Regelungen

Grundlage für eine mögliche erlaubte Längenüberschreitung durch aerodynamische Luftleiteinrichtungen ist Artikel 8b Abs. 1 der Richtlinie 96/53/EG (eingefügt durch die Richtlinie (EU) 2015/719)⁴⁰.

Demnach können Fahrzeuge oder Fahrzeugkombinationen, die mit aerodynamischen Luftleiteinrichtungen ausgerüstet sind, die in der vorliegenden Richtlinie festgelegten höchstzulässigen Längen überschreiten. Voraussetzung ist, dass folgende Anforderungen erfüllt werden:

- a) Absatz 2 (Luftleiteinrichtungen größer 500 mm)
- b) Absatz 3 (Betriebsanforderungen)
- c) sowie die der Richtlinie 2007/46/EG (EU-Typgenehmigungsrahmenrichtlinie).

Absatz 4 legt darüber hinaus fest, dass zur Konkretisierung der Betriebsanforderungen in Absatz 3 Durchführungsrechtsakte von der EU-Kommission zu erlassen sind.

Da weder die in Absatz 2 noch die in Absatz 4 aufgeführten Maßnahmen umgesetzt wurden, ist Absatz 1 noch nicht anwendbar. Dementsprechend ist eine Längenüberschreitung mit Luftleiteinrichtungen unabhängig von deren Länge anhand der Richtlinie nicht möglich. Eine nationale Umsetzung kann erst nach den geforderten Schritten erfolgen.

Fahrzeuge mit Luftleitsystemen, die im eingeklappten Zustand nicht zu einer Überschreitung der höchstzulässigen Länge des Fahrzeugs führen, können bereits heute unter Berücksichtigung ggf. weiterer Anforderungen typgenehmigt und eingesetzt werden.

⁴⁰ Richtlinie (EU) 2015/719 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 29. April 2015 zur Änderung der Richtlinie 96/53/EG des Rates zur Festlegung der höchstzulässigen Abmessungen für bestimmte Straßenfahrzeuge im innerstaatlichen und grenzüberschreitenden Verkehr in der Gemeinschaft sowie Festlegung der höchstzulässigen Gewichte im grenzüberschreitenden Verkehr

Dies ist jedoch aufgrund der auf maximales Ladevolumen optimierten Fahrzeuge derzeit nicht die Regel.

Eine juristisch vollständige Beurteilung der notwendigen rechtlichen Rahmenbedingungen für die konkrete Umsetzung dieser Maßnahme ist nicht Gegenstand der vorliegenden Studie.

9.2.2 Einsparpotenziale und Mehrkosten

Die aus mehreren Quellen [IFEU/IVT, 2015; Kies, 2017] abgeleiteten durchschnittlichen CO₂-Einsparpotenziale sowie die Mehrkosten für ein Neufahrzeug sind in Tabelle 9-3 zusammengestellt. Der Effekt der Maßnahmen hängt vom Anteil des Luftwiderstandes am Energieverbrauch des Fahrzeuges ab. So haben die aerodynamischen Maßnahmen bei niedriger Beladung und Autobahnbetrieb den größten (hier knapp -8%) und bei hoher Beladung im regionalen Verteilerverkehr die geringsten (hier ca. -4,5%) Effekt. Im gewichteten Mittel können mit diesen beiden Maßnahmen in Summe knapp 6 % an CO₂ bzw. Kraftstoff eingespart werden.

Die Kosten für das kombinierte Aerodynamikpaket im Falle der Erstausrüstung eines Neufahrzeuges liegen bei ca. 2.750 Euro.

Tabelle 9-3: CO₂-Minderung und Kosten Aerodynamikpakete bei Sattelanhängern

Aerodynamische Maßnahme	CO ₂ -Einsparpotenzial	Mehrkosten (Neufahrzeug)
1) Verkleidung Seite plus Unterboden	3,5 %	2.000 €
2) Boat tail (Länge mind. 45 cm)	2,5 %	750 €
Kombination 1) + 2)	5,9%	2.750 €

Quellen: IFEU/IVT, 2015; Kies, 2017, eigene Berechnung

Bei der Nachrüstung von Aerodynamikteilen wird angenommen, dass noch ca. 1.700 Euro Zusatzkosten durch Kosten für Montage und Überprüfung anfallen. Damit belaufen sich die Gesamtkosten für das Kombipaket im Nachrüstungsfall bei rund 4.500 Euro. Bei einer angenommenen Jahresfahrleistung von 120.000 km⁴¹ würden sich die Investitionskosten der Nachrüstung rein über den Kraftstoffverbrauch unter optimalen Betriebsbedingungen nach knapp zwei Jahren amortisieren. Selbst unter ungünstigen Umständen (z.B. niedriger Autobahnanteil in der Fahrleistung, weniger wirksames System) sollte sich die Nachrüstung über die Lebensfahrleistung eines Sattelauflegers jedenfalls rechnen.

⁴¹ Typischer Fahrleistungswert einer Sattelzugmaschine. Allerdings ist unbekannt, wie hoch die durchschnittliche Fahrleistung eines Sattelanhängers im Jahr ist. Die durchschnittliche Lebensdauer eines Sattelanhängers beim Erstbesitzer liegt bei ca. 8 Jahren.

9.3 Fahrzeugkostenrechnung

Für die Abschätzung der Wirkung der Umstellung auf eine energieeffizienzgespreizte Lkw-Maut auf Energieverbrauch und Treibhausgasemissionen werden die Fahrzeugkosten in den einzelnen Kostenblöcken betrachtet. Zu diesem Zweck wurde das von Prognos entwickelte Lkw-Kostenrechnungsmodell (vgl. insbesondere [Prognos, 2013]) aktualisiert und den Anforderungen der Modellierung im Rahmen der vorliegenden Untersuchung angepasst. Die gesamten Halterkosten (Total Cost of Ownership – TCO) werden für zwei Typen von Fahrzeugen des Straßengüterverkehrs untersucht:

- Lkw, 12 t zGM (VECTO-Klasse 2)
- Sattelzugmaschine, 40 t zGM (VECTO-Klasse 5)

Für diese beiden Fahrzeugtypen werden die fahrzeugbezogenen Halterkosten für das Jahr 2020 berechnet⁴². Die einzelnen Kostenblöcke werden nachfolgend kurz erläutert:

- **Kapitalkosten** umfassen die Nettokaufpreise der Fahrzeuge sowie der Sattelanhänger (für den Sattelzug). Die Kapitalwerte werden mit einem kalkulatorischen Zinssatz von 1,0 % auf die Fahrzeuglebensdauer umgerechnet (Annuität).
- Die **fixen Kosten** untergliedern sich in Kraftfahrzeugsteuer, Kfz-Versicherung, Güterschadensversicherung und die Gebühren für die obligatorische technische Überwachung.
- In Abhängigkeit der Mautfahrleistung und des Mautsatzes (seinerseits abhängig von der Energieeffizienzklasse und dem Mautsatz nach Energieeffizienzklasse) ergeben sich die **Mautkosten**.
- Die **Kraftstoffkosten** werden über den spezifischen Kraftstoffverbrauch und die Jahresfahrleistung berechnet.
- Die **Kosten für Reifen und Reparatur** hängen ebenfalls von der Jahresfahrleistung ab.

Die Kosten für Personal sowie Verwaltungskosten werden in dieser Betrachtung nicht berücksichtigt, da sich der Einfluss der Maut auf die fahrzeugbezogenen Kosten begrenzt.

Die Mautkosten ergeben sich aus der Mautfahrleistung und dem entsprechenden Mautsatz. Der Mautsatz ergibt sich aus der Mautsatz-Funktion (vgl. Kapitel 8.2), welche in Abhängigkeit der Energieeffizienzklassen definiert ist. Die Energieeffizienzklasse ist wiederum abhängig vom spezifischen Kraftstoffverbrauch, der für die

⁴² Exemplarische Betrachtung für das Jahr 2020. Es ist davon auszugehen, dass eine energieeffizienzgespreizte Lkw-Maut frühestens in den Jahren 2022 / 2023 eingeführt werden kann (vgl. Kapitel 3.2 und 10).

beiden untersuchten Fahrzeugtypen als Verteilung in die Berechnung eingeht. Die Verteilungen für die VECTO-Klassen 2 und 5 sind in Abbildung 8-1 und Abbildung 8-2 dargestellt.

Auch die Jahresfahrleistung, als substanzieller Treiber der Kraftstoff- und Mautkosten, geht in die TCO-Berechnung als Verteilung ein. Die Informationen zur Verteilung der Jahresfahrleistung für Lkw und Sattelzugmaschinen können aus einer internen, modellgestützten Abschätzung übernommen werden. Die durchschnittliche Mautfahrleistung wurde im Rahmen der Fahrleistungsanalyse ermittelt (vgl. Kapitel 7.2). Sie beträgt für den Lkw mit 20 t zGM 14,2 Tsd. Fahrzeugkilometer pro Jahr und für den Sattelzug mit 40 t zGM 65,7 Tsd. Fahrzeugkilometer pro Jahr. Da der Anteil der Mautfahrleistung einen substanziellen Einfluss auf die Mautkosten – und somit auf die Wirkungsabschätzung hat – wird eine Verteilung der Mautfahrleistung geschätzt, wobei im Mittel die durchschnittlichen Werte getroffen werden.

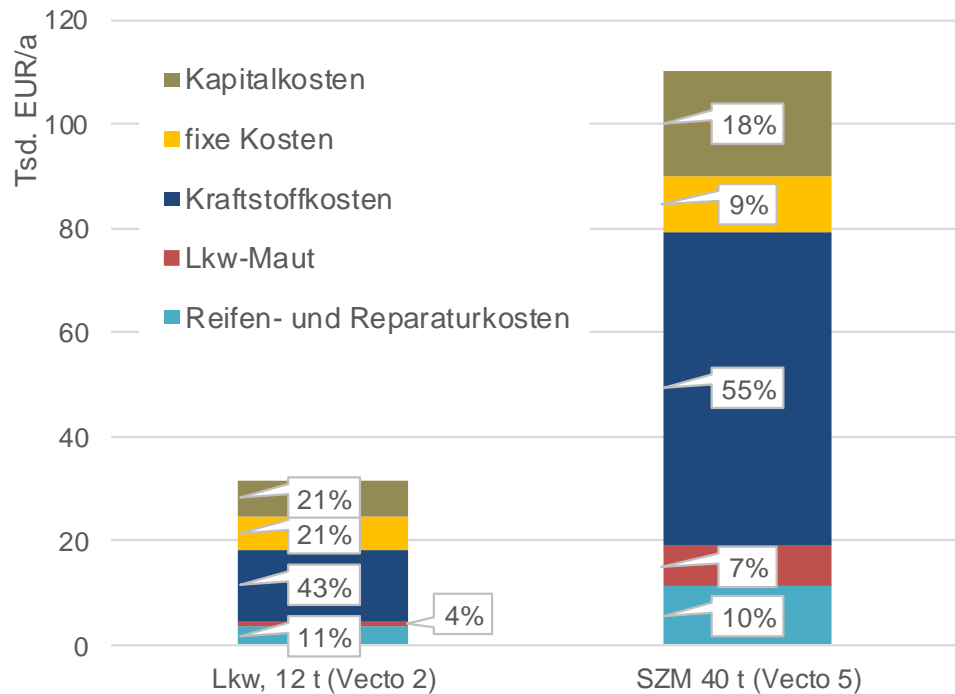
Der effektive Dieselpreis betrug im Jahresdurchschnitt 2015 1,15 Euro/Liter. Gemäß internen Untersuchungen der Prognos wird angenommen, dass der Dieselpreis bis zum Jahr 2020 auf 1,29 Euro/Liter ansteigt. Da alle Kosten für das Jahr 2020 ermittelt werden, wird auch der angenommene Dieselpreis für das Jahr 2020 verwendet.

Tabelle 9-4: Inputs zur Berechnung der fahrzeugbezogenen TCO-Kosten (mittlere Werte für: Jahresfahrleistung, Anteil Mautfahrleistung, Mautsatz und spezifischer Kraftstoffverbrauch)

		Lkw 12 t zGM	Szm, 40 t zGM
Jahresfahrleistung	Fzg.-km/a	43.777	117.527
Mautfahrleistung	Fzg.-km/a	14.220	65.741
Mautsatz	EURct/Mautkm	8,1	11,7
Spezifischer Verbrauch	l/100km	20,3	33,7
Dieselpreis	Euro/Liter	1,29	1,29
Abschreibungszeitraum	a	6,0	4,0

Quelle: eigene Berechnung

Abbildung 9-6: Fahrzeugbezogene Gesamtkosten, in Tsd. Euro/Jahr



Quelle: eigene Berechnung

Für die Darstellung der typischen Kostenaufteilung auf die Kostenblöcke und die Fahrzeugtypen in Abbildung 9-6 wurden die Parameter gemäß Tabelle 9-4 verwendet.

9.4 Energieeinsparung und Minderung von CO₂-Emissionen durch die Lkw-Maut

Basierend auf der Analyse der Minderungskosten bei neuen Kraftfahrzeugen (9.1) und Sattelanhängern (Kapitel 9.2) und Fahrzeugkostenrechnungen für Musterfahrzeuge (Kapitel 9.3) werden Effizienzsteigerung und resultierende Energieeinsparungen und CO₂-Minderungen für den Inlandsverkehr abgeleitet.

