



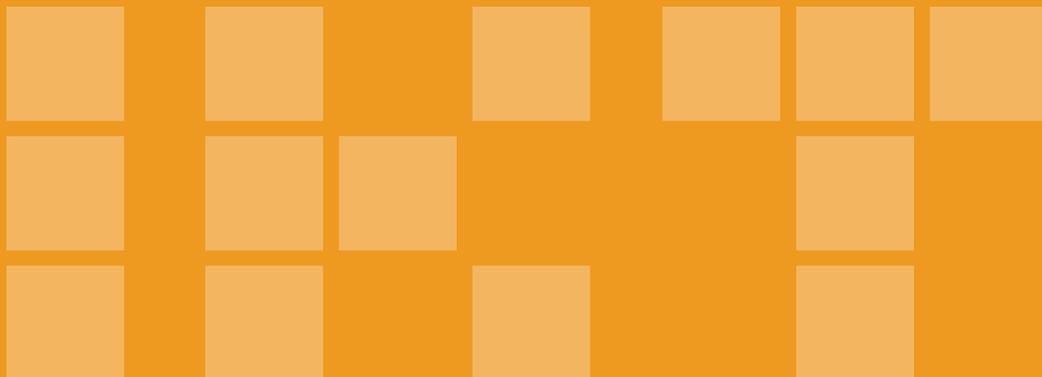
# Wirtschaftlichkeit von Elektromobilität in gewerblichen Anwendungen

## Betrachtung von Gesamtnutzungskosten, ökonomischen Potenzialen und möglicher CO<sub>2</sub>-Minderung

im Auftrag der Begleitforschung zum BMWi Förderschwerpunkt  
IKT für Elektromobilität II: Smart Car – Smart Grid – Smart Traffic

## Abschlussbericht

Aktualisierte Fassung\* | April 2015



**\* Hinweis zur aktualisierten Fassung des Abschlussberichts:**

In der ursprünglichen Fassung des Berichts (Februar 2015) wurde die Wirkung einer Sonder-AfA für Elektrofahrzeuge unvollständig dargestellt. In der vorliegenden aktualisierten Fassung wurden die Annahmen zur Sonder-AfA und die Ergebnisse der zugehörigen Sensitivitätsbetrachtung entsprechend korrigiert.

**Autoren:**

Florian Hacker  
Rut von Waldenfels  
Moritz Mottschall

Öko-Institut e.V.  
Schicklerstr. 5–7  
10179 Berlin

**Redaktionskreis**

Der Redaktionskreis ist im Rahmen des Förderschwerpunkts „IKT für Elektromobilität II“ des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) aus der Task Force „Nutzfahrzeuge“ hervorgegangen. Dieser hat die Themenbereiche der Studie definiert sowie als Schnittstelle zu den Förderprojekten fungiert. So konnten Praxiserfahrungen aus den Projekten in die Erarbeitung der Studie einfließen. Diese wurde jedoch unabhängig durch das Öko-Institut e.V. erstellt.

Eberhard Backer	Hochschule Kempten
Dr. Thomas Becks	VDE e.V.
Dr. Harald Hempel	DAKO Systemtechnik und Service GmbH
Benedikt Jäger	Technische Universität München
Markus Kroner	Technische Universität Dortmund
Karl-Josef Kuhn	Siemens AG
Paul Leibold	Vispiron GmbH
Serge Runge	Universität Oldenburg
Johannes Schmidt	Universität Göttingen
Frank Schnellhardt	INNOMAN GmbH
Michael Schygulla	PTV Group

Leitung: Dr. Moritz Vogel  
Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V.  
Stresemannallee 15  
60596 Frankfurt

# Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis .....	I
Tabellenverzeichnis .....	III
Abbildungsverzeichnis .....	VI
Das Wichtigste in Kürze .....	1
1 Hintergrund und Ziele .....	6
1.1 Motivation .....	6
1.2 Projektziele .....	7
1.3 Überblick über methodisches Vorgehen .....	7
2 Methodik und Parameterdiskussion .....	10
2.1 Einleitung .....	10
2.2 Gesamtkostenbetrachtung – der TCO-Modellansatz .....	10
2.3 Parameter der Gesamtkostenbetrachtung .....	12
2.4 Wirtschaftliches Potenzial von Elektrofahrzeugen .....	42
2.5 Potenzial zur Minderung der CO <sub>2</sub> -Emissionen .....	44
3 Ergebnisse – Pkw und leichte Nutzfahrzeuge .....	46
3.1 Allgemeine Gesamtkostenbetrachtung am Beispiel eines Pkw mittlerer Größe .....	46
3.2 Wichtige Einflussgrößen .....	56
3.3 Ökonomisches Potenzial und mögliche CO <sub>2</sub> -Minderung bis zum Jahr 2020 .....	59
3.4 Zwischenfazit .....	65
3.5 Anwendungsspezifische Ergebnisse .....	65
3.6 Zwischenfazit .....	78

4	Ergebnisse – Schwere Nutzfahrzeuge .....	80
4.1	Linienbusse am Beispiel eines Standardstadtbusses .....	80
4.2	Schwere Nutzfahrzeuge am Beispiel eines mittelschweren Lkw .....	101
4.3	Mögliche CO <sub>2</sub> -Minderung in den Anwendungen der schweren Nutzfahrzeuge .....	107
4.4	Zwischenfazit .....	108
4.5	Exkurs: Elektromobilität in der Intralogistik am Beispiel Flughafen.....	108
5	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen .....	121
5.1	Hintergrund und Ziele des Vorhabens.....	121
5.2	Methodisches Vorgehen .....	121
5.3	Zentrale Ergebnisse .....	122
5.4	Einordnung der Ergebnisse.....	126
5.5	Schlussfolgerungen.....	129
6	Anhang.....	A
6.1	Nettolistenpreise batterieelektrischer Pkw .....	A
6.2	Ergebnisse Pkw und leichte Nutzfahrzeuge .....	B
6.3	Ergebnisse Linienbusse und Lkw .....	J

# Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Relative Preiserhöhungen bzw. -minderung zur Bildung eines optimistischen bzw. pessimistischen Szenarios in Referenz zum mittleren Szenario.....	13
Tabelle 2: Verwendete Energiepreise für Pkw und leichte Nutzfahrzeuge und Lkw bis 2030 für die verschiedenen Szenarien dargestellt exkl. Mehrwertsteuer.....	17
Tabelle 3: Verwendete Energiepreise für Linienbusse bis 2030 für die verschiedenen Szenarien dargestellt exkl. Mehrwertsteuer.....	18
Tabelle 4: Zuordnung der relevanten KBA-Segmente zu den verwendeten Größenklassen für Pkw.....	21
Tabelle 5: Zuordnung der Größenklassen für leichte Nutzfahrzeuge (Lnf). ....	22
Tabelle 6: Angenommene mittlere reale Kraftstoffverbräuche und Nettolistenpreise für Benzin- und Dieselfahrzeuge im Jahr 2014 und 2020.....	23
Tabelle 7: Angenommene Kraftstoffverbräuche und Nettokaufpreise Linienbusse und Lkw im Jahr 2014 und 2020.....	24
Tabelle 8: Eigenschaften batterieelektrischer Fahrzeuge der Kategorie Pkw und leichte Nutzfahrzeuge (Lnf).....	27
Tabelle 9: Beispielfahrzeuge für batterieelektrische Pkw und leichte Nutzfahrzeuge in Serienproduktion. ....	27
Tabelle 10: Eigenschaften batterieelektrischer Fahrzeuge der Kategorie Linienbusse und mittelschwere Lkw. ....	30
Tabelle 11: Beispielfahrzeuge für batterieelektrische Busse.....	30
Tabelle 12: Beispielfahrzeuge für batterieelektrische Lkw.....	31
Tabelle 13: KFZ-Steuersätze für Pkw und leichte Nutzfahrzeuge und Antriebsarten. ....	33
Tabelle 14: Mittlere Versicherungsbeiträge für Pkw und leichte Nutzfahrzeuge differenziert nach Antriebsart.....	33
Tabelle 15: Kilometerbezogene Wartungskosten für Pkw und leichte Nutzfahrzeuge differenziert nach Antriebsart. ....	35
Tabelle 16: Versicherungsbeiträge pro Jahr für Linienbusse und Lkw differenziert nach Antriebsart.....	36
Tabelle 17: Kilometerbezogene Wartungskosten für Linienbusse und Lkw differenziert nach Antriebsart.....	36

Tabelle 18: Investitionskosten für die Ladeinfrastruktur bei Linienbussen und Lkw. ....	38
Tabelle 19: Emissionsfaktoren CO <sub>2</sub> -Äquivalente (Well-to-Wheel) der verschiedenen Kraftstoffarten für die Jahre 2014, 2020, 2025 und 2030. (Schmied & Mottschall 2014) und (IINAS 2014).....	44
Tabelle 20: Standardparameterausprägungen für einen Pkw der Größenklasse mittel. ....	48
Tabelle 21: Parameterausprägungen für die Anwendung Pkw im Lieferverkehr. ....	67
Tabelle 22: Parameterausprägungen für die Anwendung Pkw im Taxigewerbe. ....	69
Tabelle 23: Ausgewählte Daten des im Projekt "Adaptive City Mobility" konzipierten Leichtfahrzeugs zum Einsatz im Taxigewerbe.....	72
Tabelle 24: Parameterausprägungen für die Anwendung leichtes Nutzfahrzeug im Handwerk. ....	73
Tabelle 25: Parameterausprägungen für die Anwendung leichtes Nutzfahrzeug im KEP-Einsatz (Stadtgebiet). ....	75
Tabelle 26: Parameterausprägungen für die Anwendung leichtes Nutzfahrzeug im KEP-Einsatz (ländlicher Raum).....	77
Tabelle 27: Standardparameterausprägungen für einen 12 m-Standardlinienbus (overnight charging).....	82
Tabelle 28: Standardparameterausprägungen für einen 12 m-Standardlinienbus (opportunity charging).....	93
Tabelle 29: Standardparameterausprägungen für einen 18 m-Gelenkbus (opportunity charging) .....	95
Tabelle 30: Standardparameterausprägungen für einen Lkw mit einem zGG von 12 t im städtischen Lieferverkehr.....	102
Tabelle 31: Parameterausprägungen für den Kostenvergleich in der Fahrzeugklasse Flugzeugschlepper. ....	112
Tabelle 32: Parameterausprägungen für den Kostenvergleich in der Fahrzeugklasse Frachtschlepper. ....	116
Tabelle 33: Parameterausprägungen für den Kostenvergleich in der Fahrzeugklasse Gepäckschlepper.....	118
Tabelle 34: Standardparameterausprägungen für einen Pkw der Größenklasse klein. ....	B
Tabelle 35: Standardparameterausprägungen für einen Pkw der Größenklasse groß. ....	D

Tabelle 36: Standardparameterausprägungen für ein Lnf der Größenklasse klein. ....	F
Tabelle 37: Standardparameterausprägungen für ein Lnf der Größenklasse mittel/groß. ....	H

# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Überblick des methodischen Vorgehens im Projekt „Wirtschaftlichkeit von Elektromobilität in gewerblichen Anwendungen“ .....	9
Abbildung 2: Entwicklung des Batteriepreises für Pkw und leichte Nutzfahrzeuge (exkl. MwSt.) .....	19
Abbildung 3: Entwicklung des Batteriepreises für Lkw und Linienbusse (exkl. MwSt.) .....	19
Abbildung 4: Alternative Batteriepreisentwicklung für Lkw und Linienbusse (exkl. MwSt.).....	20
Abbildung 5: Nettolistenpreise Pkw und Lnf im Jahr 2014 und 2020 für die verschiedenen Antriebsarten und Größenklassen am Beispiel des mittleren Szenarios. ....	28
Abbildung 6: Verkaufspreise Linienbusse und Lkw im Jahr 2014 und 2020 für die verschiedenen Antriebsarten am Beispiel des mittleren Szenarios. ....	31
Abbildung 7: Pkw-mittel mit Anschaffungsjahr 2014. Gesamtkosten in Abhängigkeit der Fahrleistung. ....	49
Abbildung 8: Pkw-mittel mit Anschaffungsjahr 2020. Gesamtkosten in Abhängigkeit der Fahrleistung. ....	50
Abbildung 9: Vergleich der Gesamtkosten eines Pkw-mittel als Benzin- und Dieselfahrzeug mit Anschaffungsjahr 2014 in Abhängigkeit der Fahrleistung.....	51
Abbildung 10: Pkw-mittel mit einer Jahresfahrleistung von 15.000 km. Gesamtkosten in Abhängigkeit des Anschaffungsjahres. ....	52
Abbildung 11: Pkw-mittel mit Anschaffungsjahr 2018 unter Annahme des mittleren Szenarios. Für die Elektrofahrzeugvariante mit und ohne Möglichkeit zur steuerlichen Absetzung von zusätzlich 50 % des Fahrzeugpreises im Jahr der Anschaffung (Sonder-AfA). Gesamtkosten in Abhängigkeit der Fahrleistung. ....	53
Abbildung 12: Pkw-mittel mit einer Jahresfahrleistung von 15.000 km unter Annahme des mittleren Szenarios. Für die Elektrofahrzeugvariante mit und ohne Möglichkeit zur steuerlichen Absetzung von zusätzlich 50 % des Fahrzeugpreises im Jahr der Anschaffung (Sonder-AfA). Gesamtkosten in Abhängigkeit des Anschaffungsjahres. ....	54
Abbildung 13: Pkw-mittel mit Anschaffungsjahr 2018 und unter der Annahme des mittleren Szenarios. Elektrofahrzeugvariante mit und ohne	

Reduktion des Strompreises. Gesamtkosten in Abhängigkeit der Fahrleistung.....	55
Abbildung 14: Pkw-mittel mit einer Jahresfahrleistung von 15.000 km und unter der Annahme des mittleren Szenarios. Für die Elektrofahrzeugvariante mit und ohne Reduktion des Strompreises. Gesamtkosten in Abhängigkeit des Anschaffungsjahres. ....	56
Abbildung 15: Gesamtkostendifferenz zwischen Elektro- und Dieselfahrzeug in Abhängigkeit von Parametervariationen. Darstellung für Pkw-mittel mit Anschaffungsjahr 2014, einer Jahresfahrleistung von 15.000 km und unter der Annahme des mittleren Szenarios.....	57
Abbildung 16: Gesamtkosten in Abhängigkeit der Haltedauer des Erstnutzers für verschiedene Methoden der Restwertberechnung für Elektrofahrzeuge. Darstellung für einen Pkw mittlerer Größe mit Anschaffungsjahr 2014, einer Jahresfahrleistung von 15.000 km und unter der Annahme des mittleren Szenarios. ....	58
Abbildung 17: Gesamtbestand gewerblicher Pkw und Lnf im Jahr 2010. Quelle: Hochrechnung KID 2010.....	60
Abbildung 18: Ökonomisches Potenzial von Elektrofahrzeugen bis zum Jahr 2020 für das mittlere Szenario inklusive der Variation mehrerer Parameter sowie für das optimistische Szenario. ....	61
Abbildung 19: Anteil des ökonomischen Potenzials am Fahrzeuggesamtbestand der jeweiligen Größenklasse.....	62
Abbildung 20: CO <sub>2</sub> -Äquivalente – Einsparpotenzial bei Erschließung des ökonomischen Potenzials von gewerblichen Elektrofahrzeugen bis 2020.....	63
Abbildung 21: Ökonomisches Potenzial von Elektrofahrzeugen bis zum Jahr 2020 für das mittlere Szenario sowie Berücksichtigung von Fahrzeugen mit einem Gesamtkostennachteil von bis zu 2.000 €. .	64
Abbildung 22: Gesamtkosten für die Anwendung Pkw im Lieferverkehr mit Größenklasse Pkw-klein für die Jahre 2014 und 2020 im Vergleich.	68
Abbildung 23: Gesamtkosten für die Anwendung Pkw im Taxigewerbe mit Größenklasse Pkw-groß für die Jahre 2014 und 2020 im Vergleich.	70
Abbildung 24: Im Projekt "Adaptive City Mobility" konzipiertes Leichtfahrzeug für den Einsatz als eTaxi. ....	71
Abbildung 25: Gesamtkosten für die Anwendung leichtes Nutzfahrzeug im Handwerk mit Größenklasse Lnf-klein für die Jahre 2014 und 2020 im Vergleich.....	74

Abbildung 26: Gesamtkosten für die Anwendung leichtes Nutzfahrzeug im KEP-Einsatz (Stadtgebiet) mit Größenklasse Lnf-mittel/groß für die Jahre 2014 und 2020 im Vergleich. ....	76
Abbildung 27: Gesamtkosten für die Anwendung leichtes Nutzfahrzeug im KEP-Einsatz (ländlicher Raum) mit Größenklasse Lnf-mittel/groß für die Jahre 2014 und 2020 im Vergleich. ....	77
Abbildung 28: Über die Haltedauer durchschnittliche Emissionen der einzelnen Anwendungen pro Fahrzeug und pro Jahr im Vergleich für verschiedene Kraftstoffe. ....	78
Abbildung 29: 12 m-Standardlinienbus mit Anschaffungsjahr 2014. Gesamtkosten in Abhängigkeit der Fahrleistung. ....	83
Abbildung 30: 12 m-Standardlinienbus mit Anschaffungsjahr 2020. Gesamtkosten in Abhängigkeit der Fahrleistung. ....	84
Abbildung 31: 12 m-Standardlinienbus mit einer Fahrleistung von 60.000 km/a. Gesamtkosten in Abhängigkeit des Anschaffungsjahres. ....	85
Abbildung 32: Gesamtkosten eines 12 m-Standardlinienbus für die Jahre 2014 und 2020 im Vergleich. ....	86
Abbildung 33: Gesamtkostendifferenz zwischen dem Elektrofahrzeug und Dieselfahrzeug in Abhängigkeit von Parametervariationen. Darstellung für einen 12 m-Standardlinienbus mit Anschaffungsjahr 2014, einer Fahrleistung von 60.000 km/a und unter der Annahme des mittleren Szenarios. ....	87
Abbildung 34: Gesamtkosten in Abhängigkeit der Haltedauer für verschiedene Methoden der Restwertberechnung für Elektrofahrzeuge. Darstellung für einen 12 m Standardlinienbus mit Anschaffungsjahr 2014, einer Fahrleistung von 60.000 km/a und unter der Annahme des mittleren Szenarios. ....	89
Abbildung 35: 12 m-Standardlinienbus mit einer Fahrleistung von 60.000 km/a unter Annahme des mittleren Szenarios. Im Vergleich für die Elektrofahrzeugvariante: Szenarien der Batteriekostenentwicklung im Vergleich. Gesamtkosten in Abhängigkeit des Anschaffungsjahres. ....	90
Abbildung 36: 12 m-Standardlinienbus mit einer Fahrleistung von 60.000 km/a unter Annahme des mittleren Szenarios. Im Vergleich für die Elektrofahrzeugvariante: Szenarien der Kosten der Ladeinfrastruktur im Vergleich. Gesamtkosten in Abhängigkeit des Anschaffungsjahres. ....	91

Abbildung 37: 12 m-Standardlinienbus (opportunity charging) mit einer Fahrleistung von 60.000 km/a. Gesamtkosten in Abhängigkeit des Anschaffungsjahres. ....	94
Abbildung 38: 12 m-Standardlinienbus mit einer Fahrleistung von 60.000 km/a unter Annahme des mittleren Szenarios. Im Vergleich für die Elektrofahrzeugvariante: Szenarien der Kosten der Ladeinfrastruktur im Vergleich. Gesamtkosten in Abhängigkeit des Anschaffungsjahres. ....	94
Abbildung 39: 18 m-Gelenkbus mit einer Fahrleistung von 60.000 km/a unter Annahme des mittleren Szenarios. Im Vergleich für die Elektrofahrzeugvariante: Szenarien der Kosten der Ladeinfrastruktur im Vergleich. Gesamtkosten in Abhängigkeit des Anschaffungsjahres. ....	96
Abbildung 40: Gesamtkosten eines 18 m-Gelenkbusses (opportunity charging) für die Jahre 2014 und 2020 im Vergleich .....	97
Abbildung 41: Gesamtbestand an Stadtbussen differenziert nach Bustyp. Eigene Auswertung. ....	98
Abbildung 42: Ökonomisches Potenzial von Elektrobussen bis zum Jahr 2020 bzw. 2025 für das mittlere Szenario, für das optimistische Szenario und für ein Szenario mit optimistischer Batterierisikowentwicklung .	99
Abbildung 43 CO <sub>2</sub> -Äquivalente – Einsparpotenzial bei Erschließung des ökonomischen Potenzials von Elektrobussen (opportunity charging) in 2020 bzw. 2025. ....	100
Abbildung 44: Lkw mit einem zGG von 12 t im städtischen Lieferverkehr mit Anschaffungsjahr 2014. Gesamtkosten in Abhängigkeit der Fahrleistung.....	103
Abbildung 45: Lkw mit einem zGG von 12 t im städtischen Lieferverkehr mit Anschaffungsjahr 2020. Gesamtkosten in Abhängigkeit der Fahrleistung.....	103
Abbildung 46: Lkw mit einem zGG von 12 t im städtischen Lieferverkehr mit Anschaffungsjahr 2014 unter Annahme des mittleren Szenarios. Elektrofahrzeugvariante mit und ohne Reduktion des Strompreises. Gesamtkosten in Abhängigkeit der Fahrleistung. ....	104
Abbildung 47: Lkw mit einem zGG von 12 t im städtischen Lieferverkehr mit einer Fahrleistung von 30.000 km/a unter Annahme des mittleren Szenarios. Im Vergleich für die Elektrofahrzeugvariante: Szenarien der Batteriekostenentwicklung im Vergleich. Gesamtkosten in Abhängigkeit des Anschaffungsjahres.....	105

Abbildung 48: Gesamtkosten eines Lkw mit einem zGG von 12 t im städtischen Lieferverkehr für die Jahre 2014 und 2020 im Vergleich .....	106
Abbildung 49: Durchschnittliche CO <sub>2</sub> -Äquivalent-Emissionen der einzelnen Anwendungen pro Fahrzeug und pro Jahr im Vergleich für verschiedene Kraftstoffe (Anschaffungsjahr 2014).....	107
Abbildung 50: Elektrischer Flugzeugschlepper Schopf F110 electric im Einsatz am Flughafen Stuttgart .....	110
Abbildung 51: Gesamtkosten eines Flugzeugschleppers im Vergleich für ein Dieselfahrzeug und ein Elektrofahrzeug im Jahr 2014.....	113
Abbildung 52: Elektrische Fracht- und Gepäckschlepper im Einsatz am Flughafen Stuttgart .....	115
Abbildung 53: Gesamtkosten eines Frachtschleppers im Vergleich für ein Dieselfahrzeug und ein Elektrofahrzeug im Jahr 2014.....	116
Abbildung 54: Gesamtkosten eines Gepäckschleppers im Vergleich für ein serielles Dieselhybridfahrzeug und ein Elektrofahrzeug im Jahr 2014.....	119
Abbildung 55: Treibhausgasemissionen der einzelnen Anwendungen pro Fahrzeug und pro Jahr im Vergleich für verschiedene Kraftstoffe im Jahr 2014. ....	120
Abbildung 56: Zusammensetzung des Nettolistenpreises der Elektrofahrzeuge für das Jahr 2014 für die unterschiedlichen Fahrzeugklassen. ....	A
Abbildung 57: Pkw - klein mit Anschaffungsjahr 2014. Gesamtkosten in Abhängigkeit der Fahrleistung. ....	B
Abbildung 58: Pkw - klein mit Anschaffungsjahr 2020. Gesamtkosten in Abhängigkeit der Fahrleistung. ....	C
Abbildung 59: Pkw - klein mit einer Fahrleistung von 10.000 km/a. Gesamtkosten in Abhängigkeit des Anschaffungsjahres. ....	C
Abbildung 60: Pkw - groß mit Anschaffungsjahr 2014. Gesamtkosten in Abhängigkeit der Fahrleistung. ....	D
Abbildung 61: Pkw – groß mit Anschaffungsjahr 2020. Gesamtkosten in Abhängigkeit der Fahrleistung. ....	E
Abbildung 62: Pkw - groß mit einer Fahrleistung von 25.000 km/a. Gesamtkosten in Abhängigkeit des Anschaffungsjahres. ....	E
Abbildung 63: Lnf - klein mit Anschaffungsjahr 2014. Gesamtkosten in Abhängigkeit der Fahrleistung. ....	F
Abbildung 64: Lnf - klein mit Anschaffungsjahr 2020. Gesamtkosten in Abhängigkeit der Fahrleistung. ....	G

Abbildung 65: Lnf - klein mit einer Fahrleistung von 20.000 km/a. Gesamtkosten in Abhängigkeit des Anschaffungsjahres. ....	G
Abbildung 66: Lnf - groß mit Anschaffungsjahr 2014. Gesamtkosten in Abhängigkeit der Fahrleistung. ....	H
Abbildung 67: Lnf - groß mit Anschaffungsjahr 2020. Gesamtkosten in Abhängigkeit der Fahrleistung. ....	I
Abbildung 68: Lnf - groß mit einer Fahrleistung von 20.000 km/a. Gesamtkosten in Abhängigkeit des Anschaffungsjahres. ....	I
Abbildung 69: 12 m-Standardlinienbus (opportunity charging) mit Anschaffungsjahr 2014. Gesamtkosten in Abhängigkeit der Fahrleistung. ....	J
Abbildung 70: 12 m-Standardlinienbus (opportunity charging) mit Anschaffungsjahr 2020. Gesamtkosten in Abhängigkeit der Fahrleistung. ....	J
Abbildung 71: 12 m-Standardlinienbus (opportunity charging) mit einer Fahrleistung von 60.000 km/a unter Annahme des mittleren Szenarios. Im Vergleich für die Elektrofahrzeugvariante: Szenarien der Batteriekostenentwicklung im Vergleich. Gesamtkosten in Abhängigkeit des Anschaffungsjahres. ....	K
Abbildung 72: Gesamtkosten in Abhängigkeit der Haltedauer für verschiedene Methoden der Restwertberechnung für Elektrofahrzeuge. Darstellung für einen 12 m Standardlinienbus (opportunity charging) mit Anschaffungsjahr 2014, einer Fahrleistung von 60.000 km/a und unter der Annahme des mittleren Szenarios. ....	K
Abbildung 73: Gesamtkosten eines 12 m-Standardlinienbus (opportunity charging) für die Jahre 2014 und 2020 im Vergleich. ....	L
Abbildung 74: 18 m-Gelenkbus (opportunity charging) mit Anschaffungsjahr 2014. Gesamtkosten in Abhängigkeit der Fahrleistung. ....	M
Abbildung 75: 18 m-Gelenkbus (opportunity charging) mit Anschaffungsjahr 2020. Gesamtkosten in Abhängigkeit der Fahrleistung. ....	M
Abbildung 76: Gesamtkosten in Abhängigkeit der Haltedauer für verschiedene Methoden der Restwertberechnung für Elektrofahrzeuge. Darstellung für einen 18 m-Gelenkbus (opportunity charging) mit Anschaffungsjahr 2014, einer Fahrleistung von 60.000 km/a und unter der Annahme des mittleren Szenarios. ....	N
Abbildung 77: Gelenkbus (opportunity charging) mit einer Fahrleistung von 60.000 km/a unter Annahme des mittleren Szenarios. Im Vergleich für die Elektrofahrzeugvariante: Szenarien der	

Batteriekostenentwicklung im Vergleich. Gesamtkosten in Abhängigkeit des Anschaffungsjahres.....	N
Abbildung 78: 18 m-Gelenkbus (opportunity charging) mit einer Fahrleistung von 60.000 km/a. Gesamtkosten in Abhängigkeit des Anschaffungsjahres. ....	O
Abbildung 79: Lkw mit einem zGG von 12t im städtischen Lieferverkehr mit einer Fahrleistung von 30.000 km/a. Gesamtkosten in Abhängigkeit des Anschaffungsjahres.....	O
Abbildung 80: Gesamtkosten eines Lkw mit einem zGG von 12t im städtischen Lieferverkehr für die Jahre 2014 und 2020 im Vergleich .....	P

## Das Wichtigste in Kürze

Elektromobilität befindet sich in einer noch frühen Marktphase. Deutschland hat sich für das Jahr 2020 das Ziel von einer Million Elektrofahrzeugen gesetzt. In der aktuellen Diskussion wird häufig auf die besondere Bedeutung der gewerblich zugelassenen Fahrzeuge für den Markthochlauf von Elektromobilität hingewiesen. In diesem Kontext werden unter anderem die häufig stärkere Planbarkeit des Fahrzeugeinsatzes und finanzielle bzw. steuerliche Vorteile im Vergleich zu privaten Fahrzeugzulassungen sowie die hohe Bedeutung gewerblicher Zulassungen für den Neuwagenmarkt genannt. So konstatiert auch die Nationale Plattform Elektromobilität in ihrem aktuellen Fortschrittsbericht: „Ein besonderes Potenzial weisen [...] rein gewerbliche Flotten und Dienstwagen auf, die zusammen rund 60 Prozent des Neuwagenmarktes ausmachen. Hier sind die Fahrprofile oftmals gut planbar und Kaufentscheidungen stark an der Wirtschaftlichkeit orientiert“ (NPE 2014).

Ziel der Studie „Wirtschaftlichkeit von Elektromobilität in gewerblichen Anwendungen“ ist es, die Wirtschaftlichkeit von Elektrofahrzeugen im Vergleich zu konventionellen Fahrzeugvarianten für verschiedene Fahrzeugkategorien und unterschiedliche gewerbliche Anwendungsfälle bis zum Jahr 2020 anhand von Gesamtkostenanalysen zu betrachten. Auf Basis der Ergebnisse des Gesamtkostenvergleichs werden anschließend unter Berücksichtigung repräsentativer Daten zum Fahrzeugbestand und -einsatz das ökonomische Potenzial<sup>1</sup> zur Substitution konventioneller Fahrzeuge durch Elektrofahrzeuge in der jeweiligen Fahrzeugkategorie sowie die damit verbundene mögliche Minderung der Treibhausgasemissionen für den Betrachtungszeitraum bis zum Jahr 2020 quantifiziert.

Die Analysen umfassen im Kern die Fahrzeugkategorien Pkw, leichte Nutzfahrzeuge, mittelschwere Lkw und Linienbusse. Der Vergleich beschränkt sich in allen Fahrzeugkategorien auf batterieelektrische Fahrzeuge. Plug-in-Hybrid- und Range-Extender-Fahrzeuge, die nach gängiger Definition ebenfalls als Elektrofahrzeuge betrachtet werden, sind nicht Bestandteil der Wirtschaftlichkeits- und Potenzialanalysen.

Die durchgeführten Analysen ermöglichen es, frühe wirtschaftliche Potenziale von Elektromobilität in verschiedenen gewerblichen Anwendungsbereichen und für unterschiedliche Fahrzeugkategorien zu identifizieren und wichtige Einflussgrößen sowie Unsicherheiten in Bezug auf die Wirtschaftlichkeit von Elektrofahrzeugen aufzuzeigen. Die Studienergebnisse stellen somit eine fachliche Grundlage für die weitere Diskussion der Herausforderungen und möglicher Handlungsempfehlungen für den wirtschaftlichen Einsatz von Elektromobilität im gewerblichen Bereich dar.

<sup>1</sup> Das ökonomische / wirtschaftliche Potenzial bezeichnet die Anzahl an Fahrzeugen im Bestand, die im Betrachtungszeitraum unter den getroffenen Annahmen mit batterieelektrischem Antrieb im Vergleich zur konventionellen Fahrzeugvariante einen Gesamtkostenvorteil aufweisen.

Die wichtigsten Ergebnisse der Studie „Wirtschaftlichkeit von Elektromobilität in gewerblichen Anwendungen“ lassen sich in Kürze folgendermaßen zusammenfassen:

- Der batterieelektrische Antrieb kann bei hohen Jahresfahrleistungen und langer Haltedauer insbesondere bei Pkw und leichten Nutzfahrzeugen bereits kurzfristig schon Gesamtkostenvorteile gegenüber dem jeweiligen verbrennungsmotorischen Vergleichsfahrzeug aufweisen.
- Im Bereich der schweren Nutzfahrzeuge können Elektrofahrzeuge in den gewählten Anwendungsbereichen und unter den aktuellen Rahmenbedingungen hingegen, bedingt durch die höheren Anforderungen an die Batteriekapazität und deutlich höhere spezifische Batteriepreise, noch nicht wirtschaftlich betrieben werden.
- Auch hängt die Wirtschaftlichkeit von Elektromobilität bis zum Jahr 2020 maßgeblich von der Entwicklung der Rahmenbedingungen ab, die teilweise jedoch mit sehr hohen Unsicherheiten behaftet sind. Die wichtigsten Einflussgrößen stellen in allen Anwendungen die Entwicklung von Energiepreisen, der Batteriepreise sowie die Restwertentwicklung von Elektrofahrzeugen dar.
- Die unsichere Entwicklung zentraler Einflussgrößen wird in den Kostenbetrachtungen über Szenarien abgebildet. Im optimistischen Szenario ließen sich bis zum Jahr 2020 700.000 batterieelektrische Pkw und leichte Nutzfahrzeuge wirtschaftlich betreiben. Im mittleren Szenario reduziert sich die Anzahl auf 80.000 Fahrzeuge, im pessimistischen Szenario besteht kein ökonomisches Potenzial bis 2020. Die Einführung einer Sonder-AfA führt im mittleren Szenario zu einer Erhöhung des Potenzials auf 125.000 Fahrzeuge.
- Für Stadtbusse ist das wirtschaftliche Potenzial im mittleren Szenario unter den getroffenen Annahmen bis 2020 vernachlässigbar. Im optimistischen Szenario könnten bis zum Jahr 2020 etwa 40 % des Gesamtbestandes an Stadtbussen wirtschaftlich mit Elektrobussen betrieben werden. Dieses Potenzial setzt niedrige Kosten für die Ladeinfrastruktur voraus. Im pessimistischen Szenario besteht in diesem Zeitraum kein ökonomisches Potenzial.
- Elektrische Lkw im städtischen Verteilverkehr können unter den getroffenen Annahmen hingegen bis zum Jahr 2020 in keinem Szenario wirtschaftlich betrieben werden.
- Könnte das Potenzial von 700.000 batterieelektrischen Pkw und leichten Nutzfahrzeugen bis zum Jahr 2020 im optimistischen Szenario erschlossen werden, so wäre dies, unter der Voraussetzung einer vollständigen Bereitstellung des Strombedarfs aus regenerativen Energien, mit einer Minderung der verkehrsbedingten Treibhausgasemissionen im Jahr 2020 um 2,6 Millionen Tonnen verbunden.

- Würde das Potenzial an Elektrobussen des optimistischen Szenarios bis 2020 vollständig realisiert und der Strombezug aus rein erneuerbaren Quellen sichergestellt werden, könnten im Jahr 2020 etwa 1,3 Millionen Tonnen Treibhausgasemissionen eingespart werden.

Im Kontext der durchgeführten Wirtschaftlichkeits- und Potenzialbetrachtungen von Elektromobilität in gewerblichen Anwendungen sind folgende weitere Aspekte besonders relevant:

- Der Wegfall der Mehrwertsteuer und die Möglichkeit zur steuerlichen Absetzung der erhöhten Investitionskosten wirken sich in gewerblichen Anwendungen grundsätzlich und im Vergleich zu privaten Zulassungen günstig auf die Kostenbilanz von Elektrofahrzeugen aus.
- Die großen Unterschiede des ökonomischen Potenzials von Elektromobilität in den dargestellten Szenarien weist einerseits auf die hohe Relevanz der variierten Einflussgrößen hin, ist andererseits aber auch ein Indiz für den teilweise relativ geringen Kostenunterschied zwischen der elektrischen und konventionellen Fahrzeugvariante. Geringfügige Änderungen der Rahmenbedingungen können somit zu verhältnismäßig starken Veränderungen im wirtschaftlichen Potenzial führen.
- Insbesondere bei Fahrzeugen mit geringer Haltedauer durch den Erstnutzer stellt die Entwicklung des Fahrzeugrestwerts eine erhebliche Unsicherheit dar, die angesichts des frühen Marktstadiums von Elektromobilität nicht verlässlich prognostiziert werden kann.
- Die Analyse konkreter Anwendungsfälle zeigt wirtschaftliche Potenziale in Einsatzbereichen auf, die sich durch hohe Jahresfahrleistungen auszeichnen und teilweise auf die Verfügbarkeit geeigneter öffentlicher (Schnell-) Ladeinfrastruktur angewiesen sind, welche jedoch zum aktuellen Zeitpunkt nur in sehr geringem Maße verfügbar ist.
- Insbesondere bei Nutzfahrzeugen im städtischen Einsatz (z. B. Lieferfahrzeuge, Linienbusse) ist unter den gegebenen Rahmenbedingungen auch perspektivisch eine Wirtschaftlichkeit nur teilweise bzw. nicht gegeben. Verschärfte Lärm- bzw. Luftschadstoffemissionsvorschriften könnten jedoch wichtige Anreize für einen früheren Markteintritt darstellen. Ferner ist die Batteriepreisentwicklung für Nutzfahrzeuganwendungen mit sehr hohen Unsicherheiten behaftet. Sollte sich die Batteriepreise schon frühzeitig an die Entwicklung im Pkw-Bereich annähern, so würde dies zu einer deutlich früheren Wirtschaftlichkeit des batterieelektrischen Antriebs führen.
- Mit Ausnahme von Pkw stellt sich bei gewerblichen Fahrzeugen grundsätzlich die Problematik, dass dem identifizierten Potenzial bislang ein sehr beschränktes Modellangebot an Serien- bzw. Kleinserienfahrzeugen gegenüber steht.

In Bezug auf die Aussagekraft der Analysen sind folgende wichtige Einschränkungen hinsichtlich der Interpretation der Studienergebnisse festzuhalten:

- Der Modellansatz fokussiert auf den Wirtschaftlichkeitsvergleich unterschiedlicher Antriebsoptionen, da die Gesamtnutzungskosten ein zentrales Beschaffungskriterium im gewerblichen Bereich darstellen. Mögliche technische Nutzungsrestriktionen und Akzeptanzaspekte werden nicht bzw. nicht im Detail betrachtet, können für die Kaufentscheidung in der Praxis aber ebenfalls von Relevanz sein. Das in dieser Studie identifizierte wirtschaftliche Potenzial kann daher nicht automatisch mit einem tatsächlichen Marktpotenzial von batterieelektrischen Fahrzeugen im Wirtschaftsverkehr gleichgesetzt werden.
- Weitere Aspekte, die die Fahrzeugwahl in gewerblichen Anwendungen – und damit die Beschaffung batterieelektrischer Fahrzeuge sowohl positiv, wie auch negativ – beeinflussen können, im Rahmen dieses Vorhabens aber nicht bzw. nur in geringem Maße berücksichtigt wurden, sind u.a.:
  - Weitere Kosten, die mit der Umstellung des Fuhrparks auf Elektrofahrzeuge verbunden sein können (z. B. Fahrerschulungen, Werkstatt-erweiterung).
  - Die grundsätzliche Akzeptanz der Technologie bei den Nutzern bzw. möglicherweise weiterhin vorherrschende Informationsdefizite.
  - Mögliche Nutzungsrestriktionen durch die aktuell noch geringe Dichte der Ladeinfrastruktur, Nutzlastverluste, Reichweitenkonflikte sowie saisonale Effekte beim Stromverbrauch.
  - Emotionale Faktoren bei der Fahrzeugbeschaffung (z. B. Image einer Marke) sowie die mögliche positive Bewertung der Umwelteigenschaften von Elektromobilität.
  - Eine mögliche Mehrpreisbereitschaft für Elektrofahrzeuge.
  - Mögliche weitere monetäre Anreize, die noch nicht implementiert sind, bzw. nicht-monetäre Anreize, die die Attraktivität des Fahrzeug-einsatzes für den Nutzer erhöhen (z. B. Wegfall von Parkgebühren und Steuern, privilegierte Zufahrtsrechte und Parkmöglichkeiten).

Grundsätzlich zeigt der Gesamtkostenvergleich auf, dass Elektrofahrzeuge in gewerblichen Anwendungen teilweise bereits kurzfristig wirtschaftlich betrieben werden können. Hauptursachen sind im Vergleich zum privaten Einsatz besonders geeignete Fahrzeugnutzungsprofile sowie günstigere finanzielle bzw. steuerliche Rahmenbedingungen. Die Analysen weisen jedoch auch auf die besondere Relevanz der Entwicklung der Energiepreise, des Batteriepreises und der Restwertentwicklung der Fahrzeuge für die Wirtschaftlichkeit von Elektromobilität hin. Verlässlichere Aussagen zu deren zukünftigen Entwicklung würden die Unsicherheiten der Wirtschaftlichkeitsanalysen – und damit die Investitionsrisiken für Unternehmen – reduzieren. Ferner sind jedoch auch weitere nicht-monetäre Nutzungsrestriktionen zu beachten, die die Kaufentscheidung beeinflussen.

## 5 Das Wichtigste in Kürze

Wie die Realität zeigt, werden die identifizierten wirtschaftlichen Potenziale bisher in der Praxis nur in einem sehr geringen Maße tatsächlich erschlossen. Die Verringerung weiterhin bestehender Informationsdefizite, anderer Vorbehalte bezüglich der Fahrzeugnutzung sowie der verbleibenden Investitionsrisiken stellen daher weitere wichtige Voraussetzungen für den nachhaltigen Markterfolg von Elektrofahrzeugen im Wirtschaftsverkehr dar.

# 1 Hintergrund und Ziele

## 1.1 Motivation

Elektrofahrzeuge stellen mit aktuell etwa 10.000 Pkw-Neuzulassungen im Jahr 2014 und rund 24.000 Fahrzeugen im Bestand (KBA 2014a, 2014b) einen Anteil an den Gesamtneuzulassungen bzw. dem Gesamtbestand der Pkw von weit unter 1 % dar. Im Bereich der straßengebundenen Nutzfahrzeuge beschränkt sich der Einsatz elektrischer Antriebe weiterhin vorwiegend auf Vor- und Kleinserienfahrzeuge. Demgegenüber steht die Zielsetzung der Bundesregierung, bis zum Jahr 2020 eine Million Elektrofahrzeuge im deutschen Fahrzeugbestand zu etablieren (Deutsche Bundesregierung 2011). Um die Zielsetzung zum Markthochlauf von Elektromobilität zu erreichen, gilt es daher, Anwendungen zu identifizieren und zu erproben, die unter den gegebenen Rahmenbedingungen bereits technische und ökonomische Potenziale aufweisen bzw. mit bereits geringem finanziellen Mitteleinsatz erschlossen werden können.

In diesem Kontext kann der Einsatz von elektrisch betriebenen Fahrzeugen in gewerblichen Anwendungen im frühen Marktstadium von Elektromobilität eine wichtige Rolle spielen. So legen beispielsweise mehrere Studien (u.a. Plötz et al. 2013) nahe, dass der Einsatz von Elektrofahrzeugen in Unternehmensflotten im Vergleich zur privaten Nutzung in den nächsten Jahren Vorteile aufweist. So kann der Reichweitenrestriktion batterieelektrischer Fahrzeuge teilweise durch die Flexibilität eines Fahrzeugpools begegnet werden und durch die Installation von Ladestationen auf dem Betriebsgelände die geringe Verfügbarkeit öffentlicher Ladeinfrastruktur relativiert werden. Ferner zeigen mehrere Analysen zum Einsatz von gewerblichen Flottenfahrzeugen, dass deren Nutzungsmuster sich oftmals im Vergleich zu Privat-Pkw durch einen regelmäßigeren Einsatz und weniger variable Tagesfahrleistungen auszeichnen und somit durch weniger Nutzungskonflikte und ein früheres Erreichen der Wirtschaftlichkeitsschwelle gekennzeichnet sind (Hacker et al. 2011; Plötz et al. 2013). Obwohl gewerblich zugelassene Fahrzeuge mit etwa 10 % nur eine untergeordnete Rolle im Pkw-Bestand spielen, prägen sie angesichts eines Anteils von 60 % an den Neuzulassungen jedoch die Struktur des Fahrzeugbestands und beeinflussen damit auch maßgeblich die Einführung neuer Antriebstechnologien (Gnann et al. 2012).

Parallel dazu erfahren auch andere elektrische Straßenfahrzeuge, wie leichte und mittelschwere Nutzfahrzeuge, Linienbusse oder auch Schleppfahrzeuge in unterschiedlichen gewerblichen Anwendungen zunehmende Aufmerksamkeit und werden aktuell in zahlreichen Pilotvorhaben erprobt.

## 1.2 Projektziele

Ziel des Vorhabens „Elektromobilität im Wirtschaftsverkehr“ ist es, technische und ökonomisch vielversprechende gewerbliche Anwendungen von Elektromobilität unter Berücksichtigung der jeweiligen Rahmenbedingungen zu identifizieren und ökonomische Potenziale aufzuzeigen und den möglichen Beitrag zur Minderung der verkehrsbedingten Treibhausgasemissionen zu quantifizieren. Die Analysen fokussieren auf den Vergleich gängiger verbrennungsmotorischer Varianten (Benzin / Diesel) mit batterieelektrischen Alternativen. Die Betrachtung von hybridisierten Antriebskonzepten (Plug-in-Hybrid- oder Range-Extender-Fahrzeuge) ist hingegen nicht Bestandteil der Studie.

Die durchgeführten Gesamtkostenbetrachtungen haben zum Ziel, sowohl Anwendern aus Unternehmen als auch der Politik fundierte Erkenntnisse zu wirtschaftlichen Potenzialen von Elektromobilität in gewerblichen Einsatzbereichen bereitzustellen und wichtige Einflussgrößen sowie mögliche Unsicherheiten modellgestützt zu identifizieren. Die Projektergebnisse sollen als eine fachliche Grundlage für die weitere Diskussion der Herausforderungen und möglicher Handlungsempfehlungen für den wirtschaftlichen Einsatz von gewerblichen Elektrofahrzeugen dienen und eine Einordnung der Potenziale im Vergleich zur privaten Nutzung von Elektrofahrzeugen ermöglichen.

Die Studie umfasst neben übergeordneten Analysen für unterschiedliche Fahrzeugkategorien auch die Veranschaulichung der Gesamtnutzungskosten anhand konkreter Anwendungsfälle.

Die Studie entstand im Rahmen der Begleitforschung des Technologieprogramms „IKT für Elektromobilität II: Smart Car – Smart Grid – Smart Traffic“ ([www.ikt-em.de](http://www.ikt-em.de)), gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), und wurde im Auftrag des Verbands der Elektrotechnik (VDE) durchgeführt. Die Bearbeitung des Vorhabens durch das Öko-Institut war durch einen engen Austausch mit Vertretern der Praxisanwendungen im Rahmen des IKT II Programms geprägt. Im Laufe von drei ganztägigen Workshops wurden das methodische Vorgehen, die Inputparameter sowie die Modellergebnisse diskutiert und mit Praxiserfahrungen abgeglichen. Die Analyse der Praxisbeispiele basiert ferner partiell auf Realdaten der Praxisanwendungen.

## 1.3 Überblick über methodisches Vorgehen

Kern des Vorhabens ist die Betrachtung der Gesamtnutzungskosten<sup>2</sup> für unterschiedliche Fahrzeugkategorien in verschiedenen gewerblichen Anwendungen. Die Betrachtung umfasst im Regelfall den Zeitraum von heute bis zum Jahr 2020 und orientiert sich an typischen Fahrzeugeigenschaften, Einsatzmustern und Haltedauern von gewerblich zugelassenen Fahrzeugen.

<sup>2</sup> In der Literatur auch häufig als Total-Cost-of-Ownership (TCO) bezeichnet.

Die Ergebnisse der Analysen zu fahrzeug- und anwendungsspezifischen Gesamtnutzungskosten im Vergleich von konventionellen und batterieelektrischen Varianten bilden die Grundlage für die anschließenden Analysen zum ökonomischen Potenzial von Elektrofahrzeugen sowie der möglichen Minderung der Treibhausgasemissionen bis zum Jahr 2020 für die jeweilige Fahrzeugkategorie bzw. Anwendung.

Im Rahmen dieser Studie werden die Fahrzeugkategorien Pkw, leichte Nutzfahrzeuge, mittelschwere Lkw und Linienbusse im Detail sowie Spezial- und Leichtfahrzeuge in Exkursen betrachtet.

Im anschließenden Kapitel wird zunächst das methodische Vorgehen in Bezug auf die Gesamtkostenbetrachtung und die Potenzialanalysen vorgestellt und die Grenzen der Analysen diskutiert. Die modellgestützte Gesamtkostenbetrachtung (Abschnitt 2.2) setzt die Definition zahlreicher Eingangsgrößen voraus (Abschnitt 2.3). Diese umfassen u. a. Annahmen zur Fahrzeugkonfiguration, den (energiewirtschaftlichen) Rahmenbedingungen, der verfügbaren Infrastruktur sowie zu Investitions-, Fix- und variablen Kosten. Für die Analyse konkreter Anwendungsfälle sind zusätzlich Annahmen zu fall-spezifischen Fahrzeugeinsatzprofilen und Rahmenbedingungen erforderlich.

Sowohl die Eingangsparameter als auch die Ergebnisse der Gesamtkostenbetrachtung werden differenziert nach den oben genannten Fahrzeugkategorien diskutiert. Neben einer übergeordneten Gesamtbetrachtung der jeweiligen Fahrzeugkategorie werden die Ergebnisse ferner anhand von beispielhaften Anwendungsfällen konkretisiert.

Auf Grundlage des Gesamtkostenvergleichs der batterieelektrischen und konventionellen Fahrzeugvariante werden für den Zeitraum bis zum Jahr 2020 mögliche wirtschaftliche Potenziale von Elektrofahrzeugen für den Gesamtfahrzeugbestand in der jeweiligen Kategorie und für unterschiedliche Rahmenbedingungen ermittelt und die zentralen Einflussgrößen im Kontext von Sensitivitätsanalysen diskutiert. Daran anschließend wird das Potenzial zur Minderung der Treibhausgasemissionen durch die Substitution von verbrennungsmotorischen durch batterieelektrische Fahrzeuge quantifiziert.

Abschließend werden die Ergebnisse der Gesamtkostenbetrachtung und der Potenzialanalysen für die unterschiedlichen Fahrzeugkategorien und Anwendungen zusammengefasst und in Bezug auf Einflussfaktoren, die über die Betrachtung hinausgehen, sowie Unsicherheiten in den abgebildeten Entwicklungspfaden diskutiert und in den Kontext aktueller Entwicklungen im Bereich der Elektromobilität eingeordnet. Die Studienergebnisse sollen damit einen daten- /modellgestützten Beitrag zur Diskussion über die kurz- bis mittelfristigen Potenziale von Elektromobilität in unterschiedlichen Fahrzeugkategorien und Anwendungen liefern und als eine fachliche Grundlage für die Diskussion der Herausforderungen und möglicher Handlungsempfehlungen für den verstärkten Einsatz von Elektrofahrzeugen in unterschiedlichen gewerblichen Anwendungen dienen.

Einen grafischen Überblick über das gewählte methodische Vorgehen gibt die folgende Abbildung.



Abbildung 1: Überblick des methodischen Vorgehens im Projekt „Wirtschaftlichkeit von Elektromobilität in gewerblichen Anwendungen“.

## 2 Methodik und Parameterdiskussion

### 2.1 Einleitung

Um eine Vergleichbarkeit der Kosten von batterieelektrischen und verbrennungsmotorischen Fahrzeugen herzustellen, bietet sich eine sogenannte Gesamtkostenbetrachtung an. Mit Hilfe dieser werden möglichst alle Kosten der Nutzung über die gesamte Haltedauer des Fahrzeugs berücksichtigt. Dies ist gerade für den Vergleich der verschiedenen Antriebssysteme sehr aufschlussreich, da ein Elektrofahrzeug zwar oft höhere Investitionskosten als sein konventionelles Pendant, im Betrieb aber erheblich geringere Kosten aufweisen kann.

Auf Basis dieser Kostenbetrachtung wird anschließend abgeschätzt, wie viele Fahrzeuge im heutigen gewerblichen Fahrzeugbestand für eine Elektrifizierung in Frage kommen und anschließend eine Abschätzung eines ökonomischen Maximalpotenzials, sowie einer möglichen CO<sub>2</sub>-Minderung durch Elektrofahrzeuge bis in das Jahr 2020 vorgenommen.

In diesem Kapitel werden die verwendeten Methoden und die gewählten Ausprägungen der Eingangsparameter dargestellt und erläutert.

### 2.2 Gesamtkostenbetrachtung – der TCO-Modellansatz

Die Fahrzeugwahl wird im gewerblichen wie auch im privaten Bereich von einer Vielzahl von Faktoren beeinflusst, die sich jedoch sehr unterschiedlich gut quantifizieren lassen. So stellen die Kosten für den Fahrzeugkauf und Betrieb wichtige Entscheidungskriterien bei der Fahrzeugwahl dar, aber auch die Fahrzeuggröße, Komfort, Verfügbarkeit von Werkstätten und Sicherheit sowie die Marke fließen in die Kaufentscheidung ein.

Insbesondere in der gewerblichen Fahrzeugbeschaffung stellen Kostenkriterien die wichtigsten Parameter bei der Fahrzeugwahl dar. So werden beispielsweise im Rahmen einer Befragung von Fuhrparkleitern in Hacker et al. (2011) die Anschaffungskosten bzw. die Gesamtnutzungs- und Kilometerkosten vor Umwelteigenschaften als wichtigste Beschaffungskriterien genannt. Einen weiteren empirischen Beleg für die Bedeutung von Nutzungskosten bei der Fahrzeugwahl stellt der Marktanteil von Dieselfahrzeugen bei gewerblichen Haltern dar, der sich in unterschiedlichen Wirtschaftszweigen auf Basis der jeweiligen Jahresfahrleistung und den damit verbundenen Kostenvorteilen in der Nutzungsphase gegenüber der Benzin-Variante gut erklären lässt (Plötz et al. 2013).

Eine Gesamtkostenbetrachtung ermöglicht eine Vergleichbarkeit der Kosten verschiedener Investitionen. Dabei werden neben den Anschaffungskosten für

Fahrzeug und ggf. Ladeinfrastruktur, auch Betriebskosten, wie Wartungs-, Reparatur- oder Haltungskosten, berücksichtigt. Die betrachteten Kosten werden über den Gesamtnutzungszeitraum inflationsbereinigt und durch eine Diskontierung auf einen Zeitpunkt zurückgerechnet. Im Folgenden wird der Ansatz der Gesamtkostenbetrachtung genutzt, um wirtschaftliche Potenziale für den Einsatz von batterieelektrischen Fahrzeugen zu identifizieren bzw. verbleibende Kostenunterschiede zu quantifizieren. Die Betrachtung fokussiert auf den Zeitraum 2014 bis 2020 und bildet mögliche Unsicherheiten in der Entwicklung von Einflussgrößen in Form von Szenarien und Sensitivitätsanalysen ab. In Einzelfällen (Linienbusse) wird der Betrachtungszeitraum bis 2025 erweitert.

Ziel der Analysen ist es, einen möglichst umfassenden Wirtschaftlichkeitsvergleich von konventionellen und elektrischen Fahrzeugvarianten unter Berücksichtigung der jeweiligen Fahrzeugeigenschaften bzw. -anforderungen für den betrachteten Zeitraum anzustellen. Durch die deutlich veränderten Eigenschaften von Elektrofahrzeugen sind mit deren Einsatz jedoch Anpassungen im Nutzerverhalten und der Infrastruktur notwendig, die – insbesondere in der frühen Marktphase – von erheblichem Einfluss auf die Nutzerakzeptanz sein können. Die Ergebnisse der Gesamtkostenbetrachtung erlauben daher keine direkten Schlüsse auf das tatsächliche Marktpotenzial von Elektrofahrzeugen bis zum Jahr 2020, liefern aber wichtige Hinweise auf wirtschaftliche Einsatzmöglichkeiten in gewerblichen Anwendungen.

Das im Rahmen des Vorhabens entwickelte TCO<sup>3</sup>-Modell ermöglicht den Vergleich der Gesamtnutzungskosten von verschiedenen Antriebssystemen für unterschiedliche Fahrzeugkategorien über die Gesamthaltedauer des jeweiligen Fahrzeugs. Für die Simulation der unterschiedlichen Anwendungsfälle müssen jeweils fahrzeug- bzw. anwendungsspezifische Ausprägungen der Eingangsgrößen, wie beispielsweise Kraftstoffverbrauch, Anschaffungskosten, Fahrzeughaltedauer, definiert werden.

## Ökonomische Eingangsparameter

Das TCO-Modell berücksichtigt alle im Laufe der Fahrzeughaltedauer relevanten Kostenparameter. Diese stehen jeweils in Abhängigkeit von der jeweiligen Fahrzeugkategorie, der Fahrzeugnutzung und den definierten Rahmenbedingungen. Teilweise handelt es sich bei den Kosten um abgeleitete und zeitlich variable Größen. Deren Herleitung wird im folgenden Kapitel für die jeweilige Fahrzeugkategorie näher erläutert.

Da im Modell die Gesamtkosten für Neufahrzeuge mit Erstzulassung im Zeitraum zwischen 2014 und 2020 analysiert werden, kann der bilanzierte Nutzungszeitraum – je nach Haltedauer – deutlich über das Jahr 2020 hinausreichen.<sup>4</sup> Daher werden für alle über die gesamte Nutzungsdauer rele-

<sup>3</sup> Total-Cost-of-Ownership = Gesamtnutzungskosten

<sup>4</sup> Ein Fahrzeug, das beispielsweise im Anfang 2020 zugelassen wird und 6 Jahre durch den Erstnutzer betrieben wird, erforderte eine Kostenbetrachtung für den gesamten Nutzungszeitraum bis Ende 2025.

vanten Kosten, wie Kraftstoffkosten oder sonstige Betriebskosten, Annahmen zu deren Entwicklung bis zum Jahr 2030 getroffen.

Für verbrennungsmotorische und batterieelektrische Fahrzeugvarianten werden im TCO-Vergleich folgende Kostenparameter explizit berücksichtigt<sup>5</sup>:

- Anschaffungspreis
- Steuerliche Abschreibung (AfA)
- Restwert am Ende der Haltedauer
- Kosten der Ladeinfrastruktur\*
- Kosten für Instandhaltung / Wartung der Ladeinfrastruktur\*
- Kfz-Steuer, Versicherung und Kosten für Haupt-/Abgasuntersuchung
- Kosten für Fahrzeugwartung, -pflege, -reparatur
- Kraftstoffkosten.

## Abzinsung und Realkosten

Um eine Vergleichbarkeit zwischen den Kosten herzustellen, wurde eine Abzinsung aller eingehenden Kosten in die Gesamtkostenrechnung auf das Jahr 2014 vorgenommen. Mittels Abzinsung oder Diskontierung werden die Werte zukünftiger Zahlungen auf einen Zeitpunkt, der vor den Zahlungen liegt, zurückgerechnet (Wöhe & Döring 1990). Dabei wird ein Kalkulationszinssatz unterstellt, der die vom Investor (hier ist die Investition jeweils das entsprechende Fahrzeug) erwartete Mindestverzinsung des eingesetzten Kapitals berücksichtigt. Für die in dieser Studie durchgeführten Rechnungen wurde ein Kalkulationszins von 5 % angenommen. Für alle berechneten Kosten wurde eine mittlere jährliche Inflationsrate von 1,7 % für den Betrachtungszeitraum unterstellt, was der durchschnittlichen Inflation der Jahre 2004 - 2013 entspricht (Statista 2014c).

## 2.3 Parameter der Gesamtkostenbetrachtung

Im Folgenden werden alle wichtigen Eingangsgrößen für die Gesamtkostenrechnung diskutiert, das methodische Vorgehen der Herleitung erläutert und die zugrunde liegenden Quellen benannt. Parameter, deren zukünftige Entwicklung mit hoher Unsicherheit behaftet ist, welche gleichzeitig aber von hoher Relevanz für die Wirtschaftlichkeit von Elektrofahrzeugen sind, werden in Form unterschiedlicher Szenarien abgebildet. Die Definition von typischen Fahrzeugen in der jeweiligen konventionellen und batterieelektrischen Variante bildet die Grundlage für die Herleitung von Anschaffungs- und Betriebskosten. Darüber hinaus werden weitere Fix- und Infrastrukturkosten diskutiert

<sup>5</sup> Mit \* gekennzeichnete Kostenparameter sind nur für batterieelektrische Fahrzeuge relevant.

und das methodische Vorgehen zur Ableitung des Fahrzeugrestwerts erläutert.

### 2.3.1 Parameter zur Festlegung von Szenarien

Da ein Kostenvergleich für den Zeitraum von 2014 bis 2020 für unterschiedliche Antriebe angestellt wird, müssen die in die Betrachtung eingehenden Parameter in die Zukunft fortgeschrieben werden. Solch eine Fortschreibung ist stets mit Unsicherheiten behaftet. Um diesem Umstand Rechnung zu tragen, wurden für drei zentrale Parameter verschiedene Fortschreibungen, im Folgenden Szenarien genannt, gebildet, um somit die Abbildung der Unsicherheiten in den Ergebnissen dieser Studie zu gewährleisten.

In den Szenarien werden die für den Wirtschaftlichkeitsvergleich besonders relevanten Parameter Batteriepreis, Strompreis und Kraftstoffpreis variiert. Ausgehend von einem mittleren Szenario wurden ein pessimistisches und ein optimistisches Szenario gebildet, wobei sich die Benennung der Szenarien auf die hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit von Elektrofahrzeugen vorteilhaften Rahmenbedingungen bezieht.

Zur Bildung der Szenarien wurde gemäß Tabelle 1 jeweils eine Erhöhung, bzw. Minderung der Preise in Referenz zum mittleren Szenario für 2020 bzw. 2030 angenommen und für die Zwischenjahre linear interpoliert. Das optimistische Szenario zeichnet sich durch niedrigere Batterie- und Strompreise für das Elektrofahrzeug und erhöhte Kraftstoffpreise für das entsprechende konventionelle Fahrzeug aus, im pessimistischen Szenario ist dies genau umgekehrt.

*Tabelle 1: Relative Preiserhöhungen bzw. -minderung zur Bildung eines optimistischen bzw. pessimistischen Szenarios in Referenz zum mittleren Szenario.*

	<b>Optimistisches Szenario</b>	<b>Pessimistisches Szenario</b>
Batteriepreis	- 10%	+ 10%
Strompreis	- 10%	+ 10%
Benzin-/ Dieselpreis	+10%	- 10%

Wie auch die Sensitivitätsanalysen in Abschnitt 3.2 zeigen, handelt es sich bei den ausgewählten Parametern um Einflussgrößen mit vergleichsweise hoher Relevanz für die Gesamtkostenrechnung. Bezüglich der Interpretation der Szenarien ist jedoch zu beachten, dass alle drei Szenarien mögliche Entwicklungen abbilden. Die dargestellten Entwicklungspfade lassen somit keine Schlüsse über die Wahrscheinlichkeit der jeweiligen Preisentwicklung zu, sondern zeigen lediglich mögliche Spannbreiten – und damit Unsicherheiten – auf.

## Entwicklung Benzin- und Dieselpreis

Die Annahmen zur Entwicklung der Energiepreise basieren auf der Energiereferenzprognose im Auftrag der Bundesregierung (Schlesinger et al. 2014). Diese stellt eine aus Sicht der Autoren der Studie wahrscheinliche Entwicklung der Energiewirtschaft bis 2030 dar. Die Preise für konventionelle Kraftstoffe werden im Wesentlichen von Weltmarktpreisen, Wechselkursen sowie Steuern und Abgaben bestimmt. Im Referenzszenario steigt der Preis für Rohöl um 6 % von 2020 auf 2030 an. Im Vergleich dazu ist der Anstieg des Benzin-, bzw. Dieselpreises relativ moderat, da der hohe Anteil von Steuern und Abgaben am Kraftstoffpreis als real konstant angenommen werden. Für das Jahr 2020 wird in der Referenzprognose ein Rohölpreis von 117 US-Dollar/Barrel und für das Jahr 2030 von 124 US-Dollar/barrel jeweils in der Preisbasis 2011 angenommen. Für die Berechnung des Benzin-, bzw. Dieselpreises wurde ein Mineralölsteuersatz von 65,45 bzw. 47,04 ct/l und ein Deckungsbeitrag<sup>6</sup> von 15 bzw. 13 ct/l zu Grunde gelegt (BMF 2014; Plötz et al. 2013). Da es sich bei den betrachteten Anwendungsgebieten um gewerbliche Einsätze der Fahrzeuge handelt, wurde keine Mehrwertsteuer berücksichtigt. Zwischen den Jahren 2014 bis 2020 bzw. 2020 und 2030 wurde jeweils eine lineare Entwicklung der Kraftstoffpreise angenommen. Die aktuellen Werte für das Jahr 2014 für Pkw, leichte Nutzfahrzeuge und Lkw stammen aus Statista (2014a) und Statista (2014b). Die aktuellen Werte der Kraftstoffpreise für Linienbusse stammen aus Kappus et al. (2013) und basieren auf Ergebnissen von Interviews mit einer Reihe von Verkehrsunternehmen. Für die Preisentwicklung wurde die oben erläuterte Änderungsrate unterstellt. In der Praxis liegen die Kraftstoffpreise laut Aussage der Verkehrsunternehmen etwa 10 ct unter den Preisen an öffentlichen Tankstellen.

In Tabelle 2 und Tabelle 3 sind die Benzin- und Dieselpreise, welche den folgenden Gesamtkostenbetrachtungen zu Grunde liegen, für die Jahre 2014, 2020, 2025 und 2030 aufgeführt. Es ist zu beachten, dass es sich dabei um die Kraftstoffpreise exklusive Mehrwertsteuer handelt.

## Entwicklung Strompreis

In dieser Studie wird standardmäßig ein Stromtarif zugrunde gelegt, der für einen durchschnittlichen Jahresverbrauch von 3,5 MWh angenommen werden kann. Dieser Jahresverbrauch entspricht dem eines durchschnittlichen 3-Personen-Haushalts und liegt exklusive Mehrwertsteuer im Mittel für das Jahr 2014 bei 24,5 ct/kWh. Je nach Verbrauchsmenge können gewerbliche Abnehmer auf Grund von zahlreichen Ausnahmen günstigere Tarife erhalten. So liegt z. B. der Tarif für einen durchschnittlichen Jahresverbrauch von 160 MWh bei etwa 13,9 ct/kWh (BDEW 2014). Ein Jahresverbrauch dieser Größenordnung wird von sehr stromintensiven Industrieanwendungen erreicht. Für Handel- und Gewerbeabnehmer gibt es je nach Verbrauch die Möglichkeit,

<sup>6</sup> Der Deckungsbeitrag beinhaltet u. a. Kosten für Transport, Lagerhaltung, gesetzliche Bevorratung, Verwaltung, Vertrieb sowie seit Januar 2007 Kosten für Biokomponenten und die Beimischung. ((UNITI 2012)).

einen Tarif in der aufgeführten Preisspanne zu beziehen. Da in dieser Studie für die betrachteten Anwendungen der Elektrofahrzeuge keine Annahme über den Stromverbrauch der haltenden Unternehmen gemacht werden kann, wurde standardmäßig mit dem konservativen Stromtarif für einen Jahresverbrauch von 3,5 MWh gerechnet. Ergänzend werden jedoch im Rahmen von zwei Sensitivitätsbetrachtungen die Auswirkungen von reduzierten Gewerbestromtarifen betrachtet.

Die Entwicklung der Strompreise im mittleren Szenario orientiert sich für Pkw, leichte Nutzfahrzeuge und Lkw analog zur Kraftstoffpreisentwicklung für den Zeitraum bis 2030 an der Energiereferenzprognose (Schlesinger et al. 2014). Diese unterstellt zunächst einen weiteren Anstieg der Endkundenpreise für Haushaltskunden, der sich trotz sinkender Großhandelspreise aus dem weiteren Anstieg der EEG-Umlage ergibt. Nach 2020 führt der Rückgang der EEG-Umlage zu einem Rückgang der Endkundenpreise bis 2030. Diese Preise verstehen sich jeweils als Endkundenpreise an der betriebseigenen Ladeinfrastruktur.

Die von Verkehrsunternehmen zu entrichtenden Preise für Fahrstrom liegen deutlich unter den oben beschriebenen konservativ veranschlagten Stromtarifen. Im Jahr 2008 lagen diese laut Kappus et al. (2013) in einer Spannbreite von 9 bis 14 ct/kWh. Für das Jahr 2014 wird in der vorliegenden Studie ein mittlerer Strompreis von 12,6 ct für die Stromversorgung von Linienbussen veranschlagt und damit eine eher konservative Abschätzung getroffen. Das Vorgehen hinsichtlich der relativen Änderung der Kosten bis zum Jahr 2030 erfolgt analog zu den Pkw.

In Tabelle 2 und Tabelle 3 sind die in der Studie verwendeten Strompreise für die Jahre 2014, 2020, 2025 und 2030 differenziert nach Fahrzeugkategorien aufgeführt. Es ist zu beachten, dass die Werte exklusive Mehrwertsteuer aufgelistet sind.

Für einige Anwendungen bei Pkw und leichte Nutzfahrzeuge wird in den anschließenden Gesamtkostenbetrachtungen von einer relevanten Nutzung öffentlicher Ladeinfrastruktur ausgegangen. Im TCO-Modell wird die Nutzung öffentlicher Ladeinfrastruktur über einen erhöhten Endkundenpreis abgebildet. Angesichts einer sich noch in einem frühen Entwicklungsstadium befindlichen, öffentlichen Ladeinfrastruktur lassen sich zum jetzigen Zeitpunkt noch keine verlässlichen Annahmen zur längerfristigen Preisbildung an öffentlichen Ladepunkten treffen. Kley (2011) geht in einer umfassenden Analyse zur Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge von Strommehrkosten von 0,05 bis 0,34 €/kWh an öffentlichen Ladestellen aus. Dies entspricht einem Aufpreis von 20 % bis 115 % der in dieser Arbeit angenommenen Strompreise. Auf Grundlage einer eigenen Auswertung aktueller Angebote von Betreibern öffentlicher Ladeinfrastruktur sowie unter Berücksichtigung der Modellrechnungen in Kley (2011), wird in der vorliegenden Studie für Ladevorgänge an öffentlichen Ladestationen pauschal ein Aufpreis von 50 % auf den regulären Stromtarif veranschlagt.

### Variation des Stromtarifs

Neben dem Bezug eines gegenüber dem Haushaltsstromtarif günstigeren Gewerbestromtarifs auf Grund höherer Abnahmemengen und entsprechender Rabatte, können Elektrofahrzeuge perspektivisch möglicherweise weitere Vergünstigungen beim Strombezug bzw. Erlöse an der Schnittstelle zur Energiewirtschaft erzielen. Mögliche Vergünstigungen des Stromtarifs für Handel und Gewerbe werden in Plötz et al. (2013) mit etwa 25 % abgeschätzt. Eigene aktuelle Analysen des Öko-Institut<sup>7</sup> unterstellen Rabatte für Gewerbekunden in der Spannbreite von 5 bis 20 %.

Ferner bietet die Netzkopplung von Elektrofahrzeugen perspektivisch die Möglichkeit zur Bereitstellung von Netzdienstleistungen, die zum einen das Stromnetz entlasten und die Integration von erneuerbaren Energien erhöhen kann und zum anderen Erlöse für den Halter des Fahrzeugs für die Bereitstellung dieser Leistungen bzw. durch die Nutzung günstigerer (lastvariabler) Stromtarife zur Folge haben kann.

Prinzipiell wird zwischen drei Möglichkeiten der Bereitstellung von Netzdienstleistungen im Kontext von Elektromobilität unterschieden:

- **Lademanagement** (DSM: Demand Side Management): Verlagerung der Batterieladung auf kostenoptimale Zeitpunkte (z. B. auf Zeiträume mit überschüssigen erneuerbaren Energien).
- **Vehicle to Grid** (V2G): Bidirektionale Anbindung von Elektrofahrzeugen an das Stromnetz, welches auch die Rückspeisung von Energie ins Stromnetz beinhaltet.
- **Teilnahme am Regelle Energiemarkt**: Bereitstellung von positiver oder negativer Regelleistung (Minutenreserve).

Bezüglich der möglichen Erlöse für die Bereitstellung entsprechender Systemdienstleistungen ausgehend von Pkw-typischen Batteriegrößen weisen jedoch mehrere Studien (Dallinger 2012; Hermann et al. 2011) auf ein kurzfristig nur geringes Potenzial hin, da die am Markt kurz- bis mittelfristig erzielbaren – ohnehin eher geringen – Erlöse durch zusätzliche Kosten für die technische Steuerung bzw. eine schnellere Batteriealterung durch eine höhere Anzahl an Ladezyklen (siehe V2G) teilweise kompensiert werden. Dallinger (2012) beziffert die möglichen Erlöse durch DSM auf etwa 50 bis 100 € pro Jahr sowie bis zu 250 € jährlich bei V2G, allerdings ohne Berücksichtigung der Zusatzkosten für die technische Steuerung. Hermann et al. (2011) nennt Erlöse für die Bereitstellung von Systemdienstleistungen in der Größenordnung von 50 bis 100 € pro Jahr.

<sup>7</sup> Analysen im Rahmen des laufenden Forschungsvorhabens „Analyse- und Dialogvorhaben zur Sicherstellung des Klimavorteils der Elektromobilität“.

Mit einer umfassenden Integration von Elektrofahrzeugen ins Energiesystem wird in den genannten Studien erst in einer späteren Marktphase gerechnet. Insbesondere bei einer zunehmenden Marktdurchdringung von Elektromobilität ist unter Stromnetzgesichtspunkten eine intelligente Integration der zusätzlichen Stromnachfrage durch Elektromobilität zwingend erforderlich. Hierfür sind jedoch technische und regulatorische Anpassungen sowie vermutlich stärkere Preissignale perspektivisch erforderlich.

Im Rahmen von Pilotvorhaben<sup>8</sup> wird Nutzern von Elektrofahrzeugen aktuell durch den regionalen Stromanbieter ein Stromtarif angeboten, der für sogenannte unterbrechbare Verbrauchseinrichtungen um das Netzentgelt reduziert ist (MITNETZ Strom 2013) und an eine mögliche Unterbrechung der Versorgung gekoppelt ist. Denkbar ist perspektivisch auch die Nutzung von lastvariablen Tarifen für Elektrofahrzeuge, wie sie auch bereits für Nachtspeicherheizungen und Wärmepumpen angeboten werden.

Um die Auswirkungen einer Netzentgeltbefreiung bzw. von Erlösen durch Lademanagement, der Nutzung lastvariabler Tarife oder auch die Reduzierung des Stromtarifs durch den Bezug eines günstigeren Handel- und Gewerbestromtarifs auf die Wirtschaftlichkeit von Elektrofahrzeugen abzubilden, wurden daher ergänzend zwei Sensitivitätsbetrachtung in Abschnitt 3.1.5 mit einem um 6 bzw. 12 ct/kWh reduzierten Strompreis durchgeführt.

Tabelle 2: Verwendete Energiepreise für Pkw und leichte Nutzfahrzeuge und Lkw bis 2030 für die verschiedenen Szenarien dargestellt *exkl. Mehrwertsteuer*.

		2014	2020	2025	2030
optimistisch	Benzin [€/l]	1,30	1,54	1,56	1,58
	Diesel [€/l]	1,16	1,37	1,40	1,42
	Strom [ct/kWh]	24,50	24,00	23,29	22,60
mittel	Benzin [€/l]	1,30	1,40	1,42	1,44
	Diesel [€/l]	1,16	1,25	1,27	1,29
	Strom [€/kWh]	24,50	26,60	25,88	25,10
pessimistisch	Benzin [€/l]	1,30	1,26	1,28	1,29
	Diesel [€/l]	1,16	1,12	1,14	1,16
	Strom [ct/kWh]	24,50	29,30	28,46	27,60

<sup>8</sup> beispielsweise im Vorhaben Smart Mobility Thüringen (<http://www.smart-mobility-thueringen.de>)

Tabelle 3: Verwendete Energiepreise für *Linienbusse* bis 2030 für die verschiedenen Szenarien dargestellt *exkl. Mehrwertsteuer*.

		2014	2020	2025	2030
optimistisch	Diesel [€/l]	1,03	1,22	1,23	1,25
	Strom [ct/kWh]	12,60	12,35	11,99	11,63
mittel	Diesel [€/l]	1,03	1,11	1,12	1,14
	Strom [ct/kWh]	12,60	13,72	13,32	12,93
pessimistisch	Diesel [€/l]	1,03	1,00	1,01	1,02
	Strom [ct/kWh]	12,6	15,09	14,66	14,22

## Preisentwicklung Batterie

Die Batterie hat den größten Anteil am Aufpreis des Elektrofahrzeugs im Vergleich zu einem verbrennungsmotorischen Vergleichsfahrzeug. Somit ist auch die weitere Entwicklung der spezifischen Batteriepreise von zentraler Bedeutung für die Wirtschaftlichkeit von Elektrofahrzeugen. Insbesondere in den letzten Jahren konnte bereits ein deutlicher Preisrückgang beobachtet werden, die zukünftige Preisentwicklung ist jedoch weiterhin mit großen Unsicherheiten behaftet.

Für die Berechnung der Fahrzeugpreise wird im TCO-Modell für Pkw und leichte Nutzfahrzeuge die Batteriepreisentwicklung, welche von der Arbeitsgruppe II der Nationalen Plattform Elektromobilität (NPE) erarbeitet wurde, zu Grunde gelegt (NPE 2011a). Ausgehend von dieser Preisentwicklung wurden zwei weitere Szenarien durch einen Preisauf- und -abschlag von 10 % für jedes Betrachtungsjahr gebildet. Die angenommenen Batteriepreise sind jeweils als Systempreise und nicht als Zellpreise zu verstehen und spiegeln direkt den in die Rechnung eingehenden Endkundenpreis wieder.

Für Lkw und Linienbusse wird für das Jahr 2014 von deutlich höheren Batteriepreisen ausgegangen. Hintergrund sind neben hohen Anforderungen an Batterietechnik und Leistungselektronik die geringen Stückzahlen in diesem Segment, auf die die Entwicklungskosten umgelegt werden müssen. Für das Jahr 2014 werden im Folgenden Kosten in Höhe von 1.000 €/kWh veranschlagt, welche auf Annahmen in Hülsmann et al. (2014) basieren. Von Seiten eines Fahrzeugherstellers werden aktuelle Kosten zwischen 500 und 1.000 €/kWh für langsam geladene und 1.000 bis 1.400 €/kWh für schnell geladene Batterien kommuniziert.<sup>9</sup>

Für die weitere Kostendegression im Betrachtungszeitraum werden dieselben Änderungsraten wie für Batterien im Bereich Pkw und leichte Nutzfahrzeuge veranschlagt. Auch die Ableitung der beiden Alternativszenarien ergibt sich

<sup>9</sup> Persönliche Mitteilung vom 09.12.2014; H. Klessens; VDL Bus & Coach Deutschland GmbH

durch die entsprechenden prozentualen Abweichungen vom mittleren Szenario.

In Abbildung 2 ist die angenommene Batteriepreisentwicklung in den drei Standardszenarien für Pkw und leichte Nutzfahrzeuge und in Abbildung 3 für Lkw und Linienbusse dargestellt.

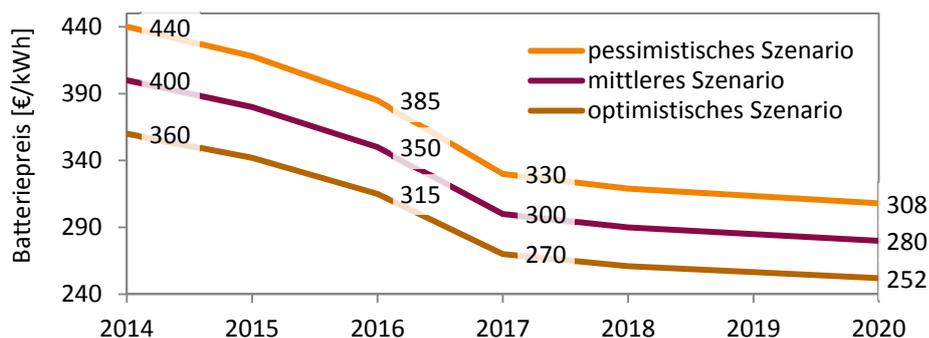


Abbildung 2: Entwicklung des Batteriepreises für Pkw und leichte Nutzfahrzeuge (exkl. MwSt.)

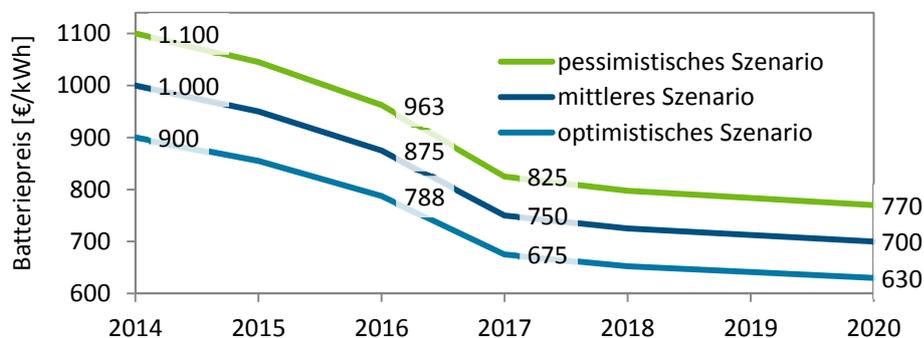


Abbildung 3: Entwicklung des Batteriepreises für Lkw und Linienbusse (exkl. MwSt.).

### Variation des Batteriepreises bei schweren Nutzfahrzeugen

Da die zukünftige Entwicklung der Batteriepreise bei den schweren Nutzfahrzeugen mit großer Unsicherheit behaftet ist, die Annahmen diesbezüglich aber einen großen Einfluss auf die Gesamtkostenberechnung besitzen, wird diese in einer Sensitivitätsbetrachtung in Abschnitt 4.1.6 variiert. Im Rahmen dieser Sensitivität wird davon ausgegangen, dass die Entwicklung bei den Batterien für schwere Nutzfahrzeuge wie Linienbusse und Lkw noch nicht weit fortgeschritten ist und in den kommenden Jahren aufgrund von Entwicklungsfortschritten bei Batterien für mobile Anwendungen auch bei Batteriesystemen für schwere Nutzfahrzeugen eine stärkere Kostendegression erreicht werden kann.

Analog zur Annahme im mittleren Szenario (vgl. Abbildung 3) wurde für die Rechnung mit alternativer Batteriepreisentwicklung im Jahr 2014 ein Batteriepreis von 1.000 €/kWh angenommen. Ausgehend von diesem Wert wurde eine schnellere Kostendegression unterstellt. Der Batteriepreis liegt in dieser Rechnung im Jahr 2020 mit 420 €/kWh um 40 % unter dem Wert des mittleren Szenarios. Der Degressionsgrad entspricht dem Verlauf bei Pkw (Plötz et al. 2013) ab dem Jahr 2010. Dahinter steht die Annahme, dass die Entwicklung der Batteriepreise für schwere Nutzfahrzeuge im Vergleich zu Pkw-Batterien zeitlich verschoben ist und Batteriesysteme im Nutzfahrzeubereich langfristig nicht grundsätzlich höhere Kosten aufweisen müssen. Für die Batteriekosten ist demzufolge ab 2014 eine stärkere Degression als für Batteriesysteme für Pkw und leichte Nutzfahrzeuge unterstellt.

Abbildung 4 zeigt die alternative Batteriepreisentwicklung für Lkw und Linienbusse.

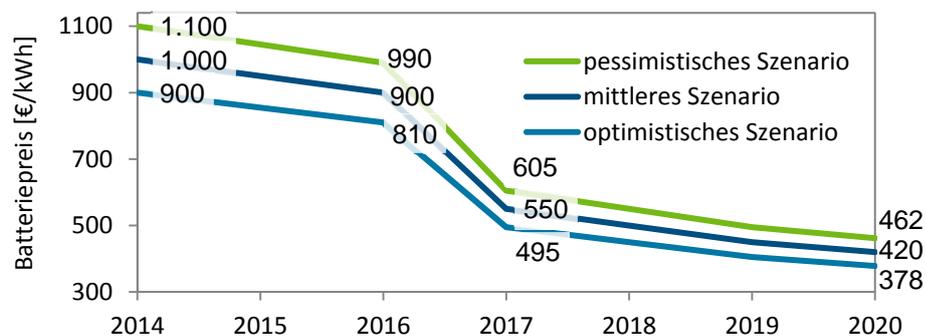


Abbildung 4: Alternative Batteriepreisentwicklung für Lkw und Linienbusse (exkl. MwSt.).

### 2.3.2 Eigenschaften konventioneller und batterieelektrischer Fahrzeugvarianten

Im Vordergrund dieser Studie steht der Wirtschaftlichkeitsvergleich unterschiedlicher Antriebssysteme. Bei den Analysen stehen die antriebsspezifischen Unterschiede unabhängig von konkreten Fahrzeugmodellen im Vordergrund. In den TCO-Analysen werden daher Fahrzeuge verglichen, die realen Modellen des Fahrzeugmarktes nicht direkt entsprechen, jedoch typische Fahrzeugkonfigurationen innerhalb der jeweiligen Fahrzeugkategorie bzw. Größenklasse repräsentieren. Im Folgenden wird die Herleitung wichtiger Parameter der jeweiligen Konfiguration für die konventionellen verbrennungsmotorischen wie auch die batterieelektrischen Fahrzeugvarianten näher erläutert.

Im TCO-Modell werden folgende Fahrzeugkategorien in die folgenden Fahrzeuggrößenklassen mit unterschiedlichen Antriebssystemen unterschieden:

- Pkw: klein, mittel, groß
- Leichte Nutzfahrzeuge: klein/mittel, groß
- Lkw: 12 t zGG.
- Linienbusse: Standardbus, Gelenkbus.

Die Größenklassen der Pkw und leichten Nutzfahrzeuge definieren sich über KBA-Segmente. Die Zuordnung der einzelnen Segmente zu den hier verwendeten aggregierten Größenklassen wird im nächsten Abschnitt erläutert. Für die Lkw erfolgt die Abgrenzung der Größenklassen über das zulässige Gesamtgewicht der Fahrzeuge und für Linienbusse wird zwischen unterschiedlichen Fahrzeuglängen unterschieden. Die genaue Abgrenzung wird in den folgenden Abschnitten erläutert.

## Eigenschaften konventioneller Referenzfahrzeuge

### Pkw und leichte Nutzfahrzeuge

Für die Größenklassen der Pkw wurden die 5 häufigsten neuzugelassen Modelle im ersten Halbjahr 2014 (KBA 2014c) der jeweiligen KBA-Segmente zur Mittelwertbildung herangezogen. Die Zuordnung der Segmente zu den aggregierten Größenklassen kann Tabelle 4 entnommen werden.