Dazu werden einleitend in Kapitel 9.4.1 mögliche Wirkungen auf Energieverbrauch und CO₂-Emissionen diskutiert und zeitlich eingeordnet. Im Rahmen von Kapitel 9.4.2 wird untersucht, welche Effizienzwirkungen auf Neufahrzeuge der VECTO-Fahrzeugklassen 2 und 5 erreicht werden können. Die Wirkungen auf die spezifischen Verbräuche in der inländischen Fahrzeugflotte werden im Kapitel 9.4.3 abgeleitet und in Kapitel 9.4.4 die zusätzlichen Wirkungen durch Aerodynamikmaßnahmen bei Sattelanhängern ergänzt. Die Wirkungen auf den Inländerverbrauch und die damit verbundenen CO₂-Emissionen wird im Kapitel 9.4.5 dargestellt. Abschließend wird in 9.4.6 die Wirkung auf inländische und ausländische Fahrzeuge im Inland abgeleitet.

9.4.1 Mögliche Wirkungen der Lkw-Maut auf Energieverbrauch und CO₂-Emissionen sowie zeitliche Einordnung

Eine Spreizung der Lkw-Maut nach Energieeffizienzklassen kann auf unterschiedliche Weise auf Endenergieverbrauch und CO₂-Emissionen schwerer Nutzfahrzeuge wirken:

- Ist die Lkw-Maut umgestellt, besteht bei Fahrzeugkauf ein Anreiz zum Kauf eines energieeffizienten bzw. eines Fahrzeuges mit niedrigen Emissionen. Damit sinken der spezifische Energieverbrauch und die CO₂-Emissionen von neu zugelassenen Fahrzeugen und damit auch sukzessive im Fahrzeugbestand.
- Bereits vor Änderung der Maut kann für schwere Nutzfahrzeuge, die ab 2019 mit VECTO-Wert zugelassen werden, ein Anreiz für effiziente Fahrzeuge entstehen. Bei klarer Ankündigung der Mautumstellung, ist damit zu rechnen, dass Fahrzeuge mit niedrigeren CO₂-Werten bevorzugt werden, da diese ab der Einführung der Energieeffizienzgespreizten Maut niedrigere Mautgebühren erwarten können.
- Zusätzlich zum Effekt bei den Zugfahrzeugen, kann eine Änderung der Lkw-Maut auch Effizienzverbesserungen an Anhängern bewirken. Dafür müssen Maßnahmen an diesen (insbesondere zur Steigerung der Aerodynamik) Eingang in die Bewertung des Fahrzeuges finden und zielgerichtet durch die Maut angereizt werden.
- Ist die Maut umgestellt, kann es ökonomisch günstig sein, frühzeitig in ein neues, energieeffizientes Fahrzeug zu investieren. Damit kann die Änderung der Lkw-Maut in begrenztem Maße auch vorgezogene Investitionen auslösen. Durch den beschleunigten Austausch von Bestandsfahrzeugen mit effizienteren Neufahrzeugen werden spezifischer Energieverbrauch und spezifische CO₂-Emissionen im Bestand verbessert.

Die Wirkung durch vorgezogene Investitionen wurde abgeschätzt. Dazu wurde untersucht, ob sich durch die Einführung einer Spreizung der Mautsätze zwischen den Schadstoffklassen EURO V und EURO VI im Jahr 2015 vorgezogene Stilllegungen und Neuzulassungen von Fahrzeugen statistisch nachweisen lassen. Dies ist nicht der Fall. Deshalb wird auch für die effizienzgespreizte Maut nicht von vorgezogenen Investitionen in signifikantem Maß ausgegangen.

Für die Berechnung wird davon ausgegangen, dass die energieeffizienzgespreizte Lkw-Maut im ersten Jahr nach Einführung der energieeffizienzgespreizten Maut die höchste Wirkung auf die Effizienz neu zugelassener Fahrzeuge hat. Für neu zugelassene Fahrzeuge der VECTO-Klassen 4, 5, 9 und 10 wird angenommen,

dass dies im Jahr 2022 und für die VECTO-Klassen 1, 2, 3, 11, 12 und 16 im Jahr 2023 der Fall ist (vgl. Kapitel 3.2).

Der Anreiz auf Fahrzeuge, die vor Einführung der energieeffizienzgespreizten Maut mit zertifiziertem CO₂-Wert zugelassen werden, ist vergleichsweise niedriger. Grund dafür ist, dass nur für einen Teil der Halterdauer (ab Einführung der energieeffizienzgespreizten Maut) der Vorteil vergleichsweise niedrigerer Mautgebühren entsteht. Mit zeitlicher Nähe zur Einführung der energieeffizienzgespreizten Maut nimmt der Anreiz entsprechend zu.

Nach Einführung der energieeffizienzgespreizten Maut werden gegenüber der Referenzentwicklung zusätzliche Effizienzmaßnahmen technologisch und kostenseitig zunehmend aufwändiger. Aus den in den Kapiteln 3.2 und 5.2 beschriebenen angenommenen Rahmenbedingungen für die Mautspreizung folgt andererseits, dass der durch die Maut gegebene finanzielle Anreiz für Effizienz konstant bleibt. Als konservative Abschätzung wird angenommen, dass die Effizienzwirkung auf neu zugelassene Fahrzeuge bis 2030 sinkt und dann 50% der Effizienzwirkung zum Zeitpunkt der Mauteinführung beträgt. Über das Jahr 2030 hinaus ist davon auszugehen, dass die Effizienzwirkung verlangsamt weiter abgeschwächt wird. Würden längerfristig stärkere Spreizungen der Mautsätze ermöglicht, kann auch auf Neuzulassungen längerfristig eine stärkere Wirkung erreicht werden.

Im Unterschied zur Entwicklung der Wirkung auf die Effizienz von neu zugelassenen Fahrzeugen wächst die Wirkung auf Energieverbrauch und CO₂-Emissionen in der Fahrzeugflotte nach Einführung der Maut an und nimmt erst Ende der 20er-Jahre leicht ab (vgl. Kapitel 9.4.3 bis 9.4.6).

9.4.2 Kostenoptimierte Investition in Energieeffizienz

Die Wirkungsabschätzung untersucht, wie sich der spezifische Verbrauch bei den Neuzulassungen von Lkw und Sattelzugmaschinen bei Einführung einer energieabhängigen Lkw-Maut verändert⁴³. Dazu wird zunächst eine Verteilung der spezifischen CO₂-Emissionen der neu zugelassenen Schwere Nutzfahrzeuge ohne wirkende effizienzgespreizte Maut simuliert (vgl. Abbildung 9-7).

Es wird unterstellt, dass ein effizienteres Fahrzeug grundsätzlich teurer ist, da z. B. effizienzoptimierte Komponenten verbaut werden (Energiesparreifen oder verbrauchsoptimierter Motor) oder energiesparende Maßnahmen am Fahrzeug umgesetzt sind (z. B. Leichtbau). So wird beim Vergleich von zwei typgleichen Fahrzeugen das energieeffizientere Fahrzeug teurer sein bezüglich seiner Anschaffungskosten. Demgegenüber stehen geringere Kosten bei

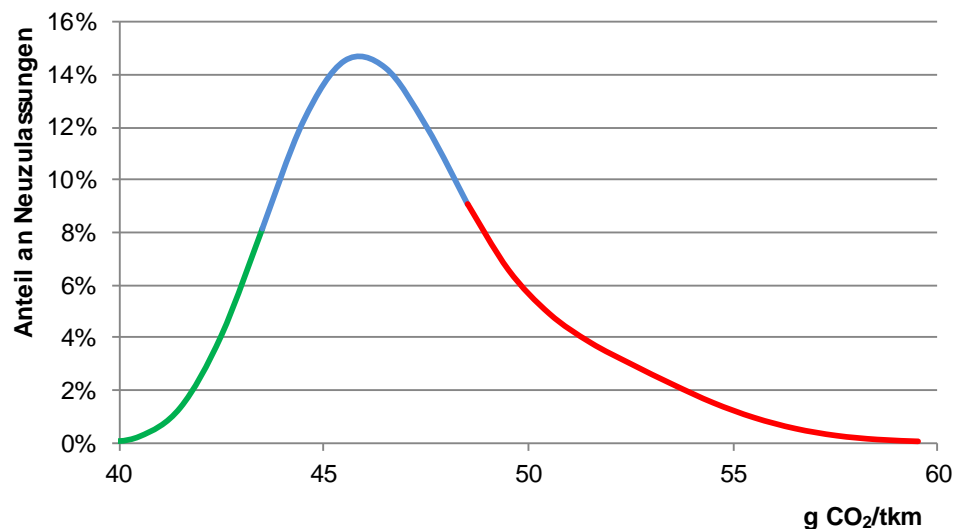
⁴³ Bei Erarbeitung der Wirkungsrechnung wurde davon ausgegangen, dass die Maut bereits im Jahr 2020 voll wirken kann. Die Berechnungen wurden unter dieser Annahme für das Jahr 2020 durchgeführt. Nach Vorlage des Änderungsvorschlags für die Eurovignettenrichtlinie ist davon auszugehen, dass die energieeffizienzgespreizte Maut frühestens in den Jahren 2022/2023 eingeführt werden kann. Die ermittelte Wirkung wird deshalb für das je Fahrzeugklasse angenommene Einführungsjahr übernommen (vgl. Kapitel 3.2 und 10).

den Betriebskosten, namentlich den Kraftstoffkosten und – bei Umsetzung der energieeffizienzgespreizten Maut – den Mautkosten. Untersucht wurde nun, um wie viel Prozent sich der spezifische Kraftstoffverbrauch bei Neufahrzeugen unter Berücksichtigung der Mautkosten im Fall mit energieeffizienzgespreizter Lkw-Maut ändert. Bei der Betrachtung wird ein ökonomisches Handeln der Verlader vorausgesetzt.

Welche Maßnahmen sich lohnen, ist abhängig von der Fahrzeugnutzung und dem Einsatzprofil. Bei Fahrzeugen mit hohen Jahresfahrleistungen (und hohen Mautanteilen) ist der Verbrauch je Kilometer ein entscheidender Kostentreiber, sowohl bezogen auf die Kraftstoffkosten wie auch auf die Mautkosten. Ein höherer Anschaffungspreis, bei geringerem spezifischem Verbrauch, kann sich deshalb bei hohen Jahresfahrleistungen lohnen.

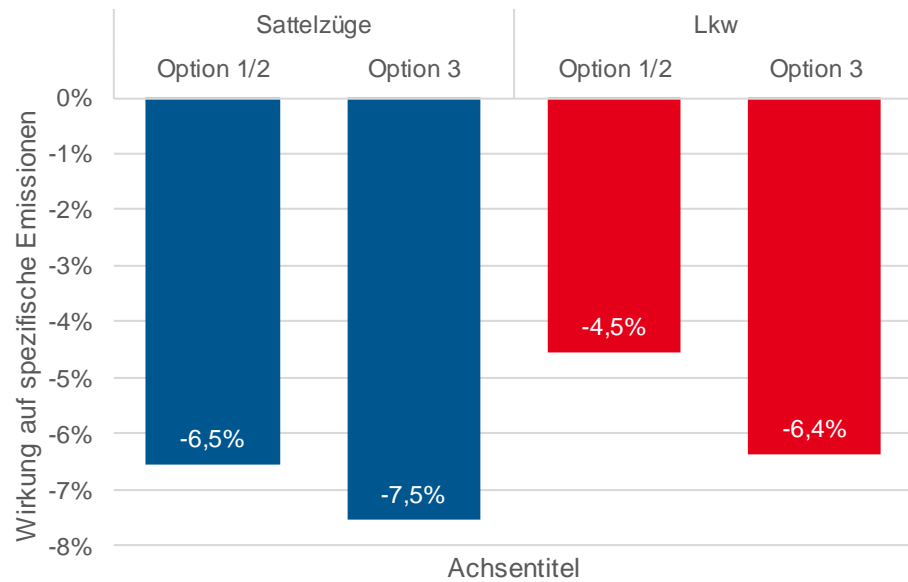
Die Fahrzeugkosten werden deshalb für verschiedene Ausprägungen der Parameter spezifischer Verbrauch (ohne effizienzgespreizte Maut), Jahresfahrleistung und Mautfahrleistung simuliert. Ausgehend von der Verteilung der Effizienzwerte werden die Fahrzeugkosten für unterschiedliche Annahmen zu den Jahresfahrleistungen und Mautfahrleistungen berechnet. Für die simulierten Werte wird jeweils untersucht, welche CO₂-mindernden Maßnahmen am Fahrzeug wirtschaftlich sind.