Tabelle 4: Zuordnung der relevanten KBA-Segmente zu den verwendeten Größenklassen für Pkw.

Größenklassen	KBA-Segmente	Beispielfahrzeuge
Pkw-klein	Mini	VW Up, Fiat 500
	Kleinwagen	VW Polo, Opel Corsa
Pkw-mittel	Kompaktklasse	VW Golf, Audi A3
	Mini-Van	Mercedes B-Klasse, Opel Meriva
	Großraum-Van	VW Touran, Opel Zafira
Pkw-groß	Mittelklasse	VW Passat, 3er BMW
	Obere Mittelklasse	BMW 5er, Audi A6
	Oberklasse	Mercedes S-Klasse, Mercedes CLS
	Geländewagen	VW Tiguan, Audi Q3
	Sportwagen	Mercedes E-Klasse, Porsche 911

Zur Unterscheidung von zwei verschiedenen Kategorien der leichten Nutzfahrzeuge wurde das KBA-Segment Utilities in zwei Größenklassen unterteilt und für die Mittelwertbildung auch hier eine Gewichtung nach den Neuzulassungen vorgenommen. In Tabelle 5 ist die Zuordnung nach Größenklassen für leichte Nutzfahrzeuge aufgelistet.

Tabelle 5: Zuordnung der Größenklassen für leichte Nutzfahrzeuge (Lnf).

Größenklasse	Segment	Beispielfahrzeuge
Lnf-klein/mittel	kleine / mittlere Utilities	VW Caddy, Citroen Berlingo, Mercedes Vito
Lnf-groß	große Utilities	Mercedes Sprinter, Fiat Ducato, VW Crafter

Der ADAC-Autokosten-Datenbank (ADAC 2014) wurden für die jeweiligen Modelle in typischen Ausstattungsvarianten Listenpreise und Kraftstoffverbräuche (kombiniert, nach dem Neuen Europäischen Fahrzyklus) entnommen und nach den Neuzulassungszahlen gewichtete Mittelwerte für Listenpreis und normiertem Kraftstoffverbrauch gebildet. Dabei wurde für Pkw zwischen Diesel- und Benzinvarianten unterschieden, für die leichten Nutzfahrzeuge wurde nur die Dieselsvariante berücksichtigt.

Aktuelle, empirisch fundierte Analysen zeigen, dass der im Neuen Europäischen Fahrzyklus (NEFZ) bestimmte Kraftstoffverbrauch in den vergangenen Jahren eine kontinuierlich zunehmende Diskrepanz zu tatsächlich erzielten Realverbräuche in der Praxis aufweist. Für den Wirtschaftlichkeitsvergleich sind jedoch die Kraftstoffkosten und damit der Kraftstoffverbrauch unter Realbedingungen relevant. Im TCO-Modell wird daher in Anlehnung an aktuelle Analysen in Mock et al. (2014) ein Aufschlag von 38 % auf den NEFZ-Kraftstoffverbrauchswert berücksichtigt.

Vor dem Hintergrund der EU-CO<sub>2</sub>-Zielwerte für neuzugelassene Pkw und leichte Nutzfahrzeuge ist in den kommenden Jahren auch bei konventionellen Fahrzeugen mit einer weiteren Effizienzsteigerung – und damit einer Verringerung des spezifischen Kraftstoffverbrauchs – zu rechnen. Der Einsatz entsprechender Effizienztechnologien ist jedoch gleichzeitig mit höheren Fahrzeugkosten verbunden. Auf Grundlage einer umfassenden Technologiedatenbank des Öko-Instituts (Hülsmann et al. 2014) wurden für die jeweiligen konventionellen Fahrzeugvarianten im Zeitraum bis 2020 Effizienzentwicklungen unterstellt, die sich an den CO<sub>2</sub>-Zielwerte bis zum Jahr 2020 orientieren. Die mit dem Einsatz entsprechender Effizienztechnologien verbundenen Kosten wurden als Kostenaufschlag auf den Anschaffungspreis im jeweiligen Neuzulassungsjahr berücksichtigt.

In Tabelle 6 sind die Nettolistenpreise und die realen Kraftstoffverbräuche der betrachteten Fahrzeugkategorien für 2014 und 2020 aufgeführt.

Tabelle 6: Angenommene mittlere reale Kraftstoffverbräuche und Nettolistenpreise für Benzin- und Dieselfahrzeuge im Jahr 2014 und 2020.

Fahrzeugkategorie		Kraftstoffverbrauch [l/100 km]		Nettolistenpreis [€]	
		2014	2020	2014	2020
Pkw-klein	Benzin	6,9	5,7	10.121	10.539
	Diesel	5,0	4,2	12.685	13.011
Pkw-mittel	Benzin	8,1	6,6	16.282	16.606
	Diesel	6,0	5,1	18.621	18.801
Pkw-groß	Benzin	8,9	7,3	29.595	29.920
	Diesel	6,4	5,4	31.827	32.038
Lnf-klein/mittel	Diesel	8,4	7,7	20.346	20.407
Lnf-groß	Diesel	9,8	9,0	34.069	34.172

### Linienbusse und Lkw

In der Gesamtkostenbetrachtung wird bei den Linienbussen zwischen den Standardbussen und den Gelenkbussen unterschieden, welche zusammen 92 % des Bestandes der Stadtbusse ausmachen (VDV Statistik 2012). Nicht gesondert betrachtet werden Großraum- (1 % am Bestand der Stadtbusse); Doppeldecker- (2 %), Midi- (2 %) sowie Klein- und Minibusse (2 %). Die Analysen fokussieren dabei auf Stadtbusse, deren Einsatz aufgrund des Fahrprofils für eine Elektrifizierung besonders geeignet ist, Überlandbusse werden nicht betrachtet.

Im Gegensatz zu Pkw und leichten Nutzfahrzeugen existiert bislang für schwere Nutzfahrzeuge kein verbindlicher und genormter Fahrzyklus zur Bestimmung des Kraftstoffverbrauchs. Der Kraftstoffverbrauch der Stadtbusse hängt zudem stark vom Einsatzprofil ab, welches im Wesentlichen gekennzeichnet ist von der Anzahl der Stopps und der Durchschnittsgeschwindigkeit. Mit den von der International Association of Public Transport (UITP) entwickelten SORT-Zyklen (Standardised Onroad Test Cycles) existiert aber eine geeignete Grundlage zum Vergleich der Verbräuche in den Fahrprofilen schwerer Stadtverkehr, leichter Stadtverkehr und Vorortverkehr. Die Gesamtkostenbetrachtung unterstellt im Weiteren einen für den leichten Stadtverkehr typischen Energieverbrauch. Ausgehend von einer Durchschnittsgeschwindigkeit von 18,6 km/h (Bourbon et al. 2012) wurde für Standardbusse (EEV) der Dieselverbrauch mit folgender, aus Pütz (2010) entnommener, Formel errechnet:

$$EV_{Zyklus} = (-10,03 * \ln(v_{Zyklus}) + 66,58) * (1 + \frac{3,8}{v_{Zyklus}})$$

$EV_{Zyklus}$  = spezifische Dieserverbrauch eines EEV Busses [l/100 km]

$v_{Zyklus}$  = Zyklusgeschwindigkeit [km/h]

Auf Basis des Handbuchs für Emissionsfaktoren (INFRAS 2014) wurde für Gelenkbusse ein Mehrverbrauch von 31 % gegenüber dem Standardbus errechnet.

net<sup>10</sup>. Eine weitere Verbrauchsreduktion bis zum Jahr 2020 wurde nicht unterstellt.

Der Kraftstoffverbrauch der Lkw mit einem zulässigen Gesamtgewicht von 12 Tonnen wurde auf Basis des Handbuchs für Emissionsfaktoren ermittelt<sup>11</sup>.

Für die Kostenbetrachtung der schweren Nutzfahrzeuge wurde auf Informationen aus dem Lastauto-Omnibus-Katalog 2013 zurückgegriffen (ETM-Verlag 2012). Aus dem Erzeugerpreisindex des statistischen Bundesamtes für Lkw, Straßenzugmaschinen, Fahrgestelle wurde eine durchschnittliche jährliche Kostensteigerung von 1,85 % hergeleitet und entsprechend fortgeschrieben<sup>12</sup>.

Tabelle 7: Angenommene Kraftstoffverbräuche und Nettokaufpreise Linienbusse und Lkw im Jahr 2014 und 2020.

Fahrzeugkategorie		Kraftstoffverbrauch [l/100 km]		Nettokaufpreise [€]	
		2014	2020	2014	2020
Standardbus	Diesel	44,9	44,9	240.000	242.197
Gelenkbus	Diesel	58,9	58,9	330.000	333.021
Lkw	Diesel	19,3	19,3	60.000	60.549

## Eigenschaften der batterieelektrischen Fahrzeuge

Auf Grundlage der definierten konventionellen Referenzfahrzeuge wurden für die jeweilige Fahrzeugkategorie und Größenklasse batterieelektrische Vergleichsfahrzeuge definiert. Die definierten batterieelektrischen Referenzfahrzeuge nehmen Bezug auf aktuell marktverfügbare, batterieelektrische Fahrzeugmodelle hinsichtlich der technischen Auslegung (z. B. elektrische Reichweite), der erzielten Energieverbräuche und der zusätzlichen Anschaffungskosten. Ziel der definierten Referenzfahrzeuge ist es aber, nicht den Markt verfügbarer Modelle im Detail abzubilden, sondern die typischen Eigenschaften eines batterieelektrischen Fahrzeugs für die betrachteten Fahrzeugklassen für unterschiedliche Zeitpunkte jeweils generisch abzubilden. Der aktuelle Markt an verfügbaren Elektrofahrzeugen wurde jedoch zur Plausibilisierung der Annahmen herangezogen. Insbesondere bei großen Pkw sowie leichten Nutzfahrzeugen, Lkw und Bussen ist ferner zu berücksichtigen, dass die definierten batterieelektrischen Referenzfahrzeuge im aktuellen Markt bisher teilweise durch nur eine sehr geringe Zahl an Serien- oder gar nur Klein- bzw. Vorserienfahrzeuge vertreten sind.

<sup>10</sup> Für den Standardbus wurde die Kategorie „UBus Std >15-18t Euro-VI“ und für den Gelenkbus „UBus Arctic >18t Euro-VI“ herangezogen.

<sup>11</sup> Lkw (Euro VI) mit einem zulässigen Gesamtgewicht von >12 bis 14 Tonnen.

<sup>12</sup> Erzeugerpreisindizes gewerblicher Produkte von 2000 bis 2013 für GP09-29104; Statistisches Bundesamt, Wiesbaden 2014; Stand: 05.09.2014

### **Pkw und leichte Nutzfahrzeuge**

Für den Wirtschaftlichkeitsvergleich werden im TCO-Modell in allen betrachteten Fahrzeugkategorien und Größenklassen batterieelektrische Varianten – unabhängig von der aktuellen Marktverfügbarkeit – definiert. Für Pkw wird eine durchschnittliche elektrische Reichweite von 150 km (real) und für leichte Nutzfahrzeuge von 130 km (real) unterstellt. Diese Annahme zu Reichweiten der Elektrofahrzeuge wurde sowohl für das Anschaffungsjahr 2014 als auch 2020 getroffen, obwohl vermutlich bereits mittelfristig mit dem zunehmenden Angebot von Elektrofahrzeugen mit größerer elektrischer Reichweite zu rechnen sein wird. Durch das gewählte Vorgehen ist eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse über den gesamten Betrachtungszeitraum sichergestellt. Die Erhöhung der Batteriekapazität zur Erreichung einer größeren elektrischen Reichweite wäre hingegen mit erheblichen Zusatzkosten verbunden. Ob diese Zusatzkosten durch die Erzielung einer höheren Jahresfahrleistung kompensiert werden können, würde eine nähere Betrachtung erfordern, die nicht Bestandteil dieser Studie ist.

Die NEFZ-Energieverbräuche der batterieelektrischen Fahrzeugvarianten für das Jahr 2014 berücksichtigen Angaben zu aktuell verfügbaren Fahrzeugmodellen, die auch in der Technologiedatenbank des Öko-Instituts (Hülsmann et al. 2014) dokumentiert sind. Analog zu verbrennungsmotorischen Fahrzeugen ist auch bei batterieelektrischen Fahrzeugen mit einer Abweichung des tatsächlichen Energieverbrauchs vom Normwert zu rechnen. Ursachen hierfür können beispielsweise ein von der Norm abweichendes Fahrverhalten, witterungsbedingte Einflüsse sowie der Energieverbrauch von Nebenaggregaten sein. Bisher liegen hierzu jedoch keine empirisch fundierten Analysen vor. Im Rahmen dieser Studie wurden Zeitreihen von etwa 80 Nutzern von Elektrofahrzeugen zum Fahrzeugeinsatz und Energieverbrauch analysiert, die in der Online-Datenbank Spritmonitor (Fisch und Fischl GmbH 2014) dokumentiert sind. Die Datensätze beziehen sich auf aktuell am Markt verfügbare Elektrofahrzeuge und berücksichtigen auch längerfristige Effekte, wie beispielsweise jahreszeitliche Schwankungen und unterschiedliche Einsatzprofile. Im Mittel weisen die Realdaten eine Abweichung vom jeweiligen NEFZ-Energieverbrauch von 12 % auf. Im TCO-Modell wird daher der reale Energieverbrauch der batterieelektrischen Referenzfahrzeuge im Jahr 2014 über einen Aufschlag von pauschal 12 % auf den Normverbrauch abgeschätzt. Bis zum Jahr 2020 wird für Elektrofahrzeuge keine weitere Minderung des Energieverbrauchs unterstellt.

Die Listenpreise von Elektrofahrzeugen lassen sich insbesondere mit den Zusatzkosten für die Batterie erklären. Im TCO-Modell ergeben sich die Nettolistenpreise der batterieelektrischen Fahrzeugvarianten als Summe aus einem Basispreis für ein konventionelles Vergleichsfahrzeug, den Batteriekosten sowie weiteren Zusatzkosten des elektrischen Antriebs. Diese Zusatzkosten resultieren aus der Differenz der Motorkosten (elektrisch gegenüber konventionell) und den Kosten weiterer spezifischer Komponenten des jeweiligen Antriebs. Die Differenz wurde basierend auf der vom Öko-Institut entwickelten Technologiedatenbank (Hülsmann et al. 2014) und in Anlehnung an (Pfahl 2010) gebildet. Die Kostendegression des Batteriefahrzeugs bis 2020 resultiert insbesondere aus den über die Zeit abnehmenden spezifischen Batte-

riekosten. Je nach Szenario (siehe oben) verringert sich der Kostenaufschlag gegenüber einem konventionellen Vergleichsfahrzeug unterschiedlich stark.

Um die Batteriekosten zu ermitteln, wird zunächst die notwendige Batteriekapazität unter Berücksichtigung der angesetzten Reichweite, des spezifischen Energieverbrauchs und der Entladetiefe der Batterie folgendermaßen bestimmt:

$$Kap_{Bat} = \frac{V_{el} * R_{el}}{E},$$

$Kap_{Bat}$  = reale Batteriekapazität [kWh]

$V_{el}$  = elektrischer Verbrauch [kWh/km]

$R_{el}$  = elektrische Reichweite [km]

$E$  = Entladetiefe der Batterie

Damit ergibt sich die nutzbare Batteriekapazität  $Kap_{n_{Bat}}$  zu:

$$Kap_{n_{Bat}} = Kap_{bat} * E$$

Der Gesamtpreis  $K_{Bat}$  für die jeweilige Fahrzeugbatterie errechnet sich dann aus:

$$K_{Bat} = Kap_{n_{Bat}} * K_{Bat,Jahr}$$

$K_{Bat,Jahr}$  = Batteriepreis im jeweiligen Jahr [€/kWh].

Unter Berücksichtigung der Reichweite und des Energieverbrauchs ergeben sich unter der Annahme einer maximalen Entladetiefe der Batterie von 80 % die Nettolistenpreise für Elektrofahrzeuge für die oben diskutierten Szenarien zur Batteriepreisentwicklung. Die Nettolistenpreise  $NLP_{el}$  der batterieelektrischen Fahrzeuge berechnen sich folgenderweise:

$$NLP_{el} = NLP_{konv} + K_{Bat,Jahr} + AP_{el}$$

$NLP_{konv}$  = Nettolistenpreis des konventionellen Fahrzeugs.

$AP_{el}$  = Aufpreis Fahrzeugelektronik

In Tabelle 8 sind die angenommenen Reichweiten, Verbräuche und Batteriekapazitäten für die betrachteten Fahrzeugkategorien aufgeführt. Für das Elektrofahrzeug wird – ausgehend von den Kosten eines konventionellen Basisfahrzeugs – neben den Zusatzkosten für die Batterie ein zusätzlicher Aufpreis für die im Vergleich zu dem jeweiligen konventionellen Fahrzeug aufwendigere Elektronik angenommen (Hülsmann et al. 2014). Abbildung 5 zeigt die Nettolistenpreise des Elektrofahrzeugs für die betrachteten Größenklassen am Beispiel des mittleren Szenarios im Vergleich zur konventionellen Fahrzeugvariante für die Jahre 2014 und 2020. Für die leichten Nutzfahrzeuge wurde kein Benzin-Vergleichsfahrzeug betrachtet. Im Anhang (Abbildung 56) ist die Zusammensetzung der Nettolistenpreise der Elektrofahrzeuge dokumentiert. In Tabelle 9 sind Beispielfahrzeuge für die betrachteten Größenklassen, die heute serienmäßig produziert werden, aufgeführt.

Tabelle 8: Eigenschaften batterieelektrischer Fahrzeuge der Kategorie Pkw und leichte Nutzfahrzeuge (Lnf).

Größenklasse	elektrische Reichweite [km]	Batteriekapazität		Entladetiefe [%]	Strom-Verbrauch (real) [kWh/100km]
		real	nutzbar		
		[kWh]			
Pkw-klein	150	28,1	22,5	80	15
Pkw-mittel	150	35,6	28,5	80	19
Pkw-groß	150	39,4	31,8	80	21
Lnf-klein/mittel	130	40,6	32,5	80	25
Lnf-groß	130	48,8	39,0	80	30

Tabelle 9: Beispielfahrzeuge für batterieelektrische Pkw und leichte Nutzfahrzeuge in Serienproduktion.

Größenklasse	Beispielfahrzeuge	Reichweite [km] laut Herstellerangabe
Pkw-klein	VW e-Up!	160
	BMW i3	190
Pkw-mittel	VW e-Golf	190
	Ford Focus Electric	160
Pkw-groß	Renault Fluence Z.E.	185
	Tesla Model S 60	375
Lnf-klein	Nissan e-NV 200	170
Lnf-mittel	Mercedes Vito e-Cell	130

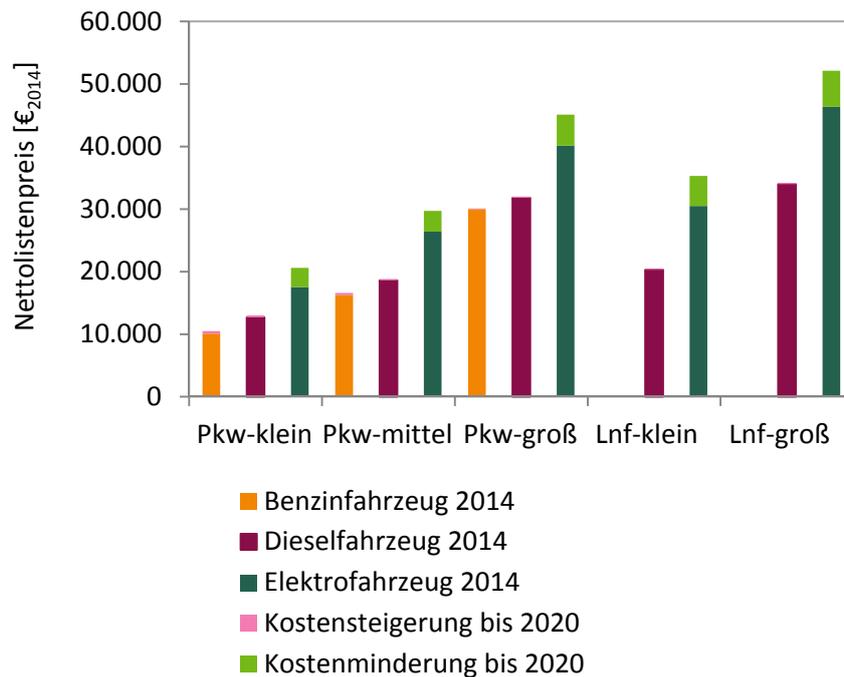


Abbildung 5: Nettolistenpreise Pkw und Lnf im Jahr 2014 und 2020 für die verschiedenen Antriebsarten und Größenklassen am Beispiel des mittleren Szenarios.

### Linienbusse und Lkw

Der Energieverbrauch der Elektrobusse kann ähnlich wie der Verbrauch der Dieselbusse in Abhängigkeit zum Fahrprofil variieren. Bushersteller geben für einen Standardbus teilweise Verbrauchswerte von 1,1 kWh/km an.<sup>13</sup> Dem Verband Deutscher Verkehrsunternehmen e.V. (VDV) zu Folge liegt der Verbrauch bei Feldversuchen zwischen 1,1 und 1,7 kWh/km.<sup>14</sup> Neben dem Fahrprofil und der Topographie hängt der Verbrauch auch stark vom Besetzungsgrad und den klimatischen Verhältnissen ab. In Schmied (2014) werden spezifische Verbräuche von 1,2 bis 2,3 kWh/km (Sommer) bzw. 1,4 bis 2,6 kWh/km (Winter) aufgeführt. In der Kostenrechnung wird ein mittlerer Verbrauch von 1,6 kWh/km für einen Standardbus und 2,1 kWh/km für einen Gelenkbus unterstellt (vgl. Tabelle 10).

Der elektrische Energieverbrauch der mittelschweren Lkw wurde auf Basis der Angaben für ein aktuell verfügbares batterieelektrisches Fahrzeug abgeschätzt

<sup>13</sup> Energieverbrauch eines Eurabus laut Herstellerangaben. [www.eurabus.de/eurabus](http://www.eurabus.de/eurabus)

<sup>14</sup> Persönliche Mitteilung von Martin Schmitz, Geschäftsführer Technik, Verband Deutscher Verkehrsunternehmen e. V. (VDV) vom 28.10.2014.

und anhand des Verhältnisses von Diesel- und Stromverbrauch bei den leichten Nutzfahrzeugen validiert<sup>15</sup>.

Die Verkaufspreise der batterieelektrischen Fahrzeugvarianten ergeben sich im TCO-Modell als Summe aus einem Basispreis für ein konventionelles Vergleichsfahrzeug und den Batteriekosten. Diese vereinfachte Herangehensweise berücksichtigt keine weiteren Komponenten wie z. B. Dieselmotor, Abgasnachbehandlung, Getriebe und Retarder, welche bei Elektrobussen nicht benötigt werden. Die Spanne der Fahrzeugkosten unterschiedlicher Modelle von Euro 6 Standardbussen liegt zudem mit 15.000 € etwa doppelt so hoch wie die Mehrkosten eines Euro 6 Busses ggü. einem Bus mit EEV (Enhanced Environmentally Friendly Vehicle) Standard<sup>16</sup>. Auf der Seite der Elektrobuse werden die Kosten von Elektromotor und Leistungselektronik sowie Batteriemangement hingegen nicht gesondert betrachtet. Angesichts der hohen Unsicherheiten hinsichtlich der Batteriepreise und des frühen Marktstadiums, die einen Abgleich mit den in geförderten Forschungsvorhaben bereits eingesetzten Fahrzeugen erschweren, scheint diese Vereinfachung jedoch vertretbar.

Die Berechnung erfolgt analog zu den oben beschriebenen Pkw, es wird lediglich nicht die elektrische Reichweite, sondern die nutzbare Kapazität als Eingangsgröße vorgegeben.

Bei den Standardbussen wird im TCO-Modell zwischen zwei Lade- bzw. Betriebskonzepten unterschieden:

- Busse mit großen elektrischen Reichweiten, die nur nachts auf dem Betriebshof geladen werden (*overnight charging* ON) und
- Busse mit kleinen Batterien, die während des Betriebs (oder nach der Morgenspitze) z. B. an den Endhaltestellen zwischengeladen werden (*opportunity charging* OC).

Für die Gelenkbusse wird diese Unterscheidung nicht gemacht, weil davon ausgegangen wird, dass durch die großen Batterien in *overnight-charging*-Bussen ein erheblicher Nutzlastverlust entstehen würde. Derzeit werden eine Reihe von Ladekonzepten für *opportunity-charging*-Busse, wie beispielsweise induktive Ladung oder konduktive Ladung mittels Pantografen diskutiert und erprobt. Diese können fahrzeugseitig mit Zusatzkosten verbunden sein, welche hier nicht berücksichtigt sind. Somit repräsentieren die folgenden Gesamtkostenrechnungen eine Umsetzungsvariante mit manueller konduktiver Ladung. Die sich zwischen den Ladekonzepten unterscheidenden Kosten der Infrastruktur werden in Abschnitt 2.3.5 betrachtet.

<sup>15</sup> Der Verbrauch des elektrischen Lkw von E-Force one mit einem zGG von 18 t wird mit 60-90 kWh/100 km bei Überland- und Stadtfahrten angegeben.

<sup>16</sup> Vergleich der Kostenrechnung im Lastautoomnibus Katalog 2013 und 2015 für einen MAN Lion's City Niederflrbus.

Die zentralen Eigenschaften der betrachteten Fahrzeugvarianten sind in Tabelle 7 aufgeführt. Abbildung 6 zeigt die sich daraus ergebenden Fahrzeugkosten.

Tabelle 10: Eigenschaften batterieelektrischer Fahrzeuge der Kategorie Linienbusse und mittelschwere Lkw.

	elektrische Reichweite [km]	Batteriekapazität [kWh]		Entladetiefe [%]	Stromverbrauch [kWh/100km]
		real	nutzbar		
Standardbus (ON)	200	394	315	80	157
Standardbus (OC)	51	100	80	80	157
Gelenkbus (OC)	48	125	100	80	206
Lkw (12t zGG)	185	125	100	80	54

Tabelle 11: Beispielfahrzeuge für batterieelektrische Busse.

Modell/Hersteller	Einsatzort	Ladekonzept	Größenklasse	Batteriekapazität
EURABUS 2.0 – 300	Pinneberg	ON / leitend	12 m Solobus	314 kWh
Solaris Urbino 12 electric	Düsseldorf	ON / OC leitend	12 m Solobus	210 kWh
Solaris Urbino 12 electric	Braunschweig	OC / induktiv	12 m Solobus	60 kWh
Solaris Urbino 18 electric	Braunschweig	OC / induktiv	Gelenkbus	90 kWh
Solaris Urbino 12 electric	Dresden	OC / leitend Oberleitung	12 m Solobus	200 kWh
Breda Menarini M200 E Zeus	Osnabrück	leitend + Batteriewechsel	Midibus	58 kWh
Rampini	Hamburg	OC / leitend	Midibus	180 kWh

Tabelle 12: Beispielfahrzeuge für batterieelektrische Lkw.

Hersteller / Modell	Nutzlast	Gesamtgewicht	Reichweite laut Herstellerangabe	Batteriekapazität
Balqon / Mule M100	4 t	12 t	160 – 240 km	312 kWh
Hytruck / C12E	ca. 7 t	12 t	160 – 280 km	120 – 200 kWh
Smith Vehicles / Newton	7,5 t	12 t	50 – 160 km	80 – 120 kWh
E-Force One / E-Force	6,1 t	18 t	bis 300 km	240 kWh

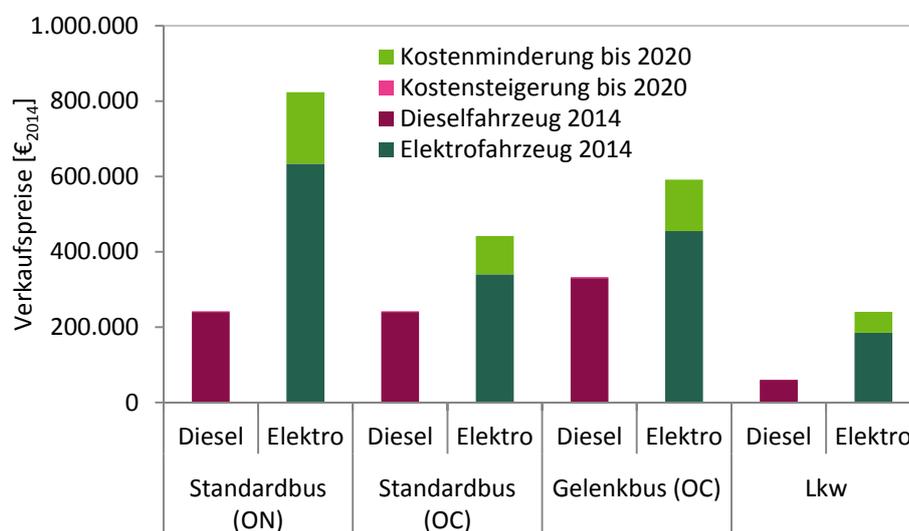


Abbildung 6: Verkaufspreise Linienbusse und Lkw im Jahr 2014 und 2020 für die verschiedenen Antriebsarten am Beispiel des mittleren Szenarios.

Aufgrund der hohen Fahrleistung, des hohen Energieverbrauchs und der langen Nutzungsdauer kann bei den Linienbussen nicht davon ausgegangen werden, dass die Batterien über die gesamte Fahrzeugnutzungsdauer verwendet werden können. Laut Herstellerangaben beträgt die Batterielebensdauer weniger als 10 Jahre.<sup>17</sup> Im TCO-Modell wird deshalb unterstellt, dass die Batterie nach Erreichen einer Obergrenze an Ladezyklen ersetzt werden muss. Kostenseitig wird der im Jahr der Ersatzbeschaffung unterstellte Batteriepreis für die Wechselbatterien veranschlagt. Mit Ausnahme einer Sensitivitätsbetrachtung in Abschnitt 4.1.6 hinsichtlich der Restwertberechnung der Fahrzeuge wird für die ausgewechselten Batterien im TCO-Modell nicht von einem Erlös aus dem Weiterverkauf der genutzten Batterie ausgegangen, da bislang kein Second-

<sup>17</sup> Persönliche Mitteilung vom 09.12.2014; H. Klessens; VDL Bus & Coach Deutschland GmbH

Life Markt für solche Batterien existiert. Sollte sich zukünftig ein Erlös mit den ersetzten Batterien erzielen lassen, würde sich dies positiv auf die Wirtschaftlichkeit der Elektrobusse auswirken, was aufgrund des frühen Marktstadiums im TCO-Modell jedoch nicht abgebildet ist. Eine Ausnahme stellt die letzte in der Nutzungszeit eingebaute Batterie dar, die kostenseitig nur zu dem Anteil der in Anspruch genommenen Ladezyklen berücksichtigt wird.

Die Anzahl der Vollladezyklen hängt vom Batterietyp (*High Energy (HE)* oder *High Power (HP)*) sowie der Entladungstiefe ab. Bei einer Entladungstiefe von 80 % können für HE-Batterien bis zu 5.000 Ladezyklen erreicht werden (Pütz 2013). Im Pkw-Bereich<sup>18</sup> garantieren die Fahrzeughersteller heute üblicherweise 700 - 2.000 Ladezyklen<sup>19</sup>. Im TCO-Modell werden für schwere Nutzfahrzeuge maximal 3.000 Ladezyklen bezogen auf die vollständige nutzbare Kapazität unterstellt.

### 2.3.3 Steuerliche Abschreibung

In gewerblichen Anwendungen werden üblicherweise gewinnmindernde Investitionen durch Absetzung für Abnutzung (AfA) steuerlich geltend gemacht. Da es sich auch bei Fahrzeugen um abnutzbare Wirtschaftsgüter handelt, kann die damit verbundene Vermögensminderung durch das steuerpflichtige Unternehmen als Betriebsausgaben deklariert werden. Dabei wird die Investition nicht zu einem Zeitpunkt deklariert, sondern über einen Zeitraum, der durch die sogenannten AfA-Tabellen festgelegt ist, linear abgeschrieben.

Angesichts der – im Vergleich zu konventionellen Fahrzeugen – höheren Investitionskosten für Elektrofahrzeuge können für diese höhere Betriebsausgaben geltend gemacht werden. Daher wirkt sich die Beschaffung eines Elektrofahrzeugs stärker steuermindernd aus. Im Rahmen der Gesamtkostenbetrachtung wurde ein pauschaler Unternehmenssteuersatz von 30 % angenommen (Bäumel et al. 2013).

### 2.3.4 Fixkosten und variable Kosten

#### Pkw und leichte Nutzfahrzeuge

##### Kfz-Steuer

Die Berechnung der Kfz-Steuersätze berücksichtigt bei Pkw den Hubraum des Motors sowie die CO<sub>2</sub>-Emissionen des Fahrzeugs pro Kilometer. Die Kfz-Steuer für leichte Nutzfahrzeuge hängt vom zulässigen Gesamtgewicht des Fahrzeugs ab. Im TCO-Modell wird der Kfz-Steuersatz für die konventionellen Fahrzeug-

<sup>18</sup> Elektroautos: Marktübersicht/Kenndaten, Stand 01/2014  
[http://www.adac.de/\\_mmm/pdf/Elektroautos\\_Marktuebersicht\\_Kenndaten\\_49KB\\_46583.pdf](http://www.adac.de/_mmm/pdf/Elektroautos_Marktuebersicht_Kenndaten_49KB_46583.pdf)

<sup>19</sup> In der Marktübersicht sind sowohl Ladezyklen, Vollladezyklen und Vollladezyklen bei 70 % Entladung aufgeführt.

varianten (Benzin / Diesel) aus dem Mittelwert, der am häufigsten nachgefragten Fahrzeugmodell in der jeweiligen Größenklasse, auf Basis der Angaben in der ADAC-Autokosten-Datenbank (ADAC 2014) bestimmt.

Für den Betrachtungszeitraum bis 2020 werden die Steuersätze als real konstant angenommen. Batterieelektrische Fahrzeuge sind grundsätzlich von der Kfz-Steuer befreit. In Tabelle 13 sind die mittleren KFZ-Steuersätze für die Größenklassen der Pkw und leichten Nutzfahrzeuge aufgeführt.

Tabelle 13: KFZ-Steuersätze für Pkw und leichte Nutzfahrzeuge und Antriebsarten.

	KFZ-Steuersätze [€/a]		
	Dieselfahrzeug	Benzinfahrzeug	Elektrofahrzeug
Pkw-klein	105	67	0
Pkw-mittel	193	109	0
Pkw-groß	227	138	0
Lnf-klein/mittel	294	-	0
Lnf-groß	391	-	0

### Versicherung

Die Kosten für die Fahrzeugversicherung orientieren sich ebenfalls an den Angaben der ADAC-Autokosten-Datenbank (ADAC 2014). Die Versicherungskosten umfassen den Beitrag zur Kfz-Haftpflichtversicherung sowie den Mittelwert aus dem Beitrag für Voll- und Teilkasko.

Die Versicherungsbeiträge werden für den Betrachtungszeitraum real konstant gehalten. Im TCO-Modell wird in Bezug auf die Versicherungsbeiträge keine Unterscheidung zwischen konventionellen und batterieelektrischen Fahrzeugen angenommen. Die Versicherungsbeiträge für Elektrofahrzeuge orientieren sich an den Annahmen für Dieselfahrzeuge. In Tabelle 14 sind die angenommenen Versicherungsbeiträge aufgelistet.

Tabelle 14: Mittlere Versicherungsbeiträge für Pkw und leichte Nutzfahrzeuge differenziert nach Antriebsart.

	Versicherung [€/a]		
	Dieselfahrzeug	Benzinfahrzeug	Elektrofahrzeug
Pkw-klein	785	721	785
Pkw-mittel	901	836	901
Pkw-groß	1.093	1.025	1.093
Lnf-klein/mittel	903	-	903
Lnf-groß	1.209	-	1.209

### **Kosten für Haupt-/Abgasuntersuchung**

Die Kosten der wiederkehrende Haupt- und Abgasuntersuchung werden im TCO-Modell für konventionelle Fahrzeuge gemäß der aktuellen Gebühren des TÜV SÜD (TÜV SÜD AG 2014) berücksichtigt. Seit Januar 2010 ist die Abgasuntersuchung Bestandteil der Hauptuntersuchung.

Für Elektrofahrzeuge werden lediglich Kosten für die Hauptuntersuchung – analog zu den Kosten für verbrennungsmotorische Fahrzeuge – berücksichtigt. Die Kosten für die Abgasuntersuchung entfallen. Bis 2020 wird keine reale Kostensteigerung angenommen. Die angenommenen Kosten für die Hauptuntersuchung betragen 53,50 € und für die Abgasuntersuchung 41 € pro Untersuchung.

### **Kosten für Fahrzeugwartung, -pflege, -reparatur**

Die Kosten für Fahrzeugwartung, -pflege und -reparatur umfassen unter anderem Ölwechsel und Inspektionen in Wartungsintervallen und -umfängen gemäß der Herstellervorgaben, typische Verschleißreparaturen, wie Ersatz von Auspuff und Bremsbelägen sowie Reifenersatz, unter Berücksichtigung der jeweiligen Laufleistung des Fahrzeugs. Die Annahmen im TCO-Modell für konventionelle Fahrzeuge orientieren sich an der ADAC-Autokosten-Datenbank (ADAC 2014). Die Angaben umfassen dabei sowohl Material- als auch Personalkosten.

Für batterieelektrische Fahrzeuge wird aufgrund des elektrischen Antriebs perspektivisch von einer Minderung der Wartungskosten im Vergleich zu konventionellen Fahrzeugen ausgegangen, da sich der Anteil an Verschleißteilen und die Wartungsintensität des Motors (bspw. Ölwechsel) deutlich reduzieren. Bisher liegen angesichts des frühen Marktstadiums und weniger Serienfahrzeuge jedoch keine umfassend empirisch belegte Erkenntnisse vor.

Im Rahmen der TCO-Betrachtung wird pauschal eine Minderung der Wartungskosten bei batterieelektrischen Fahrzeugen um 18 % gegenüber konventionellen Vergleichsfahrzeugen angenommen. Dieser Wert beruht auf einer Kostenvergleichsanalyse von elektrisch betriebenen mit konventionellen Fahrzeugen, die 2012 vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt und vom Transportation Technology R&D Center durchgeführt wurde (Propfe et al. 2012).

Tabelle 15: Kilometerbezogene Wartungskosten für Pkw und leichte Nutzfahrzeuge differenziert nach Antriebsart.

	Wartungskosten gesamt [ct/km]		
	Dieselfahrzeug	Benzinfahrzeug	Elektrofahrzeug
Pkw-klein	3,73	3,49	3,19
Pkw-mittel	4,12	4,02	3,70
Pkw-groß	5,01	5,34	4,97
Lnf-klein/mittel	4,38	-	4,03
Lnf-groß	5,52	-	5,08

### Energiekosten

Die Energiekosten (Benzin, Diesel oder Strom) stellen keinen Eingangsgröße dar, sondern werden im Modell ermittelt. Unter Berücksichtigung des spezifischen Energieverbrauchs des Fahrzeugs sowie des jeweiligen Kraftstoffpreises bzw. Stromtarifs werden die spezifischen Energiekosten im TCO-Modell berechnet. Die Energiekostenrechnung berücksichtigt veränderte Energieverbräuche je nach Neuzulassungsjahr sowie die unterstellte Entwicklung der Energiepreise bis 2030 in den betrachteten Szenarien.

### Weitere Betriebskosten

Der Fahrzeugbetrieb ist mit weiteren Kosten, wie beispielsweise Parkgebühren und Fahrzeugzubehör, verbunden. In der Gesamtkostenbetrachtung werden diese Kosten jedoch nicht berücksichtigt, da keine grundsätzlichen Unterschiede zwischen konventionellen und batterieelektrischen Fahrzeugen angenommen werden.

## Linienbusse und Lkw

### Kfz-Steuer

Aufgrund der Steuerbefreiung für Fahrzeuge im Linienverkehr (§3 Nr. 6 Kraft-StG) entfällt die Kfz-Steuer bei Linienbussen.

Bei den dieselbetriebenen Lkw wird die Kfz-Steuer hingegen berücksichtigt. Diese basiert auf der Kostenberechnung laut Lastauto-Omnibus-Katalog und wird mit 534 € pro Jahr veranschlagt (ETM-Verlag 2012).

### Versicherung

Bei den Kosten für Haftpflicht und Kaskoversicherung wird im TCO-Modell bei den schweren Nutzfahrzeugen nicht zwischen konventionellen Fahrzeugen und Elektrofahrzeugen unterschieden. Die in Tabelle 16 aufgeführten jährlichen Versicherungsbeiträge sind der Kostenrechnung des Lastauto-Omnibus-Katalog 2013 (ETM-Verlag 2012) entnommen.

Tabelle 16: Versicherungsbeiträge pro Jahr für Linienbusse und Lkw differenziert nach Antriebsart.

	Versicherung [€/a]
Standardbus	6.666
Gelenkbus	7.578
Lkw zGG 12 t	2.936

### Kosten für Fahrzeugwartung, -pflege, -reparatur

Die in Tabelle 17 aufgeführten Kosten für Fahrzeugwartung, -pflege und -reparatur umfassen Schmierstoffkosten, Reifenkosten, Reparatur-, Wartungs- und Pflegekosten und sind dem Lastauto-Omnibus-Katalog 2013 (ETM-Verlag 2012) entnommen. Für die Elektrofahrzeuge fallen keine Schmierstoff- und Ad Blue-Kosten an, zudem kann von niedrigeren Reparatur- und Wartungskosten z. B. am Getriebe und Antriebsstrang ausgegangen werden. Bei Lkw werden in Anlehnung an die leichten Nutzfahrzeuge um 20 % reduzierte Wartungskosten im Vergleich zu vergleichbaren Dieselfahrzeugen veranschlagt. Bei den Elektrobussen fällt die Kostenersparnis gegenüber der entsprechenden Dieselvariante vermutlich etwas geringer aus, da eine Reihe von Reparaturen die allgemeine Fahrzeugtechnik betreffen dürften und damit unabhängig vom Antriebstyp auftreten. Andererseits können Wartung und Diagnose der Schwerlastfahrzeugbatterien sowie das mit besonderen Sicherheitsvorkehrungen verbundene hohe Spannungsniveau zu zusätzlichen Kosten führen. Dennoch geht der Bushersteller VDL in einer aktuellen Schätzung von um 10 bis 20 % reduzierten Wartungs- und Instandhaltungskosten aus, die sich mit der Zeit weiter verringern könnten<sup>20</sup>. Im TCO-Modell werden für die elektrische Variante pauschal um 10 % reduzierte Wartungs- und Instandhaltungskosten veranschlagt.

Tabelle 17: Kilometerbezogene Wartungskosten für Linienbusse und Lkw differenziert nach Antriebsart.

	Wartungskosten gesamt [€/km]	
	Dieselfahrzeug	Elektrofahrzeug
Standardbus	0,40	0,36
Gelenkbus	0,50	0,44
Lkw zGG 12 t	0,18	0,16

### Energiekosten

Analog zu Pkw und leichten Nutzfahrzeugen stellen die Energiekosten für Diesel und Strom keine Eingangsgrößen dar, sondern werden im Modell aus den Energieverbräuchen und -kosten anwendungsspezifisch ermittelt.

<sup>20</sup> Persönliche Mitteilung vom 09.12.2014; H. Klessens; VDL Bus & Coach Deutschland GmbH

### Weitere Betriebskosten

Im TCO-Modell werden keine weiteren Kosten wie bspw. für die Fuhrparkverwaltung oder Unterstellung der Fahrzeuge veranschlagt und es wird davon ausgegangen, dass diese unabhängig vom Antriebskonzept sind und den Gesamtkostenvergleich nicht beeinflussen. Weiterhin werden Kosten für eine Systemumstellung wie bspw. Schulungen für die Mitarbeiter bzw. Fahrer nicht berücksichtigt.

## 2.3.5 Ladeinfrastruktur

### Pkw und leichte Nutzfahrzeuge

Für den Einsatz von batterieelektrischen Fahrzeugen in gewerblichen Anwendungen wird im TCO-Modell ein Ladepunkt je Fahrzeug auf dem Betriebsgelände als Mindestanforderung vorausgesetzt. Im Modell werden die Kosten für die Beschaffung und Installation einer Wallbox mit maximal 22 kW (AC) Anschlussleistung in Anlehnung an Kley (2011) berücksichtigt und eine lineare Minderung der Beschaffungskosten bis 2020 unterstellt. Ferner werden für jede Wallbox jährliche Wartungs- und Instandhaltungskosten bei den Fahrzeugbetriebskosten berücksichtigt. Für die Wallbox wurde 2014 ein Anschaffungspreis von 800 € und eine jährliche geschätzte Preisabnahme von 5 % angenommen. Die Instandhaltung der Ladeinfrastruktur wurde mit 50 €/a angesetzt (Kley 2011).

Die Kosten für die Investition und den Unterhalt der öffentlichen Ladeinfrastruktur wird im Modell nur indirekt und pauschal über erhöhte Stromtarife für die Nutzung öffentlicher Lademöglichkeiten berücksichtigt.

### Linienbusse und Lkw

Für die *overnight-charging*-Linienbusse, wird davon ausgegangen, dass diese nachts auf dem Betriebshof an einer Ladesäule (44 kW) geladen werden. Bei den *opportunity-charging*-Bussen wird dagegen auf dem Betriebshof aufgrund der geringeren Batteriegröße lediglich die Installation einer Ladesäule mit einer Ladeleistung von 22 kW unterstellt. Darüber hinaus werden in diesem Fall jedoch weitere Schnellladestationen an den Endhaltestellen benötigt, die mit hoher Ladeleistung betrieben werden. Die dadurch entstehenden Kosten werden im TCO-Modell auf mehrere auf der Linie fahrende Busse alloziert. Es wird berücksichtigt, dass die Nutzungsdauer der Infrastruktur die der Fahrzeuge übersteigt und unterstellt, dass sie von zwei Fahrzeuggenerationen genutzt werden kann. Für Lkw wird je Fahrzeug eine Ladesäule (22 kW) auf dem eigenen Betriebsgelände unterstellt. Die veranschlagten Kosten für die Ladesäulen orientieren sich an Kley (2011). Sie beinhalten die Hardware für Infrastruktur, Kommunikation und Abrechnung sowie Kosten für Ladekabel und Montage bzw. Baukosten. Nicht enthalten sind bei den Ladesäulen zusätzliche Kosten für den Netzanschluss, da diese standortabhängig stark variieren können. Die Kosten des Netzanschlusses können bspw. von der Größe des elektrischen Fuhrparks bzw. von der Anzahl der Ladesäulen abhängen. Bei

mehreren Fahrzeugen muss ggf. ein Anschluss an das Mittelspannungsnetz vorgenommen werden, was zu zusätzlichen Kosten in Höhe von rund 100.000 € führen kann.<sup>21</sup>

Die veranschlagten Kosten pro Ladepunkt an den Endhaltestellen stellen eine Abschätzung auf Basis eines Praxiseinsatzes in Wien dar, in dem Kosten in Höhe von 90.000 € pro Endhaltestelle mittels Pantograph angegeben werden.<sup>22</sup>

Tabelle 18: Investitionskosten für die Ladeinfrastruktur bei Linienbussen und Lkw.

	Investitionskosten [€]
Ladesäule 22 kW	2.600
Ladesäule 44 kW	15.250
Schnellladestation Haltestelle	90.000

Wie oben beschrieben, können die Kosten für die Ladesäulen auf dem Betriebshöfen höher ausfallen, wenn beispielsweise mehrere Fahrzeuge gleichzeitig geladen werden und aufwendiger Netzanschluss notwendig wird. Aus diesem Grund wird in Abschnitt 4.1.6 nochmals untersucht, wie sich höhere Kosten für die Ladesäulen auf die Gesamtkosten auswirken. In diesem Fall werden für das Jahr 2014 Kosten in Höhe von 130.000 € veranschlagt, welche aktuell für die konduktive Ladeinfrastruktur der Rheinbahn kommuniziert werden.<sup>23</sup>

Auch Kosten für die Schnellladung an den Endhaltestellen können in der Praxis deutlich höher ausfallen. Großen Einfluss haben die konkreten Gegebenheiten vor Ort und das Ladekonzept. Aus diesem Grund wird in einer Sensitivitätsbetrachtung in Kapitel 4.1.7 (siehe Abbildung 38) von deutlich höheren Kosten ausgegangen. In diesem Fall werden Kosten für die Ladeinfrastruktur über einen Pantographen für eine Linie in Höhe von 670.000 € veranschlagt, welche aktuell für die Ausstattung der Linie 133 in Köln angesetzt werden (Schwarze 2014).

Analog zu Pkw wird in Bezug auf die Ladeinfrastruktur zukünftig von einer Kostendegression von 5 % pro Jahr ausgegangen. Für die Wartung der Infrastruktur werden Kosten in Höhe von 330 (Ladesäule 22 kW) bis 1.600 € (Ladesäule 44 kW und Schnellladestation) pro Jahr angenommen.

<sup>21</sup> Zusätzliche Kosten für die Installation eines Transformators. Persönliche Mitteilung vom 28.01.2015; von A. Dinter, E.ON Technologies GmbH

<sup>22</sup> Innovative Electric Buses in Vienna - Clean Fleets case study  
[www.innovationseeds.eu/ImagePub.aspx?id=159506](http://www.innovationseeds.eu/ImagePub.aspx?id=159506)

<sup>23</sup> Kosten der Ladestation für Solaris Urbino electric Busse,  
<http://www.rheinbahn.de/presse/mitteilungen/Seiten/PressReportDetail.aspx?Nr=78478> (abgerufen am 29.01.2014)

### 2.3.6 Restwertentwicklung

#### **Pkw und leichte Nutzfahrzeuge**

Gewerblich zugelassene Neufahrzeuge zeichnen sich häufig durch eine relativ kurze Haltedauer von wenigen Jahren aus, bevor sie direkt über das Unternehmen bzw. das beauftragte Leasingunternehmen über den Gebrauchtwagenmarkt oftmals in den Besitz privater Halter gelangen. Insbesondere in den ersten Jahren nach der Erstzulassung stellt der Wertverlust des Fahrzeugs jedoch den größten Anteil der monatlichen Gesamtkosten dar. Die Restwertentwicklung von Neufahrzeugen ist daher von maßgeblicher Bedeutung für die Gesamtnutzungskosten.

Für verbrennungsmotorische Fahrzeuge liegen umfassende Analysen zur Entwicklung der Restwerte auf Fahrzeugmodellebene vor, so dass auch deren zukünftige Restwertentwicklung – allerdings unter der Annahme, dass die Kundenpräferenzen und die Rahmenbedingungen relativ stabil bleiben – auf Basis historischer Daten abgeschätzt werden kann.

Bedeutend schwieriger stellt sich die Situation für Elektrofahrzeuge dar. Angesichts des frühen Marktstadiums existiert noch kein relevanter Gebrauchtwagenmarkt. Prognosen über die zukünftige Preisbildung im Gebrauchtwagenmarkt sind angesichts der wenigen Fahrzeuge, eines sich voraussichtlich schnell wandelnden Produktangebots und unklarer Nutzerpräferenzen mit sehr hohen Unsicherheiten behaftet. Gleichzeitig verstärkt der höhere Anschaffungspreis für Elektrofahrzeuge die Bedeutung der Restwertentwicklung für die Gesamtnutzungskosten und damit den Vergleich zu konventionellen Fahrzeugen. In welchem Maß sich Batteriesysteme, die auf neueren Technologien wie Lithium-Schwefel- und Lithium-Sauerstoff-Verbindungen beruhen, auf den zukünftigen Restwert von Elektrofahrzeugen auswirken und ob sich ein Markt für die gebrauchten Batterien der Fahrzeuge, z. B. als zusätzliche stationäre Energiespeicher, bilden wird, ist aus heutiger Sicht nicht zu quantifizieren.

Um dieser Unsicherheit im TCO-Modell methodisch zu begegnen, wurden daher im Rahmen dieser Studie unterschiedliche Methoden zur Abschätzung der Restwertentwicklung von batterieelektrischen Fahrzeugen angewendet. Der Wertverlust von verbrennungsmotorischen Fahrzeugen wird im Modell hingegen grundsätzlich nach Methode 1 ermittelt.

##### **Methode 1: Regressionskurve für konventionelle Fahrzeuge**

Auf Grundlage von Daten zur Restwertentwicklung von verbrennungsmotorischen Fahrzeugen wurde eine Regressionskurve abgeleitet, die es ermöglicht, den Restwert eines Fahrzeugs unter Berücksichtigung von Anschaffungspreis, Fahrleistung und Fahrzeugalter zu berechnen. Im Modell wurde eine Regressionskurve des statistischen Bundesamtes verwendet (Dexheimer 2003).

Die Regressionskurve wird im TCO-Modell auch für batterieelektrische Fahrzeuge angewendet und führt im Vergleich zu konventionellen Fahrzeugen zur selben relativen, aber – angesichts des höheren Anschaffungspreises – zu einer deutlich höheren absoluten Wertminderung.

### **Methode 2: Verbrauchskostenvorteil des Zweitnutzers**

Ein Alternativansatz in Anlehnung an Pfahl (2012) geht davon aus, dass sich der Restwert des Elektrofahrzeugs am Ende der Nutzung durch den Erstnutzer mit der Energiekostensparnis des Zweitnutzers ermitteln lässt. Es wird unterstellt, dass der Zweitnutzer eine zusätzliche Zahlungsbereitschaft für ein Elektrofahrzeug in Höhe der Energiekostensparnis über die Haltedauer des Zweitnutzers aufweist. Entsprechend wird der Restwert am Ende der Haltedauer durch den Erstnutzer als Summe aus dem Restwert eines konventionellen Vergleichsfahrzeugs und einem Kostenaufschlag in Höhe der Energiekostensparnis des Zweitnutzers dargestellt.

### **Methode 3: Restwert analog zu Dieselfahrzeug**

Der konservativste Ansatz für die Restwertbestimmung des Elektrofahrzeugs geht davon aus, dass sich der Restwert auf dem Niveau eines konventionellen Vergleichsfahrzeugs (siehe Methode 1) einpendelt. Angesichts der wesentlich höheren Anschaffungskosten bei Elektrofahrzeugen bedeutet dies einen deutlich höheren absoluten, aber auch relativen Wertverlust gegenüber einem konventionellen Vergleichsfahrzeug.

In den anschließenden Gesamtkostenbetrachtungen (Kapitel 3) wurde Methode 2, welche im Vergleich der drei Methoden eine mittlere Wertminderung von Elektrofahrzeugen darstellt, als Standardeinstellung gewählt. In Sensitivitätsanalysen werden optimistischere bzw. pessimistischere Entwicklungen des Fahrzeugrestwerts anhand der Methoden 1 und 3 und deren Auswirkung auf die Gesamtkosten veranschaulicht.

## **Linienbusse und Lkw**

Linienbusse werden häufig über einen langen Zeitraum von bis zu 12 Jahren genutzt. Der Restwert der Fahrzeuge ist nach dieser langen Nutzungszeit für die verbrennungsmotorischen relativ gering. Der Restwert bei den Elektrobusen ist mit großer Unsicherheit behaftet. Das frühe Marktstadium lässt einen tendenziell geringeren Restwert vermuten. Auf der anderen Seite werden elektrisch betriebene Oberleitungsbusse jedoch häufig deutlich länger als Dieselsebusse genutzt. Dies spricht für einen hohen Restwert für Batteriebusse, da die kurzlebigen und damit wenig wertstabilen Batterien im TCO-Modell bereits über Zusatzkosten für den Batterieersatz berücksichtigt sind und die geringere Verschleißanfälligkeit des elektrischen Antriebs einen geringeren Wertverlust des restlichen Fahrzeugs ohne Batterie nahelegt.

Da bisher jedoch aufgrund des frühen Marktstadiums keine Praxiserfahrungen bestehen, wurden im Rahmen dieser Studie analog zu Pkw die Unsicherheiten bezüglich des Wertverlusts mittels unterschiedlicher Methoden zur Abschät-

zung der Restwertentwicklung von batterieelektrischen Fahrzeugen abgebildet.

### **Methode 1: Restwert analog zu Dieselfahrzeug**

Auf Grundlage einer Beispielrechnung für einen Standardbus in der VDV-Mitteilung „Life Cycle Cost (LCC) bei Linienbussen“ (Demirkaya et al. 2010) wurde eine Restwertkurve für Dieselfahrzeuge erstellt, mit welcher der Wertverlust eines Fahrzeugs in Abhängigkeit der Haltedauer abgeschätzt werden kann. Nach einer typischen Nutzungsdauer von 12 Jahren beträgt der Restwert demnach rund 7 % der Anschaffungskosten.

In diesem konservativen Ansatz wird davon ausgegangen, dass der absolute Restwert der Elektrobusse dem der Dieselfahrzeuge mit gleicher Nutzungsdauer entspricht. Aufgrund der höheren Anschaffungskosten fällt der Wertverlust der Elektrobusse prozentual deutlich höher aus als bei Dieselfahrzeugen.

### **Methode 2: Restwertkurve für konventionelle Fahrzeuge**

Die oben beschriebene Restwertkurve wird im TCO-Modell auch für batterieelektrische Fahrzeuge angewendet. Dies führt im Vergleich zu konventionellen Fahrzeugen zu höheren absoluten Restwerten der Elektrofahrzeuge, wobei auch der absolute Wertverlust aufgrund des höheren Anschaffungspreises im Vergleich höher ausfällt.

### **Methode 3: Restwertkurve für konventionelle Fahrzeuge und Verkaufserlöse durch Wechselbatterien**

Diese Methode entspricht im Wesentlichen Methode 2, es wird jedoch angenommen, dass mit den während der Nutzungsdauer ausgetauschten Batterien ein Erlös im Kontext einer Second-Life-Nutzung des Batteriesystems erzielt werden kann. Die Batterien werden im TCO-Modell nach 3.000 auf die nutzbare Kapazität bezogene Ladezyklen ersetzt, können dann aber noch bis zu 80 % der ursprünglichen Kapazität besitzen. Dieser Ansatz geht davon aus, dass sich ein Markt für solche Batterien entwickelt und veranschlagt für den Erlös 25 % der zum Zeitpunkt des Austauschs veranschlagten spezifischen Marktpreise für entsprechende Batterien. Diese spezifischen Batteriepreise werden auf die noch verfügbare, reduzierte Kapazität bezogen.

In den anschließenden Gesamtkostenbetrachtungen in Kapitel 4 wird für Linienbusse Methode 2 standardmäßig zu Grunde gelegt. In einer Sensitivitätsanalyse in Abschnitt (4.1.6) werden optimistischere bzw. pessimistischere Entwicklungen des Fahrzeugrestwerts anhand der Methoden 1 und 3 abgebildet und deren Auswirkung auf die Gesamtkosten veranschaulicht.

Der Restwert von mittelschweren Lkw wurde im TCO-Modell nach einer Nutzungsdauer von sechs Jahren analog zu Methode 2 sowohl bei der verbrennungsmotorischen als auch bei der batterieelektrischen Fahrzeugvariante mit

19 % der Anschaffungskosten veranschlagt. Dieser wurde rechnerisch auf Basis des Lastauto-Omnibus-katalog bestimmt (ETM-Verlag 2012).

## 2.4 Wirtschaftliches Potenzial von Elektrofahrzeugen

### Pkw und leichte Nutzfahrzeuge

Der Vergleich der Gesamtnutzungskosten von konventionellen und batterieelektrischen Fahrzeugvarianten ermöglicht es, wirtschaftliche Einsatzbereiche von Elektrofahrzeugen bis zum Jahr 2020 zu identifizieren. Um die Relevanz der identifizierten Einsatzbereiche zu bewerten, ist es notwendig, das Potenzial für die wirtschaftliche Substitution von gewerblichen Fahrzeugen im Bestand zu analysieren.

Grundlage für die Abschätzung des wirtschaftlichen Potenzials in dieser Studie bilden die Gesamtkostenanalysen, die für die jeweilige Fahrzeugkategorie jahresscharf analysiert, ab welcher Jahresfahrleistung (Minimalwert) ein wirtschaftlicher Einsatz batterieelektrischer Fahrzeuge in gewerblichen Anwendungen möglich ist. Die Minimalfahrleistung  $Fl_{\min}$  des Elektrofahrzeugs zur Bestimmung eines ökonomischen Potenzials wurde über den Schnittpunkt der Gesamtkostengeraden in Abhängigkeit der Fahrleistung jeweils für das betrachtete Szenario festgelegt:

$$GK_{el}(Fl_{\min}) = GK_{konv.}(Fl_{\min})$$

$GK_{el}$  = Gesamtkosten des Elektrofahrzeugs [€],

$GK_{konv.}$  = Gesamtkosten des konventionellen Fahrzeugs [€].

Der Maximalwert der Jahresfahrleistung, welche den Einsatz von batterieelektrischen Fahrzeugen technisch beschränkt, wird über die Annahme abgebildet, dass die Jahresfahrleistung das Produkt aus 300 Tagen und der elektrischen Reichweite des Fahrzeugs nicht überschreiten darf. Für die Pkw wurde die maximale Jahresfahrleistung auf 45.000 km und für die leichten Nutzfahrzeuge auf 39.000 km festgelegt.

Die somit identifizierten „Jahresfahrleistungsfenster“ bilden die Grundlage, um auf Basis des repräsentativen Datensatzes zu gewerblich zugelassenen Fahrzeugen „Kraftfahrzeugverkehr in Deutschland 2010“ (Wermuth et al. 2012) gewerbliche Fahrzeuge in der jeweiligen Fahrzeugkategorie und Größenklasse zu identifizieren, die innerhalb des Jahresfahrleistungsbereichs liegen und somit wirtschaftlich durch batterieelektrische Fahrzeuge ersetzt werden könnten.

Um mögliche Nutzungskonflikte im Kontext möglicher unregelmäßiger Tagesfahrten zu berücksichtigen, wird das identifizierte Potenzial im Fahrzeugbestand um Fahrzeuge reduziert, deren Einsatzmuster über einen Umkreis von 50 km des Fahrzeugstandorts hinausgeht<sup>24</sup>. Diesem Prozedere folgend, lässt sich für jedes Jahr im Zeitraum von 2014 bis 2020 der Anteil des technisch und ökonomisch durch Elektrofahrzeuge substituierbaren Fahrzeugbestands ermitteln. Unter Berücksichtigung der durchschnittlichen Fahrzeughalterdauer und den daraus resultierenden jährlichen Neuzulassungen kann das ökonomische Maximalpotenzial für gewerblich zugelassene Elektrofahrzeuge für den Betrachtungszeitraum quantifiziert werden.

Die Gesamtzahl  $An_{ges,FK,i}$  der Fahrzeuge einer Fahrzeugklasse  $FK$  mit einem ökonomischen Potenzial im Jahr  $i$  im Fahrzeugbestand wurde dabei folgenderweise berechnet:

$$An_{ges,FK,i} = \sum_{j=2014}^i \frac{An_{ök,FK,j}}{HD_{FK}}$$

$An_{ök,FK,j}$  = Anzahl Bestandsfahrzeuge einer Fahrzeugklasse, die im Jahr  $j$  ein ökonomisches Potenzial haben,  
 $HD_{FK}$  = durchschnittliche Haltedauer einer Fahrzeugklasse [Jahren].

Das ermittelte ökonomische Potenzial ist jedoch nicht mit einem tatsächlichen Marktpotenzial gleichzusetzen, da das ökonomische Potenzial auf der Voraussetzung beruht, dass jedes Fahrzeug, das einen Kostenvorteil in der batterieelektrischen Variante erzielt, im Betrachtungszeitraum auch tatsächlich ein konventionelles Fahrzeug substituiert. Ferner sind beispielsweise mögliche Nutzerpräferenzen und die tatsächlich verfügbaren Modelle in der jeweiligen Fahrzeugklasse nicht berücksichtigt, diese können aber erhebliche Auswirkungen auf die tatsächliche Nachfrage haben.

## Linienbusse und Lkw

Die Abschätzung eines wirtschaftlichen Maximalpotenzials für elektrische Stadtbusse erfolgt ähnlich wie für Pkw und leichte Nutzfahrzeuge beschrieben. Allerdings kann im Gegensatz dazu nicht auf einen detaillierten Datenbestand zur Fahrzeugnutzung zurückgegriffen werden. Stattdessen wurde ausgehend von der Annahme einer mittleren jährlichen Fahrleistung von 60.000 km analysiert, ab welchem Anschaffungsjahr Kostenparität bzw. ein Kostenvorteil zur konventionellen Vergleichsvariante besteht. Das Maximalpotenzial beschreibt die akkumulierten Neuzulassungen ab dem Zeitpunkt der Kostenparität bis einschließlich zum Jahr 2020 bzw. 2025. Dabei wird unterstellt, dass sich der absolute Bestand und die Verteilung der Größenklassen

<sup>24</sup> Im KiD-Datensatz wurde die Variable „Einsatzgebiet“ zur Differenzierung herangezogen. Fahrzeuge, die laut Angabe deutschlandweit oder europaweit eingesetzt werden, wurden nicht berücksichtigt, da regelmäßige Reichweitenkonflikte in diesem Fall relativ wahrscheinlich sind.

innerhalb des Bestandes im Betrachtungszeitraum nicht wesentlich verändern.

Für die Lkw wird auf eine Potenzialbetrachtung verzichtet, da die dargestellten Berechnungen sich auf ein konkretes Anwendungsszenario beziehen: der innerstädtischen Belieferung mit Volumengütern wie z. B. Textilien, mit einem mittelschweren Lkw. Dies bedeutet, dass ein Nutzlastverlust sich in diesem Fall nicht negativ auf die Kostenberechnung auswirkt. Aus den verfügbaren Daten in „Kraftfahrzeugverkehr in Deutschland 2010“ (Wermuth et al. 2012) lässt sich angesichts des spezifischen Anwendungsfalls somit kein verallgemeinerbares Potenzial ableiten. Zudem zeigen die Ergebnisse in Abschnitt 4.2, dass ein wirtschaftliches Potenzial unter den getroffenen Annahmen mittelfristig auch für den betrachteten Anwendungsfall nicht erwartet werden kann.

## 2.5 Potenzial zur Minderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen

Die Einführung von Elektromobilität steht in enger Verbindung mit der Herausforderung zur Minderung der verkehrsbedingten Klimagase (insbesondere CO<sub>2</sub>-Emissionen). Im Rahmen dieser Studie wird daher für die identifizierten ökonomischen Potenziale von Elektrofahrzeuge, aber auch auf Ebene konkreter Anwendungsfälle, das Potenzial zur Minderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen durch die Substitution von verbrennungsmotorischen durch batterieelektrische Fahrzeuge quantifiziert.

Dabei wurde eine Gesamtjahresfahrleistung aller substituierbaren Fahrzeuge mittels des „Kraftfahrzeugverkehr in Deutschland“-Datensatzes für die einzelnen Fahrzeugklassen hochgerechnet. Die Emissionen  $E_{FK,i,A}$  einer Fahrzeugklasse  $FK$ , eines Jahres  $i$  und einer Antriebsart  $A$  ergeben sich dann aus:

$$E_{FK,i,A} = Fl_{ges,Fk,i} * VB_{FK,A} * EF_A$$

$Fl_{ges,Fk,i}$  = Gesamtjahresfahrleistung einer Fahrzeugklasse in einem Jahr  $i$  [km],

$VB_{FK,A}$  = Realverbrauch einer Fahrzeugklasse und der jeweiligen Antriebsart [l/km],

$EF_A$  = Emissionsfaktor des jeweiligen Energieträgers [kg/l bzw. kg/kWh]

Tabelle 19: Emissionsfaktoren CO<sub>2</sub>-Äquivalente (Well-to-Wheel) der verschiedenen Kraftstoffarten für die Jahre 2014, 2020, 2025 und 2030. (Schmied & Mottschall 2014) und (IINAS 2014)

		2014	2020	2025	2030
Diesel (7% Bioanteil)	kg/l	3,15	3,15	3,15	3,15
Benzin (5% Bioanteil)	kg/l	2,80	2,80	2,80	2,80
Strom (mix)	kg/kWh	0,57	0,39	0,32	0,25
Strom (100% erneuerbar)	kg/kWh	0,01	0,01	0,01	0,01

Die CO<sub>2</sub>-Einsparung ergibt sich aus der Differenz zwischen den Emissionen des konventionellen verbrennungsmotorischen und des batterieelektrischen Fahrzeugs. Die Emissionsbilanz des Elektrofahrzeugs berücksichtigt die Emissionen aus der Stromerzeugung. Im Rahmen dieser Studie wird die Strombereitstellung für Elektrofahrzeuge auf Grundlage des heutigen Strommixes als auch eine ausschließlich regenerative Strombereitstellung betrachtet. Die verwendeten Emissionsfaktoren entsprechen den Anforderungen der Norm DIN EN 16258 „Methode zur Berechnung und Deklaration des Energieverbrauchs und der Treibhausgasemissionen bei Transportdienstleistungen“, d. h. sie berücksichtigen neben CO<sub>2</sub> weitere Treibhausgase wie Methan oder Lachgas und enthalten die vorgelagerten Emissionen durch die Energiebereitstellung (Well-to-Wheel-Emissionen). Bauvorleistungen der Kraftwerke und Anlagen (z. B. durch Beton oder Stahl) sind hingegen nicht enthalten. Weiterhin werden der Norm folgend Emissionen von Strom aus erneuerbaren Quellen (mit der Ausnahme von Strom aus Biomasse) mit Null gerechnet. Vor- und nachgelagerte Emissionen aus der Fahrzeugherstellung und -entsorgung sind nicht Bestandteil der Betrachtung.

## 3 Ergebnisse – Pkw und leichte Nutzfahrzeuge

Die Diskussion der Ergebnisse zu Pkw und leichten Nutzfahrzeugen gliedert sich in zwei Teile. Ausgehend von Standardwerten, welche repräsentativ für den Durchschnitt einer Fahrzeuggrößenklasse gewählt wurden, werden zunächst allgemeine Ergebnisse am Beispiel eines typischen Pkw mittlerer Größe diskutiert. Dabei werden Spezifika der darauffolgend betrachteten Anwendungen zunächst nicht berücksichtigt. Es wird die Abhängigkeit der berechneten Gesamtkosten von Fahrleistung und Anschaffungsjahr gezeigt und Unsicherheiten in den Preisentwicklungen entsprechend der definierten Szenarien durch Darstellung von Bandbreiten dargelegt. Die Ergebnisse zu den weiteren Pkw-Größenklassen (klein und groß) sowie zu den beiden Größenklassen der leichten Nutzfahrzeuge sind im Anhang dokumentiert.

Auf Basis der Ergebnisse der Kostenrechnungen wird eine Bestandsanalyse der gewerblich zugelassenen Fahrzeuge in Deutschland vorgenommen, die das maximale ökonomische Potenzial von Elektrofahrzeugen aufzeigt und die damit einhergehende Treibhausgasminderung berechnet.

Im zweiten Teil der Ergebnisse für Pkw und leichte Nutzfahrzeuge werden konkrete Anwendungsfälle exemplarisch und in größerem Detail betrachtet. Diese Anwendungsfälle von Elektrofahrzeugen wurden im Rahmen der projektbegleitenden Workshopreihe mit den Teilnehmern entwickelt und sollen besonders vielversprechende frühzeitige Einsatzmöglichkeiten von Elektrofahrzeugen repräsentieren. Die Gesamtkostenbetrachtung zu diesen Anwendungsfällen stellt die relevanten Kostenblöcke einzeln aufgeschlüsselt dar und es werden die anwendungsspezifischen Potenziale für Elektromobilität qualitativ diskutiert. In Abschnitt 3.5.2 wird als Exkurs außerdem eine alternative Realisierung einer elektrischen Taxiflotte vorgestellt.

Grundsätzlich wird im Folgenden der Vergleich zwischen einem Diesel- und einem Elektrofahrzeug gezogen. Im nächsten Abschnitt wird zur Einordnung der Gesamtkostenvergleich zwischen einem Diesel- und Benzinfahrzeug in Abhängigkeit der Fahrleistung diskutiert, um zu zeigen, dass in den Fahrleistungsbereichen, in denen eine Fahrzeugelektrifizierung wirtschaftlich sinnvoll ist, die Gesamtkosten des Benzinfahrzeugs wesentlich höher liegen und davon ausgegangen werden kann, dass in den allermeisten Fällen das Elektrofahrzeug in Konkurrenz zu einem entsprechenden Dieselfahrzeug steht.

### 3.1 Allgemeine Gesamtkostenbetrachtung am Beispiel eines Pkw mittlerer Größe

Eine allgemeine Betrachtung soll die Schwierigkeit der Einordnung und Interpretation der Ergebnisse auf Grund der Vielzahl von Parametern und ihrer Unsicherheiten aufzeigen und mögliche Spannbreiten darstellen. Durch die Festlegung von Szenarien, welche in Abschnitt 2.3.1 ausführlich dargelegt

sind, wird eine Bandbreite der Ergebnisse aufgespannt, die verdeutlicht, in welchen Größenordnungen Schwankungen unter den gegebenen Unsicherheiten liegen können. Zusätzlich sollen die Ergebnisse unabhängig von konkreten Anwendungen im gewerblichen Bereich die Wirtschaftlichkeit von Elektrofahrzeugen für die einzelnen Fahrzeuggrößenklassen aufzeigen. Dies soll anhand der Parameter mit dem größten direkten Einfluss auf die Gesamtkostendifferenz zwischen Elektrofahrzeugen und entsprechenden Dieselfahrzeugen, Jahresfahrleistung und Anschaffungsjahr, diskutiert werden. Die Jahresfahrleistung bestimmt die Kraftstoffkosten und damit den Betriebskostenvorteil der Elektrofahrzeuge. Das Anschaffungsjahr des Fahrzeugs ist angesichts der angenommenen Batteriepreisdegression hinsichtlich des Aufpreises eines Elektrofahrzeugs von besonderer Relevanz. Das Verhältnis dieser beiden Kostenblöcke ist ausschlaggebend für die Höhe der Gesamtkostendifferenz zwischen Elektro- und verbrennungsmotorischem Fahrzeug.

### 3.1.1 Standardparameter

Für die Berechnung der Gesamtkosten in Abhängigkeit der Fahrleistung und des Anschaffungsjahres wurden Standardparameter für jede Größenklasse der Pkw und der leichten Nutzfahrzeuge definiert. Wird ein Parameter in der Ergebnisdarstellung nicht variiert, so liegt der Wert dieser Standardkonfiguration zu Grunde.

Die Standardparameter für den Pkw mittlerer Größe finden sich in Tabelle 20. Die Standardwerte wurden folgendermaßen festgelegt: Die jährliche Fahrleistung des Erstnutzers differenziert nach den Größenklassen wurde durch Bestimmung von Durchschnittswerten der KID-Erhebung 2010 (Wermuth et al. 2012) vorgenommen. Die mittlere Fahrleistung für den Pkw mittlerer Größe beträgt nach dieser Auswertung etwa 15.000 km/a. Die angenommenen Haltedauern orientieren sich am zweiten Bericht der NPE (NPE 2011b) und die steuerlichen Absetzungszeiträume entsprechen dem in den AfA-Tabellen des Bundesfinanzministeriums vorgegebenen Zeitraum. Für den Pkw mittlerer Größe wurde eine mittlere Haltedauer von 4 Jahren und ein Absetzungszeitraum von 6 Jahren zu Grunde gelegt. Es wurde weiterhin angenommen, dass eine Wallbox mit möglicher Ladeleistung von 11 bzw. 22 kW bei Anschaffung eines Elektrofahrzeugs installiert wird und die Ladung des Fahrzeugs ausschließlich im Unternehmen und nicht an öffentlichen Lademöglichkeiten stattfindet. Für die Berechnungen wurde ein Kalkulationszins von 5 % und ein Unternehmenssteuersatz von 30 % angenommen (Bäumel et al. 2013). Da für die Restwertbestimmung die Methode 1 nach Pfahl (2012) (siehe Abschnitt 2.3.6) angewendet wird, ist eine Festlegung der Fahrleistung des Zweitnutzers und eine Gesamthaltedauer beider Nutzer notwendig. Für die Gesamthaltedauer wurde ein Wert von 10 Jahren, in Anlehnung an den zweiten Bericht der NPE (NPE 2011a), angenommen. Die Fahrleistung des Zweitnutzers beruht auf einer Auswertung der Erhebung Mobilität in Deutschland 2008 (Follmer et al. 2010) zur privaten Pkw-Nutzung. Für den Pkw mittlerer Größe ergibt sich eine mittlere Jahresfahrleistung des Zweitnutzers von ca. 15.000 km/a.

Die Übersicht zu den Parameterausprägungen für die weiteren Pkw-Größenklassen und für leichte Nutzfahrzeuge befindet sich im Anhang.

Tabelle 20: Standardparameterausprägungen für einen Pkw der Größenklasse *mittel*.

Parameter	Ausprägung
Jahresfahrleistung	15.000 km
Haltedauer Erstnutzer	4 Jahre
Absetzungszeitraum	6 Jahre
Ladeinfrastruktur	Wallbox 11-22 kW
Ladeverhalten	nur am Unternehmensstandort
Kalkulationszins	5 %
Unternehmenssteuersatz	30 %
Jahresfahrleistung Zweitnutzer	15.000 km
Haltedauer Zweitnutzer	6 Jahre
Elektrische Reichweite	150 km

### 3.1.2 Gesamtkosten in Abhängigkeit der Fahrleistung

Eine zentrale Einflussgröße für Gesamtkosten eines Fahrzeugs ist die Fahrleistung, welche die Kraftstoffkosten bestimmt und auch die Restwertentwicklung des Fahrzeugs maßgeblich beeinflusst. Für den Vergleich von konventionellen mit elektrischen Fahrzeugen ist der Schnittpunkt der Kostenkurven in Abhängigkeit der Fahrleistung von besonderem Interesse. Er bestimmt, welche Fahrleistung ein Fahrzeug haben muss, damit der Kraftstoffkostenvorteil des elektrischen Fahrzeugs groß genug wird, um den Nachteil durch teurere Investitionskosten auszugleichen. Der Schnittpunkt zeigt die zur Erreichung von Kostengleichheit notwendige Fahrleistung an.

In Abbildung 7 und Abbildung 8 sind die Gesamtkosten eines Diesel- und eines Elektro-Pkw mittlerer Größe gegen die Fahrleistung im Anschaffungsjahr 2014 und 2020 aufgetragen. Dabei sind die Gesamtkosten als Bänder, aufgespannt durch die angenommenen Szenarien, dargestellt. Die untere Kante des Kostenbandes für das Elektrofahrzeug und die obere Kante des Kostenbandes für das Dieselfahrzeug sind die berechneten Gesamtkosten auf Basis des optimistischen Szenarios. Analog dazu stellen die obere Kante des Kostenbandes für das Elektrofahrzeug und die untere Kante des Kostenbandes für das Dieselfahrzeug die berechneten Gesamtkosten im pessimistischen Szenario dar. Die Kosten jeweils mit Annahme des mittleren Szenarios sind durch gestrichelte Linien innerhalb der Bänder gezeigt.

Das Kostenband des Elektrofahrzeugs ist in beiden Abbildungen wesentlich breiter als das des Dieselfahrzeugs. Für das Dieselfahrzeug wird die Breite durch die unterschiedlichen Dieselpreise in den Szenarien bestimmt. Dabei spreizen sich die Preise für den Kraftstoff in der Zukunft stärker, was zur Folge hat, dass das Kostenband des Dieselfahrzeugs in Abbildung 7 schmaler bleibt als in Abbildung 8. In beiden Abbildungen wird das Band mit zunehmender Fahrleistung breiter, da dann die Spreizung des Dieselpreises durch den wachsenden Anteil der Kraftstoffkosten an den Gesamtkosten einen größeren Einfluss hat. Die Breite des Kostenbandes für das Elektrofahrzeug wird neben den

Szenario-Annahmen für den Strompreis zusätzlich durch den Batteriepreis beeinflusst. Es wird deutlich, dass der Beitrag zur Breite des Bandes durch die Batteriepreise wesentlich größer ist als der durch den Strompreis. In den Rechnungen wurde für das Jahr 2014 für Kraftstoffpreise in allen Szenarien der gleiche Wert angesetzt (siehe Abschnitt 2.3.1). Für die Batteriepreise wurden in den Szenarien auch für das Jahr 2014 unterschiedliche Preise angenommen, was durch die wenig transparenten und von Hersteller zu Hersteller unterschiedlichen Aufpreise von elektrischen Fahrzeugvarianten heute begründet werden kann.

Der Schnittpunkt der Kostenkurven beider Antriebe unter Annahme des optimistischen Szenarios (obere Kante orangenes Band schneidet untere Kante blaues Band) liegt in Abbildung 7 bei ca. 30.400 km. Ab dieser Jahresfahrleistung und unter Annahme der oben erläuterten Standardparameter sind die Gesamtkosten eines Elektrofahrzeugs im Vergleich zu denen eines Dieselfahrzeug gleich bzw. niedriger. Im mittleren Szenario liegt der Schnittpunkt der Kurven erst bei einer Jahresfahrleistung von über 50.000 km und für das pessimistische Szenario außerhalb des gezeigten Bereichs. Die Gesamtkostendifferenz zwischen den mittleren Szenarien beträgt (vgl. Abbildung 7) bei einer Jahresfahrleistung von 10.000 km ca. 4.500 € und sinkt für 15.000 km auf 4.000 € und für 20.000 km auf ca. 3.500 €.

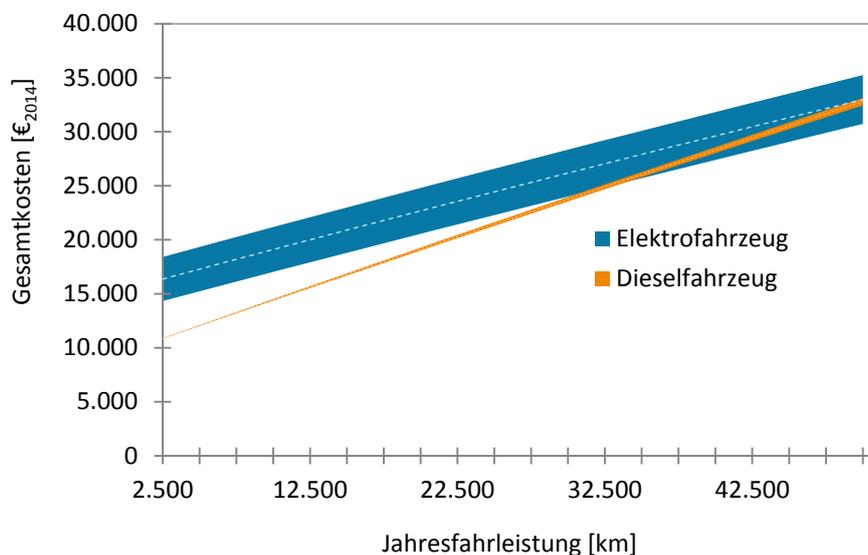


Abbildung 7: Pkw-mittel mit Anschaffungsjahr 2014. Gesamtkosten in Abhängigkeit der Fahrleistung.

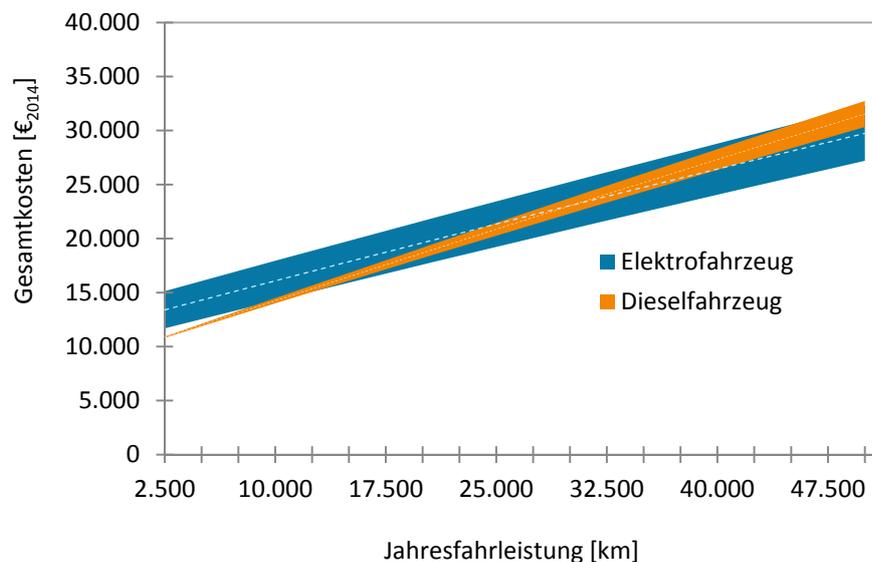


Abbildung 8: Pkw-mittel mit Anschaffungsjahr 2020. Gesamtkosten in Abhängigkeit der Fahrleistung.

Abbildung 8 zeigt die Gesamtkosten in Abhängigkeit der Fahrleistung bei einem sechs Jahre späteren Fahrzeugkauf im Jahr 2020. Vor allem durch den gesunkenen Batteriepreis wird hier Kostenparität zwischen dem Elektrofahrzeug und dem Dieselfahrzeug im optimistischen Szenario schon bei einer Jahresfahrleistung von ca. 8.200 km erreicht, im mittleren Szenario bei etwa 30.000 km. Die Gesamtkostendifferenz im mittleren Szenario liegt bei einer Fahrleistung von 15.000 km im Jahr 2020 noch bei ca. 1.300 €. Die beiden Kostenbänder haben über den dargestellten Fahrleistungsbereich weitgehende Überschneidung, was eine Wirtschaftlichkeit von Elektrofahrzeugen im Rahmen der Unsicherheiten im Jahr 2020 wahrscheinlich macht.

Die analogen Abbildungen für die weiteren Größenklassen der Pkw und leichten Nutzfahrzeuge finden sich im Anhang 6.3.

In Abbildung 9 ist der Gesamtkostenvergleich zwischen einem mittleren Diesel- und Benzin-Pkw in Abhängigkeit der Fahrleistung für die Bandbreite der betrachteten Szenarien dargestellt. Das Dieselfahrzeug erzielt ab einer Jahresfahrleistung von 12.500 km im Vergleich zur Benzinvariante einen Kostenvorteil. Für die Gesamtkostenbetrachtung der elektrischen Fahrzeugvariante wird hier und im Folgenden das Dieselfahrzeug standardmäßig als Vergleichsgröße herangezogen, da sich im Betrachtungszeitraum bis 2020 Elektrofahrzeuge im Regelfall erst bei höheren Jahresfahrleistungen (> 12.500 km) rechnen, in denen das Dieselfahrzeug jeweils die günstigste konventionelle Vergleichsvariante darstellt.