Abbildung 9-7: Verteilung des Neuzulassungsanteils über den spezifischen Emissionen in Gramm CO₂ pro Tonnenkilometer (g/tkm) bei neu zugelassenen Sattelzugmaschinen, aufgeteilt nach den drei Effizienzklassen grün: bis einschließlich 43,5 g CO₂/tkm; blau zwischen 43,5 und einschließlich 48,5 g CO₂/tkm; grün: über 48,5 g CO₂/tkm



Quelle: eigene Berechnung, schematische Darstellung

Abbildung 9-8: Wirkung der Maut nach Mautspreizungsoptionen für Sattelzüge der VECTO-Klasse 5 und Verteiler-Lkw der VECTO-Klasse 2 auf die spezifischen Emissionen bei den Neuzulassungen im Jahr maximaler Wirkung, in %



Quelle: eigene Berechnung

Auf Basis der differenzierten Abschätzung von Kosteneinsparungen bei Effizienzmaßnahmen bzw. höheren Anschaffungskosten für ein effizienteres Fahrzeug wird die Wirkung einer energieabhängigen Lkw-Maut für Sattelzüge und Lkw abgeleitet. Gemäß dieser Analyse sinken die mittleren spezifischen Emissionen bei Sattelzügen um 7,5 % bei Neufahrzeugen bei Umsetzung der Mautoption 3. Bei einer geringeren Mautspreizung sind es 6,5 %. Aufgrund der geringeren Mautfahrleistungsanteile ist die Wirkung der effizienzgespreizten Maut bei Verteiler-Lkw der VECTO-Klasse 2 geringer. Hier wird eine Absenkung der spezifischen Emissionen von 4,5 % bei Mautspreizung⁴⁴ Option 1 und 2 erreicht, und 6,4 % bei Option 3 (vgl. Abbildung 9-8).

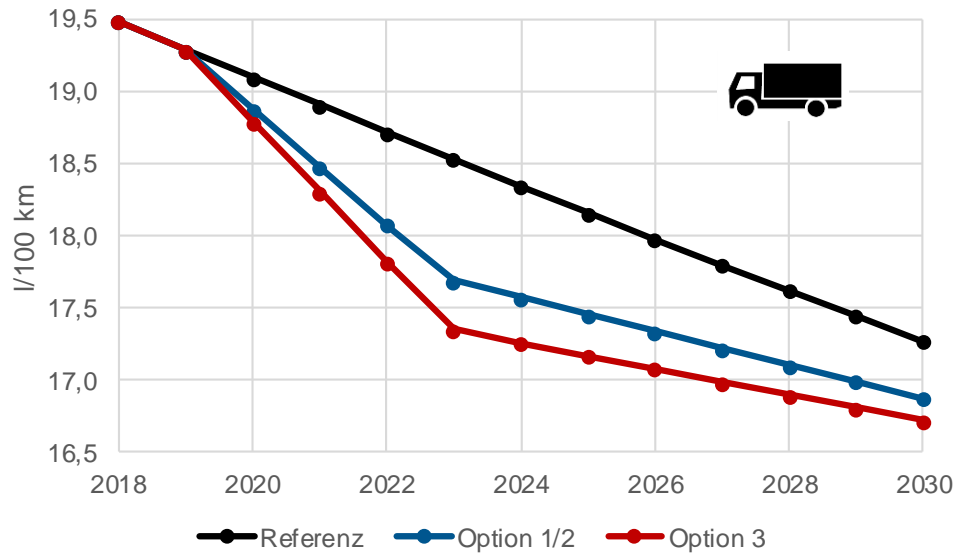
Eine höhere Wirkung der energieeffizienzgespreizten Lkw-Maut könnte erreicht werden, wenn die Mautspreizung stärker ausfällt. Dies ist insbesondere möglich, wenn abweichend von den in den Kapiteln 3.2 und 5.1 angenommenen Rahmenbedingungen:

- höhere externe Kosten für CO₂-Emissionen angesetzt werden,
- eine höhere Spreizung als 100 % der Infrastrukturkomponente erlaubt wird,
- oder die Mautspreizung unabhängig von den Wegekosten definiert wird.

In der Referenzentwicklung wird davon ausgegangen, dass sich der spezifische Verbrauch von neu zugelassenen Schweren Nutzfahrzeugen jeweils um 1 % pro Jahr verringert (vgl. Abbildung 9-9 und Abbildung 9-10, schwarze Kurve). Ausgehend von den Effizienzwirkungen auf Neuzulassungen durch die Maut im Jahr der Mautumstellung (VECTO-5-Fahrzeuge: 2022, VECTO-2-Fahrzeuge: 2023) gemäß Abbildung 9-8 wird die Minderungswirkung auf die Folgejahre und die Jahre ab Einführung der CO₂-Zertifizierung abgeleitet (vgl. Kapitel 3.2, 9.4.1). Dadurch ergeben sich die spezifischen Verbräuche im Falle einer Umstellung der Maut für die Mautspreizungsoptionen 1 / 2 und für die Mautspreizungsoption 3.

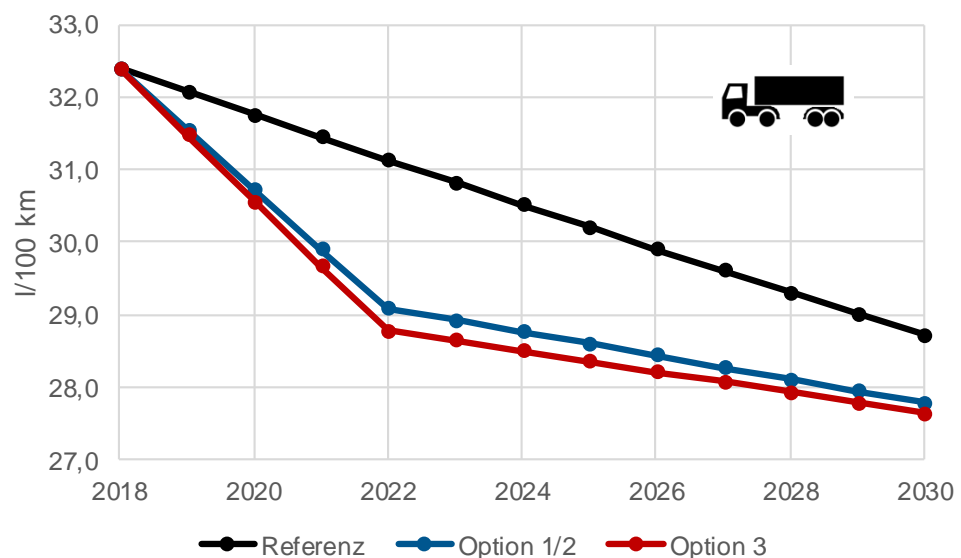
⁴⁴ Die Möglichkeiten zur Differenzierung des Mautsatzes nach Energieeffizienz werden in Kapitel 3.2 und Kapitel 5.2 beschrieben (Option 1: Spreizung des Infrastrukturmautsatzes, Option 2: Mautsatzkomponente für CO₂-Emissionen als externe Kosten, Option 3: Kombination von Option 1 und Option 2).

Abbildung 9-9: Entwicklung des spezifischen Kraftstoffverbrauchs neu zugelassener Verteiler-Lkw der VECTO-Klasse 2 im Referenzfall und für unterschiedliche Mautspreizungsoptionen nach Zulassungsjahr



Quelle: eigene Berechnung

Abbildung 9-10: Entwicklung des spezifischen Kraftstoffverbrauchs neu zugelassener Sattelzugmaschinen der VECTO-Klasse 5 im Referenzfall und für unterschiedliche Mautspreizungsoptionen nach Zulassungsjahr



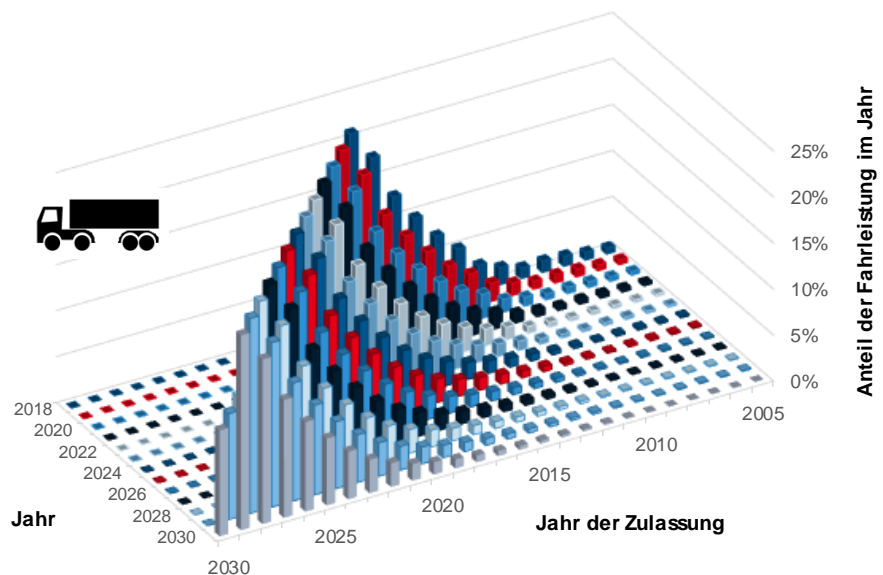
Quelle: eigene Berechnung

9.4.3 Energieeffizienzwirkungen für Sattelzüge und Verteiler-Lkw in der Fahrzeugflotte

Die Auswirkungen der gemäß vorangegangenen Abschnitt für die Kfz-Neuzulassungen berechneten Effizienzsteigerungen auf den Kraftstoffverbrauch im gesamten Fahrzeugbestand eines Jahres wurden mit dem Modell NEMO (Network Emission Model [Dippolt M., 2016]) berechnet. NEMO ist ein an der TU Graz entwickeltes Modell zur Simulation von Energieverbrauch und Schadstoffemissionen auf Straßennetzwerken. Dabei verbindet NEMO die Berechnung der Flottenzusammensetzung nach Berechnungsjahr über vorgegebene Bestandsentwicklungen, Ausfallwahrscheinlichkeiten und spezifische jährliche Fahrleistungen mit einem fahrzeugfeinem Emissionsmodell.

Für die Ableitung der Entwicklung der spezifischen Verbräuche der Fahrzeugflotten wurde in einem ersten Schritt die Statistik der deutschen Fahrzeuge nach Alter und Größenklasse analysiert. In Deutschland zugelassene Fahrzeuge sind gegenüber dem EU-Durchschnitt vergleichsweise jünger. Die entsprechenden Modellparameter in NEMO wurden anhand der statistischen Auswertungen angepasst. Ausgehend von der Altersstruktur der Fahrzeuge wurde in einem zweiten Schritt die Fahrleistungsverteilung nach Zulassungsjahr (Kohorte) abgeleitet (Abbildung 9-11).

Abbildung 9-11: Fahrleistungsverteilung der Sattelzugmaschinen der VECTO-Klasse 5 nach Zulassungsjahr und Jahr (Kohorte)



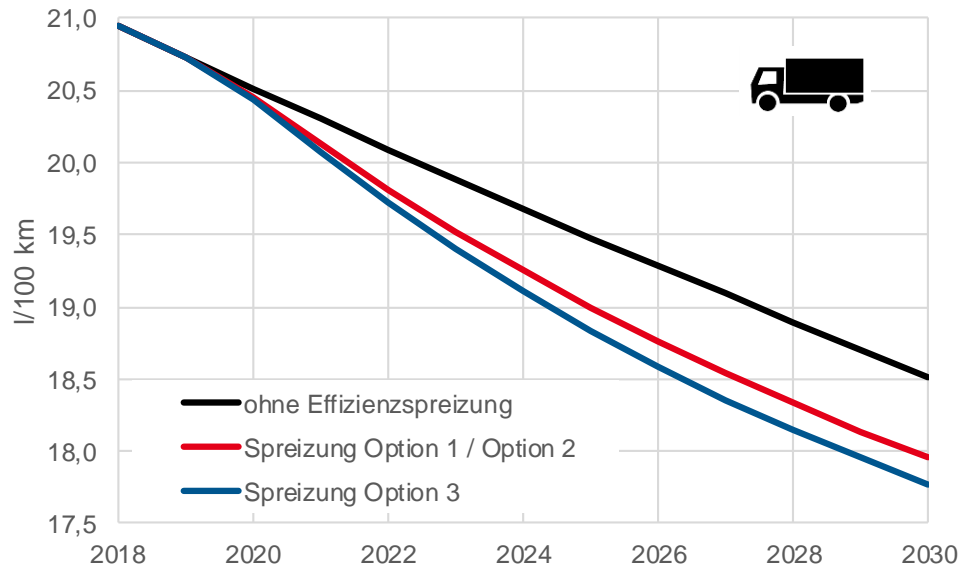
Quelle: eigene Berechnung

Für das Szenario ohne Effizienzspreizung wurde dabei unterstellt, dass die Lkw Neuzulassungen im betrachteten Zeitraum bereits durch von Kraftstoffeinsparungen getriggerten Maßnahmen pro Jahr um 1,0 % effizienter als die Neuzulassungen des Vorjahres werden (schwarze Kurve, ohne effizienzgespreizte Maut). Auf diesen „Referenzfall“ wurden die Effizienzspreizung durch die Lkw-Maut bei den neuzugelassenen Fahrzeugen in den einzelnen Spreizungsszenarien zusätzlich aufgeschlagen. Durch den über die Jahre steigenden Anteil der durch die Mautwirkung erfassten Fahrzeuge an der Gesamtfahrleistung ergibt sich eine über die Jahre zunehmende Auswirkung auf den flottendurchschnittlichen Kraftstoffverbrauch. Der mittlere spezifische Kraftstoffverbrauch der Flotte der Sattelfahrzeuge der VECTO-Klasse 5 liegt ohne Einführung eine effizienzgespreizten Maut im Jahr 2030 bei 29,8 l / 100 km. Demgegenüber können die spezifischen Flottenverbräuche bei Spreizung des Mautsatzes nach Option 3 um 4,7 % (28,4 l / 100 km) nach Option 1 / 2 um 4,0 % (28,6 l / 100 km) gesenkt werden (Abbildung 9-12).