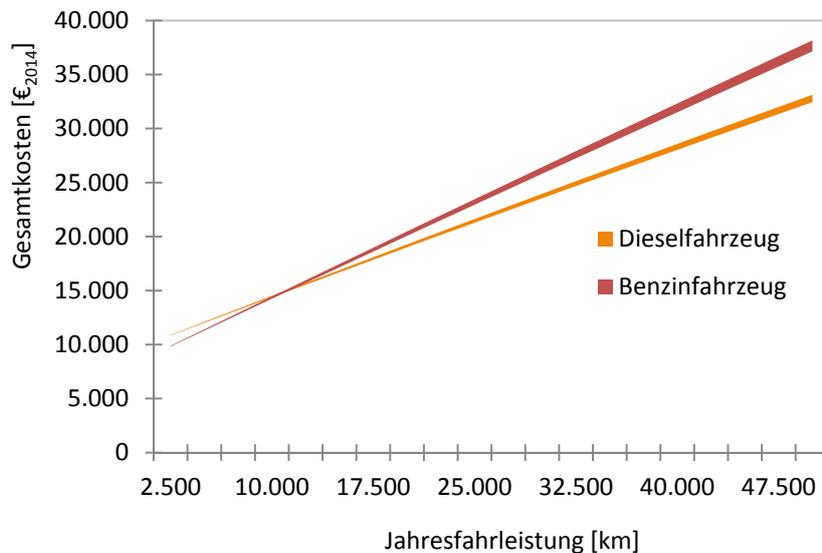


Abbildung 9: Vergleich der Gesamtkosten eines Pkw-mittel als Benzin- und Dieselfahrzeug mit Anschaffungsjahr 2014 in Abhängigkeit der Fahrleistung.

### 3.1.3 Gesamtkosten in Abhängigkeit des Anschaffungsjahres

Die wesentliche Einflussgröße auf den Investitionsnachteil von Elektrofahrzeugen ist der Batteriepreis. Für diesen wird in den nächsten Jahren eine deutliche Degression durch Senkung der Produktionskosten auf Grund von Entwicklungsfortschritten und Skaleneffekten erwartet (siehe Abschnitt 2.3.1). Um den Einfluss des Batteriepreises geeignet abzubilden, wurden die Gesamtkosten eines Pkw mittlerer Größe unter Annahme der Standardparameter (siehe Tabelle 20) in Abhängigkeit des Anschaffungsjahres aufgetragen (Abbildung 10).

Analog zu den vorherigen Abbildungen wurde hier eine Darstellung der Szenarien durch Kostenbänder gewählt. Der unteren Kante des Kostenbandes für das Elektrofahrzeug und der oberen Kante des Bandes für das Dieselfahrzeug liegt das optimistische Szenario zugrunde, analog wurde die obere Kante des Bandes für Elektrofahrzeuge und die untere Kante für Dieselfahrzeuge unter Annahme des pessimistischen Szenarios berechnet. Das mittlere Szenario ist jeweils durch eine gestrichelte Linie dargestellt. Wie oben erläutert, wird die Breite des jeweiligen Kostenbandes durch die Szenario-Annahmen der Kraftstoffpreise und für die Elektrofahrzeuge zusätzlich durch die Annahmen des Batteriepreises bestimmt. Dieser hat einen deutlich größeren Einfluss auf die Breite des Unsicherheitsbandes als der Kraftstoffpreis.

Aus Abbildung 10 lässt sich die Annahme einer starken Degression des Batteriepreises bis 2018 erkennen, welche dann abflacht und linear weiterläuft (vgl. Abschnitt 2.3.1). Ab dem Jahr 2017 überschneiden sich die beiden Kostenbänder, d. h. unter Annahme des optimistischen Szenarios besteht ab 2017 Kostensparität bzw. die Elektrofahrzeugvariante hat einen mit weiteren Jahren

steigenden Kostenvorteil, der 2020 ca. 1.000 € beträgt. Im mittleren Szenario wird bis 2025 eine Kostengleichheit nicht erreicht, allerdings sinkt die Gesamtkostendifferenz ab 2017 unter 1.800 € und beträgt 2025 noch etwa 900 €.

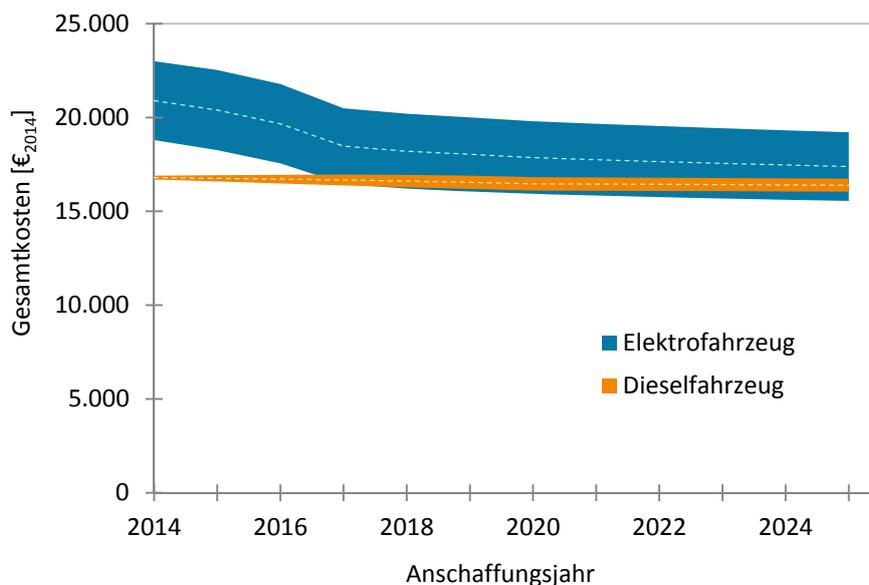


Abbildung 10: Pkw-mittel mit einer Jahresfahrleistung von 15.000 km. Gesamtkosten in Abhängigkeit des Anschaffungsjahres.

### 3.1.4 Sonder-AfA für Elektrofahrzeuge

Um die Wirtschaftlichkeit von Elektrofahrzeugen bereits kurzfristig zu erhöhen, werden unterschiedliche Maßnahmen diskutiert. So empfiehlt beispielsweise die Nationale Plattform Elektromobilität (NPE) im vierten Fortschrittsbericht die Einführung einer Sonder-AfA für Elektrofahrzeuge als zentrale Marktanreizmaßnahme (NPE 2014). Die Einführung einer Sonder-AfA für Elektrofahrzeuge soll es erlauben, 50 % der Investition zusätzlich zur normalen jährlichen Abschreibung bereits im Jahr der Anschaffung steuerlich abzusetzen (vgl. Abschnitt 2.3.3). Durch die Sonder-AfA bietet sich dem Steuerpflichtigen die Möglichkeit, im ersten Jahr höhere Verluste steuerlich geltend zu machen und somit seinen zu versteuernden Gewinn zu reduzieren. Ab dem zweiten Jahr kehrt sich dieser Effekt um, da nunmehr ein geringeres Abschreibungsvolumen zur Verfügung steht. Der monetäre Vorteil einer Sonder-AfA für den Fahrzeughalter beruht somit auf dem Zins- und Liquiditätsvorteil, der sich durch eine vorgezogene Abschreibung ergibt.

**Wichtiger Hinweis:**

*In der ursprünglichen Fassung dieses Berichts (Februar 2015) wurde die Wirkung einer Sonder-AfA nur unvollständig dargestellt. Unberücksichtigt blieb in der Vorgängerversion, dass bei einem Wiederverkauf des Fahrzeugs vor dem Zeitpunkt der vollständigen Abschreibung (im Regelfall nach 6 Jahren) die Differenz zwischen Verkaufserlös und Restbuchwert versteuert werden muss. Da bei einer Sonder-AfA der Restbuchwert schneller sinkt, muss beim Wiederverkauf ein höherer Erlös versteuert werden. Für die dargestellte Sensitivitätsbetrachtung zur Sonder-AfA bedeutet dies, dass sich der monetäre Vorteil für den Nutzer gegenüber der ursprünglichen Darstellung deutlich reduziert und das ökonomische Potenzial von Elektrofahrzeugen geringer ausfällt.*

In Abbildung 11 sind die Gesamtkosten im Jahr 2018 für einen Elektro-Pkw mittlerer Größe mit und ohne Berücksichtigung einer Sonder-AfA, sowie die Kosten eines vergleichbaren Dieselfahrzeugs in Abhängigkeit der Fahrleistung dargestellt. Die Gesamtkostenersparnis durch die Sonder-AfA ist unabhängig von der Fahrleistung und beträgt ca. 410 €<sup>25</sup> unter Annahme der erläuterten Standardparameter. Durch diese Ersparnis wird Kostenparität zwischen einem Elektro- und Dieselfahrzeug im Jahr 2018 im mittleren Szenario bei einer Jahresfahrleistung von ca. 28.000 km statt bei ca. 33.000 km erreicht.

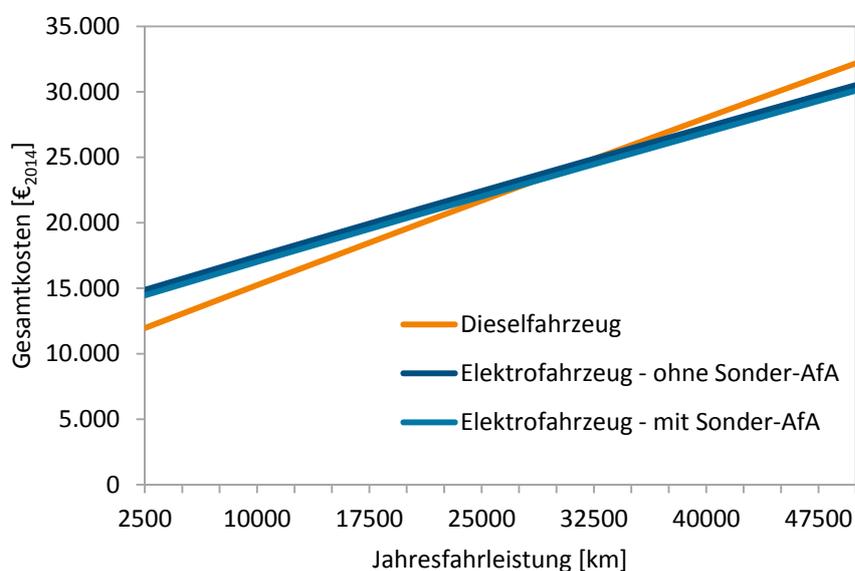


Abbildung 11: Pkw-mittel mit Anschaffungsjahr 2018 unter Annahme des mittleren Szenarios. Für die Elektrofahrzeugvariante mit und ohne Möglichkeit zur steuerlichen Absetzung von zusätzlich 50 % des Fahrzeugpreises im Jahr der Anschaffung (Sonder-AfA). Gesamtkosten in Abhängigkeit der Fahrleistung.

<sup>25</sup> Hinweis: In der Vorgängerversion vom Februar 2014 wurde ohne Berücksichtigung des zu versteuernden Wiederverkaufserlöses ein monetärer Anreiz durch die Einführung einer Sonder-AfA von etwa 1.200 € ermittelt.

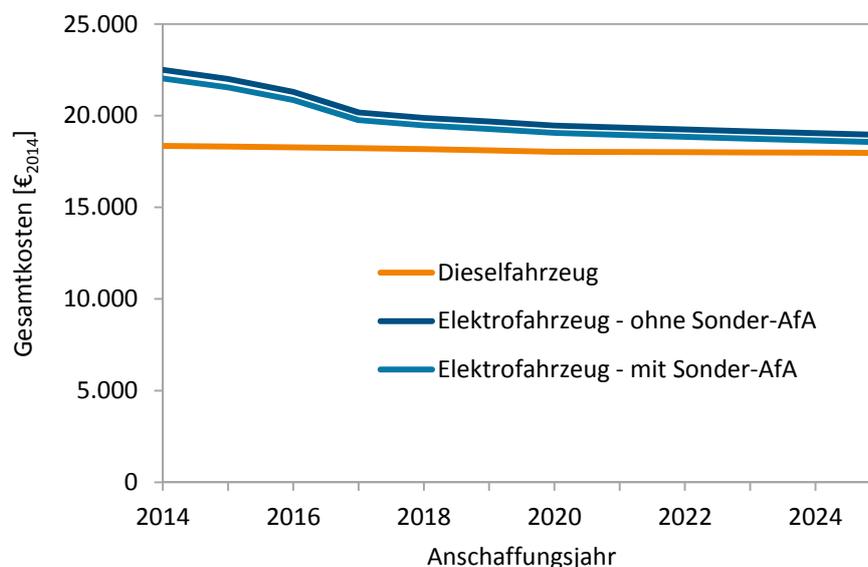


Abbildung 12: Pkw-mittel mit einer Jahresfahrleistung von 15.000 km unter Annahme des mittleren Szenarios. Für die Elektrofahrzeugvariante mit und ohne Möglichkeit zur steuerlichen Absetzung von zusätzlich 50 % des Fahrzeugpreises im Jahr der Anschaffung (Sonder-AfA). Gesamtkosten in Abhängigkeit des Anschaffungsjahres.

Abbildung 12 zeigt die Gesamtkosten für eine Jahresfahrleistung von 15.000 km für einen Elektro-Pkw mittlerer Größe mit und ohne Einführung einer Sonder-AfA, sowie die Kosten eines vergleichbaren Dieselfahrzeugs in Abhängigkeit des Anschaffungsjahres. Die Kostenersparnisse durch die Einführung einer Sonder-AfA sinken durch die geringer werdende Differenz der Investitionskosten von Elektro- und Dieselfahrzeug leicht von etwa 470 € im Anschaffungsjahr 2014 auf 400 € bis 2025. Eine Kostenparität für das Elektro- und Dieselfahrzeug kann auch unter Berücksichtigung einer Sonder-AfA im mittleren Szenario bis zum Jahr 2025 nicht erreicht werden.

### 3.1.5 Strompreis – Lademanagement und Stromtarife

Der in den Berechnungen unterstellte Standardstrompreis berücksichtigt keine Rabatte für Gewerbekunden und kann daher in vielen Fällen – insbesondere für größere Unternehmen – als konservativ betrachtet werden (vgl. Abschnitt 2.3.1). Wie auch bereits in Abschnitt 2.3.1 diskutiert, ist ebenfalls denkbar, dass durch die Nutzung lastvariabler Tarife bzw. die mögliche Befreiung von Netzentgelten gegebenenfalls ein günstigerer Stromtarif für die gewerbliche Nutzung von Elektrofahrzeugen bezogen werden kann. Um die genannten Sachverhalte abzubilden und hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf die Gesamtnutzungskosten zu quantifizieren, wurden in den Berechnungen in Abbildung 13 und Abbildung 14, gegenüber den Standardannahmen, um 6 bzw. 12 ct/kWh reduzierte Strompreise angenommen. Eine Minderung um 6 ct/kWh (red. Strompreis I in Abbildung 13) stellt die mögliche Spannweite möglicher Gewerberabatte dar. Eine weitere Reduzierung auf eine Differenz

von 12 ct/kWh gegenüber dem Standardtarif könnte beispielsweise durch das zusätzliche Wegfallen des Netzentgeltes (BDEW 2014) erreicht werden bzw. liegt in der Größenordnung, in der andere Vergünstigungsmechanismen, wie beispielsweise lastvariable Tarife, in Zukunft liegen könnten (vgl. Abschnitt 2.3.1). Die beiden Sensitivitäten zeigen somit eine plausible Spannweite auf, in der sich die Kosten für den Strombezug von gewerblich zugelassenen Elektrofahrzeugen zukünftig bewegen könnten.

Abbildung 13 zeigt die Gesamtkosten im Jahr 2018 für einen Elektro-Pkw mittlerer Größe mit und ohne Reduzierung des Strompreises unter Annahme des mittleren Szenarios, sowie die Kosten eines analogen Dieselfahrzeugs in Abhängigkeit der Fahrleistung. Mit zunehmender Fahrleistung steigt der Gesamtkostenvorteil durch den reduzierten Strompreis. Mit Zugrundelegung eines um 6 ct/kWh reduzierten Strompreises erreicht das Elektrofahrzeug bereits bei einer Fahrleistung von etwa 22.500 km im Vergleich zu etwa 30.000 km ohne Strompreisvergünstigung Kostengleichheit mit dem konventionellen Pkw. Für eine Jahresfahrleistung von 15.000 km liegt der Gesamtkostenvorteil gegenüber einem Elektrofahrzeug ohne reduzierten Tarif bei ca. 600 € und steigt für eine Fahrleistung von 40.000 km auf etwa 1.600 €. Für eine weitere Strompreisreduzierung (red. Strompreis II in Abbildung 13) wird Kostengleichheit mit dem Dieselfahrzeug bereits für eine Jahresfahrleistung von etwa 17.500 km erreicht. Der Gesamtkostenvorteil gegenüber einem Elektrofahrzeug ohne Strompreisreduzierung liegt für 15.000 km/Jahr bei etwa 1.200 € und steigt für 40.000 km/Jahr auf etwa 3.200 €.

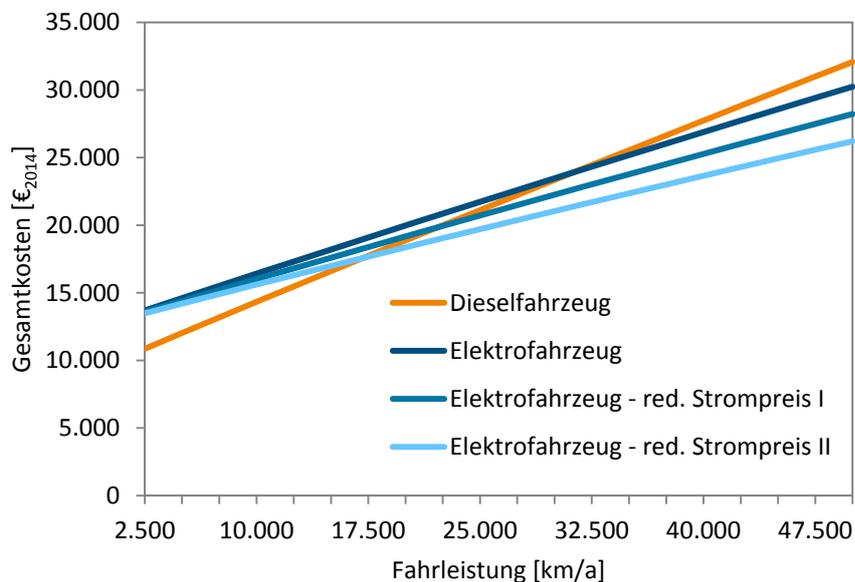


Abbildung 13: Pkw-mittel mit Anschaffungsjahr 2018 und unter der Annahme des mittleren Szenarios. Elektrofahrzeugvariante mit und ohne Reduktion des Strompreises. Gesamtkosten in Abhängigkeit der Fahrleistung.

Da die Jahresfahrleistung in Abbildung 14 konstant mit 15.000 km eingeht, bleibt der Gesamtkostenvorteil durch den einfach reduzierten Stromtarif (red.

Stromtarif I) für verschiedene Anschaffungsjahre fast konstant. Er sinkt lediglich von etwa 640 € im Jahr 2014 auf 580 € im Jahr 2025 auf Grund der verbesserten Effizienz der Dieselfahrzeugvariante und des Verhältnisses von Strom- zu Dieselpreis. Wie zu erkennen ist, reicht der Kostenvorteil bei einer Jahresfahrleistung von 15.000 km nicht aus, um die Gesamtkostenlücke zwischen Elektro- und Dieselfahrzeug zu schließen. Unter Annahme eines weiter reduzierten Stromtarifs kann Kostengleichheit des Elektrofahrzeugs mit dem entsprechenden Dieselmotell bei einer Jahresfahrleistung von 15.000 km im Jahr 2023 erreicht werden. Die Kostenkurve für den angenommenen reduzierten Stromtarif II liegt etwa 1.200 € unter der für das Elektrofahrzeug ohne reduzierten Tarif.

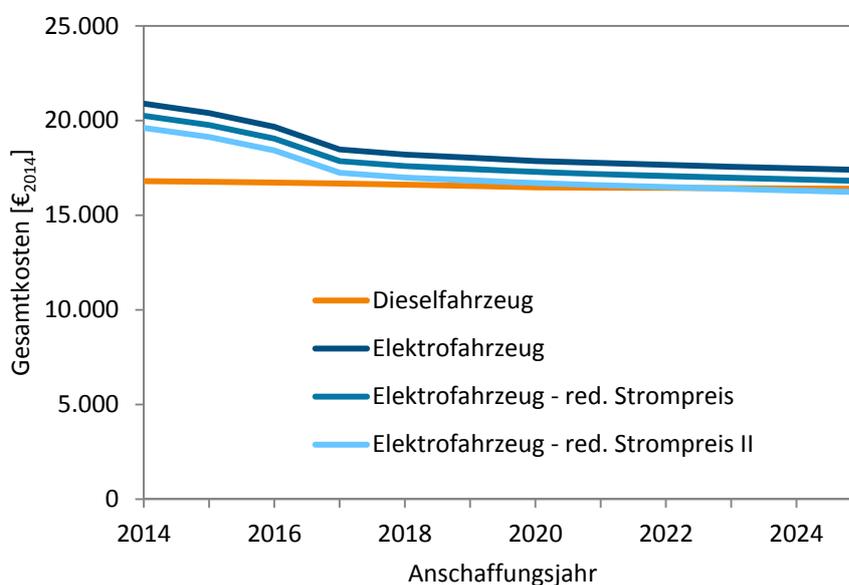


Abbildung 14: Pkw-mittel mit einer Jahresfahrleistung von 15.000 km und unter der Annahme des mittleren Szenarios. Für die Elektrofahrzeugvariante mit und ohne Reduktion des Strompreises. Gesamtkosten in Abhängigkeit des Anschaffungsjahres.

## 3.2 Wichtige Einflussgrößen

Die berechneten Gesamtkosten hängen direkt und indirekt von zahlreichen Parametern ab, die zusätzlich zu Unsicherheiten durch z. B. Mittelwertbildung Unsicherheiten durch Fortschreibung in die nächste Zukunft aufweisen. Es ist wichtig, die berechneten Ergebnisse auf ihre Sensitivität gegenüber Parametervariation zu untersuchen und bei der Einordnung der Ergebnisse die Bandbreite der Schwankungen zu berücksichtigen. Da eine genaue Fehleranalyse der Berechnungen auf Grund der schwer quantifizierbaren Fehler einzelner Parameter nicht möglich ist, wird eine einfache Analyse der Sensitivitäten, wie sie im Folgenden beschrieben wird, durchgeführt, um eine Einordnung der Ergebnisse vorzunehmen. Diese Analyse erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit, d. h. die Unsicherheiten der Ergebnisse sind damit zwar annähernd für wesentliche Parameter abzuschätzen, aber keineswegs vollständig abgebildet.

In Abbildung 15 ist die Gesamtkostendifferenz eines Elektro-Pkw und eines Diesel-Pkw mittlerer Größe für das Anschaffungsjahr 2014 und für eine Jahresfahrleistung von 15.000 km in Abhängigkeit einer relativen Variation verschiedener Parameter dargestellt. Variiert wurden die aufgeführten Parameter in einem Bereich von 70 % bis 130 % bezüglich des Standardwertes. Ein Wert von 100 % entspricht hierbei der Standardeinstellung. Alle Parameter wurden einzeln, d. h. unabhängig von anderen Parametern verringert bzw. erhöht.

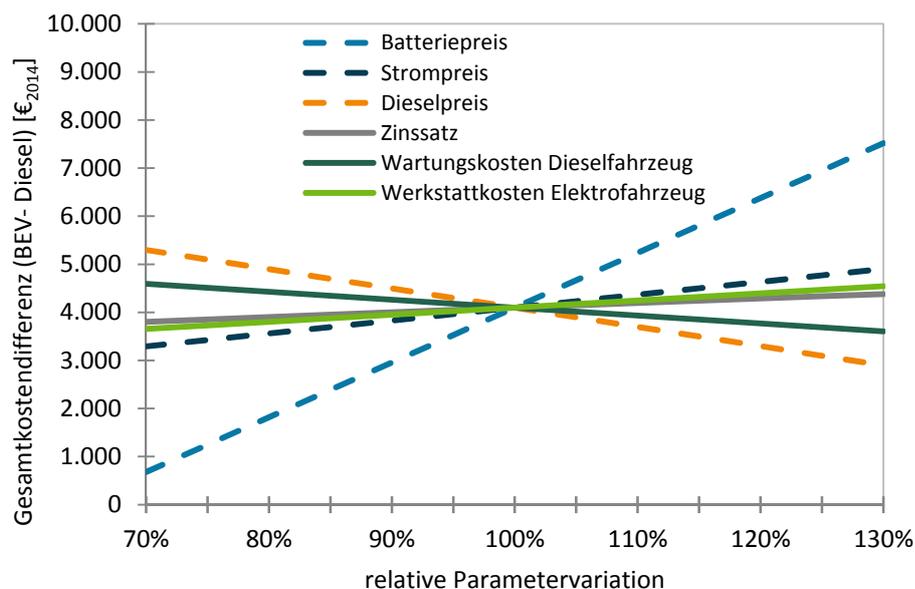


Abbildung 15: Gesamtkostendifferenz zwischen Elektro- und Dieselfahrzeug in Abhängigkeit von Parametervariationen. Darstellung für Pkw-mittel mit Anschaffungsjahr 2014, einer Jahresfahrleistung von 15.000 km und unter der Annahme des mittleren Szenarios.

Die Parameter, die zur Szenarien-Bildung herangezogen wurden, sind durch gestrichelte Linien gekennzeichnet. Diese sind der Batteriepreis, der Strompreis und der Dieselpreis. Die Sensitivität der Gesamtkosten auf einen einzelnen Parameter lässt sich anhand der Steigung der jeweiligen Geraden bewerten. Je steiler die Gerade, desto größer ist die Änderung der Gesamtkostendifferenz bei Variation des Parameters, d. h. desto größer ist der Einfluss des Parameters auf die Gesamtkosten.

Abbildung 15 plausibilisiert die getroffene Wahl der Parameter zur Szenario-Bildung (Batterie- und Energiepreise). Wie die Analysen zeigen, haben diese einen weit größeren Einfluss auf die Gesamtkosten, d. h. in der Abbildung eine größere Steigung als weitere Einflussgrößen, wie z. B. die Wartungskosten des jeweiligen Fahrzeugs. Die Variation des Batteriepreises verursacht eine Änderung der Gesamtkostendifferenz von maximal 7.000 € in der betrachteten Spannbreite von 70 % bis 130 %. Die Variation des Dieselpreises hat eine Änderung von maximal etwa 2.500 € und die des Strompreises von etwa 1.500 € zur Folge, jeweils mit unterschiedlichem Vorzeichen. Wenn der Dieselpreis verringert wird, steigt die Gesamtkostendifferenz, d. h. das Elektrofahrzeug wird im Verhältnis zum Dieselfahrzeug teurer. Analog dazu sinkt die Gesamtkostendifferenz bei Verringerung des Strompreises und umgekehrt.

Die Variation der Werkstattkosten hat jeweils eine maximale Änderung der Gesamtkostendifferenz von 1.000 € zur Folge, analog zu den Kraftstoffpreisen mit entgegengesetztem Vorzeichen. Die Variation des Kalkulationszinssatzes bewirkt eine Änderung der Gesamtkostendifferenz von höchstens 600 €.

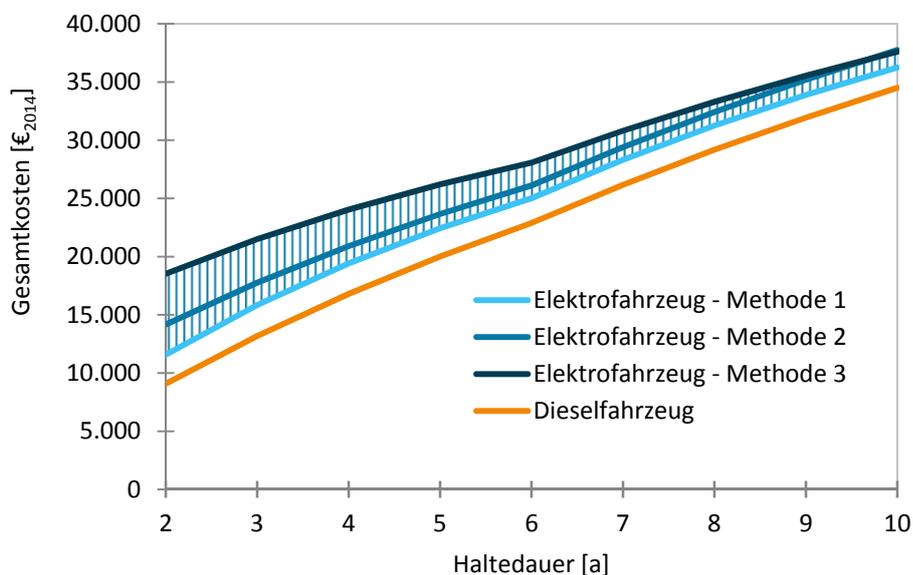


Abbildung 16: Gesamtkosten in Abhängigkeit der Haltedauer des Erstnutzers für verschiedene Methoden der Restwertberechnung für Elektrofahrzeuge. Darstellung für einen Pkw mittlerer Größe mit Anschaffungsjahr 2014, einer Jahresfahrleistung von 15.000 km und unter der Annahme des mittleren Szenarios.

Einen wesentlichen Einfluss auf das Ergebnis der Gesamtkostenrechnung hat der Restwert des Fahrzeugs. Für konventionelle Fahrzeuge sind Restwerte relativ gut abzuschätzen (vgl. Abschnitt 2.3.6). Parameter, die den Restwert eines Fahrzeugs bestimmen, sind vor allem die Gesamtfahrleistung und das Alter des Fahrzeugs. Für die Elektrofahrzeugvarianten sind Restwerte zum jetzigen Zeitpunkt schwer abzuschätzen. Es gibt verschiedene Ansätze der Berechnung, von denen drei hier diskutiert werden.

In Abbildung 16 wurden drei verschiedene Methoden der Restwertberechnung am Beispiel eines Elektro-Pkw mittlerer Größe im Anschaffungsjahr 2014 mit einer Jahresfahrleistung von 15.000 km/a und unter Annahme des mittleren Szenarios angewandt und verglichen. Mit Methode 1 wird der Berechnung des Restwerts die gleiche Regressionskurve wie der Dieselfahrzeugvariante zu Grunde gelegt. Methode 2 unterstellt den Restwert des Dieselfahrzeugs zusätzlich eines Kraftstoffkostenvorteils des Zweitnutzers und Methode 3 geht lediglich vom Restwert des entsprechenden Dieselfahrzeugs aus. Näheres zu den einzelnen Methoden ist in Abschnitt 2.3.6 beschrieben.

Aus Abbildung 16 wird deutlich, dass die Bedeutung des Restwerts mit zunehmender Haltedauer und damit Gesamtfahrleistung abnimmt. Der Restwert wird für alle Methoden geringer und stellt so einen geringeren Anteil an den Gesamtkosten dar. Gerade im gewerblichen Markt spielt er also zur Kostenbe-

rechnung eine große Rolle, da Neuzulassungen gewerblicher Halter im Pkw-Bereich im Schnitt nur vier Jahre gehalten werden. Für eine Haltedauer von vier Jahren liegt der Gesamtkostenunterschied zwischen Methode 1 und 3 bei ca. 4.600 €. Auch im Vergleich zu den anderen Einflussgrößen und unter Berücksichtigung der Größenordnung der Kostendifferenz von elektrischem und konventionellem Fahrzeug, unterstreicht die Betrachtung unterschiedlicher Restwertbestimmungsmethoden die besondere Relevanz dieser Einflussgröße für die Gesamtkosten. Für die Berechnungen in dieser Studie wurde standardmäßig Methode 2 gewählt, da sie einen Mittelweg zwischen der optimistischen Annahme der gleichen Restwertentwicklung für konventionelle Fahrzeuge (Methode 3) und der pessimistischen Annahme des absoluten Restwerts des konventionellen Fahrzeugs (Methode 1) darstellt.

Für lange Haltedauern nähern sich die Kostenkurven mit Restwertberechnung nach Methode 2 und 3 an, da die Gesamthaltedauer von Erst- und Zweitnutzer auf zehn Jahre begrenzt wurde und der in die Restwertberechnung von Methode 2 eingehende Kraftstoffkostenvorteil des Zweitnutzers abnimmt. Bei der Berechnung der Gesamtkosten wurde auch hier für den Absetzungszeitraum der Standardwert von sechs Jahren unterstellt. Dies führt zu einem leichten Knick in der Steigung der Gesamtkosten nach dem sechsten Jahr. Die Gesamtkosten nehmen mit steigender Haltedauer ab diesem Punkt schneller zu, da die Kostenvorteile durch die Absetzung entfallen.

### 3.3 Ökonomisches Potenzial und mögliche CO<sub>2</sub>-Minderung bis zum Jahr 2020

Im Folgenden wird ein ökonomisches Potenzial für gewerbliche Elektrofahrzeuge in den betrachteten Fahrzeugkategorien Pkw und leichte Nutzfahrzeuge auf Grundlage der diskutierten Gesamtkostenanalysen für das Jahr 2020 aufgezeigt. Erläuterungen zum methodischen Vorgehen finden sich in Abschnitt 2.5. An dieser Stelle sei jedoch nochmals betont, dass die gezeigten Berechnungen eine Abschätzung darstellen, die nur Kosten- und Reichweitenkriterien berücksichtigt. Weitere mögliche Nutzungshemmnisse, Akzeptanzaspekte oder auch eine mögliche Mehrpreisbereitschaft ist in die Analysen nicht eingeflossen. Der Anspruch der Analysen ist es, ein Potenzial für die wirtschaftlich vorteilhafte Substitution von konventionellen durch Elektrofahrzeuge unter den getroffenen Annahmen zu quantifizieren. Die identifizierten Potenziale sind jedoch nicht mit Marktpotenzialen oder Markthochlaufszszenarien gleichzusetzen.

Die zu Grunde liegenden Daten zur Struktur des gewerblichen Fahrzeugbestandes sowie zum Einsatz der Fahrzeuge stammen aus der KID-Erhebung des Jahres 2010 (Wermuth et al. 2012).

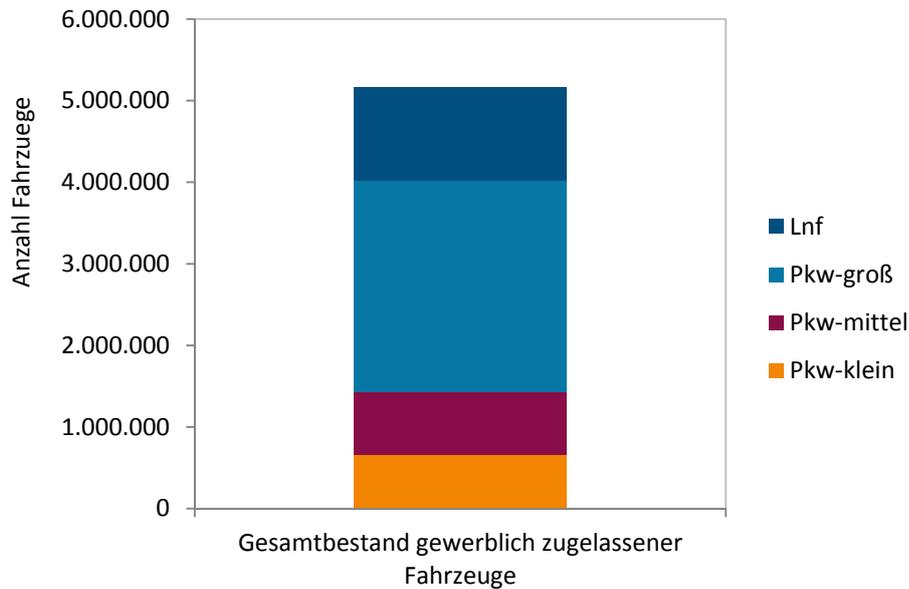


Abbildung 17: Gesamtbestand gewerblicher Pkw und Lnf im Jahr 2010. Quelle: Hochrechnung KID 2010.

Abbildung 17 zeigt den Gesamtbestand gewerblich zugelassener Pkw und leichter Nutzfahrzeuge aufgeschlüsselt nach Größenklassen. Große Pkw bilden mit ca. 2,5 Millionen Fahrzeugen den größten Teil des Bestandes, leichte Nutzfahrzeuge sind mit ca. 1,1 Millionen und mittlere und kleine Pkw jeweils mit etwa 750.000 bzw. 650.000 Fahrzeugen vertreten. Es wird von etwa 2,5 Millionen Pkw im gewerblichen Bestand ausgegangen, die als Dienstwagen genutzt werden, d. h. die sowohl zu privaten als auch geschäftlichen Zwecken genutzt werden (Diekmann et al. 2011). Von den Dienstwagen stammen die meisten Fahrzeuge aus den höheren KBA-Segmenten, d. h. sie gehören zur Kategorie Pkw-groß. Da eine Anpassung der 1 %-Regel die bisherige Benachteiligung von Elektrofahrzeugen als Dienstwagen durch ihre höheren Investitionskosten aufgehoben hat, wird in dieser Studie davon ausgegangen, dass Dienstwagen im Rahmen der ausgewählten Kriterien keiner Sonderbehandlung bedürfen.

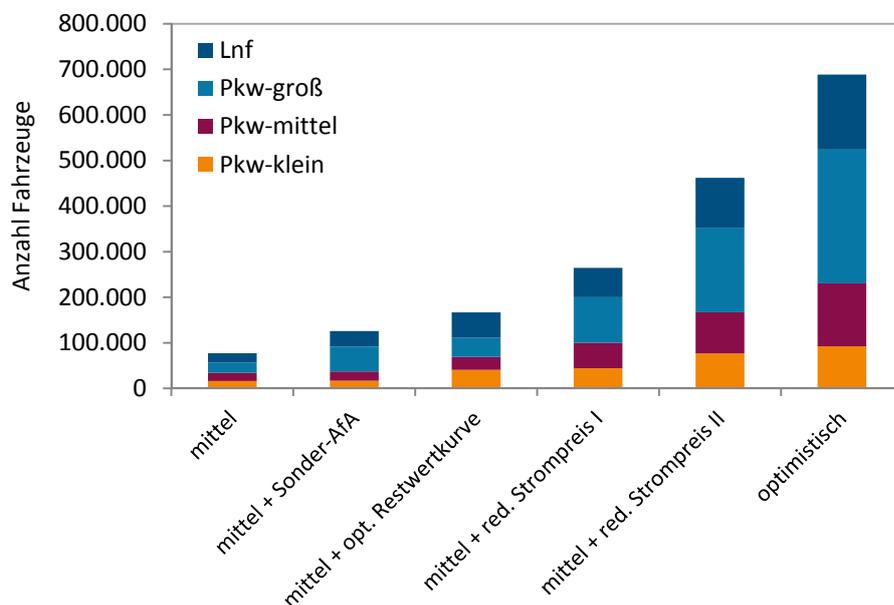


Abbildung 18: Ökonomisches Potenzial von Elektrofahrzeugen bis zum Jahr 2020 für das mittlere Szenario inklusive der Variation mehrerer Parameter sowie für das optimistische Szenario.

Abbildung 18 zeigt die berechneten ökonomischen Potenziale von Elektrofahrzeugen bis zum Jahr 2020 für verschiedene Szenarien. Der erste Balken von links zeigt das ökonomische Potenzial unter Annahme des mittleren Szenarios. Dabei wurde als Entscheidungskriterium für die Wahl der elektrischen Variante die Kostengleichheit bzw. ein Kostenvorteil im Vergleich zum Dieselfahrzeug unterstellt (siehe Abschnitt 3.4). In diesem Szenario könnten unter den getroffenen Annahmen bis 2020 knapp 80.000 Fahrzeuge im gewerblichen Bereich wirtschaftlich betrieben werden, wobei große Pkw mit etwa 22.000 Fahrzeugen das größte Potenzial haben, gefolgt von den leichten Nutzfahrzeugen mit ca. 20.000 Fahrzeugen. Trotz der Tatsache, dass das absolut größte ökonomische Potenzial bei den großen Pkw liegt, ist der relative Anteil am Gesamtbestand für die großen Pkw am geringsten. Die Reichweitenbeschränkung verhindert vor allem, dass bis 2018 große Pkw für eine Elektrifizierung in Frage kommen, da sich dies erst bei hohen Fahrleistungen ökonomisch lohnt. Unter den Annahmen des pessimistischen Szenarios ergibt sich für keine der betrachteten Fahrzeugklassen bis 2020 ein ökonomisches Potenzial.

Die Einführung einer Sonder-AfA für Elektrofahrzeuge führt durch die Kostenersparnis auf Seiten der Elektrofahrzeuge zu einem ökonomischen Potenzial von ca. 125.000 Fahrzeugen<sup>26</sup> im Jahr 2020. Unterstellt man im mittleren Szenario – statt der Restwertkurve berechnet nach Methode 2 – die optimistischere Methode 1 (siehe Abschnitt 2.3.6), erhöht sich das Potenzial auf etwa

<sup>26</sup> Hinweis: In der Vorgängerversion vom Februar 2014 wurde ohne Berücksichtigung des zu versteuernden Wiederverkaufserlöses ein ökonomisches Potenzial von etwa 400.000 Fahrzeugen ermittelt.

180.000 Fahrzeuge im Jahr 2020. Die Verteilung des Potenzials auf die verschiedenen Größenklassen verschiebt sich zu Gunsten der kleinen Fahrzeuge. Dies ist durch den unterstellten Verbrauchsvorteil in Berechnungsmethode 2 zu erklären, der bei großen Fahrzeugen mit hohem Verbrauch und hohen Fahrleistungen stärker ins Gewicht fällt.

Geht man von einem um 6 ct/kWh reduzierten Strompreis (siehe Abschnitt 2.3.1) aus, erreicht man ein Potenzial von ca. 280.000 Fahrzeugen. Unter Annahme eines um 12 ct/kWh reduzierten Stromtarifs könnten bis zum Jahr 2020 etwa 460.000 Fahrzeuge wirtschaftlich durch Elektrofahrzeuge ersetzt werden. Mit Zugrundelegung des optimistischen Szenarios könnte man im Jahr 2020 maximal 710.000 Fahrzeuge elektrisch wirtschaftlich betreiben.

Aus Abbildung 19 wird deutlich, dass leichte Nutzfahrzeuge anteilig am Gesamtbestand der Nutzfahrzeuge ein hohes Potenzial für einen wirtschaftlichen Betrieb aufweisen. Im Durchschnitt haben diese Fahrzeuge längere Haltedauern als Pkw und hohe Jahresfahrleistungen, die im Unterschied zu Fahrleistungen von z. B. Dienstwagen oft planbarer sind. Auch kleine und mittlere Pkw weisen ein anteilig hohes Potenzial auf, das je nach unterstellter Restwertberechnung stark schwankt. Große Pkw fallen anteilig zurück, da hohe Fahrleistungen das Potenzial beschränken.