Der mittlere spezifische Kraftstoffverbrauch der Flotte der Verteiler-Lkw der VECTO-Klasse 2 liegt ohne Einführung eine effizienzgespreizten Maut im Jahr 2030 bei 18,5 l / 100 km. Demgegenüber können die spezifischen Flottenverbräuche bei Spreizung des Mautsatzes nach Option 3 um 4,0 % (17,8 l / 100 km) nach Option 1 / 2 um 3,0 % (18,0 l / 100 km) gesenkt werden (Abbildung 9-13).

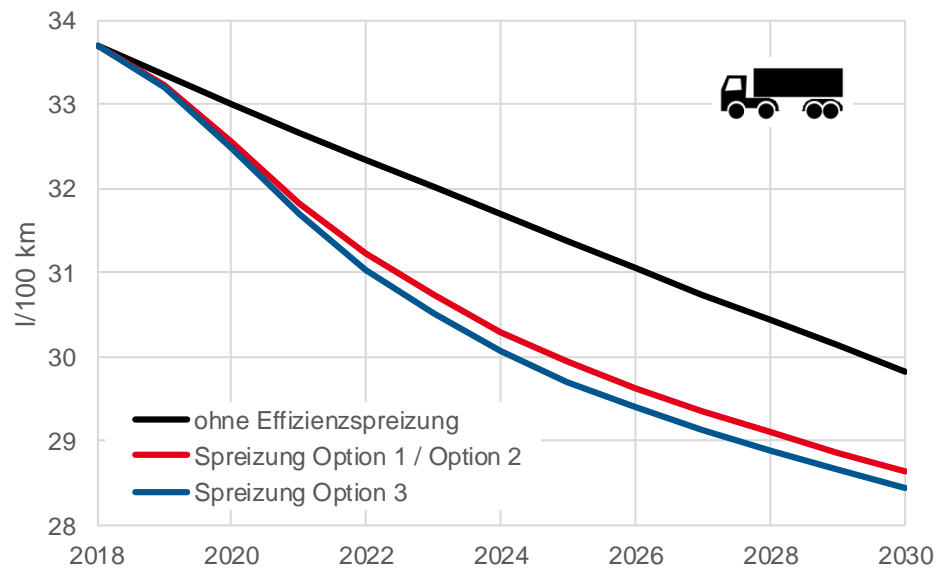
Die schnellere Wirkung auf den Flottendurchschnitt bei Sattelfahrzeugen folgt aus der schnelleren Flottenerneuerung sowie der Tatsache, dass diese Fahrzeuge um 1 Jahr früher von der CO₂-Zertifizierung und damit von der effizienzgespreizten Lkw-Maut erfasst werden.

Abbildung 9-12: Entwicklung des spezifischen Kraftstoffverbrauchs im Bestand für Lkw der VECTO-Klasse 2 mit und ohne Mautwirkung (inkl. Spreizungsoptionen) für die Jahr 2020 bis 2030



Quelle: eigene Berechnung

Abbildung 9-13: Entwicklung des spezifischen Kraftstoffverbrauchs im Bestand für Sattelzugmaschinen der VECTO-Klasse 5 mit und ohne Mautwirkung (inkl. Spreizungsoptionen) für die Jahr 2020 bis 2030



Quelle: eigene Berechnung

9.4.4 Effizienzwirkungen von Aerodynamikmaßnahmen an Sattelzugaufliegern

Eine mögliche Vorgehensweise für die Anrechnung von Aerodynamikmaßnahmen an Sattelzugaufliegern beim Mautsatz sowie deren CO₂-Einsparungspotenziale und Mehrkosten wurden bereits in Abschnitt 6.2.3 erläutert. Für die Quantifizierung der Effizienzwirkungen dieser Maßnahme in der Flotte musste das entsprechende Flottendurchdringungspotenzial abgeschätzt werden. Dafür wurde vereinfachend davon ausgegangen, dass nur die Kombination der in Abschnitt 9.2 definierten Maßnahmen 1) und 2) an den Sattelanhängern umgesetzt wird. In der Umsetzung des Mautkonzeptes könnte man die beiden Fälle jedenfalls auch einzeln berücksichtigen.

Das Flottendurchdringungspotenzial wurde anhand folgender Zahlen bzw. Annahmen abgeschätzt:

- Anteil Boxbodies am Sattelanhängerbestand = 60 %
- Fahrleistungsanteil Boxbodies am Sattelanhängerbestand = 60 % (Annahme Fahrleistungsanteil = Bestandsanteil, nähere Informationen dazu liegen nicht vor)
- Auswirkungen auf Neufahrzeuge: Es wird von einer progressiven Zunahme des Anteils an aerodynamisch optimierten Fahrzeugen an den Neuzulassungen von 1/3 in 2020⁴⁵ auf 2/3 ab 2025 ausgegangen.
- Als jährliche Erneuerungsrate der Sattelanhängerflotte wird ein Wert von 10 % angenommen (d.h. die durchschnittliche Lebensdauer eines Sattelanhängers beträgt 10 Jahre)
- Auswirkungen auf den Fahrzeugbestand der Zulassungsjahre vor 2020:
 - Leasingfahrzeuge (Annahme Anteil 50 %) werden nicht nachgerüstet
 - Die verbleibenden Sattelanhänger werden zu 20 % nachgerüstet (davon jeweils die Hälfte in 2020 und 2021). Diese Nachrüstungen betreffen jeweils die Zulassungsjahre 2016 bis 2019 mit einer Restlebensdauer von mindestens 4 Jahren.

Bei diesen Annahmen wurde berücksichtigt, dass laut Auskunft von Branchenkennern die Transportbranche sehr konservativ mit dem Thema Aerodynamikmaßnahmen umgeht.

Aus diesen Zahlen ergibt sich eine Prognose für den Anteil von mit Aerodynamikteilen ausgerüsteten Sattelanhängern an der Fahrleistung von Sattelzügen gemäß Tabelle 9-5. Demnach steigt der

⁴⁵ Es wird dabei davon ausgegangen, dass aerodynamisch optimierte Fahrzeuge bereits vor Einführung der energieeffizienten Maut für Fahrzeuge der VECTO-Klasse 5 im Jahr 2022 eingesetzt werden (vgl. Kapitel 3.2 und 10).

Anteil kontinuierlich von knapp 5 % im ersten Jahr der Berücksichtigung im Mautsatz auf gut ein Drittel der Sattelanhänger im Jahr 2030 an. Gemäß der oben getroffenen Annahmen würde sich eine Sättigung des Anteils in den früheren 2030er Jahren bei 40% der Sattelanhänger-Fahrleistung einstellen.

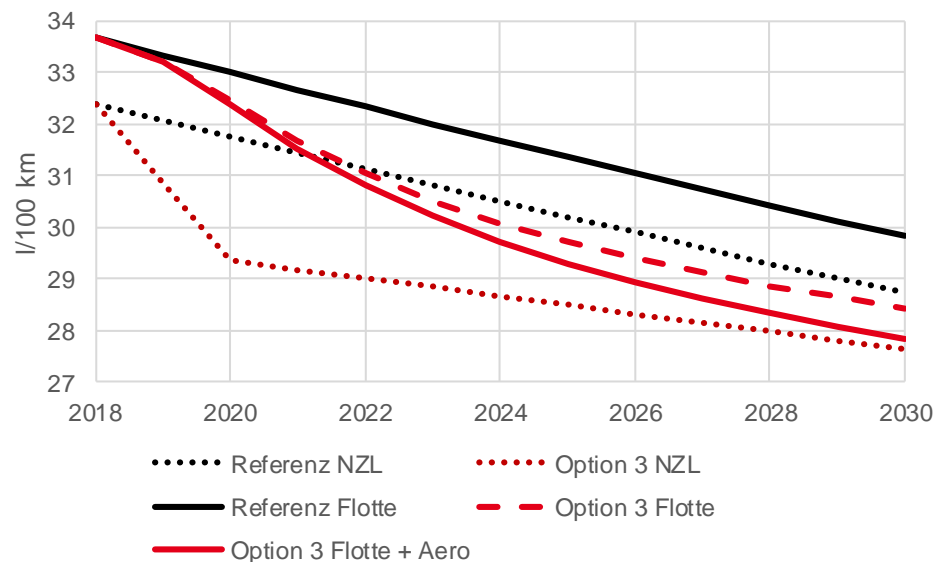
Tabelle 9-5: Anteil Sattelanhänger mit Aerodynamikpaket an gesamter Sattelanhänger-Fahrleistung

Jahr	Anteil
2020	4.7%
2021	9.5%
2022	12.3%
2023	15.5%
2024	19.1%
2025	23.1%
2026	25.8%
2027	28.6%
2028	31.3%
2029	34.0%
2030	36.0%

Quelle: eigene Berechnung

Aus dem CO₂-Einsparpotenzial der Aeropakete sowie der Prognose für den Anteil von Sattelzugaufliegern mit Aeropaketen an der Gesamtfahrleistung von Sattelzügen lässt sich schließlich die Wirkung der Maßnahme in den spezifischen Flottenverbrauch einrechnen. Die sich daraus ergebende Werte für Sattelzugmaschinen sind in Abbildung 9-14 dargestellt.

Abbildung 9-14: Entwicklung des spezifischen Kraftstoffverbrauchs für Sattelzugmaschinen der VECTO-Klasse 5 mit Mautwirkungspreizung Option 3 und für die Referenzentwicklung, für neu zugelassene Fahrzeuge („NZL“, gepunktet), in der Fahrzeugflotte (durchgezogen und gestrichelt) und unter Berücksichtigung der Wirkung von Aerodynamikmaßnahmen an Sattelzugaufliegern (rote durchgezogene Kurve)



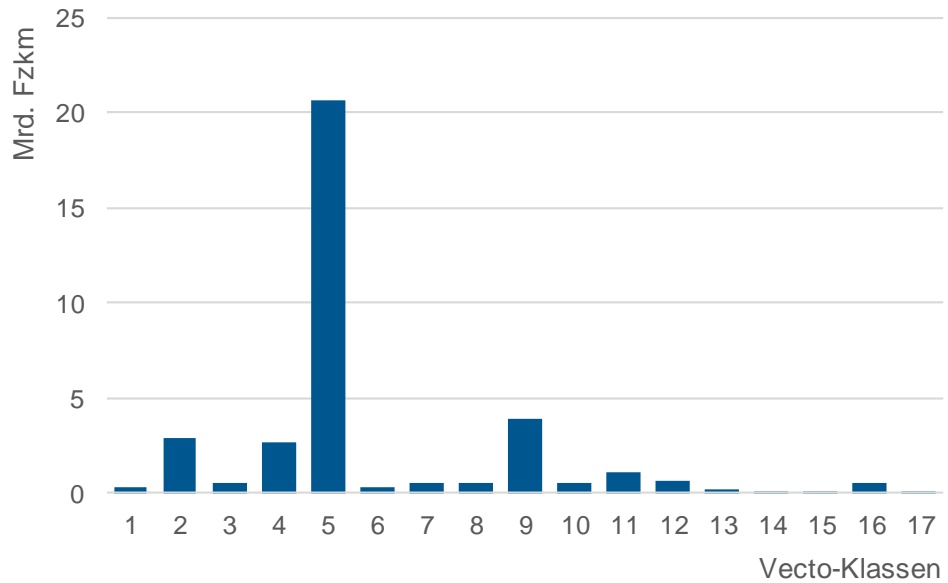
Quelle: eigene Berechnung

9.4.5 Energieeinsparung und Minderung von CO₂-Emissionen bei inländischen Fahrzeugen aller Fahrzeugklassen

Die Wirkung einer energieeffizienzgespreizten Lkw-Maut auf die durchschnittlichen spezifischen Verbräuche von Fahrzeugen der VECTO-Klassen 2 und 5 wurde in den vorangegangenen Kapiteln detailliert untersucht. Diese Fahrzeuge haben wesentliche Anteile am Bestand (vgl. Kapitel 7.1.6), den Fahrleistungen und dem Energieverbrauch und unterscheiden sich dabei deutlich im Einsatz. Sie eignen sich deshalb, um die Wirkungen der energieeffizienzgespreizten Maut auf die übrigen VECTO-Klassen abzuleiten.

Basierend auf der in Kapitel 7.2 beschriebenen nach VECTO-Klassen differenzierten Fahrleistungsprognose werden zunächst die Inländerverbräuche nach VECTO-Klassen abgeleitet. Für das Jahr 2020 ist die entsprechende Inländerfahrleistung nach VECTO-Klassen in Abbildung 9-15 dargestellt.