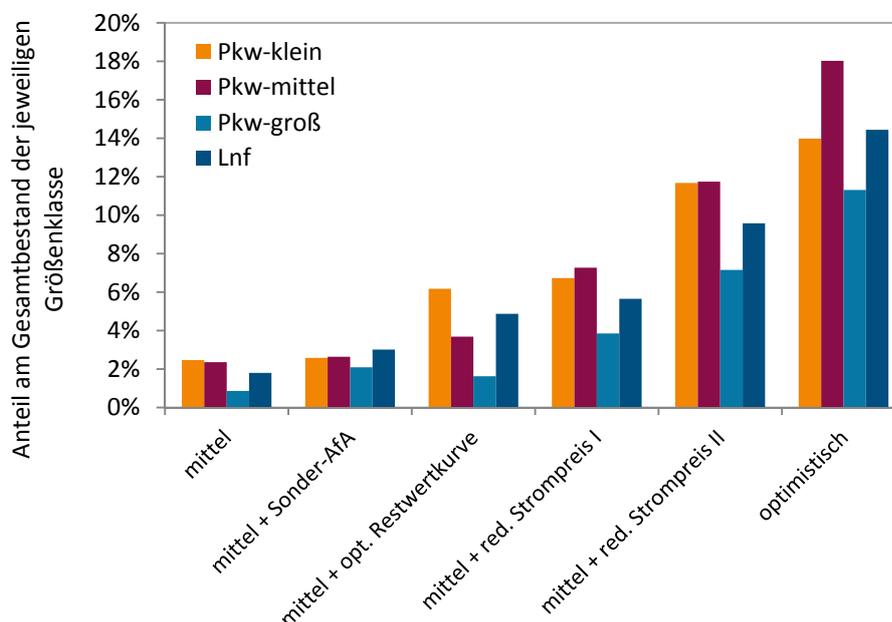


Abbildung 19: Anteil des ökonomischen Potenzials am Fahrzeuggesamtbestand der jeweiligen Größenklasse.

Eine wesentliche Motivation für die Einführung von Elektrofahrzeugen ist das Potenzial der Technologie; bei einem zunehmenden Einsatz von Strom aus erneuerbaren Energien die Treibhausgasemissionen des motorisierten Verkehrs deutlich zu verringern. Die tatsächlich realisierbare Treibhausgasminderung

durch Elektromobilität hängt sehr stark von der Integration des neuen Stromnachfragers Elektromobilität in die Stromwirtschaft ab. Im Rahmen dieser Studie wird der Treibhausgasmindeungsbeitrag vereinfachend unter Berücksichtigung der CO<sub>2</sub>-Intensität des deutschen Strommixes und alternativ für den Fall einer vollständigen Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien abgeschätzt.

Umfassende Analysen zu den möglichen Wechselwirkungen von Elektromobilität und Energiewirtschaft sowie den Auswirkungen auf das Treibhausgasmindeungspotenzial von Elektrofahrzeugen wurden unter anderem in den Projekten OPTUM (Hacker et al. 2011) und eMobil 2050 (Hacker et al. 2014) des Öko-Instituts angestellt.

Auf Grundlage der dargestellten vereinfachenden Bilanzierungsmethodik, hätte die tatsächliche Realisierung der aufgezeigten ökonomischen Potenziale von Elektrofahrzeugen bis 2020 eine relevante Einsparung von Treibhausgasemissionen im Straßenverkehr zur Folge. Abbildung 20 zeigt die Größenordnung dieser Einsparungen für eine Strombereitstellung auf Basis der durchschnittlichen CO<sub>2</sub>-Intensität der Stromerzeugung in Deutschland (Strommix) sowie für eine vollständig erneuerbare Stromerzeugung. Nähere Erläuterungen zur Berechnung der Emissionen sind in Abschnitt 2.5 zu finden. Im mittleren Szenario können so etwa 0,5 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalente im Jahr 2020 und im optimistischen Szenario können maximal etwas mehr als 2,6 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalente eingespart werden. Zum Vergleich: Im Durchschnitt werden jährlich etwa 182 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalente im Straßenverkehr emittiert (Knörr et al. 2012).

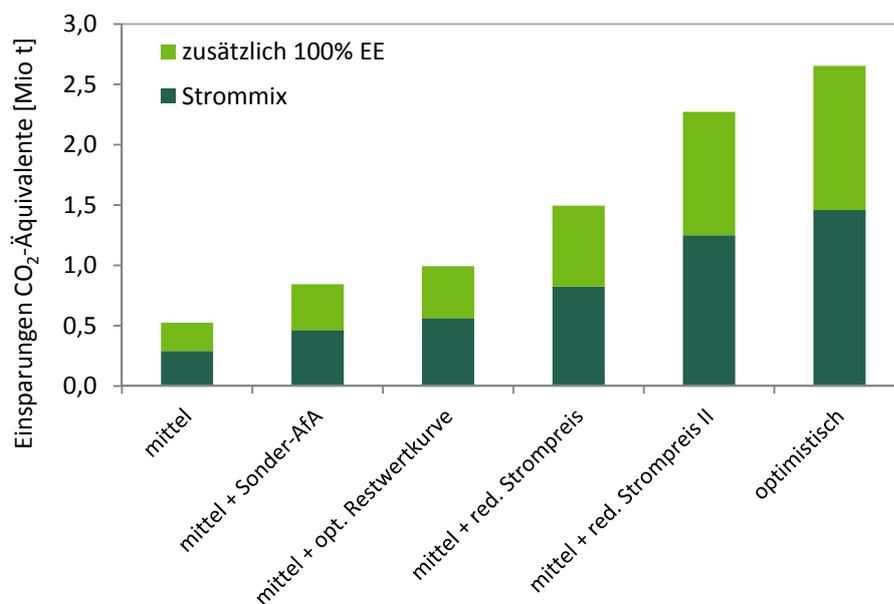


Abbildung 20: CO<sub>2</sub>-Äquivalente – Einsparpotenzial bei Erschließung des ökonomischen Potenzials von gewerblichen Elektrofahrzeugen bis 2020.

Wie in Abschnitt 2.4 beschrieben, wurde als Kriterium für das ökonomische Potenzial eine Kostenparität bzw. ein Kostenvorteil der elektrischen Variante definiert. Insbesondere bei nur geringen Kostennachteilen der elektrischen Variante bei einer größeren Anzahl von Fahrzeugen ist die Aussagekraft eines solchen ökonomischen Potenzials – auch vor dem Hintergrund der Unsicherheiten der Eingangsparameter – beschränkt. In einer erweiterten Analyse wurden daher in die Potenzialbetrachtung auf Grundlage des mittleren Szenarios auch Fahrzeuge mit einbezogen, die einen Gesamtkostennachteil von bis zu 2.000 € aufweisen. Das Ergebnis ist in Abbildung 21 dargestellt. Den Ausgangspunkt stellt das ökonomische Potenzial im mittleren Szenario dar, indem bis zum Jahr 2020 insgesamt ca. 80.000 Fahrzeuge als Elektrofahrzeug mindestens Kostenparität mit der vergleichbaren Dieselve Variante aufweisen. Weitet man die Einschränkung auf einen maximalen Kostennachteil von 500 €, verdoppelt sich das Potenzial an Elektrofahrzeugen auf nahezu 140.000 Fahrzeuge. Bei maximal 1.000 € höheren Kosten über die Gesamtnutzungsdauer des Fahrzeugs erhöht sich das Potenzial bis 2020 auf ca. 240.000 Fahrzeuge und bei einer Obergrenze von 2.000 € auf etwa 550.000 Fahrzeuge.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass ein Großteil der Fahrzeuge bis zum Jahr 2020 unter den getroffenen Annahmen in einem relativ schmalen Korridor um die Kostenparität von elektrischer und konventioneller Fahrzeugvariante liegt. Entsprechend führt bereits eine leichte Lockerung des Wirtschaftlichkeitskriteriums zu einem deutlich höheren Potenzial von Elektrofahrzeugen in den betrachteten Fahrzeugkategorien.

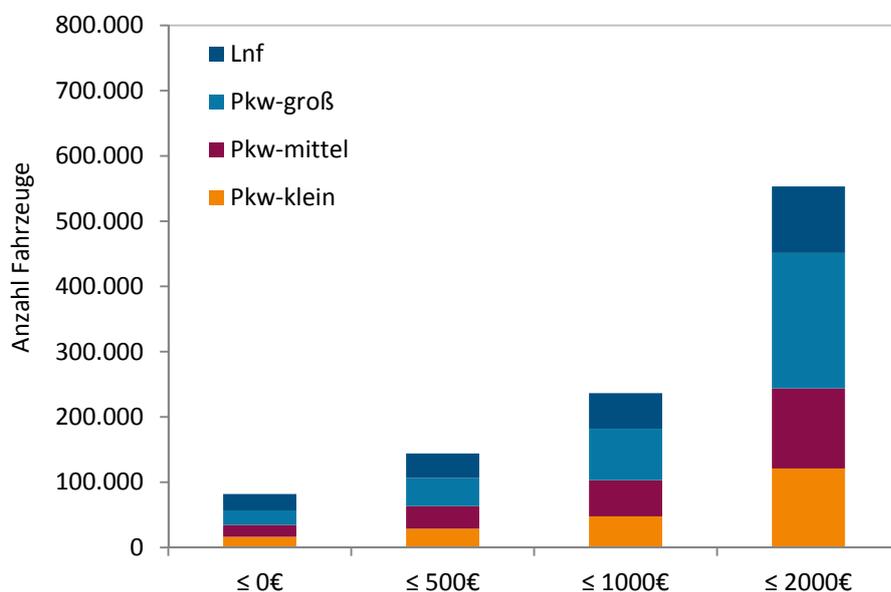


Abbildung 21: Ökonomisches Potenzial von Elektrofahrzeugen bis zum Jahr 2020 für das mittlere Szenario sowie Berücksichtigung von Fahrzeugen mit einem Gesamtkostennachteil von bis zu 2.000 €.

### 3.4 Zwischenfazit

- Batterieelektrische Fahrzeuge können bereits heute bei hoher Jahresfahrleistung und langer Haltedauer Kostenvorteile gegenüber konventionellen Antriebsvarianten haben. In den nächsten Jahren bis 2020 sinken die Kostennachteile der batterieelektrischen Fahrzeuge erheblich, sodass in vielen gewerblichen Anwendungen die Nutzung eines elektrischen Fahrzeugs wirtschaftlich sein kann.
- Ein Pkw mittlerer Größe liegt in den Gesamtkosten im optimistischen Szenario 2014 bereits bei einer Fahrleistung von 30.000 km/a mit einem Dieselfahrzeug gleich auf. Im Jahr 2020 wird Kostengleichheit im optimistischen Szenario bei einer Fahrleistung von 8.000 km/a und im mittleren Szenario bei 30.000 km/a erreicht.
- Im mittleren Szenario ergibt sich im Jahr 2020 ein ökonomisches Potenzial von 80.000 Fahrzeugen. Mit Annahme des optimistischen Szenarios erhöht sich diese Anzahl auf 700.000 Fahrzeuge. Die Einführung einer Sonder-AfA als Fördermaßnahme hätte unter Annahme des mittleren Szenarios zur Folge, dass die Anzahl der maximal ersetzbaren Fahrzeuge bis 2020 auf etwa 125.000 Fahrzeuge stiege.
- Die Elektrifizierung von 700.000 Fahrzeugen im gewerblichen Bereich bis 2020 würde eine Einsparung von 2,6 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalenten allein im Jahr 2020 zur Folge haben.

### 3.5 Anwendungsspezifische Ergebnisse

In diesem Abschnitt werden auf spezielle Anwendungsgebiete zugeschnittene Gesamtkostenrechnungen vorgestellt und diskutiert. Dabei wurden wichtige Parameter wie Fahrleistungen und Haltedauern gemäß den Anwendungen angepasst und zusätzliche Kriterien, wie ein erhöhter Kraftstoffverbrauch oder höhere Wartungskosten, die sich durch die jeweilige Anwendung begründen, berücksichtigt. Es wird für jede Anwendung ein Vergleich der Gesamtkosten zwischen den verschiedenen Antrieben und für die Jahre 2014 und 2020 gegeben.

Folgende Anwendungen werden betrachtet:

- Anwendung I: Pkw im Lieferverkehr (Stichfahrt)
- Anwendung II: Pkw im Taxigewerbe
- Anwendung III: Leichtes Nutzfahrzeug im Handwerk (Tour)
- Anwendung IV: Leichtes Nutzfahrzeug im KEP-Einsatz (Stadtgebiet)
- Anwendung V: Leichtes Nutzfahrzeug im KEP-Einsatz (ländlicher Raum).

Für jede der betrachteten Anwendungen werden die wichtigsten der Rechnung zugrunde liegenden Parameter in einer Tabelle zusammengefasst und anschließend die Ergebnisse der Rechnungen dargestellt.

Bei den Analysen wurden einsatzspezifische Annahmen zu Wartungskosten und Energieverbrauch berücksichtigt. Für den Einsatz im Stadtgebiet wurde ein 10 % höherer Energieverbrauch der konventionellen Fahrzeuge durch z. B. häufigeres Bremsen und Anfahren im Stadtverkehr unterstellt. Für Elektrofahrzeuge wurde unterstellt, dass hier häufigeres Bremsen und Anfahren durch Rekuperation und elektrisches Anfahren keinen Einfluss auf den Verbrauch hat. Zudem wurden im Einsatzgebiet Stadt für alle Antriebsarten 20 % höhere Wartungskosten aufgrund eines höheren Materialverschleißes unterstellt. Alle Rechnungen wurden auf Basis des mittleren Szenarios durchgeführt.

### 3.5.1 Pkw im Lieferverkehr (Stichfahrt)

Anwendung I basiert auf einem Fahrzeug der Kategorie Pkw-klein. Zentrale Parameter zu den Rechnungen sind in Tabelle 21 aufgeführt. Anwendungen, die durch dieses Beispiel repräsentiert werden sollen, sind zum Beispiel: Lieferdienste im Gastronomiebereich (Pizzalieferdienst), Lieferdienste von Medikamenten (Apothekenlieferdienst) oder ähnliche Lieferdienste. Die angesetzte Jahresfahrleistung von 21.000 km entspricht einer Tagesfahrleistung von etwa 70 km bei etwa 300 Werktagen im Jahr (Knahl & Sommer 2013). Für diese Anwendung wurde ein Einsatz vor allem in Stadtgebieten angenommen und den konventionellen Fahrzeugen ein um 10 % erhöhter Kraftstoffverbrauch, sowie allen Antrieben durch erhöhten Verschleiß um 20 % erhöhte Wartungskosten unterstellt.

Tabelle 21: Parameterausprägungen für die Anwendung *Pkw im Lieferverkehr*.

Parameter	Ausprägung
Größenklasse	Pkw-klein
Jahresfahrleistung Erstnutzer	21.000 km
Haltedauer Erstnutzer	8 Jahre
Absetzungszeitraum	6 Jahre
Ladeinfrastruktur	Wallbox 11-22 kW
Ladeverhalten	nur am Unternehmensstandort
Kalkulationszins	5 %
Unternehmenssteuersatz	30 %
Jahresfahrleistung Zweitnutzer <sup>27</sup>	10.000 km
Haltedauer Zweitnutzer	2 Jahre
Reichweite	150 km
Einsatz	Stadtverkehr
Szenario	mittel

In Abbildung 22 ist ein Gesamtkostenvergleich für diese Anwendung zwischen einem Benzin-, einem Diesel- und einem Elektrofahrzeug dargestellt. Für Anwendung I wurde das Benzinfahrzeug zusätzlich in den Vergleich aufgenommen, da im Gegensatz zu den anderen Größenklassen die Mehrheit der kleinen gewerblich angemeldeten Pkw Benziner sind. Aus der Abbildung ist zu entnehmen, dass sich ein Elektrofahrzeug gegenüber dem Benzinfahrzeug heute schon für die angenommene Fahrleistung lohnt. Die Kraftstoffkosten des Benzinfahrzeugs sind für das Anschaffungsjahr 2014 fast dreifach, für das Anschaffungsjahr 2020 etwas mehr als doppelt so hoch wie die des Elektrofahrzeugs. Das Dieselfahrzeug hat im Anschaffungsjahr 2014 noch einen leichten Gesamtkostenvorteil von etwa 200 €, welcher mit dem Anschaffungsjahr 2020 zu einem Gesamtkostennachteil von etwa 1.500 € wird. Die Gesamtkosten des Elektro- und Dieselfahrzeugs liegen in diesem Fall in einer Größenordnung, die bereits heute im Bereich der Unsicherheiten der Gesamtkostenrechnung liegen.

<sup>27</sup> Haltedauer und Fahrleistung des Zweitnutzers gehen in die Restwertberechnung ein (siehe Abschnitt 2.3.6).

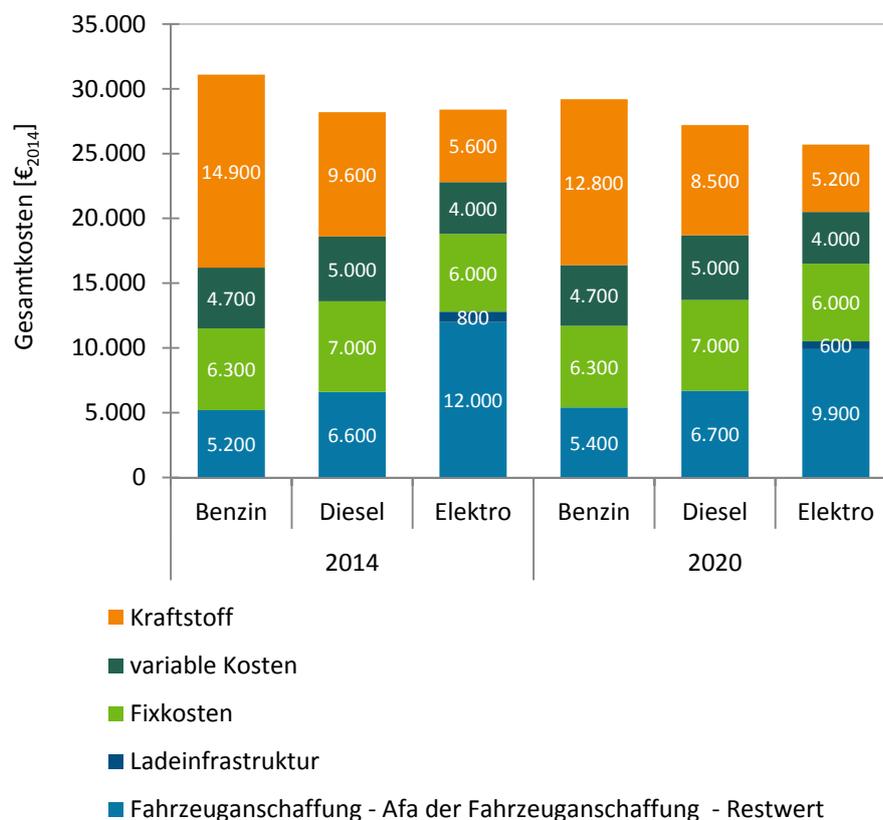


Abbildung 22: Gesamtkosten für die Anwendung **Pkw im Lieferverkehr** mit Größenklasse Pkw-klein für die Jahre 2014 und 2020 im Vergleich.

### 3.5.2 Pkw im Taxigewerbe

Anwendung II stellt den Einsatz eines großen Pkw im Taxigewerbe dar. Hier liegt die angenommene Jahresfahrleistung mit 40.000 km deutlich über dem Durchschnitt in diesem Segment. Für den Taxi-Einsatz ist solch eine Fahrleistung allerdings eher am unteren Rand des Fahrleistungsspektrums und stellt einen Ein-Schicht-Betrieb dar.<sup>28</sup> Um eine solche Fahrleistung realisieren zu können, muss das Elektrofahrzeug an öffentlichen Ladestellen die Möglichkeit zur schnellen Aufladung haben. Für den Ein-Schicht-Betrieb eines Elektro-Taxis wurde unterstellt, dass das Fahrzeug 40 % des geladenen Stroms über öffentliche Ladepunkte bezieht. Für die öffentliche Ladung wurde ein um 50 % erhöhter Stromtarif unterstellt (siehe Abschnitt 2.3.1).

Auch für diese Anwendung wurde der vorwiegende Einsatz im Stadtgebiet unterstellt, d. h. der Verbrauch des konventionellen Fahrzeugs wurde um 10 % und die Wartungskosten beider Fahrzeugvarianten wurden um 20 % erhöht angenommen. Der Absetzungszeitraum (AfA, siehe Abschnitt 2.3.3) wurde

<sup>28</sup> Die Annahmen zur möglichen Jahresfahrleistung von elektrischen Fahrzeugen im Taxigewerbe beruhen auf den Erfahrungen des Praxiseinsatzes von Elektro-Taxis des Unternehmens Prima Klima Taxi in Hamburg.

hier auf vier Jahre verkürzt angesetzt, was durch die hohe Fahrleistung zu begründen ist. In Tabelle 22 sind wichtigsten Berechnungsparameter für Anwendung II aufgelistet.

Tabelle 22: Parameterausprägungen für die Anwendung *Pkw im Taxigewerbe*.

Parameter	Ausprägung
Größenklasse	Pkw-groß
Jahresfahrleistung Erstnutzer	40.000 km
Haltezeitdauer Erstnutzer	4 Jahre
Absetzungszeitraum	4 Jahre
Ladeinfrastruktur	Wallbox 11-22 kW
Ladeverhalten	60% im Unternehmen / 40 % öffentlich
Kalkulationszins	5 %
Unternehmenssteuersatz	30 %
Jahresfahrleistung Zweitnutzer	15.000 km
Haltezeitdauer Zweitnutzer	6 Jahre
Reichweite	150 km
Einsatz	Stadtverkehr
Szenario	mittel

In Abbildung 23 ist der Vergleich der Gesamtkosten mit denen der Anwendung zu Grunde gelegten Parametern für ein Diesel- und ein Elektrofahrzeug unterschieden nach den Anschaffungsjahren 2014 und 2020 dargestellt. Durch den als erhöht angesetzten Strompreis an öffentlichen Ladestellen ist der Kraftstoffkostenvorteil des Elektrofahrzeugs gegenüber dem Dieselfahrzeug nicht in der gleichen Größenordnung wie in Anwendung I. Für das Anschaffungsjahr 2014 sind die Energiekosten für das Elektrofahrzeug über die Gesamtnutzungsdauer etwa um ein Drittel günstiger, für 2020 noch etwa um ein Fünftel. Im Anschaffungsjahr 2014 hat die Dieselvariante einen Gesamtkostenvorteil von etwa 1.700 €, 2020 hat das Elektrofahrzeug einen minimalen Gesamtkostenvorteil.

Anwendung II weist angesichts der hohen Jahresfahrleistung ein hohes ökonomisches Potenzial auf. Tatsächlich fehlen jedoch auf dem heutigen Markt Elektrofahrzeuge der Größenklasse Pkw-groß. Es ist aber durchaus denkbar, dass auch Fahrzeuge niederer Segmente als Fahrzeug für den Taxibetrieb, sowohl von Fahrern als auch Kunden, akzeptiert werden. Vergleichbar dazu ist die heutige Akzeptanz von Hybridfahrzeugen, vornehmlich des Toyota Prius, als Fahrzeug im Taxibetrieb. Ein solcher Sprung in den Segmenten hätte zusätzlich den Vorteil, dass ein Elektrofahrzeug der Größenklasse mittel oder klein geringere Investitionskosten aufweist und durch seinen Kraftstoffkostenvorteil schneller wirtschaftlich im Vergleich zu einem großen Diesel-Pkw ist. Zentral bei der Elektrifizierung von Fahrzeugen im Taxigewerbe ist das Vorhandensein einer öffentlichen Schnellladeinfrastruktur. Ohne eine solche ist

der zur Wirtschaftlichkeit mindestens notwendige Ein-Schicht-Betrieb vermutlich nicht realisierbar.

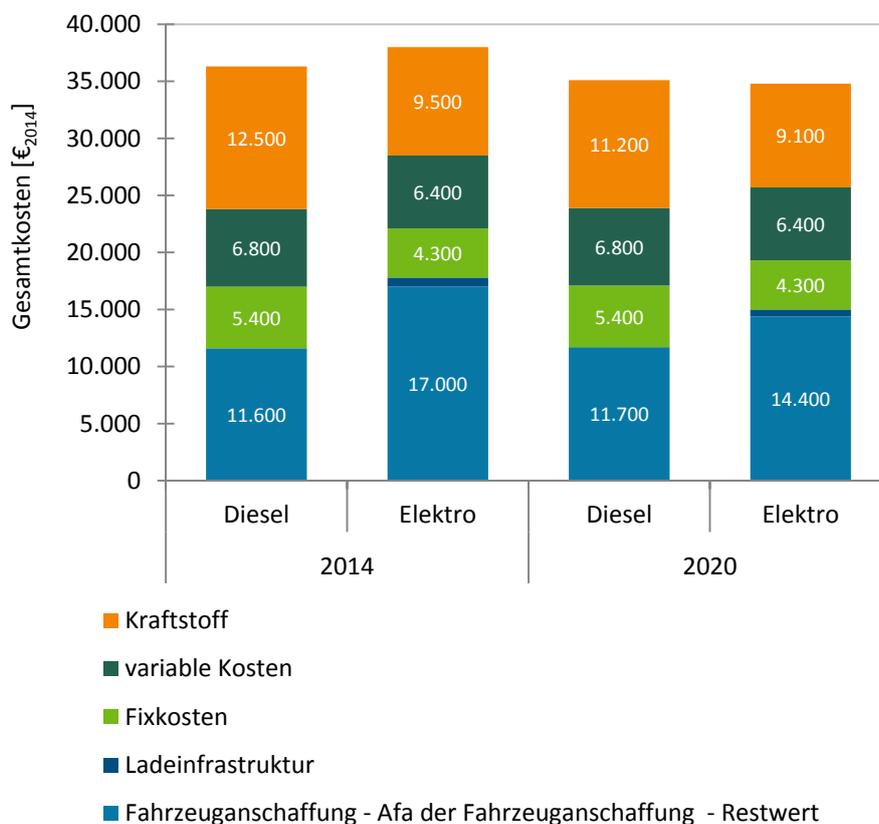


Abbildung 23: Gesamtkosten für die Anwendung **Pkw im Taxigewerbe** mit Größenklasse Pkw-groß für die Jahre 2014 und 2020 im Vergleich.

## Exkurs: CITY eTAXI – Batterieelektrisches Leichtbaufahrzeug für den Stadteinsatz

Eine interessante Alternative zu einer herkömmlichen Taxiflotte mit vornehmlich großen Diesel-Pkw stellt die im Projekt „Adaptive City Mobility“<sup>29</sup> konzipierte Umsetzung von batterieelektrisch betriebenen e-Taxis dar, die intelligent vernetzt und mit einer zentralen Akkuwechselstation betrieben werden. Die ultraleichtgebauten Fahrzeuge haben ein Fahrzeugleergewicht von etwa 450 kg zzgl. Akkugewicht von 100 kg, was etwa der Hälfte des Leergewichts eines durchschnittlichen großen Pkw entspricht. Das geringe Gewicht begünstigt einen geringen elektrischen Verbrauch, sodass eine elektrische Reichweite von mindestens 140 km mit einer Gesamtbatteriekapazität von lediglich 16 kWh realisiert werden kann.

<sup>29</sup> [www.adaptive-city-mobility.de](http://www.adaptive-city-mobility.de)

Förderprojekt im Rahmen des Forschungsprogramms IKT für Elektromobilität II des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie.



Abbildung 24: Im Projekt "Adaptive City Mobility" konzipiertes Leichtfahrzeug für den Einsatz als eTaxi. (Quelle: Adaptive City Mobility<sup>29</sup>)

Das Batteriesystem besteht aus acht manuell einzeln austauschbaren Akkus mit je etwa 2 kWh Kapazität. Ab einer Stückzahl von etwa 5.000 Fahrzeugen könnten die Investitionskosten pro Fahrzeug perspektivisch auf 15.000 € zzgl. Akkuleasing von ca. 100 €/Monat sinken. Dieser Wert entspricht etwa der Hälfte der Anschaffungskosten eines herkömmlichen großen Pkw. Bei einer Jahresfahrleistung von 40.000 km – ein Wert der sich im Taxigewerbe eher am unteren Rand typischer Jahresfahrleistungen bewegt – liegen die Energiekosten über vier Jahre (ausgehend von 2014) bei etwa 5.600 €. Im Vergleich mit den Kraftstoffkosten eines batterieelektrischen Taxis im Segment Pkw-groß (vgl. Abbildung 23) beträgt der Energiekostenvorteil über vier Jahre etwa 4.000 € und im Vergleich zu einem entsprechenden Dieselfahrzeug sogar knapp 7.000 €. Demzufolge könnten diese Fahrzeuge im Vergleich zu den großen konventionellen Fahrzeugen bereits heute wirtschaftlich betrieben werden, da sowohl in den Investitionskosten, als auch in den Kraftstoffkosten ein großer Vorteil besteht. Allerdings ist zu betonen, dass der direkte Vergleich dieser Fahrzeuge durchaus problematisch ist, da es sich um sehr unterschiedliche Fahrzeuge und Nutzungskonzepte handelt.

Das Leichtfahrzeug ist für drei Insassen, also einen Fahrer und zwei Passagiere, konzipiert. Das Konzept einer zentralen Akkuwechselstation und den acht kleinen Einzel-Akkus pro Fahrzeug würde den Fahrern der Fahrzeuge eine Aufladung bei verschiedenen Ladeständen erlauben, d. h. der Fahrer kann durch das Auswechseln einzelner Akkus seine Route an den Ladestand flexibel anpassen. Angedacht ist die zentrale Vernetzung einer Fahrzeugflotte, die auf eine gemeinsame Ladestation zugreift und durch eine Betreiberinstanz mit Hilfe geeigneter Software koordiniert wird. Der Vorteil einer solchen zentralen Verwaltungsstelle ist die effiziente Planungsmöglichkeit der Fahrzeugeinsätze.

Dabei ist eine Vergabe der Fahrzeuge an z. B. Taxiunternehmen durch ein Leasing- oder Mietmodell für eine längere Einsatzdauer oder die Einführung von Zeittarifen für eine kurzfristige Nutzung denkbar. Durch den geringen Kraftstoffverbrauch und die beschriebene Möglichkeit, die Fahrzeuge durch intelligente Vernetzung möglichst effizient in der Auslastung zu betreiben, bietet sich ein großes Potenzial zur Minderung der Treibhausgasemissionen, da nicht nur ein 1:1-Fahrzeuersatz, sondern möglicherweise auch die Substitution mehrerer konventioneller Fahrzeuge durch ein Leichtfahrzeug längerfristig denkbar ist.

Tabelle 23: Ausgewählte Daten des im Projekt "Adaptive City Mobility" konzipierten Leichtfahrzeugs zum Einsatz im Taxigewerbe. (Quelle: Adaptive City Mobility)

Parameter	Wert
Fahrzeugklasse	Ultraleichtfahrzeug, LE7 nach EG-Klassifizierung
Höchstgeschwindigkeit	85 km/h
Energieverbrauch	ca. 10 kWh/100km
Batterie	8 austauschbare Akkumodule mit je 2kWh / 48 Volt
Reichweite	mindestens 140 km
Sitzplätze	1 Fahrer + 2 Passagiere

Ob sich entsprechende Fahrzeugkonzepte perspektivisch in bestehende Fahrzeugflotten integrieren lassen und ob diese auf die Akzeptanz der Nutzer und Kunden – beispielsweise im Taxigewerbe – treffen, muss in der praktischen Erprobung näher untersucht werden.

### 3.5.3 Leichtes Nutzfahrzeug im Handwerk (Tour)

Anwendung III steht für den Einsatz von kleinen leichten Nutzfahrzeugen, also Modellen wie einem Citroen Berlingo, VW Caddy oder vergleichbaren Fahrzeugen, die in Handwerksbetrieben zu Tour-Fahrten eingesetzt werden. Es wurde für diese Anwendung eine Jahresfahrleistung von 21.000 km angenommen (Zentralverband des deutschen Handwerks 2008). Dies entspricht bei 300 unterstellten Werktagen einer Tagesfahrleistung von etwa 70 km.

Auf Grund des Einsatzes in Touren wurde angenommen, dass die Fahrzeuge 10 % des geladenen Stroms an öffentlichen Schnellladepunkten beziehen. An diesen liegt der Stromtarif 50 % über dem standardmäßig zu Grunde gelegten Tarif (vgl. Abschnitt 2.3.1). Es wurde für die leichten Nutzfahrzeuge eine Haltdauer von acht Jahren hinterlegt, dieser Wert liegt deutlich über dem für Pkw und wirkt sich zu Gunsten der Elektrofahrzeuge aus, da der gesamte Kraftstoffkostenvorteil zunimmt. In Tabelle 24 sind die wichtigsten Berechnungsparameter für Anwendung III aufgeführt.

Tabelle 24: Parameterausprägungen für die Anwendung *leichtes Nutzfahrzeug im Handwerk*.

Parameter	Ausprägung
Größenklasse	Lnf-klein
Jahresfahrleistung Erstnutzer	21.000 km
Haltedauer Erstnutzer	8 Jahre
Absetzungszeitraum	6 Jahre
Ladeinfrastruktur	Wallbox 11-22 kW
Ladeverhalten	90 % im Unternehmen / 10 % öffentlich
Kalkulationszins	5 %
Unternehmenssteuersatz	30 %
Jahresfahrleistung Zweitnutzer	15.000 km
Haltedauer Zweitnutzer	2 Jahre
Reichweite	130 km
Einsatz	freifließend
Szenario	mittel

Abbildung 25 zeigt den Gesamtkostenvergleich für ein Diesel- und ein Elektrofahrzeug unterschieden nach Anschaffungsjahr 2014 und 2020 für Anwendung III. Im Anschaffungsjahr 2014 hat das Elektrofahrzeug noch einen Gesamtkostennachteil von etwa 1.800 €. Im Anschaffungsjahr 2020 haben sich die Investitionskosten für das Elektrofahrzeug soweit verringert, dass dieses einen Gesamtkostenvorteil von etwa 1.000 € über die Nutzungsdauer aufweist.

Da für leichte Nutzfahrzeuge von einer weniger starken Effizienzsteigerung als bei den Pkw bis 2020 ausgegangen wird, bleibt das Verhältnis der Kraftstoffkosten fast konstant und ändert sich nur minimal auf Grund der veränderten Kraftstoffpreise. Die Kraftstoffkosten über den gesamten Nutzungszeitraum liegen für das Elektrofahrzeug etwa um ein Drittel niedriger.

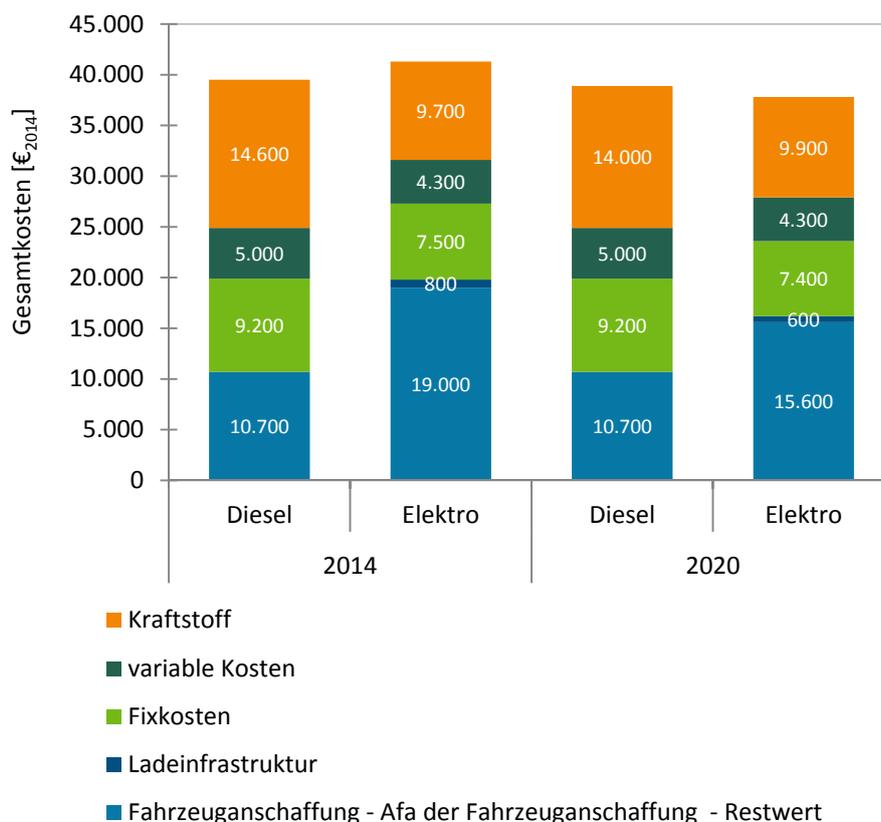


Abbildung 25: Gesamtkosten für die Anwendung **leichtes Nutzfahrzeug im Handwerk** mit Größenklasse Lnf-klein für die Jahre 2014 und 2020 im Vergleich.

### 3.5.4 Leichtes Nutzfahrzeug im KEP-Einsatz (Stadtgebiet)

Anwendungen IV und V veranschaulichen die Gesamtnutzungskosten eines mittelgroßen leichten Nutzfahrzeugs im Einsatz bei Kurier-, Express- und Paketdiensten (KEP). Dabei sind Fahrzeugmodelle wie ein Mercedes Vito oder Sprinter oder ein VW Crafter unter mittelgroßes leichtes Nutzfahrzeug zu verstehen. Dabei ist die Unterscheidung des Einsatzgebietes auf Grund stark unterschiedlicher Fahrleistungen von Bedeutung. Anwendung IV betrachtet den Einsatz des KEP-Fahrzeugs im Stadtgebiet. Für diese Anwendung liegt eine Tagesfahrleistung von 40 km zu Grunde, was etwa einer Jahresfahrleistung von 12.000 km entspricht. Zudem wurde analog zu den anderen Anwendungen im Stadtgebiet ein um 10 % erhöhter Verbrauch für das Dieselfahrzeug und um 20 % erhöhte Wartungskosten für beide Antriebsarten unterstellt. Wie auch bei Anwendung III wurde eine Haltedauer von acht Jahren angenommen (Edwards et al. 2009). In Tabelle 25 sind die wichtigsten Berechnungsparameter für Anwendung IV aufgeführt.

Tabelle 25: Parameterausprägungen für die Anwendung *leichtes Nutzfahrzeug im KEP-Einsatz (Stadtgebiet)*.

Parameter	Ausprägung
Größenklasse	Lnf-mittel/groß
Jahresfahrleistung Erstnutzer	12.000 km
Haltedauer Erstnutzer	8 Jahre
Absetzungszeitraum	6 Jahre
Ladeinfrastruktur	Wallbox 11-22 kW
Ladeverhalten	nur am Unternehmensstandort
Kalkulationszins	5 %
Unternehmenssteuersatz	30 %
Jahresfahrleistung Zweitnutzer	15.000 km
Haltedauer Zweitnutzer	2 Jahre
Reichweite	130 km
Einsatz	Stadtverkehr
Szenario	mittel

Abbildung 26 zeigt den Gesamtkostenvergleich für ein Diesel- und Elektrofahrzeug unterschieden nach den Anschaffungsjahren 2014 und 2020 für Anwendung IV. Auch in dieser Anwendung hat das Elektrofahrzeug 2014 noch einen Gesamtkostennachteil von etwa 3.500 €, etwas weniger als 10 % der Gesamtkosten des Dieselfahrzeugs. Das liegt vor allem an den vergleichsweise hohen Investitionskosten für das Elektrofahrzeug. Im Anschaffungsjahr 2020 hat das Elektrofahrzeug dagegen einen Gesamtkostenvorteil von etwa 400 €.

Jedoch gilt es zu beachten, dass Elektrofahrzeuge in der Kategorie der großen leichten Nutzfahrzeuge, wie beispielsweise Mercedes Sprinter, momentan nicht als Serienfahrzeuge auf dem Fahrzeugmarkt verfügbar sind. Im Vergleich zu Anwendung V, dem Einsatz im ländlichen Raum, ist die Fahrleistung im Stadtgebiet relativ gering und durch die Notwendigkeit von öffentlicher Ladung verringert sich der Kraftstoffkostenvorteil des Elektrofahrzeugs.

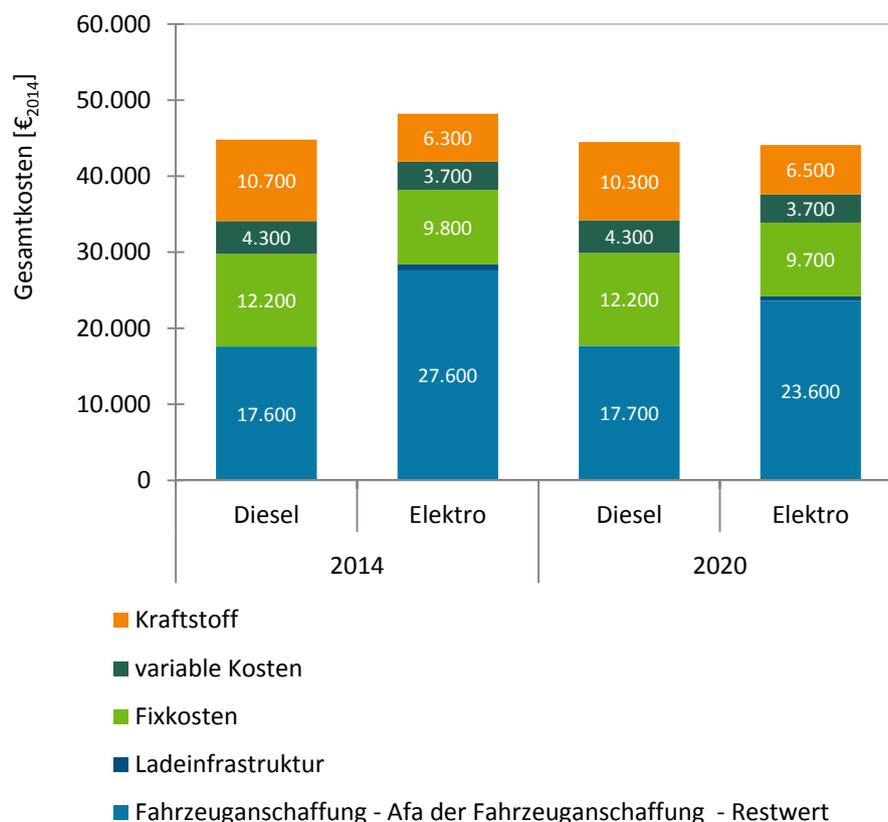


Abbildung 26: Gesamtkosten für die Anwendung **leichtes Nutzfahrzeug im KEP-Einsatz (Stadtgebiet)** mit Größenklasse *Lnf-mittel/groß* für die Jahre 2014 und 2020 im Vergleich.