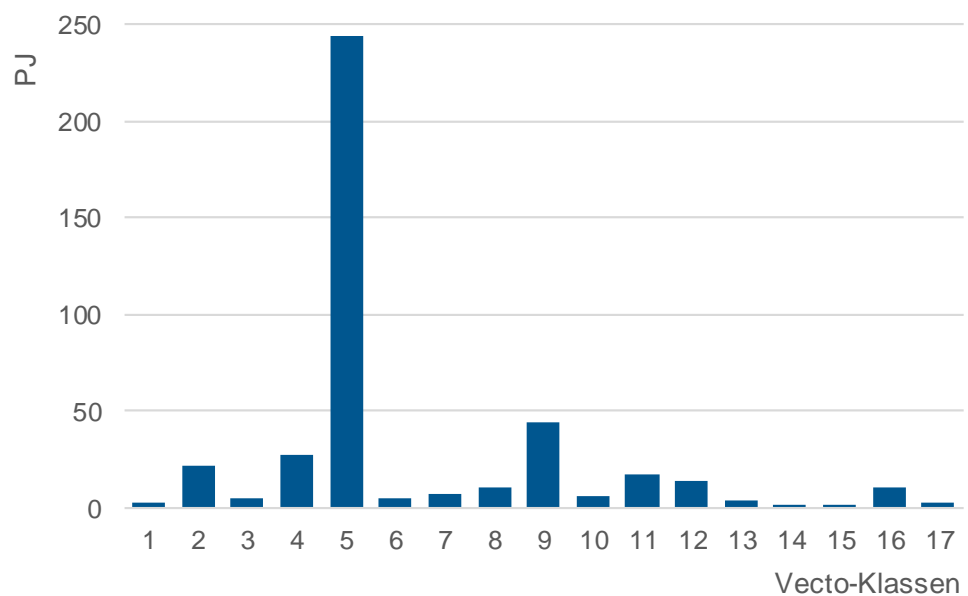
Abbildung 9-15: Inländerfahrleistung der mautpflichtigen Fahrzeuge nach VECTO-Klassen im Jahr 2020 in Deutschland, in Mrd. Fzkm



Quelle: eigene Berechnung

Für die Referenzentwicklung ohne wirkende energieeffizienzgepreizte Maut lässt sich der Inländerverbrauch nach VECTO-Klassen gemäß Abbildung 9-16 ermitteln. Mit einem Anteil von knapp 60 % am Inländerverbrauch kommt den Sattelzugmaschinen der VECTO-Klasse 5 die größte Bedeutung zu.

Abbildung 9-16: Inländerverbrauch der mautpflichtigen Fahrzeuge nach VECTO-Klassen im Jahr 2020 in Deutschland, in PJ



Quelle: eigene Berechnung

Für die VECTO-Klassen 2 und 5 lässt sich die Wirkung der energieeffizienzgespreizten Lkw-Maut auf den Inländerverbrauch direkt aus den im Detail ermittelten Entwicklungen der spezifischen Verbräuche für die Spreizungsoptionen 1 / 2 und Spreizungsoption 3 ableiten (vgl. Kapitel 9.4.3 und 9.4.4). Für die übrigen VECTO-Klassen wird anhand der Fahrzeugkombination und dem erwarteten Mautfahrleistungsanteil die Wirkung der Maut auf den durchschnittlichen spezifischen Verbrauch eingeschätzt. Danach wurde für jede VECTO-Klasse der Effekt als analog zu VECTO 2, analog zu VECTO 5, analog zu VECTO 5 ohne Wirkung der Aeropakete an den Sattelanhängern, als eine Kombination oder als keine Wirkung eingeschätzt. Die Resultate dieser Einschätzung sind in Tabelle 9-6 aufgeführt.

Tabelle 9-6: Ableitung der Wirkung der Lkw-Maut für alle VECTO-Klassen

Anzahl Achsen	Achskonfiguration	Typ	zulässige Gesamtmasse	VECTO-Klasse	Wirkung abgeleitet von
2 Achsen	4x2	Lkw + (Sattelzug)	7,5 t – 10 t	1	VECTO 2
		Lkw + (Sattelzug)	> 10 t – 12 t	2	berechnet
		Lkw + (Sattelzug)	> 12 t – 16 t	3	VECTO 2
		Lkw	> 16 t	4	2/3 VECTO 5 ohne Aero* 1/3 VECTO 2
		Sattelzug	> 16 t	5	berechnet
		4x4	Lkw	7,5 t – 16 t	(6)
	Lkw		> 16 t	(7)	keine Wirkung
	Sattelzug		> 16 t	(8)	keine Wirkung
	3 Achsen	6x2/2-4	Lkw	alle	9
Sattelzug			alle	10	VECTO 5
6x4		Lkw	alle	11	keine Wirkung
		Sattelzug	alle	12	keine Wirkung
6x6		Lkw	alle	(13)	keine Wirkung
		Sattelzug	alle	(14)	keine Wirkung
4 Achsen	8x2	Lkw	alle	(15)	keine Wirkung
	8x4	Lkw	alle	16	keine Wirkung
	8x6/8x8	Lkw	alle	(17)	keine Wirkung

*Quelle: eigene Darstellung, * abzüglich der Wirkung von Aerodynamikmaßnahmen an Sattelanhängern gemäß Kapitel 9.4.4*

Der Inländerverbrauch der mautpflichtigen Schwere Nutzfahrzeuge (SNF) sinkt in der Referenzentwicklung ohne energieeffizienzgespreizte Maut zwischen 2020 und 2030 von 418 auf 408 PJ (vgl. Tabelle 9-7). Die absolute Entwicklung ist von Konjunktur und Energiepreisen abhängig und deshalb gegenüber den ermittelten relativen Wirkungen der Mautumstellung mit einer höheren Unsicherheit behaftet.

Bei Einführung der energieeffizienzgespreizten Lkw-Maut kann eine stärkere Energieverbrauchsabsenkung als im Referenzpfad

erreicht werden. Die daraus resultierenden Einsparungen beim Inländerverbrauch sind für die Mautspreizungsoptionen 1 / 2 sowie für die Mautspreizungsoption 3 in Abbildung 9-17 dargestellt.

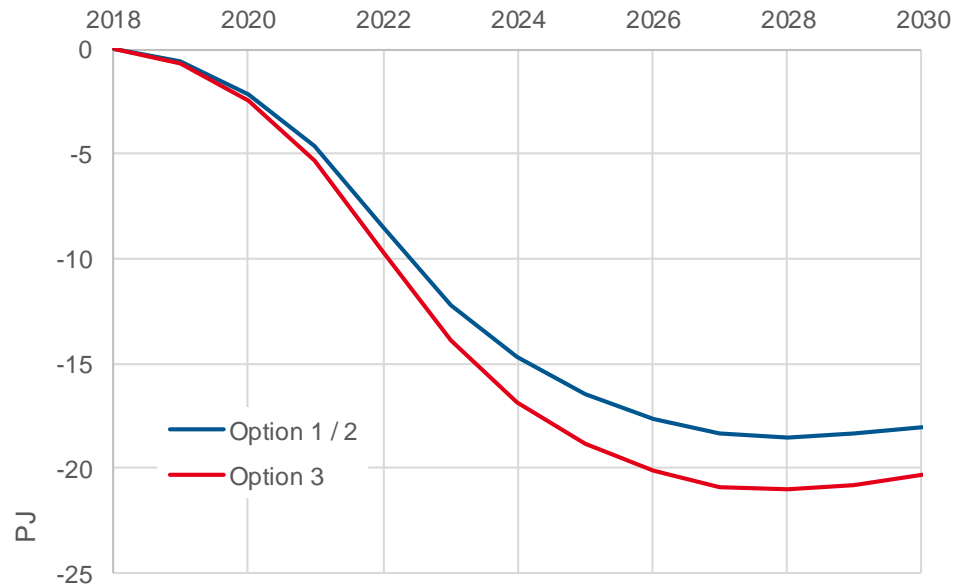
Die Einsparungen betragen je nach Spreizungsoption im Jahr 2020 erst 2,1 bis 2,4 PJ – in den Jahren 2025 bis 2030 werden Absenkungen gegenüber dem Referenzpfad von 16,5 bis 20,3 PJ und damit Einsparungen von 4–5 % gegenüber der Referenzentwicklung erreicht.

Tabelle 9-7: Inländerverbrauch der mautpflichtigen SNF, Referenz und nach Mautspreizung sowie Einsparung gegenüber Referenz, 2020 – 2030, in PJ und %

Inländer		2020	2025	2030
Absolutwerte in PJ				
Ref	ohne Effizienzspreizung	418,3	414,9	408,2
O 1 / 2	Spreizung Option 1 / Option 2	416,2	398,4	390,2
O 3	Spreizung Option 3	415,8	396,1	387,9
Einsparung gegenüber Referenz in PJ				
O 1 / 2	Spreizung Option 1 / Option 2	-2,1	-16,5	-18,0
O 3	Spreizung Option 3	-2,4	-18,8	-20,3
Einsparung gegenüber Referenz in %				
O 1 / 2	Spreizung Option 1 / Option 2	-0,5%	-4,0%	-4,4%
O 3	Spreizung Option 3	-0,6%	-4,5%	-5,0%

Quelle: eigene Berechnung

Abbildung 9-17: Einsparungen des Inländerverbrauchs der mautpflichtigen SNF, nach Mautspreizung gegenüber Referenz, 2018 – 2030, in PJ



Quelle: eigene Berechnung

Aus den Entwicklungen der Inländerverbräuche lassen sich die Pfade für die damit verbundenen CO₂-Emissionen ableiten.

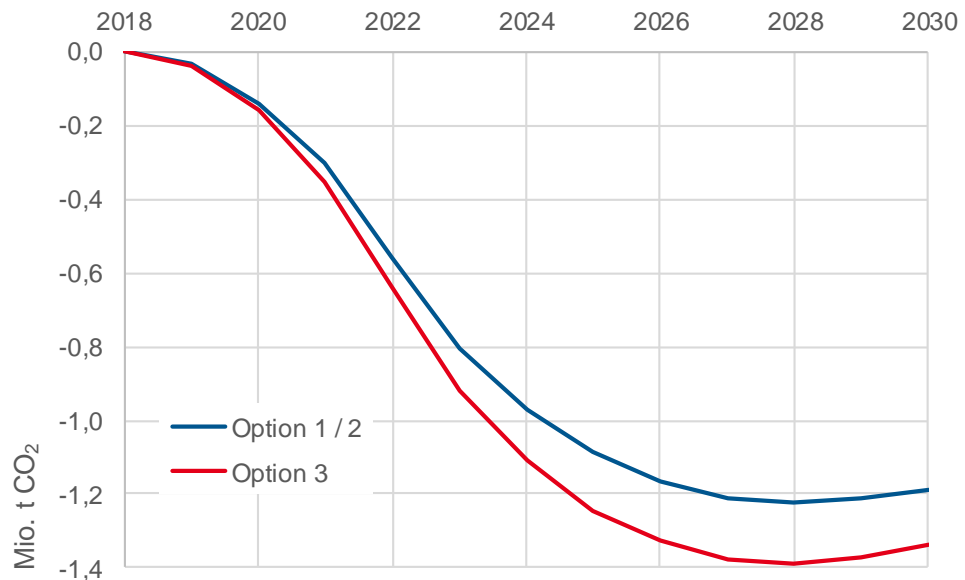
Je nach Spreizung der Mautsätze wird im Jahr 2020 eine Minderung der Emissionen von 140 bis 160 Tsd. t CO₂ erreicht. Längerfristig wächst die Minderungswirkung je nach Mautspreizungsoption und Zeitpunkt auf 1,1 bis 1,3 Mio. t CO₂ an (vgl. Tabelle 9-8, Abbildung 9-18).

Tabelle 9-8: CO₂-Emissionen der inländischen mautpflichtigen SNF, Referenz und nach Mautspreizung sowie Minderung gegenüber Referenz, 2020 – 2030, in Mio. t CO₂ und %

Inländer		2020	2025	2030
Absolutwerte in Mio. t				
Ref	ohne Effizienzspreizung	27,6	27,4	27,0
O 1 / 2	Spreizung Option 1 / Option 2	27,5	26,3	25,8
O 3	Spreizung Option 3	27,5	26,2	25,6
Minderung gegenüber Referenz in Tsd. t				
O 1 / 2	Spreizung Option 1 / Option 2	-140	-1.089	-1.189
O 3	Spreizung Option 3	-161	-1.243	-1.340
Minderung gegenüber Referenz in %				
O 1 / 2	Spreizung Option 1 / Option 2	-0,5%	-4,0%	-4,4%
O 3	Spreizung Option 3	-0,6%	-4,5%	-5,0%

Quelle: eigene Berechnung

Abbildung 9-18: CO₂-Minderung der inländischen mautpflichtigen SNF nach Mautspreizung gegenüber Referenz, 2020 – 2030, in Mio. t CO₂



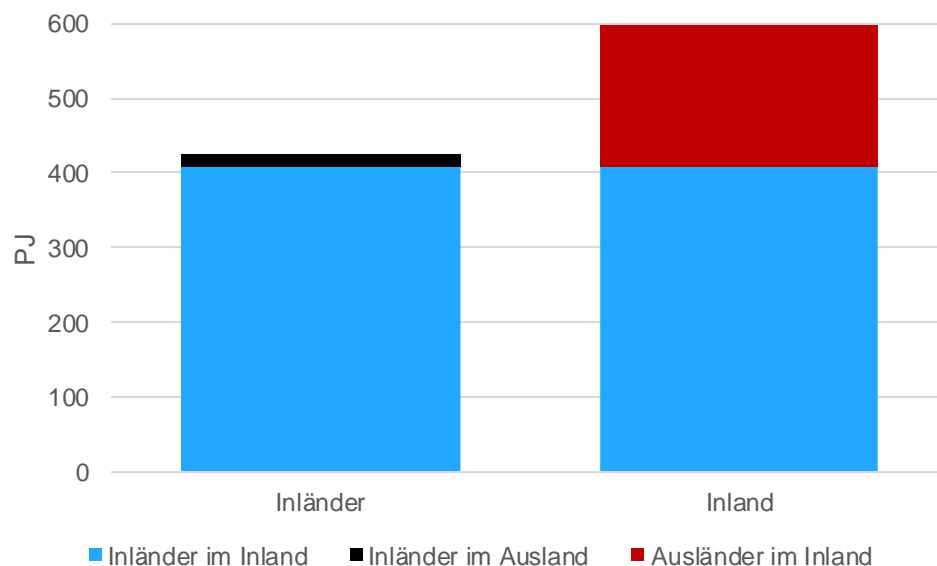
Quelle: eigene Berechnung

9.4.6 Energieeinsparung und Minderung von CO₂-Emissionen bei inländischen Fahrzeugen und ausländischen Fahrzeugen aller Fahrzeugklassen im Inland

Eine energieeffizienzgespreizte Lkw-Maut hat sowohl eine Wirkung auf ausländische als auch auf inländische Fahrzeuge. Da ausländische Fahrzeuge einen wesentlichen und wachsenden Anteil an der inländischen Mautfahrleistung ausmachen, müssen die bei diesen Fahrzeugen induzierten Energieeinsparungen und Minderungen der CO₂-Emissionen im inländischen Verkehr abgeleitet werden.

Basis für die Untersuchung ist die nach VECTO-Fahrzeugklassen erstellte Fahrleistungsprognose, welche zusätzlich nach Gebiet und zwischen inländischen und ausländischen Fahrzeugen differenziert wird (vgl. Kapitel 7.2). Davon ausgehend werden die Energieverbräuche der inländischen mautpflichtigen SNF im Ausland und die Energieverbräuche der ausländischen mautpflichtigen Fahrzeuge im Inland abgeleitet (siehe Abbildung 9-19). Der Energieverbrauch der inländischen Fahrzeuge im Ausland fällt dabei deutlich geringer als der Energieverbrauch der ausländischen Fahrzeuge im Inland aus. Entsprechend liegt der Inlandsverbrauch im Jahr 2020 mit 40 % deutlich über dem Inländerverbrauch.

Abbildung 9-19: Inländerverbrauch versus Inlandsverbrauch der mautpflichtigen SNF im Referenzszenario im Jahr 2020



Quelle: eigene Berechnung

Ausländische mautpflichtige Fahrzeuge erbringen in der Regel deutlich weniger Mautfahrleistung pro Jahr in Deutschland. Es ist deshalb davon auszugehen, dass die Umstellung auf eine energie-

effizienzgespreizte Lkw-Maut eine geringere Wirkung auf die spezifischen Verbräuche der ausländischen Fahrzeuge hat, als dies bei inländischen Fahrzeugen der Fall ist.

Um die Wirkung fundiert abzuschätzen zu können, müsste die Verteilung der Anteile der Mautfahrleistungen je Fahrzeug zugrunde gelegt werden. Diese ist nicht bekannt. Bekannt ist jedoch der Mittelwert der durchschnittlichen Mautfahrleistung pro Mautfahrzeug nach Nationalität, welcher im Jahr 2017 für inländische Fahrzeuge bei 28,4 Tsd. km – für ausländische Fahrzeuge bei durchschnittlich bei 16,6 Tsd. km lag.

Davon ausgehend wird angenommen, dass die energieeffizienzgespreizte Lkw-Maut auf ausländische Fahrzeuge pauschal 50% der verbrauchsabsenkenden Wirkung erzielt, wie bei inländischen Fahrzeugen. Im Ergebnis ergeben sich die in Tabelle 9-9 dargestellten Entwicklungen der Inlandsverbräuche für die Mautspreizungsszenarien.

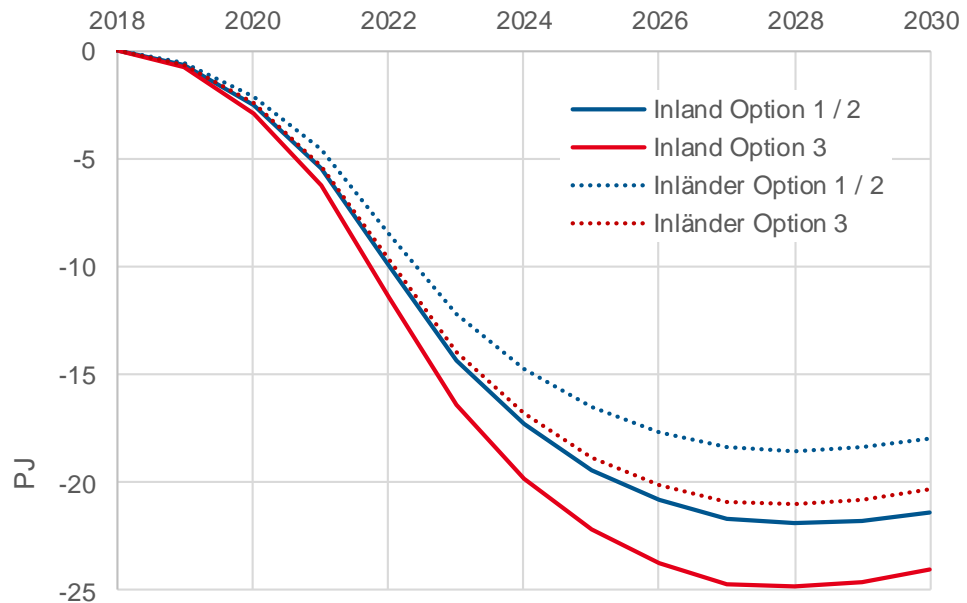
Tabelle 9-9: Inlandsverbrauch der mautpflichtigen SNF, Referenz und nach Mautspreizung sowie Einsparung gegenüber Referenz, 2020 – 2030, in PJ und %

Inland		2020	2025	2030
Absolutwerte in PJ				
Ref	ohne Effizienzpreizung	583,4	582,8	580,6
O 1 / 2	Spreizung Option 1 / Option 2	580,9	563,4	559,3
O 3	Spreizung Option 3	580,5	560,6	556,6
Einsparung gegenüber Referenz in PJ				
O 1 / 2	Spreizung Option 1 / Option 2	-2,5	-19,4	-21,4
O 3	Spreizung Option 3	-2,9	-22,2	-24,1
Einsparung gegenüber Referenz in %				
O 1 / 2	Spreizung Option 1 / Option 2	-0,4%	-3,3%	-3,7%
O 3	Spreizung Option 3	-0,5%	-3,8%	-4,1%

Quelle: eigene Berechnung

In Abbildung 9-20 sind die resultierenden Einsparung des Inlandsverbrauches der mautpflichtigen SNF nach Mautspreizung gegenüber Referenzfall dargestellt und mit den entsprechenden Einsparungen in der Abgrenzung des Verbrauches der Inländer verglichen.

Abbildung 9-20: Einsparung des Inlandsverbrauches und des Inländerverbrauches der mautpflichtigen SNF nach Mautspreizung gegenüber Referenz, 2018 – 2030, in PJ



Quelle: eigene Berechnung

Die CO₂-Emissionspfade und Minderungen gegenüber der Referenz in der Abgrenzung des Inlandsverbrauches folgen aus den vorgestellten Entwicklungen für die Energieverbräuche. Je nach Spreizung der Mautsätze werden im Jahr 2020 jährliche Minderungen der inländischen Emissionen von 160 bis 190 Tsd. t CO₂ erreicht. Längerfristig wächst die jährliche Minderungswirkung je nach Mautspreizungsoption und Zeitpunkt auf 1,3 bis 1,6 Mio. t CO₂ an (vgl. Tabelle 9-10 und Abbildung 9-21).

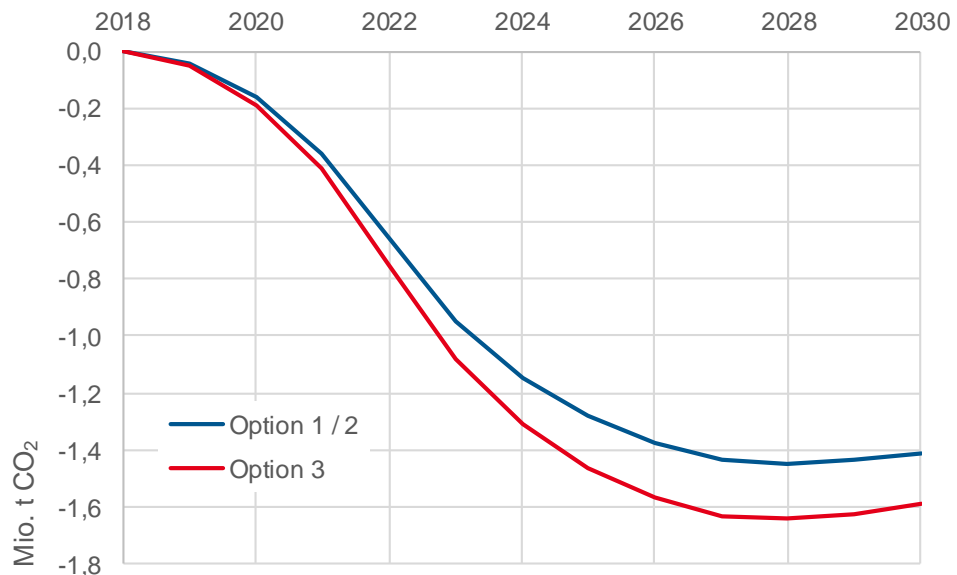
Der

Tabelle 9-10: CO₂-Emissionen der mautpflichtigen SNF im Inland, Referenz und nach Mautspreizung sowie Minderung gegenüber Referenz, 2020 – 2030, in Mio. t CO₂ und %

Inland		2020	2025	2030
Absolutwerte in Mio. t				
Ref	ohne Effizienzspreizung	38,5	38,5	38,3
O 1 / 2	Spreizung Option 1 / Option 2	38,4	37,2	36,9
O 3	Spreizung Option 3	38,3	37,0	36,8
Minderung gegenüber Referenz in Tsd. t				
O 1 / 2	Spreizung Option 1 / Option 2	-164	-1.283	-1.410
O 3	Spreizung Option 3	-189	-1.465	-1.590
Minderung gegenüber Referenz in %				
O 1 / 2	Spreizung Option 1 / Option 2	-0,4%	-3,3%	-3,7%
O 3	Spreizung Option 3	-0,5%	-3,8%	-4,1%

Quelle: eigene Berechnung

Abbildung 9-21: CO₂-Minderung der mautpflichtigen SNF im Inland nach Mautspreizung gegenüber Referenz, 2020 – 2030, in Mio. t CO₂



Quelle: eigene Berechnung

10 Roadmap zur Einführung der energieeffizienzgespreizten Lkw-Maut

Dieses Kapitel zeigt auf, welche Voraussetzungen geschaffen werden müssen, um die Maut nach der Energieeffizienz der Fahrzeuge zu differenzieren und welche zeitlichen Meilensteine bei einer Mautumstellung zu berücksichtigen sind. Nach dem aktuellen Vorschlag zur Änderung der Eurovignettenrichtlinie (vgl. Kapitel 3.2) kann die Maut frühestens 2022/23 eingeführt werden.

Nachfolgend werden die aus gutachterlicher Sicht und zum aktuellen Stand bekannten Meilensteine aufgeführt; Verzögerungen ihrer Umsetzung werden in der Regel dazu führen, dass die nach Energieeffizienz gespreizte Maut erst zu einem späteren Zeitpunkt eingeführt werden kann. Die entsprechenden Zuständigkeiten und das Vorgehen im Detail bei der Verwirklichung der Meilensteine sind im weitergehenden Prozess zu konkretisieren.

2018–2019: Gesetzliche Änderungen auf europäischer Ebene und Vorbereitung von gesetzlichen Änderungen auf nationaler Ebene

Zur Spreizung der Mautsätze nach Energieeffizienz bzw. CO₂-Werten sind sowohl Änderungen an der Eurovignettenrichtlinie [1999/62/EU] auf EU-Ebene als auch Änderungen am Bundesfernstraßenmautgesetz [BFStrMG] auf nationaler Ebene notwendig. Der EU-gesetzliche Rahmen erlaubt bislang keine Mautspreizung nach Energieeffizienzkriterien. Die Eurovignettenrichtlinie sieht zwar die Einbeziehung von externen Kosten in die Berechnung des Mautsatzes vor, nicht jedoch eine energieeffizienzgespreizte Lkw-Maut. Bei den in dieser Untersuchung vorgeschlagenen Mautkonzepten wurde ein angepasster gesetzlicher Rahmen – ausgehend von der aktuellen Eurovignettenrichtlinie – vorausgesetzt. Die notwendigen Anpassungen des deutschen Bundesfernstraßenmautgesetzes [BFStrMG] müssen ebenfalls geprüft werden; das benötigt entsprechend Zeit.