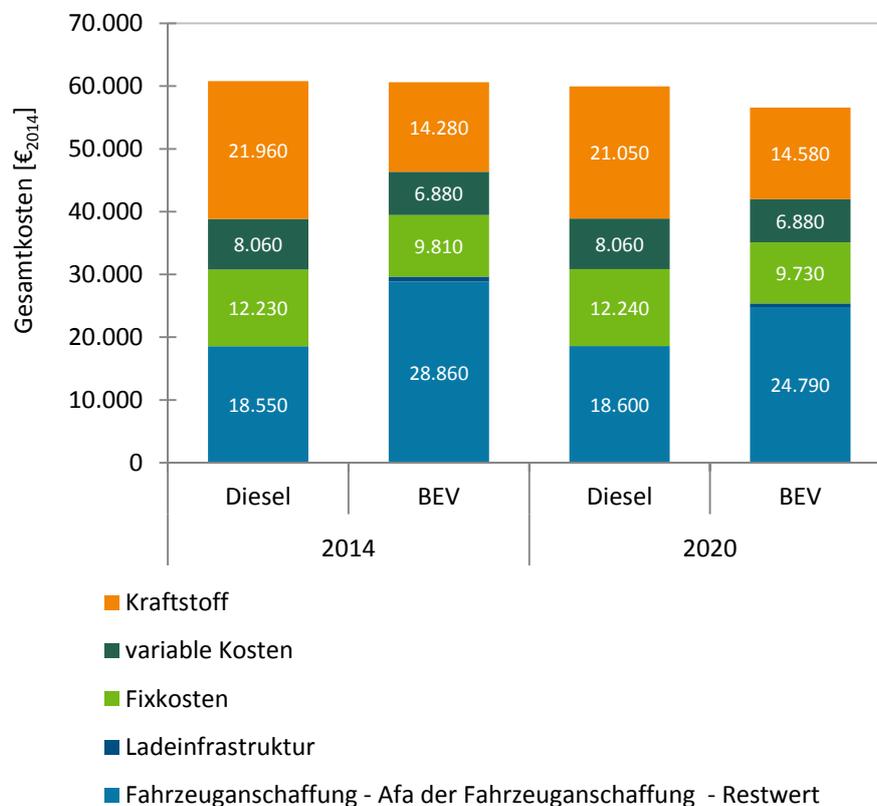
### 3.5.5 Leichtes Nutzfahrzeug im KEP-Einsatz (ländlicher Raum)

Anwendung V betrachtet die Gesamtkosten von Fahrzeugen im KEP-Einsatz im ländlichen Raum. Diese Fahrzeuge weisen im Vergleich zu Anwendung IV eine wesentlich höhere Jahresfahrleistung auf. In den Rechnungen wurde eine Jahresfahrleistung von 27.000 km angesetzt (Knörr et al. 2012). In Tabelle 26 sind die wichtigsten Berechnungsparameter für Anwendung V aufgeführt. Diese sind bis auf das Einsatzgebiet und die Fahrleistung analog zu Anwendung IV.

In Abbildung 27 sind die Gesamtkosten für ein Diesel- und ein Elektrofahrzeug unterschieden nach Anschaffungsjahr 2014 und 2020 dargestellt. Schon 2014 ist das Elektrofahrzeug vor allem durch den Kraftstoffkostenvorteil minimal günstiger in den Gesamtkosten. 2020 hat die Elektrovariante einen Gesamtkostenvorteil von etwa 3.400 €. Wie im vorherigen Abschnitt besprochen, steht der Elektrifizierung von Fahrzeugen dieser Anwendung vor allem das Fehlen von Fahrzeugmodellen und die Schwierigkeiten durch ein höheres Gesamtgewicht entgegen. Zusätzlich ist für den Einsatz im ländlichen Raum eine verlässliche Reichweite von zentraler Bedeutung, da ein engmaschiges Schnellladenetz vermutlich in naher Zukunft insbesondere im ländlichen Raum schwierig zu realisieren ist.

Tabelle 26: Parameterausprägungen für die Anwendung *leichtes Nutzfahrzeug im KEP-Einsatz (ländlicher Raum)*.

Parameter	Wert
Größenklasse	Lnf-mittel/groß
Jahresfahrleistung Erstnutzer	27.000 km
Haltedauer Erstnutzer	8 Jahre
Absetzungszeitraum	6 Jahre
Ladeinfrastruktur	Wallbox 11-22 kW
Ladeverhalten	nur am Unternehmensstandort
Kalkulationszins	5 %
Unternehmenssteuersatz	30 %
Jahresfahrleistung Zweitnutzer	15.000 km
Haltedauer Zweitnutzer	2 Jahre
Reichweite	130 km
Einsatz	freifließend
Szenario	mittel

Abbildung 27: Gesamtkosten für die Anwendung *leichtes Nutzfahrzeug im KEP-Einsatz (ländlicher Raum)* mit Größenklasse Lnf-mittel/groß für die Jahre 2014 und 2020 im Vergleich.

### 3.5.6 Mögliche CO<sub>2</sub>-Minderung in den Anwendungen

Abbildung 28 zeigt die über die Haltedauer durchschnittlichen jährlichen Emissionen an CO<sub>2</sub>-Äquivalenten für die einzelnen Anwendungen. Verglichen werden in der Abbildung für jede Anwendung die Emissionen des Dieselfahrzeugs, sowie die des Elektrofahrzeugs. Für das Elektrofahrzeug wurde analog zum bereits erläuterten Vorgehen ein Strombezug auf Basis des deutschen Strommixes sowie alternativ vollständig durch erneuerbare Energien berücksichtigt.

Je nach angenommener Strombereitstellung und Anwendung können durch den Einsatz von Elektrofahrzeugen pro Jahr und Fahrzeug zwischen 2 und 5 Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalente (Strommix) bzw. 3 und 8 Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalente (100 % erneuerbare Energien) vermieden werden. Dies bedeutet gegenüber der verbrennungsmotorischen Fahrzeugvariante eine Verringerung der Treibhausgasemissionen von mindestens 60 % bzw. fast 100 % im Falle einer vollständigen erneuerbaren Strombereitstellung.

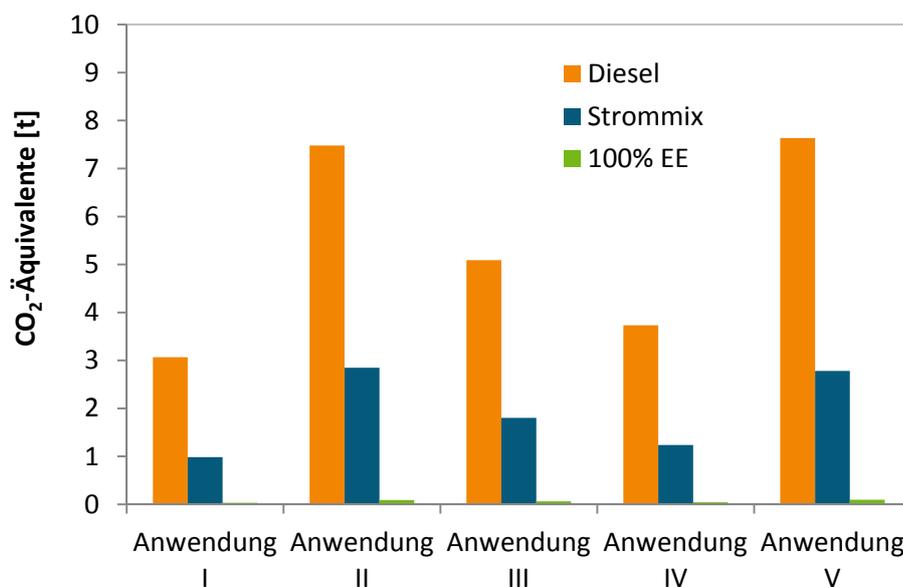


Abbildung 28: Über die Haltedauer durchschnittliche Emissionen der einzelnen Anwendungen pro Fahrzeug und pro Jahr im Vergleich für verschiedene Kraftstoffe.

## 3.6 Zwischenfazit

- Die betrachteten Anwendungsfälle zeichnen sich durch hohe Jahresfahrleistungen bzw. relativ lange Haltedauern aus. Werden für die betrachteten Anwendungen im Jahr 2020 Dieselfahrzeuge durch Elektrofahrzeuge ersetzt, bedeutet dies in allen Fällen einen Gesamtkostenvorteil.
- Der Betrieb von kleinen elektrischen Pkw im Lieferverkehr (Anwendung I) ist schon heute nahe an der Wirtschaftlichkeit.

- Im Taxigewerbe (Anwendung II) bestehen hohe wirtschaftliche Potenziale, die Bereitstellung von Schnellladeinfrastruktur ist jedoch von größter Bedeutung, um mit Elektrofahrzeugen mindestens den Ein-Schicht-Betrieb zu ermöglichen.
- Der Einsatz von Elektrofahrzeugen in Touren für einen Handwerksbetrieb (Anwendung III) liegt ebenfalls bereits nahe an der Wirtschaftlichkeit und im Jahr 2020 könnten sich erhebliche Kostenvorteile einstellen.
- Im KEP-Einsatz (Anwendung IV und V) ist das Einsatzgebiet der Fahrzeuge eine zentrale Größe für die Wirtschaftlichkeit. Die Fahrleistungen sind im Stadtgebiet deutlich geringer als im ländlichen Raum. So wäre der Einsatz von elektrischen großen Nutzfahrzeugen im ländlichen Raum bei hohen Fahrleistungen schon heute wirtschaftlich, in der Stadt erst im Jahr 2020.
- Durch die Elektrifizierung von Fahrzeugen in den betrachteten Anwendungen können bei Bezug von Strom aus rein erneuerbaren Quellen pro Jahr und Fahrzeug zwischen etwa 3 und 8 Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalente eingespart werden.

## 4 Ergebnisse – Schwere Nutzfahrzeuge

Die Diskussion der Ergebnisse zu schweren Nutzfahrzeugen gliedert sich in die Betrachtung von Linienbussen und mittelschweren Lkw. In einem weiteren Exkurs wird der Einsatz von Elektrofahrzeugen in der Intralogistik am Beispiel von Flughafenanwendungen thematisiert.

Die Gesamtkosten im Vergleich von elektrischen und dieselmotorischen Fahrzeugvarianten wird am Beispiel eines 12 m-Standardbusses als besonders relevanter Kategorie im Fahrzeugbestand im Detail diskutiert. Dabei werden neben den Gesamtkosten in Abhängigkeit von Jahresfahrleistung und Anschaffungsjahr auch die Kostenzusammensetzung und die Bedeutung der Restwertentwicklung sowie der Batteriepreisentwicklung näher betrachtet. Die Bedeutung wichtiger Einflussgrößen wird im Rahmen von Sensitivitätsanalysen untersucht.

Anschließend werden weitere Buskategorien (Gelenkbus) und weitere batterieelektrische Ausgestaltungsvarianten hinsichtlich ihrer Wirtschaftlichkeit im Vergleich zur jeweiligen dieselmotorischen Variante analysiert.

Auf Grundlage der Wirtschaftlichkeitsanalysen wird in einem nächsten Schritt das ökonomische Potenzial für den Einsatz batterieelektrischer Busse bis zum Jahr 2020 bzw. 2025 abgeschätzt und der mögliche Beitrag zur Minderung der verkehrsbedingten Treibhausgasemissionen quantifiziert.

Die Wirtschaftlichkeit des batterieelektrischen Antriebs bei mittelschweren Lkw wird am Beispiel des städtischen Verteilverkehrs betrachtet.

In einem ergänzenden Exkurs wird das Potenzial für die Elektrifizierung von Schleppfahrzeugen in Flughafenanwendungen anhand von drei Praxisbeispielen diskutiert.

### 4.1 Linienbusse am Beispiel eines Standardstadtbusses

#### 4.1.1 Hintergrund

In den Verkehrsunternehmen in Deutschland wurden bereits unterschiedliche alternative Antriebskonzepte wie bspw. Erdgas- oder Brennstoffzellenfahrzeuge erprobt. In den letzten Jahren stand die Hybridisierung der Stadtbusse im Fokus, mit deren Einsatz durchschnittliche Kraftstoffersparnisse von bis zu 21 % erzielt wurden (Faltenbacher et al. 2011). Aktuelle Hybridfahrzeuge weisen teilweise Minderungspotenziale von über 30 % bezogen auf konventionel-

le Vergleichsfahrzeuge auf<sup>30</sup>. Die Hybridtechnologie wird häufig auch als Übergangstechnologie auf dem Entwicklungspfad von konventionellen Bussystemen hin zu vollelektrischen Bussen gesehen (Soffel & Schwärzel 2013).

Elektromobilität bei Linienbussen hat in vielen Verkehrsunternehmen mit den Oberleitungsbussen (Trolleybusse) eine lange Geschichte. Heute werden in Deutschland noch rund 70 Fahrzeuge betrieben. Batterieelektrische Fahrzeuge rückten erst in jüngster Zeit wieder in den Fokus und werden in Deutschland bereits in niedriger Stückzahl testweise eingesetzt (beispielsweise in den Städten Pinneberg, Osnabrück, Hamburg). Darüber hinaus ist der Einsatz bei einer Reihe von Verkehrsunternehmen geplant (z. B. in Berlin, Köln, Dresden). Elektromobilität im ÖPNV hat entscheidende Vorteile. Bei Bussen handelt es sich aufgrund der geringen Stückzahlen mehr oder weniger um Sonderanfertigungen. Diese können somit jeweils an den konkreten Einsatzzweck angepasst werden, bspw. bezüglich der Batteriegröße. Darüber hinaus ist langfristig auch denkbar, dass die Linien- und Betriebsführung so angepasst wird, dass diese gut für den Einsatz von elektrischen Bussen geeignet ist.

In der weiteren Betrachtung wird im Folgenden lediglich zwischen vollelektrischen Stadtbussen unterschieden, welche nur im Depot nachgeladen werden (overnight charging; ON), und Bussen, die auch während des Betriebs an den Endhaltestellen nachgeladen werden (opportunity charging; OC). Elektrobusse, die zusätzlich an normalen Haltestellen induktiv oder automatisiert konduktiv geladen werden, sind weitere Optionen, welche in der vorliegenden Studie jedoch nicht gesondert betrachtet werden. Die folgende Detailanalyse befasst sich mit einem Standardstadtbuss (12 m Solobus).

#### 4.1.2 Standardparameter

Für die Gesamtkostenrechnungen eines 12 m-Solobusses in der Ausführung als „overnight-charging“-Bus wurden repräsentative Werte für einen Einsatz im leichten Stadtverkehr gewählt. Die Jahresfahrleistung wurde mit 60.000 km festgelegt und eine Haltedauer des Busses von 12 Jahren unterstellt. Die „overnight-charging“-Ausführung legt fest, dass die Ladung des Busses ausschließlich auf dem Betriebshof stattfindet. Dafür wird der Bus mit einer großen Batterie von 315 kWh nutzbarer Kapazität ausgestattet, welche einen Tageseinsatz ohne Zwischenladung erlaubt. Mit den gewählten Annahmen beträgt die Batterielebensdauer rund 10 Jahre. Unter Berücksichtigung einer den Hybridbussen entsprechenden täglichen Fahrleistung von 200 km und einer Einsatzdauer von 14 Stunden (Faltenbacher et al. 2011) wurde die Anschaffung einer Ladeinfrastruktur mit 44 kW Ladeleistung unterstellt, die für diesen Anwendungsfall ausreichend ist.

In Tabelle 27 sind die verwendeten Parameter aufgelistet.

<sup>30</sup> Durchschnittliche Minderung des Kraftstoffverbrauchs einzelner im Rahmen der NKI geförderter Busse. Persönliche Mitteilung vom 28.01.2015, F. Heinen, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit.

Tabelle 27: Standardparameterausprägungen für einen 12 m-Standardlinienbus (overnight charging)

Parameter	Ausprägung
Jahresfahrleistung	60.000 km
Haltedauer	12 Jahre
Ladeinfrastruktur	Ladesäule 44 kW
Ladeverhalten	nur auf dem Betriebshof
Reichweite	200 km
Batteriekapazität	315 kWh

Unter den getroffenen Annahmen betragen die Anschaffungskosten für einen 12 m-Standardlinienbus im mittleren Szenario rund 634.000 €. Verglichen mit den verfügbaren Bussen (ON) liegen sie damit im Mittelfeld, was die gemachten Annahmen plausibilisiert. So liegen die Kosten für den Eurabus 2.0 – 300 eines chinesischen Herstellers mit 450.000 €<sup>31</sup> zwar unter den im Modell ermittelten Kosten, für den Solaris Urbino 12 electric werden jedoch Kosten in Höhe von 635.000 €<sup>32</sup> genannt, wobei die Batteriekapazität mit 210 kWh deutlich geringer ausfällt.

### 4.1.3 Gesamtkosten in Abhängigkeit der Fahrleistung

In diesem Abschnitt werden die Gesamtkosten des Diesel- und Elektrobusses im Vergleich unter Variation der Fahrleistung diskutiert. Analog zu den Darstellungen für Pkw und leichte Nutzfahrzeuge werden die Gesamtkosten in Bandbreiten gezeigt, welche durch die gewählten Szenarien aufgespannt werden und Unsicherheiten in der Entwicklung wichtiger Einflussgrößen abbilden. Die untere Kante des Kostenbandes für den Elektrobus und die obere Kante des Kostenbandes für den Dieselbus sind die berechneten Gesamtkosten auf Basis des optimistischen Szenarios. Analog dazu stellen die obere Kante des Kostenbandes für den Elektrobus und die untere Kante des Kostenbandes für den Dieselbus die berechneten Gesamtkosten im pessimistischen Szenario dar. Die Kosten jeweils mit Annahme des mittleren Szenarios werden durch gestrichelte Linien innerhalb der Bänder gezeigt.

In Abbildung 29 und Abbildung 30 zeigen die Gesamtkosten des Elektro- und Dieselbusses in Abhängigkeit der Fahrleistung für das Anschaffungsjahr 2014 und 2020. Die Kostenbänder erfahren mit zunehmender Fahrleistung eine stärkere Spreizung, da der Kraftstoffkostenanteil an den Gesamtkosten steigt und die Unsicherheit in den Kraftstoffpreisentwicklungen einen stärkeren Ein-

<sup>31</sup> [http://www.shz.de/lokales/pinneberger-tageblatt/kvip-faehrt-ab-juni-mit-neuem-  
elektrobus-id6413441.html](http://www.shz.de/lokales/pinneberger-tageblatt/kvip-faehrt-ab-juni-mit-neuem-elektrobus-id6413441.html)

<sup>32</sup> [http://www.rheinbahn.de/presse/mitteilungen/Seiten-  
/PressReportDetail.aspx?Nr=78478](http://www.rheinbahn.de/presse/mitteilungen/Seiten-<br/>/PressReportDetail.aspx?Nr=78478)

fluss hat. Zusätzlich zu dem Einfluss des Strompreises bestimmt die Batteriepreisentwicklung in den verschiedenen Szenarien die Breite des Gesamtkostenbandes des Elektrobusses.

Aus Abbildung 29 wird ersichtlich, dass mit den zugrunde gelegten Parametern eine Wirtschaftlichkeit des Elektrobusses im Anschaffungsjahr 2014 in keinem der angenommenen Szenarien erreicht wird. Die Gesamtkostendifferenz im mittleren Szenario liegt für eine Jahresfahrleistung von 40.000 km bei etwa 160.000 € und sinkt bei einer Jahresfahrleistung von 60.000 km auf etwa 120.000 €. Letzteres entspricht zusätzlichen Nutzungskosten der batterieelektrischen Variante im Vergleich zur Dieselvariante von etwa 18 %.

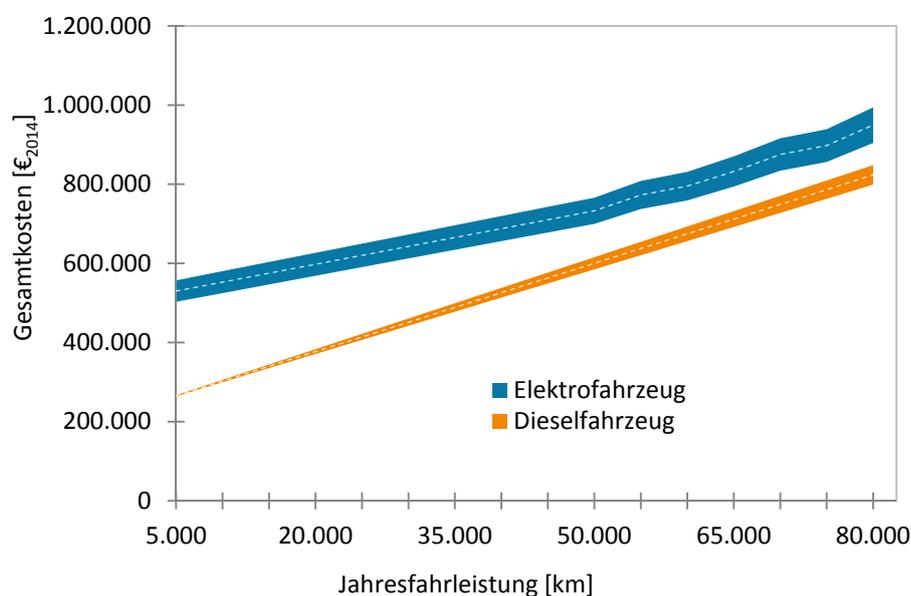


Abbildung 29: 12 m-Standardlinienbus mit Anschaffungsjahr 2014. Gesamtkosten in Abhängigkeit der Fahrleistung.

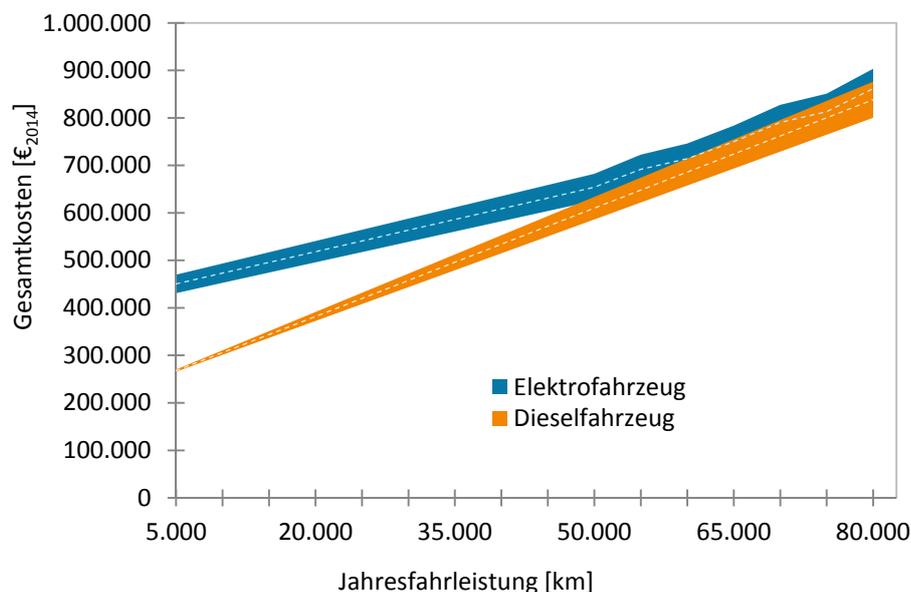


Abbildung 30: 12 m-Standardlinienbus mit Anschaffungsjahr 2020. Gesamtkosten in Abhängigkeit der Fahrleistung.

Bei einer Beschaffung im Jahr 2020 (Abbildung 30) erreicht der Elektrobus im optimistischen Szenario die Wirtschaftlichkeitsschwelle bei einer Jahresfahrleistung von mindestens 50.000 km. Im mittleren Szenario wird die Schwelle erst bei einer Jahresfahrleistung von 100.000 km erreicht, welche jedoch mit den getroffenen Annahmen zu Batteriekapazität und Verbrauch nicht realistisch ist. Bei einer Jahresfahrleistung von 40.000 km beträgt die Gesamtkostendifferenz etwa 75.000 € und sinkt bei einer Jahresfahrleistung von 60.000 km auf 30.000 €. Diese Kostendifferenz entspricht etwa 4 % der Gesamtkosten des vergleichbaren Dieselfahrzeugs.

#### 4.1.4 Gesamtkosten in Abhängigkeit des Anschaffungsjahres

Die wesentliche Einflussgröße auf den Investitionsnachteil von Elektrofahrzeugen ist der Batteriepreis. Für diesen wird in den nächsten Jahren eine deutliche Degression durch Senkung der Produktionskosten auf Grund von Entwicklungsfortschritten und Skaleneffekten erwartet (siehe Abschnitt 2.3.2). Um den Einfluss des Batteriepreises geeignet abzubilden, wurden die Gesamtkosten eines Stadtbusses unter Annahme der Standardparameter (siehe Tabelle 20) in Abhängigkeit des Anschaffungsjahres betrachtet (Abbildung 10). In der angenommenen Batteriepreisentwicklung sinken die Batteriepreise in den nächsten vier Jahren stärker als in den darauffolgenden. Dies ist in Abbildung 31 implizit durch die stärker sinkenden Gesamtkosten des Elektrobusses bis 2018 abgebildet. Analog zu den vorhergehenden Darstellungen ist die Berechnung der Gesamtkosten im optimistischen Szenario als Unterkante des Kostenbandes für den Elektrobus und als Oberkante des Kostenbandes für den Dieselbus abgebildet. Umgekehrt bilden die Unterkante des Bandes für den Dieselbus und die Oberkante des Bandes für den Elektrobus die Berechnung unter Annahme des pessimistischen Szenarios ab. Die Berechnungen im mittleren Szenario wurden jeweils durch eine gestrichelte Mittellinie dargestellt.

Aus der Abbildung ist zu entnehmen, dass ab dem Jahr 2018 mit einer Jahresfahrleistung von mindestens 60.000 km und unter Annahme des optimistischen Szenarios ein Elektrobus im Vergleich zu einem Dieselfahrzeug wirtschaftlich betrieben werden kann. Im Jahr 2020 wird durch den Elektrobus in diesem Szenario eine Gesamtkostenersparnis von etwa 30.000 € erreicht. Im mittleren Szenario beträgt die Gesamtkostendifferenz zum Dieselfahrzeug noch circa 28.000 €, also etwa 4 % der Gesamtkosten des Dieselfahrzeuges. Kostengleichheit wird in diesem Szenario erst nach 2025 erreicht.

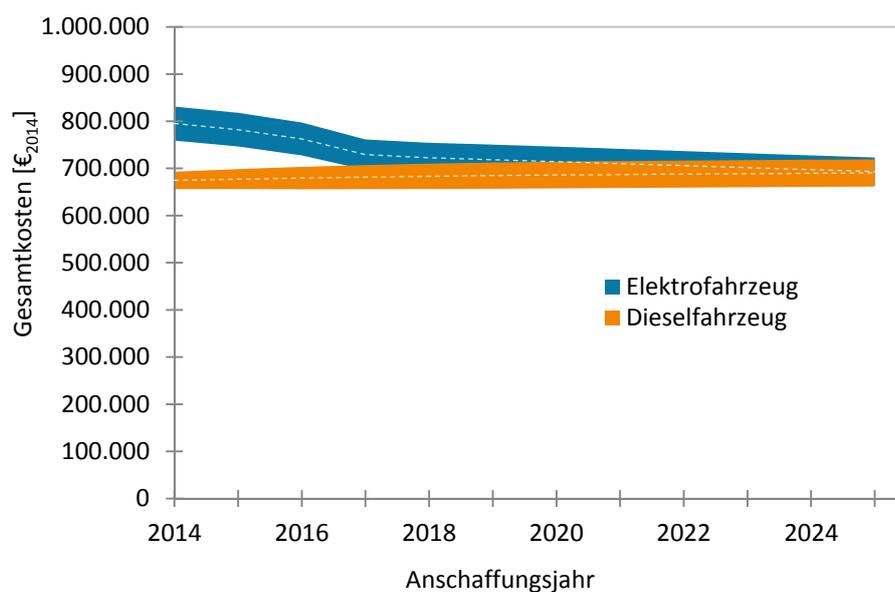


Abbildung 31: 12 m-Standardlinienbus mit einer Fahrleistung von 60.000 km/a. Gesamtkosten in Abhängigkeit des Anschaffungsjahres.

#### 4.1.5 Gesamtkostenvergleich im Detail

In diesem Abschnitt werden die Gesamtkosten eines 12 m-Solobusses mit Diesel- und Elektroantrieb im Vergleich für das mittlere Szenario detailliert aufgeschlüsselt und diskutiert. Es wurden zur Berechnung die in Abschnitt 4.1.2 eingeführten Standardparameter zur Berechnung verwendet. Abbildung 32 zeigt die nach verschiedenen Kostenblöcken aufgeschlüsselten Gesamtkosten eines Diesel- und Elektrobusse für die Anschaffungsjahre 2014 und 2020 im Vergleich. Der Gesamtkostennachteil der Elektrovariante sinkt von 120.000 € im Jahr 2014 auf 28.000 € im Jahr 2020. Der Anteil der Investitionskosten abzüglich AfA und Restwert liegt für Dieselfahrzeuge etwa bei 24 % für beide Anschaffungsjahre und für den Elektrobus bei etwa 56 % im Jahr 2014 und noch bei 53 % im Jahr 2020.

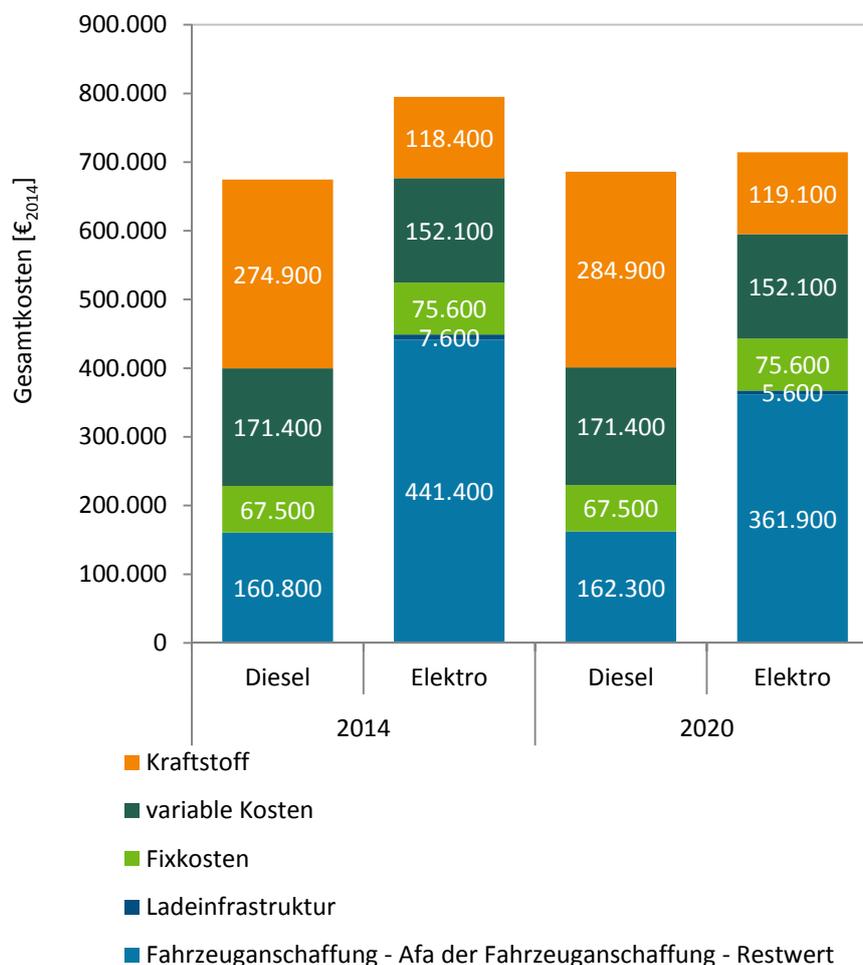


Abbildung 32: Gesamtkosten eines 12 m-Standardlinienbus für die Jahre 2014 und 2020 im Vergleich

Die Ladeinfrastruktur macht mit Annahme der „overnight-charging“-Ausstattung des Elektrobusses anteilig nur etwa 1 % der Gesamtkosten aus. Der Kraftstoffkostenvorteil des Elektrobusses liegt 2014 bei ca. 150.000 € und 2020 bei ca. 160.000 €. Die Kraftstoffkosten eines Elektrobusses liegen fast 60 % unter denen eines Dieselmotors. Die elektrische Fahrzeugvariante hat für beide Anschaffungsjahre einen leichten Vorteil in den variablen Kosten von etwa 20.000 €, welcher durch die leicht geringeren Wartungskosten pro Kilometer zu Stande kommt (Göhlich et al. 2013). Die Fixkosten der Elektrobussvariante liegen um die Instandhaltungskosten der Ladeinfrastruktur höher. In den Gesamtkosten sind Personalkosten nicht berücksichtigt.

#### 4.1.6 Wichtige Einflussgrößen

Analog zu den Untersuchungen bei Pkw und leichten Nutzfahrzeugen in Abschnitt 3.2 wird in diesem Abschnitt die Sensitivität der berechneten Gesamtkosten auf die Variation verschiedener Parameter untersucht. Zudem wird der Einfluss der verwendeten Restwertberechnungsmethode auf die resultierenden Gesamtkosten in Abhängigkeit der Haltedauer dargestellt und diskutiert.

Als weitere wichtige Sensitivität werden die Gesamtkosten in Abhängigkeit des Anschaffungsjahres bei Unterstellung einer alternativen Batteriepreisentwicklung untersucht. Die folgenden Berechnungen zeigen Bandbreiten der Unsicherheiten in den Kosten auf, erheben aber keinen Anspruch auf Vollständigkeit, da eine genaue Fehleranalyse der Berechnungen auf Grund der schwer quantifizierbaren Fehler einzelner Parameter in Gänze nicht möglich ist.

Abbildung 33 zeigt die Gesamtkostendifferenz zwischen einem 12 m-Elektro- und einem 12 m-Dieselfahrzeug für das Anschaffungsjahr 2014 und unter Annahme einer Jahresfahrleistung von 60.000 km in Abhängigkeit relativer Parametervariationen. Die Parameter, die zur Szenarien-Bildung herangezogen wurden, sind durch gestrichelte Linien gekennzeichnet. Diese sind der Batteriepreis, der Strompreis und der Dieselpreis. Die Sensitivität der Gesamtkosten auf einen einzelnen Parameter lässt sich anhand der Steigung der jeweiligen Geraden bewerten. Je steiler die Gerade, desto größer ist die Änderung der Gesamtkostendifferenz bei Variation des Parameters, d. h. desto größer der Einfluss des Parameters auf die Gesamtkosten.

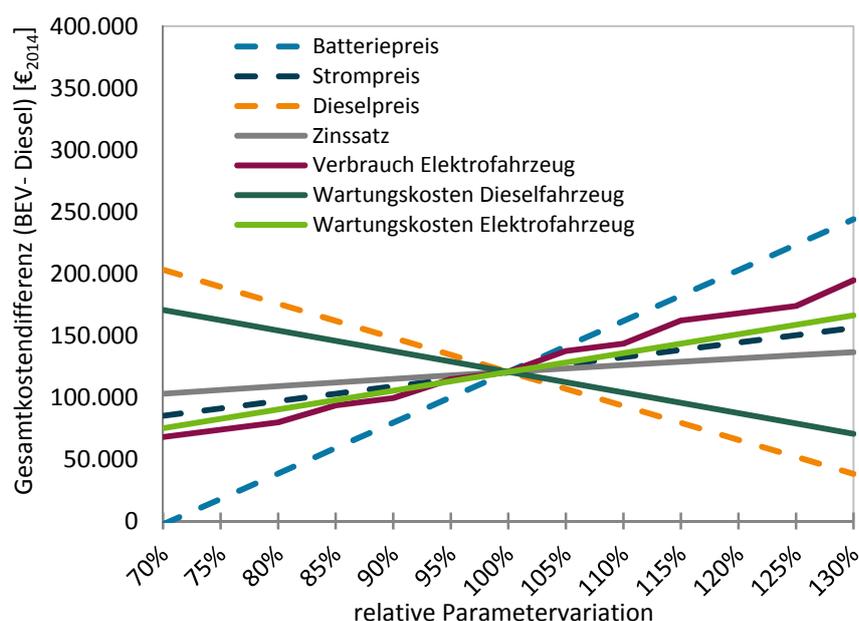


Abbildung 33: Gesamtkostendifferenz zwischen dem Elektrofahrzeug und Dieselfahrzeug in Abhängigkeit von Parametervariationen. Darstellung für einen 12 m-Standardlinienbus mit Anschaffungsjahr 2014, einer Fahrleistung von 60.000 km/a und unter der Annahme des mittleren Szenarios.

Variiert wurden die aufgeführten Parameter in einem Bereich von 70 % bis 130 % bezüglich des Standardwertes. Ein Wert von 100 % entspricht hierbei der Standardeinstellung. Alle Parameter wurden einzeln, d. h. unabhängig von anderen Parametern verringert bzw. erhöht.

Abbildung 33 unterstreicht die Auswahl der Szenario-Parameter, da eine Variation dieser eine vergleichsweise große Änderung in der Gesamtkostendifferenz bewirkt. Die Variation des Batteriepreises hat den größten Einfluss auf die Gesamtkostendifferenz und verursacht eine Änderung dieser von maximal 250.000 €. Die Variation des Dieselpreises hat eine Änderung von maximal etwa 160.000 € und die des Strompreises von etwa 70.000 € zur Folge, jeweils mit unterschiedlichem Vorzeichen. Wenn der Dieselpreis verringert wird, steigt die Gesamtkostendifferenz, d. h. der Elektrobus wird im Verhältnis zum Dieselbus teurer. Analog dazu sinkt die Gesamtkostendifferenz bei Verringerung des Strompreises und umgekehrt. Der Einfluss des Strompreises ist wesentlich geringer als der des Dieselpreises, da davon ausgegangen wurde, dass Busse mit günstigem Fahrstrom betrieben werden können.

Die Variation der Wartungskosten der Dieselbusse hat eine maximale Änderung der Gesamtkostendifferenz von etwa 100.000 € zur Folge. Die Variation der Wartungskosten der Elektrobuse hat eine maximale Änderung der Gesamtkostendifferenz, analog zu den Kraftstoffpreisen mit entgegengesetztem Vorzeichen, von rund 90.000 € zur Folge. Die Variation des Kalkulationszinseszinses bewirkt eine Änderung der Gesamtkostendifferenz von höchstens 30.000 €. Zusätzlich zur Variation des Strompreises wurde für den 12 m-Bus auch die Variation des elektrischen Verbrauchs abgebildet. Ein veränderter elektrischer Verbrauch beeinflusst das Anschaffungsintervall einer Ersatzbatterie. Steigt der Verbrauch, erhöht sich das Intervall, da die maximale Anzahl an Ladezyklen schneller erreicht wird (vgl. Abschnitt 2.3.2), umgekehrt führt ein sinkender elektrischer Verbrauch zu einem längeren Batterieeinsatz. Die Treppenform der Variationskurve des elektrischen Verbrauchs ist mit dem wiederholt sprunghaften Anstieg der Gesamtkosten des Elektrobusses durch ein verändertes Anschaffungsjahr einer Ersatzbatterie und damit unterschiedlichen spezifischen Batteriekosten zu erklären. Der Zeitpunkt des Batterieersatzes ergibt sich aus dem Erreichen der unterstellten 3.000, auf die nutzbare Kapazität bezogenen, Ladezyklen.

Um Unsicherheiten in Bezug auf den Restwert des Elektrobusses zu quantifizieren, wurden in Abbildung 34 die Gesamtkosten des Elektrobusses für verschiedene Restwertberechnungen im Vergleich zu den Gesamtkosten des Dieselfahrzeugs für das Anschaffungsjahr 2014 und mit einer Jahresfahrleistung von 60.000 km dargestellt. Mit Methode 1 wird der Berechnung des Restwerts des Elektrofahrzeugs der absolute Restwert des Dieselbusses zu Grunde gelegt. Methode 2 unterstellt die gleiche Degression des Restwerts wie für den Dieselbus und Methode 3 geht zuzüglich zum nach Methode 2 berechneten Restwert von einer Batterienachnutzung aus. Näheres zu den einzelnen Methoden ist in Abschnitt 2.3.6 beschrieben.

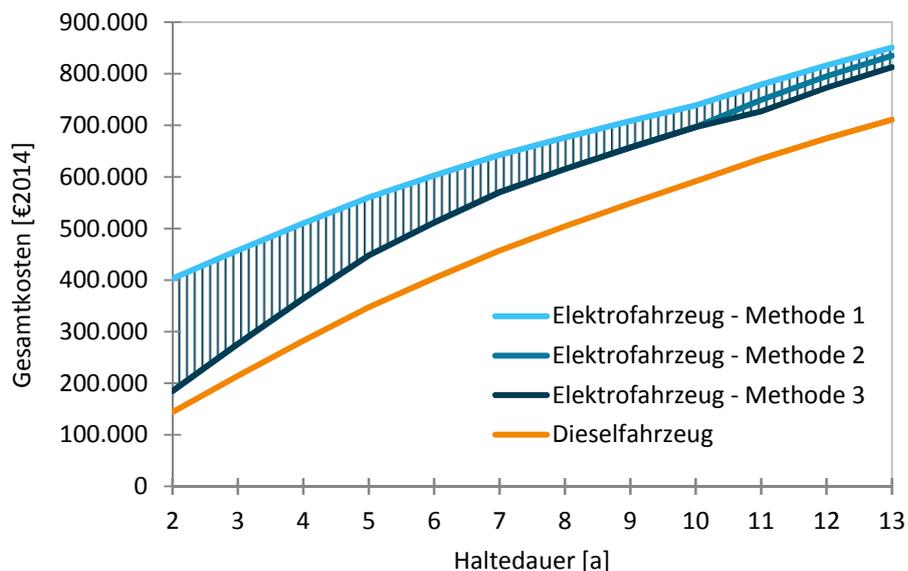


Abbildung 34: Gesamtkosten in Abhängigkeit der Haltedauer für verschiedene Methoden der Restwertberechnung für Elektrofahrzeuge. Darstellung für einen 12 m Standardlinienbus mit Anschaffungsjahr 2014, einer Fahrleistung von 60.000 km/a und unter der Annahme des mittleren Szenarios.

Für eine Haltedauer von 12 Jahren liegt der Unterschied in den Gesamtkosten des Elektrobusses für Methode 1 und 3 im Vergleich bei etwa 40.000 €. In der Berechnung mit Methode 2 geht nach Anschaffung einer Ersatzbatterie nach 10 Jahren der angesetzte Batterierestwert in die Gesamtkosten des Elektrobusses ein und verursacht einen Kostenvorteil von etwa 20.000 € gegenüber Berechnungsmethode 3. Insgesamt ist der Einfluss des Restwertes für eine typische Haltedauer von 12 Jahren auf die Gesamtkosten nicht sehr groß, der Gesamtkostenunterschied bei den Elektrobussen entspricht etwa einem Anteil von 5 %. Für geringere Haltedauern nimmt der Unterschied durch verschiedene Restwertberechnungsmethoden zu.

Unter den gegebenen Annahmen ergibt sich für Methode 2 ein Minimum der Gesamtkosten bei einer Nutzungsdauer von zehn Jahren mit einem Kostenvorteil von rund 15.000 €. Dennoch wurde in den Berechnungen eine in der Praxis für Dieselsebusse übliche Nutzungsdauer von 12 Jahren veranschlagt, da dies der üblichen Nutzungsdauer entspricht und Elektrobusse mit Ausnahme der Batterie vermutlich eher länger genutzt werden können.

Ob der in Methode 3 unterstellte Batterierestwert von 25 % tatsächlich realisierbar ist, hängt von der Entwicklung eines „Second-Life“-Marktes für Wechselbatterien ab. Weiterhin können die Rohstoffverfügbarkeit und Fortschritte beim Batterierecycling einen Einfluss auf den Wert der ersetzten Batterien haben. Für die Berechnungen in dieser Studie wurde standardmäßig Methode 2 gewählt.