2019: Konkretisierung des Mautkonzeptes und Abstimmungsprozess mit den beteiligten Akteuren

An einer Umstellung der Lkw-Maut sind zahlreiche Akteure beteiligt. Die im Rahmen dieser Studie vorgeschlagenen Mautkonzepte schaffen einen Anreiz, effiziente schwere Nutzfahrzeuge einzusetzen. Je eher der zukünftige Mautmechanismus den Herstellern und Fahrzeughaltern bekannt ist, desto früher können sich diese darauf vorbereiten. Ein Vorteil dieses Vorgehens ist, dass bereits vor Einführung der energieeffizienzgespreizten Maut ein Impuls zur Steigerung der Effizienz von Neufahrzeugen möglich ist.

2019–2020: Einführung der Zertifizierung nach CO₂-Emissionswerten

Voraussichtlich ab 2019/20 werden SNF bei Zulassung je nach Klasse sukzessive mit CO₂-Emissionswerten zertifiziert. Durch diese CO₂-Zertifizierung werden zukünftig spezifische CO₂-Emissionswerte [g CO₂/tkm] zur Bewertung der Fahrzeuge zur Verfügung stehen.

2020–2021: Veröffentlichung der amtlichen CO₂-Werte durch die Europäische Umweltagentur (EUA)

Für Fahrzeuge, die mit zertifizierten CO₂-Werten zugelassen werden, müssen von Seiten des Herstellers und der nationalen Zulassungsbehörden Zulassungszahlen und CO₂-Werte bis zum Februar des Folgejahres an die EUA übermittelt werden. Die Veröffentlichung amtlicher CO₂-Emissionsdaten durch die EUA ist nicht zeitlich geregelt. Es wird hier davon ausgegangen, dass sie noch im selben Jahr veröffentlicht werden. Parallel dazu erfolgt idealerweise eine Erhebung und Analyse der Mautfahrleistung in Deutschland nach Energieeffizienzwerten zur Vorbereitung der Festlegung der Mautsätze nach Effizienzklassen.

2021–2022: Festlegung der Bezugswerte und Klasseneinteilung in Effizienzklassen auf EU-Ebene – Definition der Mautsätze und Gesetzgebung zur deutschen Lkw-Maut

Der Vorschlag zur Änderung der Eurovignettenrichtlinie sieht vor, dass die Kommission innerhalb eines Jahres nach Veröffentlichung der amtlichen CO₂-Werte „Bezugswerte für CO₂-Emissionen und eine Klasseneinteilung für die betreffenden SNF“ festlegt. Für die deutsche Lkw-Maut können parallel Mautsätze nach Effizienzklasse definiert werden.

2022–2023: Einführung der nach Energieeffizienz differenzierten Lkw-Maut in Deutschland

Eine effizienzabhängige Differenzierung von Mautsätzen kann erst erfolgen, wenn für eine relevante Anzahl der Fahrzeuge Effizienzwerte verfügbar sind. Eine Einführung der energieeffizienzgespreizten Maut ist deshalb frühestens ab 2022 / 2023 möglich.

Ab 2024: Monitoring der Mautfahrleistung nach Energieeffizienz und Nachjustierung der Mautsätze nach Energieeffizienzklassen

Um eine möglichst starke Wirkung der energieeffizienzgespreizten Lkw-Maut zu erzielen, wird die Lkw-Mautfahrleistung nach CO₂-Werten erhoben und die Mautsätze werden nachjustiert.

11 Fazit

Im Rahmen der Untersuchung wurde ein Konzept entwickelt, nach dem die Lkw-Maut differenziert nach Energieeffizienzklassen erhoben werden kann. Das Konzept berücksichtigt die rechtlichen Grundlagen, stellt eine hohe Aufkommensneutralität sicher und führt innerhalb der Rahmenbedingungen zu einem möglichst starken Anreiz, energieeffiziente Fahrzeuge einzusetzen. Es wurde untersucht, welche Wirkungen die Umstellung auf das konkret beschriebene Mautkonzept für den Energieverbrauch und die CO₂-Emissionen der mautpflichtigen Schwere Nutzfahrzeuge in Deutschland hat.

Die effizienzgespreizte Maut wirkt auf alle mautpflichtigen Fahrzeuge welche auf mautpflichtigen Straßen verkehren und damit sowohl auf inländische als auch auf ausländische Fahrzeuge. Dies ist ein Vorteil gegenüber anderen politischen Instrumenten zur Steigerung der Effizienz im Straßengüterverkehr, da der Anteil ausländischer Fahrzeuge an der Mautfahrleistung in Deutschland zunimmt und bereits über 40 % liegt.

Die aktuelle Eurovignettenrichtlinie erlaubt keine Differenzierung der Mautsätze nach der Energieeffizienz der Fahrzeuge. Um über die Lkw-Maut einen Anreiz für Effizienz schaffen zu können, muss deshalb der europäische Rechtsrahmen angepasst werden. In der vorliegenden Studie wurden Mautsätze und Mautsatzspreizungen unter der Annahme abgeleitet, dass für diese vergleichbare Rahmenbedingungen gelten wie für die aktuelle Differenzierung nach Schadstoffemissionen. In der Zwischenzeit wird ein Anpassungsvorschlag der Eurovignettenrichtlinie [2017/0114/COD/EU] diskutiert, der eine Differenzierung nach CO₂-Emissionswerten und damit nach Energieeffizienz ermöglicht und vorschreibt (vgl. Kapitel 3.2). Die Umsetzung des vorgestellten Mautkonzeptes ist im Rahmen dieses Vorschlages prinzipiell möglich, erfordert in einzelnen Aspekten jedoch eine weitere Anpassung der europäischen Rahmengesetzgebung und hängt von deren Entwicklung ab.

Der von der umgestellten Lkw-Maut ausgehende Anreiz, effiziente Fahrzeuge einzusetzen, ist umso höher, je stärker sich die Mautsätze nach der Energieeffizienz der Fahrzeuge unterscheiden. Um den EU-Mitgliedsstaaten bezüglich des Anreizes für Effizienz einen größeren Gestaltungsspielraum zu geben, könnte eine stärkere Spreizung der Infrastrukturkomponente (z. B. höchster Mautsatz begrenzt durch doppelte Infrastrukturkosten) oder die Anlastung von externen Kosten analog zu dem aktuellen Rahmen für die Differenzierung nach Schadstoffemission ermöglicht werden. Dafür müsste die Eurovignettenrichtlinie weiter angepasst werden.

Um den Mautsatz nach der Energieeffizienz zu differenzieren, müssen die Fahrzeuge bewertet werden. Dafür bieten sich die spezifischen CO₂-Emissionen an, welche ab 2019/20 für neu zugelassene SNF verfügbar sind. Dabei wird neben dem Anreiz für Effizienz zusätzlich ein Anreiz zum Einsatz alternativer Antriebe

geschaffen, die mit Kraftstoffen mit geringerer CO₂-Intensität betrieben werden. In der vorliegenden Arbeit wird ein Verfahren definiert, wie die Schwere Nutzfahrzeuge zunächst in Gruppen vergleichbarer Fahrzeuge (VECTO-Klassen) eingeteilt und anschließend in Abhängigkeit ihres spezifischen Emissionswertes Effizienzklassen zugeordnet werden können. Die Mautsätze der Effizienzklassen können auf der Grundlage der Mautstatistik des Vorjahres⁴⁶ derart festgelegt werden, dass der Anreiz zur Schaffung von Energieeffizienz und die Aufkommensneutralität optimiert werden. Dabei unterscheiden sich die Mautsätze stärker in Abhängigkeit der Effizienz, wenn in dem entsprechenden Effizienzbereich viel Mautfahrleistung erbracht wird. Dadurch hängen die Mautsätze von der Effizienz der übrigen mautpflichtigen Fahrzeuge ab. Prinzipiell wird durch die effizienzgespreizte Lkw-Maut ein Anreiz für den Einsatz eines effizienteren Fahrzeuges gegeben, wenn dadurch eine bessere Effizienzklasse und damit auch ein niedrigerer Mautsatz erreicht werden. Um möglichst viele Effizienzmaßnahmen anzureizen, ist es deshalb entscheidend, dass die Breite der Effizienzklassen, welche nach dem aktuellen Vorschlag zur Anpassung der Eurovignettenrichtlinie auf EU-Ebene definiert werden sollen, eng genug gesetzt werden.

Je nach Fahrzeugkategorie und Jahresfahrleistung unterscheidet sich der Anteil der Mautkosten an den Fahrzeugkosten deutlich. Sattelzugmaschinen der Fahrzeugklasse VECTO 5 sind von besonderer Bedeutung, da sie für knapp 60 % des Energieverbrauchs mautpflichtiger Fahrzeuge verantwortlich sind. Ohne Kosten für den Fahrer hat die Maut im Mittel einen Anteil von rund 7 % an den Fahrzeugkosten, der Anteil der Kraftstoffkosten liegt hingegen bei über 55 %; die Anteile unterscheiden sich jedoch deutlich nach Einsatz.

Obwohl die Kraftstoffkosten einen deutlich höheren Anteil an den Fahrzeugkosten haben als die Mautkosten, kann von einer energieeffizienzgespreizten Lkw-Maut ein entscheidender Anreiz für Effizienz ausgehen, wenn die Mautsätze sehr viel stärker mit der Effizienz variieren. Zusätzlich wird eine höhere Transparenz bezüglich der Effizienz der Fahrzeuge geschaffen.

Durch die CO₂-Zertifizierung wird zukünftig die Effizienz von motorisierten Schwere Nutzfahrzeugen bei deren Zulassung bewertet. Nachträgliche Maßnahmen am Fahrzeugbestand zur Steigerung der Effizienz oder Eigenschaften von Anhängern mit Einfluss auf die Effizienz des Gesamtfahrzeugs können damit nicht bewertet und folglich auch prinzipiell nicht durch eine energieeffizienzgespreizte Maut angereizt werden. Aerodynamikanpassungen an Sattelanhängern sind jedoch eine entscheidende Maßnahme zur Effizienzsteigerung, weil bei niedrigen Minderungskosten insgesamt deutliche CO₂-Minderungen erreicht werden können. Daher wird in der vorliegenden Arbeit davon ausgegangen, dass diese

⁴⁶ Dafür muss zukünftig im Rahmen der Mautstatistik auch die Mautfahrleistung nach Effizienzwert erhoben werden.

Maßnahmen in die Bewertung der Effizienz der Fahrzeuge eingehen. Dies ist nach dem Vorschlag zur Anpassung der Eurovignettenrichtlinie bisher nicht vorgesehen und verlangt eine weitere Anpassung. Um eine Bewertung in Abhängigkeit des Anhängers zu ermöglichen, muss bei jeder Fahrt gemeldet werden, ob der eingesetzte Anhänger aerodynamisch optimiert ist.

Aus dem aktuellen Vorschlag zur Änderung der Eurovignettenrichtlinie lässt sich ableiten, dass die energieeffizienzgespreizte Lkw-Maut frühestens 2022/23 eingeführt werden kann. Für Fahrzeuge, welche ab 2019 mit zertifiziertem CO₂-Wert zugelassen werden, kann bereits vor der Mautumstellung ein Anreiz für den Einsatz energieeffizienter Fahrzeuge entstehen, wenn abzusehen ist, dass sie ab 2022 Vorteile im Rahmen der dann differenzierten Maut genießen. Die Wirkung fällt jedoch gering aus, da nur für einen Teil der Betriebsdauer Vorteile durch die effizienzgespreizte Maut zu erwarten sind. Die volle Wirkung der Maut auf die Energieeffizienz der Schweren Nutzfahrzeuge wird im Bestand erst nach einigen Jahren erreicht.

Die ermittelten Wirkungen auf Energieverbrauch und CO₂-Emissionen basieren auf konkreten Annahmen zu Rahmenbedingungen und zur Umsetzung der Lkw-Maut, und hängen von diesen ab. Die Möglichkeiten zur Umsetzung des Mautkonzeptes werden von der tatsächlichen Änderung der Eurovignettenrichtlinie beeinflusst – insbesondere davon, welche Mautsatzspreizungen erlaubt werden. Wird die Effizienzspreizung der Maut zu einem späteren Zeitpunkt eingeführt, (Annahme: Wirkung zum 1. Januar 2022) und nicht frühzeitig in ihrer konkreten Ausgestaltung angekündigt, reduziert sich neben der zeitlichen Verzögerung auch ihre Wirkung auf Energieverbrauch und CO₂-Emissionen. Die durch Aerodynamikmaßnahmen am Sattelanhänger induzierten Beiträge zur Wirkung liegen bei 30% der Gesamtwirkung und hängen von deren Anrechenbarkeit auf den Effizienzwert des Fahrzeugs ab. Die Stabilität der Wirkung hängt von der regelmäßigen Anpassung der Mautsätze nach dem vorgestellten festgelegten Verfahren und der dafür notwendigen Erhebung der Mautstatistik nach Effizienzwerten ab.

Die Wirkung der Mautumstellung auf den Energieverbrauch und die CO₂-Emissionen des mautpflichtigen Güterverkehrs wurde für die Jahre 2018 bis 2030 untersucht. Je nach Spreizung der Mautsätze kann im Jahr 2020 eine Energieeinsparung von 2,5 bis 2,9 PJ bzw. eine Minderung von 160 bis 200 Tsd. t CO₂ erreicht werden. Längerfristig können im Jahr 2030 Energieeinsparungen von 22 bis 25 PJ und damit Minderungen von 1,4 bis 1,6 Mio. t CO₂ erreicht werden.

Abkürzungsverzeichnis

CO ₂	Kohlendioxid
CO ₂ -Äq	CO ₂ -Äquivalente
Fzkm	Fahrzeugkilometer
Lkw	Lastkraftwagen
LNF	Leichte Nutzfahrzeuge
NZL	Neuzulassungen
PJ	Petajoule
SNF	Schwere Nutzfahrzeuge
tkm	Tonnenkilometer
VECTO	Vehicle Energy Consumption Calculation Tool
zGM	Zulässige Gesamtmasse

Literaturverzeichnis

- Alfen Consult (2014) Alfen Consult im Auftrag des Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur: Berechnung der Wegekosten für das Bundesfernstraßennetz sowie der externen Kosten nach Maßgabe der Richtlinie 1999/62/EG für die Jahre 2013 bis 2017. Leipzig / Weimar
- AEA (2011) AEA, 2011: Reduction and Testing of Greenhouse Gas (GHG) Emissions from Heavy Duty Vehicles, Lot 1: Strategy. Didcot : AEA, 22 Feb 2011.
- BAG (2016) Bundesamt für Güterverkehr (BAG): Mautstatistik Jahrestabellen 2015. Köln
- BASSt (2013) Bundesamt für Straßenwesen (BASSt): Straßenverkehrszählung 2010. Tabellenband. Bergisch-Gladbach
- BASSt (2017a) Bundesamt für Straßenwesen (BASSt): Fahrleistungserhebung 2014 – Inländerfahrleistung. Verkehrstechnik Heft V 290
- BASSt (2017b) Bundesamt für Straßenwesen (BASSt): Fahrleistungserhebung 2014 – Inlandsfahrleistung und Unfallrisiko. Verkehrstechnik Heft V 291
- BFStrMG Bundesfernstraßenmautgesetz - Gesetz über die Erhebung von streckenbezogenen Gebühren für die Benutzung von Bundesautobahnen und Bundesstraßen, vom 12.07.2011, veröffentlicht am 18.07.2011 im Bundesgesetzblatt Teil I, 2011, Nr. 36, S. 1378
- BMUB (2014) Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB): Aktionsprogramm Klimaschutz 2020, Kabinettsbeschluss vom 3. Dezember 2014
- BMUB (2016) Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB): Klimaschutzplan 2050 - Klimaschutzpolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung, November 2016
- Dippolt, M. (2016) NEMO: Entwicklung eines Simulationsmodells zur Ermittlung von Energieverbrauch und Emissionen auf Verkehrsnetzwerken. Dissertation, Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik, Technische Universität Graz
- Ecoplan/Infras (2014) Ecoplan/Infras: Externe Effekte des Verkehrs 2010 Bern/Zürich
- FAT (2011) FAT, 2011: FAT Schriftenreihe 237: Verbrauchsreduktion an Nutzfahrzeugkombinationen durch aerodynamische Maßnahmen. ISSN 2192-7863

FVT (2016)	FVT – Forschungsgesellschaft für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik m.b.H.: „EVO“ – Ertüchtigung von VECTO zur Berechnung des Energieverbrauches von Nutzfahrzeugen vor Erstzulassung 2018, Z30/SeV/288.3/1546/G20. Graz
GÖRG (2015)	GÖRG Partnerschaft von Rechtsanwälten mbB: Rechtsgutachten über die Zulässigkeit einer energieeffizienzgespreizten Lkw-Maut
IFEU/IVT (2015)	Zukünftige Maßnahmen zur Kraftstoffeinsparung und Treibhausgasminderung bei schweren Nutzfahrzeugen. Studie im Auftrag des Umweltbundesamtes (TEXTE 32/2015), Heidelberg.
KBA (2015) a	Kraftfahrtbundesamt (KBA): Verkehr deutscher Lastkraftfahrzeuge (VD) – Verkehrsaufkommen; Jahr 2014. Flensburg
KBA (2015) b	Kraftfahrtbundesamt (KBA): FZ 25: Bestand an Nutzfahrzeugen, Kraftfahrzeugen insgesamt und Kraftfahrzeuganhängern nach technischen Daten (Größenklassen, Motorisierung, Fahrzeugklassen und Aufbauarten); 1. Januar 2015 Flensburg
KBA (2016)	Sonderauswertung des Kraftfahrtbundesamt im Rahmen der vorliegenden Studie, Kraftfahrtbundesamt, Flensburg
Kies (2017)	Kies, 2017: A contribution to the analysis of fuel efficiency measures for heavy duty vehicles; Doctoral Thesis at TU Graz; 2017
Prognos (2013)	ProgTrans/Prognos: Ermittlung der Wirkungen einer weiterentwickelten Lkw-Maut auf Endenergieverbrauch und CO ₂ -Emissionen. Basel
Prognos, Fraunhofer ISI, TU München, Giger (2016)	Prognos, Fraunhofer ISI, Technische Universität München, Dr. Bernd Geiger: Datenbasis zur Bewertung von Energieeffizienzmaßnahmen in der Zeitreihe 2005 – 2014, i. A. des Umweltbundesamtes, Basel/Berlin, Karlsruhe, München
Prognos (2016b)	World Transport Report 2015/2016. Analysis and forecasts of freight transport. Basel
Riccardo/ICCT (2017)	Heavy Duty Vehicles Technology Potential and Cost Study. Final Report for the International Council on Clean Transportation (ICCT). ED 61727 Issue Number 5b Date 27/04/2017
TUG (2012) a	University of Technology Graz: LOT 2: Reduction and Testing of Greenhouse Gas Emissions from Heavy Duty Vehicles. Graz

TUG (2012) b	University of Technology Graz: LOT 3: Development and validation of a methodology for monitoring and certification of greenhouse gas emissions from heavy duty vehicles through vehicle simulation, Final report; Service contract CLIMA.C.2/SER/2012/0004; Report No. I 07/14/Rex EM-I 2012/08 699. Graz
UBA (2012)	Umweltbundesamt (UBA): Schätzung der Umweltkosten in den Bereichen Energie und Verkehr Dessau
UBA (2018)	Umweltbundesamt (UBA): Nationales Treibhausgasinventar (National Inventory Report), Bericht 15. Januar 2018, Weblink: http://cdr.eionet.europa.eu/de/eu/mmr/art07_inventory/ghg_inventory/envwldoww/ , Zugriff: 19. Februar 2018, Dessau
4. BFStrMGÄndG	Viertes Gesetz zur Änderung des Bundesfernstraßenmautgesetzes, vom 27.03.2017, veröffentlicht am 30.03.2017 im Bundesgesetzblatt Teil I, 2017, Nr. 15, S. 564
1999/62/EG EG-Richtlinie	Richtlinie 1999/62/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 17. Juni 1999 über die Erhebung von Gebühren für die Benutzung bestimmter Verkehrswege durch Schwere Nutzfahrzeuge, Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften, L 187, 20. Juli 1999, http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX:31999L0062
2011/76/EU EU-Richtlinie	Richtlinie 2011/76/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 27. September 2011 zur Änderung der Richtlinie 1999/62/EG über die Erhebung von Gebühren für die Benutzung bestimmter Verkehrswege durch Schwere Nutzfahrzeuge Text von Bedeutung für den EWR, Amtsblatt der Europäischen Union, L 269, 14. Oktober 2011, http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX:32011L0076
2011/582/EU EU-Verordnung	Verordnung (EU) Nr. 582/2011 der Kommission vom 25. Mai 2011 zur Durchführung und Änderung der Verordnung (EG) Nr. 595/2009 des Europäischen Parlaments und des Rates hinsichtlich der Emissionen von schweren Nutzfahrzeugen (Euro VI) und zur Änderung der Anhänge I und III der Richtlinie 2007/46/EG des Europäischen Parlaments und des Rates Text von Bedeutung für den EWR, Amtsblatt der Europäischen Union, L 167, 25. Juni 2011, http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX:32011R0582
2012/1230/EU EU-Verordnung	Verordnung (EU) Nr. 1230/2012 der Kommission vom 12. Dezember 2012 zur Durchführung der Verordnung (EG) Nr. 661/2009 des Europäischen Parlaments und des Rates hinsichtlich der Anforderungen an die Typgenehmigung von Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern bezüglich ihrer Massen und Abmessungen und zur Änderung der Richtlinie 2007/46/EG des Europäischen Parlaments und des Rates Text

	von Bedeutung für den EWR, Amtsblatt der Europäischen Union, L 353, 21. Dezember 2012, http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=OJ:L:2012:353:TOC
2015/719/EU EU-Richtlinie	Richtlinie (EU) 2015/719 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 29. April 2015 zur Änderung der Richtlinie 96/53/EG des Rates zur Festlegung der höchstzulässigen Abmessungen für bestimmte Straßenfahrzeuge im innerstaatlichen und grenzüberschreitenden Verkehr in der Gemeinschaft sowie zur Festlegung der höchstzulässigen Gewichte im grenzüberschreitenden Verkehr (Text von Bedeutung für den EWR). Amtsblatt der Europäischen Union, L 115, 6. Mai 2015, http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/ALL/?uri=CELEX:32015L0719
2017/0114/COD/EU Ordentliches EU-Gesetzgebungsverfahren	Verfahren zu 2017/275/EU final: Vorschlag für eine Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates RICHTLINIE DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES zur Änderung der Richtlinie 1999/62/EG über die Erhebung von Gebühren für die Benutzung bestimmter Verkehrswege durch Schwere Nutzfahrzeuge, http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/HIS/?uri=CELEX:52017PC0275 , http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/HIS/?uri=CELEX:52017PC0276 , 16.02.2018
2017/275/EU final Vorschlag EU-Richtlinie	Vorschlag für eine Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates RICHTLINIE DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES zur Änderung der Richtlinie 1999/62/EG über die Erhebung von Gebühren für die Benutzung bestimmter Verkehrswege durch schwere Nutzfahrzeuge, http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX:52017PC0275 , 16.02.2018
2017/0111/COD/EU Ordentliches EU-Gesetzgebungsverfahren	Verfahren 2017/0111/COD: COM (2017) 279: Vorschlag für eine VERORDNUNG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES über die Überwachung und Meldung der CO ₂ -Emissionen und des Kraftstoffverbrauchs neuer schwerer Nutzfahrzeuge, http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/HIS/?uri=CELEX:52017PC0279
2017/2400/EU EU-Verordnung	Verordnung (EU) 2017/2400 der Kommission vom 12. Dezember 2017 zur Durchführung der Verordnung (EG) Nr. 595/2009 des Europäischen Parlaments und des Rates hinsichtlich der Bestimmung der CO ₂ -Emissionen und des Kraftstoffverbrauchs von schweren Nutzfahrzeugen sowie zur Änderung der Richtlinie 2007/46/EG des Europäischen Parlaments und des Rates sowie der Verordnung (EU) Nr. 582/2011 der Kommission (Text von Bedeutung für den EWR.), Amtsblatt der Europäischen Union, L 349, 29. Dezember 2017, http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=OJ:L:2017:349:TOC

Anhang A: Technische Informationen zur Einführung der CO₂-Zertifizierung für Schwere Nutzfahrzeuge

Auszug aus der EU-Richtlinie [2017/2400/EU] zur Bestimmung der CO₂-Emissionen und des Kraftstoffverbrauchs von Schwere Nutzfahrzeugen:

Transitional provisions

1. Where the obligations referred to in Article 9 have not been complied with, Member States shall prohibit the registration, sale or entry into service of:

(a) vehicles in the groups 4, 5, 9 and 10, as defined in Table 1 of Annex I, as from 1 July 2019;

(b) vehicles in the groups 1, 2, and 3, as defined in Table 1 of Annex I, as from 1 January 2020;

(c) vehicles in the groups 11, 12 and 16, as defined in Table 1 of Annex I, as from 1 July 2020.

2. Notwithstanding paragraph 1(a), the obligations referred to in Article 9 shall apply from 1 January 2019 with regard to all vehicles in the groups 4, 5, 9 and 10 with production date on or after 1 January 2019. The production date shall be the date of signature of the certificate of conformity or the date of issue of the individual approval certificate.

Demnach müssen Fahrzeuge in SNF-Gruppen, die vorwiegend im Fernverkehr eingesetzt werden (Gruppen 4, 5, 9, und 10) ab 1.1.2019 (Produktionsdatum) mit VECTO zertifiziert werden. Ab 1.7.2019 dürfen keine Fahrzeuge dieser Gruppen, die keinen individuellen CO₂-Wert in den Fahrzeugpapieren ausweisen, mehr neu zum Verkehr zugelassen werden. Kleine Lkw Klassen (Gruppen 1, 2 und 3) müssen spätestens ab 1.1.2020 für eine Straßenzulassung mit VECTO zertifiziert worden sein. Fahrzeuge der Gruppen 11, 12 und 16 (6x4 und 8x4 Fahrzeuge mit wenig Fahrleistung auf Autobahnen) folgen mit Juli 2020.

Davon ausgehend wird angenommen, dass im ersten Halbjahr 2019 ca. 50% der neu zugelassenen Fernverkehrs-Sattelzugmaschinen (unter anderem VECTO-5) bereits einen individuellen CO₂-Wert ausweisen können. Im zweiten Halbjahr 2019 sollte dieser Anteil dann 100 % betragen. Bei Verteiler-Lkw (unter anderem VECTO-2) werden Neufahrzeuge erst 2020 durchgängig mit individuellen CO₂-Werten versehen sein.