Die zentrale Größe der Gesamtkosten des Elektrobusses ist der Batteriepreis. Standardmäßig wurde den Rechnungen die gleiche relative Entwicklung ab dem Jahr 2014 wie im zweiten Bericht der NPE (siehe Abbildung 3) mit einem

erhöhten Startwert von 1.000 €/kWh unterstellt. Aktuell höhere spezifische Batteriekosten für den Einsatz in Bussen oder Lkw lassen sich durch andere Anforderungen an die Batteriezellen und die Leistungselektronik, sowie durch geringe Stückzahlen, auf die sich Entwicklungs- und Toolingkosten verteilen, begründen. Gerade durch die wenig fortgeschrittene Marktdurchdringung ist die Batteriepreisentwicklung für Busse und Lkw im Vergleich zu der für Pkw mit noch größerer Unsicherheit behaftet. Um diesem Umstand Rechnung zu tragen, wurde in Abbildung 35 zum Vergleich eine alternative Preisentwicklung unterstellt. Hierbei wurde die relative Degression des Batteriepreises aus der Studie „Markthochlaufszszenarien für Elektrofahrzeuge“ (Plötz et al. 2013) des contra-EV-Szenarios mit Startjahr 2010 und Startwert 1.000 €/kWh unterstellt. Diese Entwicklung geht von einem in den ersten Jahren schnelleren Abfall des Batteriepreises aus. Eine schnellere Abnahme kann durch zunehmende Stückzahlen und die Wechselwirkung mit der Entwicklung der Batterietechnologie im Pkw-Bereich begründet werden. (siehe „Variation des Batteriepreises bei schweren Nutzfahrzeugen“ in Abschnitt 2.3.1).

Durch Annahme der alternativen Batteriepreisentwicklung wird in Abbildung 35 Kostenparität zwischen dem Elektro- und Dieselbus schon im Jahr 2017 unter Annahme der oben beschriebenen Standardparameter und des mittleren Szenarios erreicht. Mit Anschaffungsjahr 2020 liegt der Gesamtkostenvorteil des Elektrobusses bereits bei etwa 50.000 €.

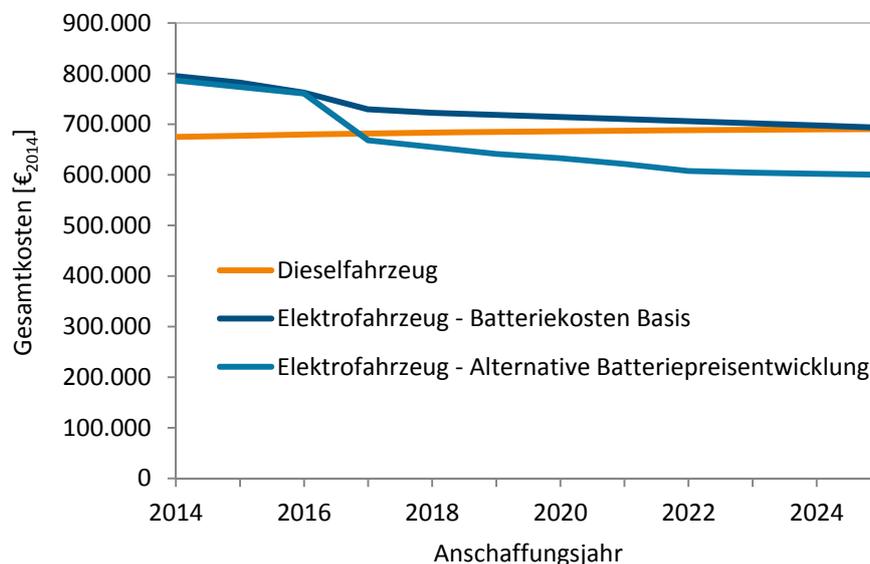


Abbildung 35: 12 m-Standardlinienbus mit einer Fahrleistung von 60.000 km/a unter Annahme des mittleren Szenarios. Im Vergleich für die Elektrofahrzeugvariante: Szenarien der Batteriekostenentwicklung im Vergleich. Gesamtkosten in Abhängigkeit des Anschaffungsjahres.

Eine weitere zentrale Größe, die mit starken Unsicherheiten behaftet ist, sind die Kosten der Ladeinfrastruktur. Diese können sich z. B. nach Standort und Flottengröße unterscheiden. In Abbildung 36 ist deshalb für das mittlere Szenario aufgezeigt, wie sich deutlich höhere Kosten für die Ladeinfrastruktur auf

die Gesamtkosten auswirken. In dem dargestellten Fall sind die Kosten der Infrastruktur mit 130.000 €<sup>33</sup> wesentlich höher veranschlagt als in der Basisbetrachtung.

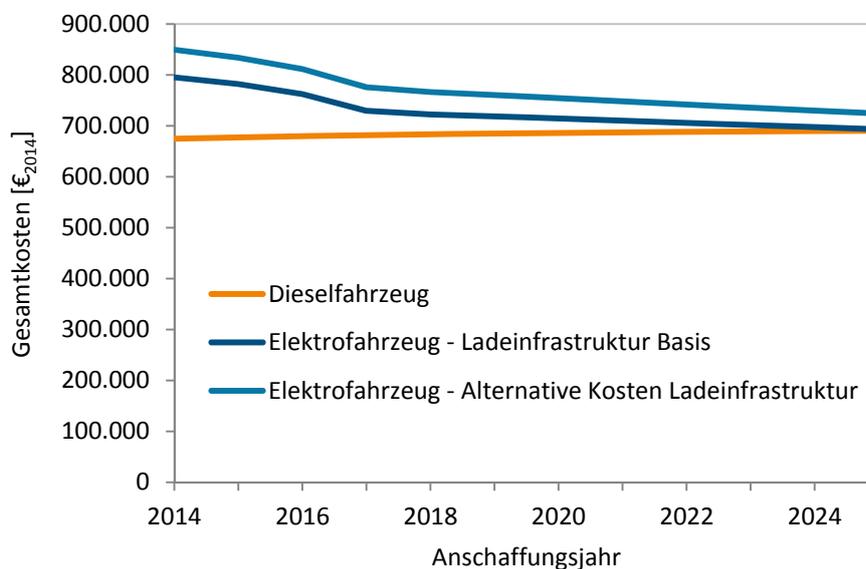


Abbildung 36: 12 m-Standardlinienbus mit einer Fahrleistung von 60.000 km/a unter Annahme des mittleren Szenarios. Im Vergleich für die Elektrofahrzeugvariante: Szenarien der Kosten der Ladeinfrastruktur im Vergleich. Gesamtkosten in Abhängigkeit des Anschaffungsjahres.

Durch Annahme der alternativen Kosten der Ladeinfrastruktur wird bis zum Jahr 2035 im mittleren Szenario (Abbildung 36) keine Kostenparität zwischen dem Elektro- und Dieselbus erreicht. Die Mehrkosten gegenüber einem Dieselbus betragen im Anschaffungsjahr 2025 noch rund 34.000 €. Im optimistischen Szenario würden die Gesamtkosten der Elektrofahrzeuge unter Berücksichtigung der höheren Kosten der Ladeinfrastruktur erst im Anschaffungsjahr 2022 unter denen der Dieselbusse liegen, und damit fünf Jahre später als unter den Standardannahmen.

#### 4.1.7 Betrachtung weiterer batterieelektrischer Linienbusvarianten

Im vorangegangenen Abschnitt wurden die Ergebnisse der Gesamtkosten eines vollelektrischen „overnight-charging“ (kurz: ON) -Standardbusses im Detail beleuchtet. Nachteil des „overnight-charging“-Konzeptes ist die hohe benötigte Batteriekapazität, die zu hohen Anschaffungskosten und einem hohen Batteriegewicht und ggf. reduzierter Fahrgastkapazität führen kann. Da bei den Linienbussen grundsätzlich verschiedene Ladekonzepte denkbar sind (vgl. Abschnitt 2.3.2) werden im Weiteren vollelektrische „opportunity-charging“

<sup>33</sup> Kosten der Ladegeräte bei der Rheinbahn für die konduktive Ladung des Solaris Urbino electric.

(kurz: OC)-Busvarianten mit geringerer Batteriekapazität betrachtet, welche jedoch zusätzliche Ladeinfrastruktur im Streckenverlauf benötigen.

Anschließend werden die Gesamtkosten eines 18 m-Gelenkbusses, ebenfalls in „opportunity-charging“-Ausstattung, im Vergleich zu einem 18 m-Dieselbus diskutiert.

Für die Untersuchung der weiteren elektrischen Busvarianten werden je nach Variante nur die zentralen Ergebnisse gezeigt und auf eine umfassende Darstellung wie im vorhergehenden Abschnitt verzichtet. Die Detailergebnisse sind jedoch im Anhang in Abschnitt 6.4 dokumentiert.

## Opportunity-Charging-Standardbus

Im Vergleich zur „overnight-charging“-Ausstattung des Elektrobusses, die in den vorhergehenden Abschnitten besprochen wurde, verfügt die „opportunity-charging“-Variante über eine wesentlich kleinere Batterie (80 kWh nutzbare Kapazität im Vergleich zu 315 kWh). Dies erfordert die Installation einer entsprechenden Ladeinfrastruktur, die Zwischenladung z. B. an den Endhaltestellen erlaubt. Für die konkrete Fahrzeugausgestaltung (installierte Batteriekapazität) sind für diese Variante die Linienlängen, die Topographie, die Wendezeiten sowie die Betriebsstundenanzahl von Bedeutung. Die höheren Kosten für die Ladeinfrastruktur an der Linie verteilen sich auf die darauf eingesetzten Busse. In dieser Studie wird von einer Flotte von sechs Fahrzeugen je Linie ausgegangen.

Wie in Abschnitt 2.3.5 erläutert, handelt es sich bei der in den Gesamtkosten berücksichtigten Ladeinfrastruktur um die einfachste Variante mittels Ladekabel (konduktiv, manuell). Derzeit werden jedoch eine Reihe anderer Konzepte geplant oder erprobt, wie beispielsweise induktives Laden (z. B. in Braunschweig und Mannheim) oder konduktives Laden mittels Pantograf (z. B. in Wien, Köln), welche mit deutlich höheren Kosten verbunden sein können. Aus diesem Grund werden die Analysen in diesem Abschnitt um eine Sensitivitätsbetrachtung hinsichtlich der Kosten der Ladeinfrastruktur ergänzt.

In Tabelle 28 sind die Berechnungsparameter für den elektrischen OC-Standardstadtbuss aufgelistet.

Tabelle 28: Standardparameterausprägungen für einen 12 m-Standardlinienbus (opportunity charging)

Parameter	Ausprägung
Jahresfahrleistung	60.000 km
Haltedauer	12 Jahre
Ladeinfrastruktur	Ladesäule 22 kW u. Schnellladestationen an den Endhaltestellen
Ladeverhalten	auf dem Betriebshof und an den Endhaltestellen
Reichweite	50 km
Batteriekapazität	80 kWh

In Abbildung 37 sind die Gesamtkosten eines 12 m-Elektrobusses (OC) im Vergleich zu denen eines 12 m-Dieselmotors für eine Jahresfahrleistung von 60.000 km in Abhängigkeit des Anschaffungsjahres dargestellt. Im Vergleich zur analogen Abbildung 31 mit einem 12 m-Elektrobus in „overnight-charging“ (ON)-Ausstattung sind die Gesamtkosten des Elektrobusses heute und in den nächsten drei Jahren für diese Ausgestaltungsvariante wesentlich geringer. Dies lässt sich durch den in diesen Jahren hohen Batteriepreis erklären, der einen wesentlich größeren Einfluss auf die ON-Busvariante hat (Schlesinger et al. 2014). Grund dafür ist die fast 4-fache Kapazität der Batterie des ON-Busses. Es bleibt zu beachten, dass wesentlich für die Verringerung der Gesamtkosten der OC-Variante im Vergleich zur ON-Variante die Verteilung der Kosten für die benötigte Ladeinfrastruktur auf eine entsprechend große Flotte ist.

Auf Basis der beschriebenen Parameter und einer Mindestflottengröße von sechs Fahrzeugen wird im mittleren Szenario die Wirtschaftlichkeitsschwelle ab dem Jahr 2021 überschritten. Für das optimistische Szenario wird Kostengleichheit bereits 2015 erreicht und im Jahr 2020 hat der OC-Elektrobus bereits einen Kostenvorteil von etwa 50.000 € gegenüber dem Dieselbus. In diesem Jahr liegt der Kostenanteil der Ladeinfrastruktur bei etwa 2 % der Gesamtkosten, dies entspricht etwa einem Wert von 16.000 €. Im pessimistischen Szenario hat der Elektrobus im Jahr 2020 noch einen Kostennachteil von etwa 60.000 € gegenüber der Dieselvariante und bis 2025 wird keine Kostengleichheit erreicht.

Im Gegensatz zu einem Elektrobus in „overnight-charging“-Ausstattung sind die Kosten der benötigten Schnellladeinfrastruktur eine zentrale Größe. Neben der angenommenen Flottengröße, auf die sich die Kosten der Infrastruktur verteilen, spielt die Ausführung und der mit der Installation einhergehende Kostenaufwand eine große Rolle. Um die Bandbreite der möglichen Realisierungen zu quantifizieren, wurden die Gesamtkosten des OC-Elektrobusses sowohl mit Annahme einer Standard-Schnellladeinfrastruktur als auch mit einer aufwendigeren Infrastruktur wie z. B. induktives Laden mittels Pantograph berechnet und mit dem Dieselbus verglichen (vgl. Abbildung 38). Dabei sind in der alternativen Betrachtung die Kosten der Linie 133 in Köln in Höhe von 670.000 € veranschlagt worden (Schwarze 2014). Aus der Abbildung ist klar ersichtlich, dass das Erreichen der Wirtschaftlichkeitsschwelle mit höheren Ladeinfrastrukturkosten im mittleren Szenario verfehlt wird.

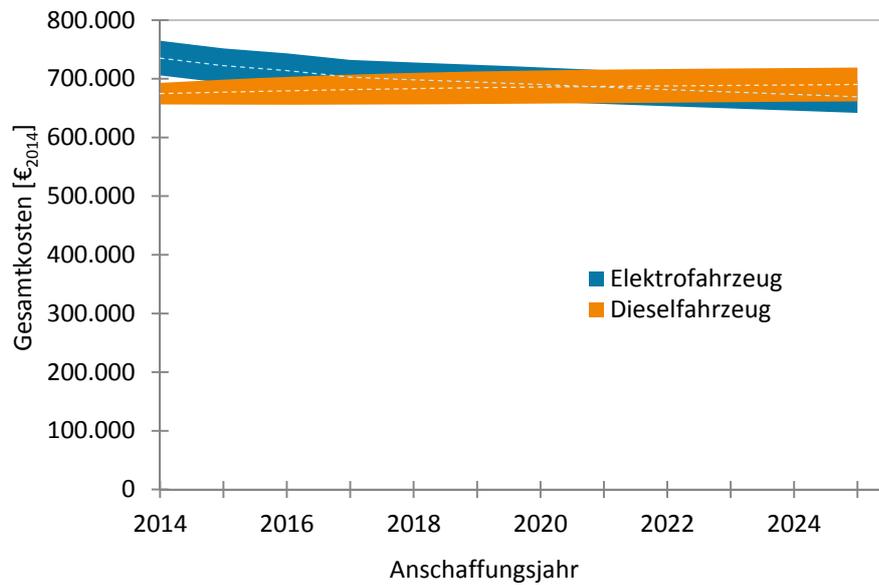


Abbildung 37: 12 m-Standardlinienbus (opportunity charging) mit einer Fahrleistung von 60.000 km/a. Gesamtkosten in Abhängigkeit des Anschaffungsjahres.

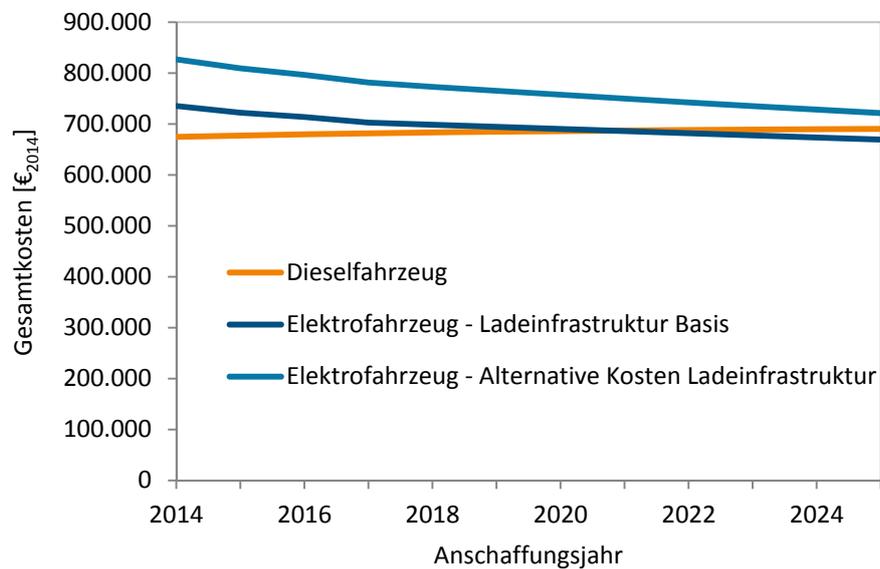


Abbildung 38: 12 m-Standardlinienbus mit einer Fahrleistung von 60.000 km/a unter Annahme des mittleren Szenarios. Im Vergleich für die Elektrofahrzeugvariante: Szenarien der Kosten der Ladeinfrastruktur im Vergleich. Gesamtkosten in Abhängigkeit des Anschaffungsjahres.

Je nach Schnellladeinfrastruktur und Anzahl der Fahrzeuge, die diese Infrastruktur nutzen, sind OC-Elektrobusse früher wirtschaftlich als die ON-Variante. Es bleibt zu beachten, dass die Kosten für die benötigte Ladeinfra-

struktur stark variieren können und damit eine maßgebliche Unsicherheit in den Gesamtkosten des OC-Elektrobusses darstellen.

## Opportunity-Charging-Gelenkbus

Neben den 12 m-Standardbussen haben die 18 m-Gelenkbusse den zweitgrößten Anteil an der Fahrzeugflotte der Stadtbusse. Für diese wurde eine Gesamtkostenbetrachtung für eine OC-Variante durchgeführt. Zwar wurde bereits ein vollelektrischer ON-Gelenkbus vorgestellt<sup>34</sup>, jedoch deuten aktuelle Projekte bei den Verkehrsunternehmen eher auf den zukünftigen Einsatz von OC-Gelenkbussen hin. Zudem zeigen die vorangegangenen Berechnungen, dass die OC-Stadtbusse einen Kostenvorteil gegenüber den ON-Stadtbussen besitzen.

In Tabelle 29 sind die angenommenen Parameter zur Berechnung des elektrischen 18 m-Gelenkbusses in OC-Ausstattung aufgelistet.

Tabelle 29: Standardparameterausprägungen für einen 18 m-Gelenkbus (opportunity charging)

Parameter	Ausprägung
Jahresfahrleistung	60.000 km
Haltedauer	12 Jahre
Ladeinfrastruktur	Ladesäule 22kW u. Schnellladestationen an den Endhaltestellen
Ladeverhalten	auf dem Betriebshof und an den Endhaltestellen
Reichweite	50 km
Batteriekapazität	100 kWh

Abbildung 39 zeigt die Gesamtkosten eines 18 m-Elektrobusses (OC) im Vergleich zu denen eines 18 m-Dieselmotors für das mittlere Szenario bei einer Jahresfahrleistung von 60.000 km in Abhängigkeit des Anschaffungsjahres. Dabei werden hier analog zur Betrachtung des 12 m-Busses für die elektrische Variante die Gesamtkosten unter Annahme einer Basis-Schnellladeinfrastruktur und einer kostenaufwendigeren Infrastruktur dargestellt (siehe Abbildung 16). Im mittleren Szenario erreicht der Elektrobus mit Basisladeinfrastruktur im Jahr 2020 die Schwelle zur Wirtschaftlichkeit. Geht man allerdings von einer aufwendigeren Ladeinfrastruktur aus, bleibt das Elektrofahrzeug über das Anschaffungsjahr 2025 hinaus im Kostennachteil gegenüber der Dieselvariante. Dieser Nachteil beträgt 2025 etwa 66.000 €. Lediglich unter Annahme des optimistischen Szenarios wird auch bei aufwendigerer Ladeinfrastruktur im Jahr 2020 Kostengleichheit zwischen dem Elektrobus und dem Dieselmotors erreicht.

<sup>34</sup> Eurabus 2.0-600 GL; 18 t Eigengewicht; 12 t Nutzlast; 564 kWh Batteriekapazität; Reichweite 250 km.

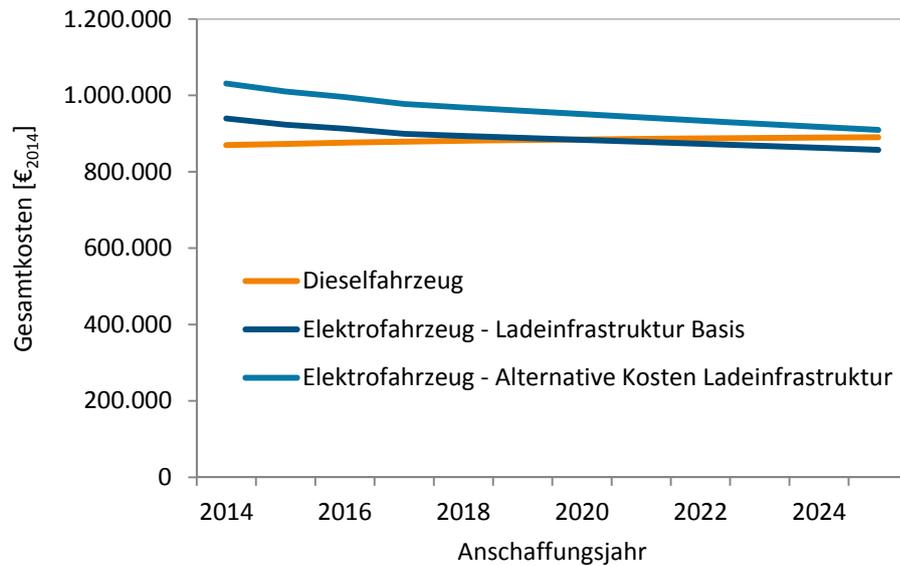


Abbildung 39: 18 m-Gelenkbus mit einer Fahrleistung von 60.000 km/a unter Annahme des mittleren Szenarios. Im Vergleich für die Elektrofahrzeugvariante: Szenarien der Kosten der Ladeinfrastruktur im Vergleich. Gesamtkosten in Abhängigkeit des Anschaffungsjahres.

In Abbildung 40 sind die Gesamtkosten aufgeschlüsselt nach Kostenblöcken eines elektrischen 18 m-Gelenkbusses mit OC-Ausstattung im Vergleich zu denen eines 18 m-Dieselmotors für die Anschaffungsjahre 2014 und 2020 dargestellt. Die Investitionskosten des Elektrobusses liegen trotz relativ kleiner Batterie 2014 bei etwa den 2,3-fachen Kosten, 2020 immer noch bei etwa den 2-fachen Investitionskosten des Dieselmotors. Die Kraftstoffkosten haben für das Dieselfahrzeug für beide Anschaffungsjahre etwa einen Anteil von 40 % an den Gesamtkosten, für das Elektrofahrzeug etwa 17 bzw. 18 %.

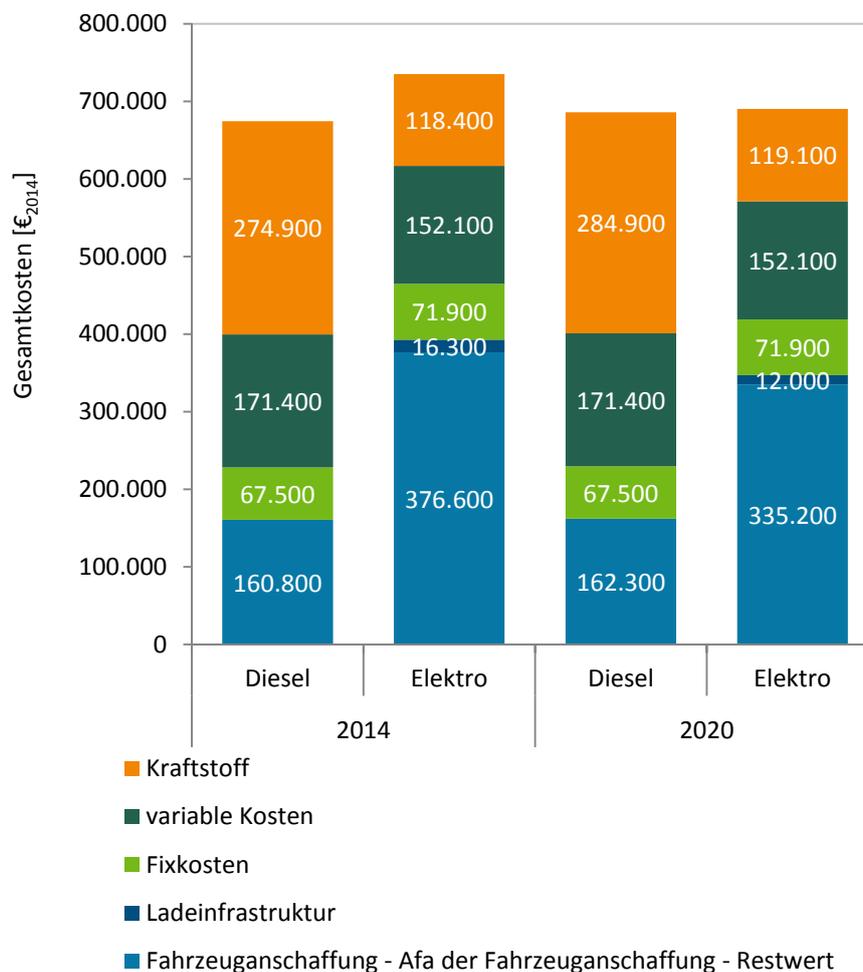


Abbildung 40: Gesamtkosten eines 18 m-Gelenkbusses (opportunity charging) für die Jahre 2014 und 2020 im Vergleich

#### 4.1.8 Abschätzung eines ökonomischen Potenzials

In diesem Abschnitt soll ein maximales ökonomisches Potenzial für batterieelektrische Stadtbusse für das Jahr 2020 aufgezeigt werden. Die folgenden Berechnungen stellen jedoch lediglich eine Abschätzung dar, die nur Kostenkriterien berücksichtigt. Andere Hemmnisse und Restriktionen wie beispielsweise höhere Kosten für den Netzanschluss der Ladeinfrastruktur, Unvereinbarkeit mit den Betriebsabläufen oder Linienführungen sowie verfügbare Flächen für die Installation von Ladeinfrastruktur werden nicht berücksichtigt. Gleiches gilt für mögliche sonstige Vorteile der elektrischen Busse wie eine Verringerung der Luftschadstoffemissionen und der Lärmbelastung.

Die vom Kraftfahrt-Bundesamt veröffentlichten Bestandszahlen ermöglichen keine Differenzierung, ob es sich bei den Bussen um Reise-, Überland- oder Stadtbusse handelt. Daher wurde in dieser Studie eine eigene Abschätzung durchgeführt. Dabei wurde auf Bestandszahlen aus dem Tremod-Modell des

Umweltbundesamtes zurückgegriffen, für deren Herleitung Detaildaten des KBA herangezogen wurden und die Differenzierung auf Basis des Merkmals „Stehplätze“ durchgeführt wurde. Für die Aufteilung auf Bustypen und Einsatzzwecke (Stadtbus oder Überlandbus) wurde auf die VDV Statistik 2012 zurückgegriffen (Dziambor et al. 2013).

Das Kraftfahrt-Bundesamt nennt für das Jahr 2013 einen Gesamtbestand an Bussen von rund 76.000. Davon entfallen rund 65 % auf Linienbusse und 35 % auf Reisebusse (Tremod 5.41). Veranschlagt man die in der VDV-Statistik enthaltene Verteilung der Fahrzeugkategorien auf den Gesamtbestand von rund 49.000 Linienbussen, ergibt sich ein Bestand an Standardstadtbusen von rund 18.500 und 10.000 Gelenkstadtbusen. Bei den restlichen Fahrzeugen handelt es sich um sonstige Stadtbusse (rund 2.500) und Überlandbusse unterschiedlicher Größe (18.500). Der Bestand an Stadtbusen ist in Abbildung 41 differenziert nach Bustyp dargestellt.

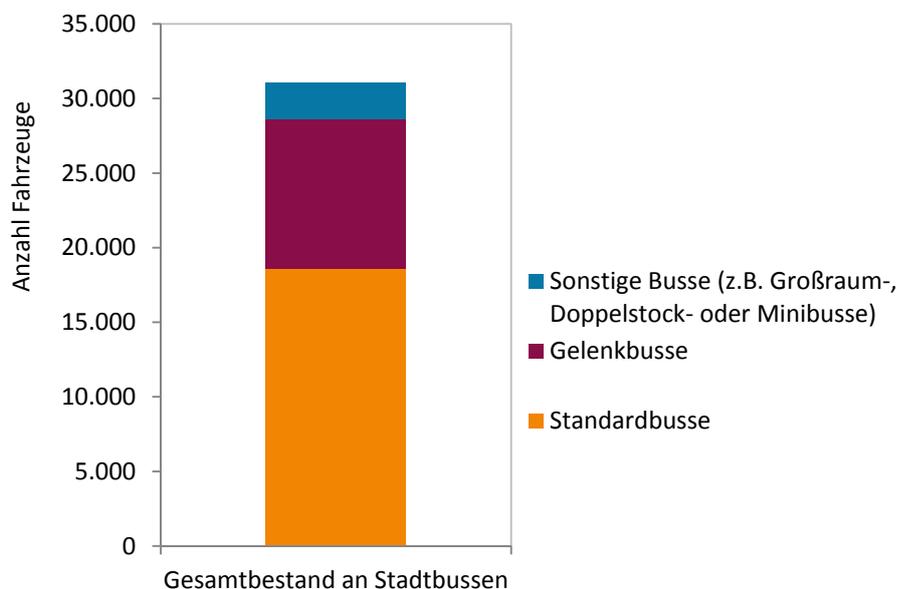


Abbildung 41: Gesamtbestand an Stadtbusen differenziert nach Bustyp. Eigene Auswertung.

Unter der Annahme einer Nutzungsdauer von 12 Jahren ergeben sich bei konstantem Fahrzeugbestand Neuzulassungen von rund 1.550 Standardstadtbusen und 850 Gelenkbussen pro Jahr.

In der folgenden Abschätzung wird das Potenzial für eine Elektrifizierung von Stadtbusen allein unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten ermittelt. Aufgrund der höheren Wirtschaftlichkeit sind dies bei den Standardstadtbusen die OC-Varianten. In Abbildung 42 ist das maximale Potenzial für die Jahre 2020 und 2025 für verschiedene Szenarien dargestellt. Die angegebenen Bestandszahlen ergeben sich aus den akkumulierten Neuzulassungen ab dem Erreichen der Kostenparität bei einer jährlichen Fahrleistung von 60.000 km und einer Nutzungsdauer von 12 Jahren. Da das ökonomische Potenzial bei den Linienbus-

sen im Betrachtungszeitraum bis 2020 zumindest im mittleren Szenario äußerst gering ist, wird für die Linienbusse ein Ausblick auf den Zeitraum bis 2025 gewagt, der allerdings mit noch größeren Unsicherheiten behaftet ist.

Im mittleren Szenario ergibt sich bis zum Jahr 2020 lediglich ein Potenzial von rund 850 vollelektrischen Gelenkbussen, Standardbusse erreichen bis zu diesem Zeitpunkt keine Kostenparität. Der Ausblick bis zum Jahr 2025 zeigt, dass sich langfristig durchaus Potenziale ergeben können. Das Maximalpotenzial beträgt unter den gegebenen Annahmen mit rund 5.000 Gelenk- und 7.800 Standardbussen rund 40 % des Gesamtbestandes an Stadtbussen.

Im optimistischen Szenario, in dem von um 10 % niedrigeren Batteriepreisen, 10 % niedrigeren Strompreisen und 10 % höheren Dieselpreisen ausgegangen wird, wird die Kostenparität für Standard- und Gelenkbusse bereits 2015 erreicht. Die akkumulierten Neuzulassungen erreichen bis zum Jahr 2020 rund 5.000 elektrische Gelenkbusse und 9.300 elektrische Standardbusse. Bis zum Jahr 2025 erhöht sich das rein wirtschaftliche Potenzial im optimistischen Szenario auf insgesamt rund 26.300 Elektrobusse.

In einer weiteren Betrachtung wurde auf Basis des mittleren Szenarios eine Sensitivität mit einer alternativen Batteriepreisentwicklung (vgl. Abbildung 35) betrachtet, die von einer deutlicheren Kostendegression ausgeht. Das Elektrifizierungspotenzial entspricht in diesem Fall dem optimistischen Szenario.

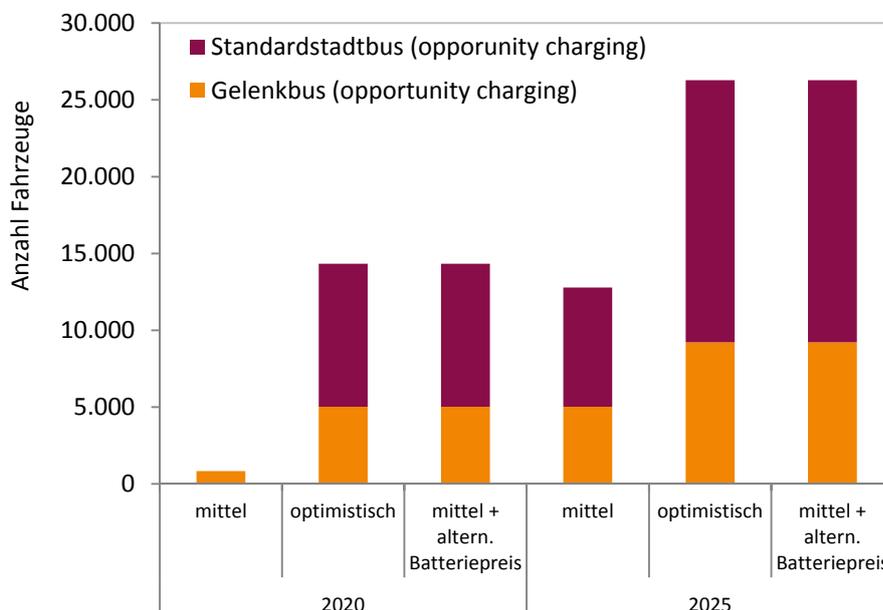


Abbildung 42: Ökonomisches Potenzial von Elektrobussen bis zum Jahr 2020 bzw. 2025 für das mittlere Szenario, für das optimistische Szenario und für ein Szenario mit optimistischer Batteriepreisentwicklung

## Mögliche CO<sub>2</sub>-Minderung im Busbestand

Auf Grundlage der dargestellten Potenzialabschätzung könnte die Elektrifizierung der Stadtbusse zu einer relevanten Einsparung von Treibhausgasemissionen im Straßenverkehr führen. Abbildung 43 zeigt die Größenordnung dieser Einsparungen für eine Strombereitstellung auf Basis der durchschnittlichen CO<sub>2</sub>-Intensität der Stromerzeugung in Deutschland (Strommix) sowie für eine vollständig erneuerbare Stromerzeugung auf. Nähere Erläuterungen zur Berechnung der Emissionen sind in Abschnitt 2.5 zu finden.

Im mittleren Szenario können so im Jahr 2020 etwa 90.000 Tonnen Treibhausgasemissionen (CO<sub>2</sub>-Äquivalente) und im Jahr 2025 1,2 Millionen Tonnen eingespart werden.

In den beiden anderen, optimistischeren Szenarien beträgt die Minderung im Jahr 2020 1,3 Millionen Tonnen Treibhausgasemissionen. Dies entspricht fast der Hälfte der Minderungspotenziale, die für Pkw und leichte Nutzfahrzeuge bestimmt worden sind. Im Jahr 2025 ergibt sich in den optimistischen Szenarien ein CO<sub>2</sub>-Minderungspotenzial von rund 2,4 Millionen Tonnen.

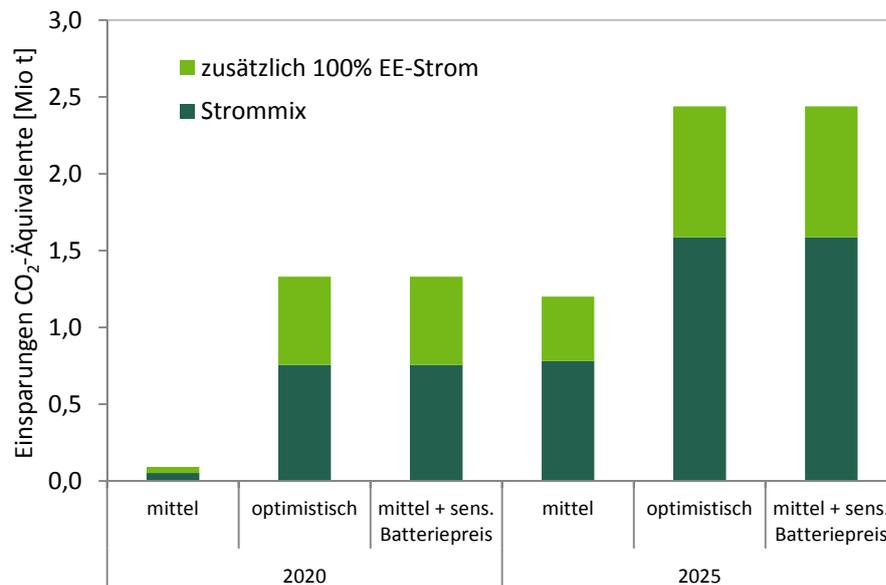


Abbildung 43 CO<sub>2</sub>-Äquivalente – Einsparpotenzial bei Erschließung des ökonomischen Potenzials von Elektrobussen (opportunity charging) in 2020 bzw. 2025.

Die in den konkreten Anwendungsfällen erzielbare Minderung der Treibhausgasemissionen für Standard- und Gelenkbusse für das Anschaffungsjahr 2014 sind in Abschnitt 4.3 dargestellt.

## 4.2 Schwere Nutzfahrzeuge am Beispiel eines mittelschweren Lkw

Der Einsatz von alternativen Antrieben stellt bei Lkw aufgrund der hohen Leistungsanforderungen und der hohen Jahresfahrleistungen eine besondere Herausforderung dar. Insbesondere bei Lkw im Fernverkehr stellt auch perspektivisch der batterieelektrische Antrieb daher keine realistische Antriebsoption dar (Hülsmann et al. 2014).

Eine realistischere Option für den Einsatz von batterieelektrischen Fahrzeugen stellt die Lkw-Klasse mit einem zulässigen Gesamtgewicht von bis zu 12 Tonnen im städtischen Lieferverkehr dar. Perspektivisch könnten verschärfte Grenzwerte für Luftschadstoffe und Lärmemissionen (z. B. bei Nachtbelieferungen) insbesondere in Innenstädten wichtige Treiber für die Entwicklung und den Einsatz elektrisch betriebener Lieferfahrzeuge darstellen. Bisher sind in diesem Fahrzeugsegment jedoch nur Prototypen oder Kleinserienfahrzeuge verfügbar, die vorwiegend im Rahmen von Pilotvorhaben zum Einsatz kommen.

Im Folgenden wird am Beispiel dieser Lkw-Klasse ein Vergleich der Gesamtkosten für eine batterieelektrische und eine entsprechende dieselmotorische Fahrzeugvariante für den Betrachtungszeitraum 2014 bis 2020 angestellt.

### 4.2.1 Standardparameter

Für die Berechnung der Gesamtkosten in Abhängigkeit der Fahrleistung und des Anschaffungsjahres wurden Standardparameter definiert, die eine mögliche Ausprägung der elektrischen Fahrzeugvariante sowie einen konkreten Anwendungsfall abdecken – die innerstädtische Belieferung ausgehend von einem regionalen Logistikzentrum. Wird ein Parameter in der folgenden Ergebnisdarstellung nicht variiert, so liegt der jeweilige Wert dieser Standardkonfiguration zu Grunde.

In Tabelle 30 sind die den folgenden Berechnungen zugrundeliegenden Parameter für einen mittelschweren Lkw mit zulässigem Gesamtgewicht von 12 Tonnen aufgeführt. Der unterstellten mittleren Jahresfahrleistung liegt die Annahme eines Fahrzeugeinsatzes an 300 Tagen im Jahr mit jeweils einer Tagesfahrleistung von 100 km zu Grunde. Für den konkreten Anwendungsfall wird eine Samstagsbelieferung unterstellt<sup>35</sup>. Es wird angenommen, dass sich der Nutzlastverlust aufgrund eines Transportes von Volumengütern nicht negativ auf die Kostenberechnung auswirkt.

<sup>35</sup> Die Annahmen zur jährlichen Fahrleistung entsprechen dem Praxiserfahrungen bei der Belieferung von C&A durch die Meyer & Meyer Transport Services GmbH in Berlin mit einem elektrischen Lkw (Gesamtgewicht 8,8 t). Persönliche Mitteilung vom 26.01.2015; C. Schröder, Meyer & Meyer Transport Services GmbH vom 26.01.2015.

Tabelle 30: Standardparameterausprägungen für einen Lkw mit einem zGG von 12 t im städtischen Lieferverkehr

Parameter	Wert
Jahresfahrleistung	30.000 km
Haltedauer	6 Jahre
Ladeinfrastruktur	Ladesäule 22 kW
Ladeverhalten	nur auf Betriebsgelände
Reichweite	185 km
Batteriekapazität	100 kWh

#### 4.2.2 Gesamtkosten in Abhängigkeit der Fahrleistung

Die Gesamtkosten werden bei Lkw angesichts relativ hoher Jahresfahrleistungen in erheblichem Maße durch die Kraftstoffkosten bestimmt. Angesichts der deutlich niedrigeren Energiekosten der batterieelektrischen Varianten wird die Wirtschaftlichkeit mit zunehmender Jahresfahrleistung erhöht. Gleichzeitig stellt jedoch die begrenzte elektrische Reichweite eine Restriktion für hohe Tagesfahrleistungen dar und begrenzt somit technisch die mögliche maximale Jahresfahrleistung.

Abbildung 44 und Abbildung 45 zeigen den Gesamtkostenvergleich für die definierten Szenarien für einen mittelschweren Lkw als Elektrofahrzeug entsprechend der oben genannten Ausprägung der Standardparameter im Vergleich zu einem Dieselfahrzeug in Abhängigkeit der Fahrleistung für die Anschaffungsjahre 2014 und 2020.

Wie aus Abbildung 44 ersichtlich wird, kann heute eine Wirtschaftlichkeit des elektrischen Lkw auch bei hoher Jahresfahrleistung nicht erreicht werden. Vergleicht man dieses Ergebnis mit dem Ergebnis aus Abbildung 29 für einen 12 m-Standardbus, wirkt sich hier der höher angesetzte Strompreis bei Lkw im Vergleich zu Bussen negativ aus (vgl. Abschnitt 4.1.3). Im Anschaffungsjahr 2020 (Abbildung 45) wird die Wirtschaftlichkeitsschwelle im optimistischen Szenario bei einer Jahresfahrleistung von 52.000 km überschritten. Die auf Grundlage der elektrischen Reichweite abgeschätzte maximal erzielbare Fahrleistung pro Jahr liegt bei etwa 55.000 km. Bei der im Anwendungsfall unterstellten Jahresfahrleistung von 30.000 km ergeben sich im mittleren Szenario Mehrkosten für ein Elektrofahrzeug von rund 53.000 € im Anschaffungsjahr 2014 bzw. 30.000 € im Anschaffungsjahr 2020.

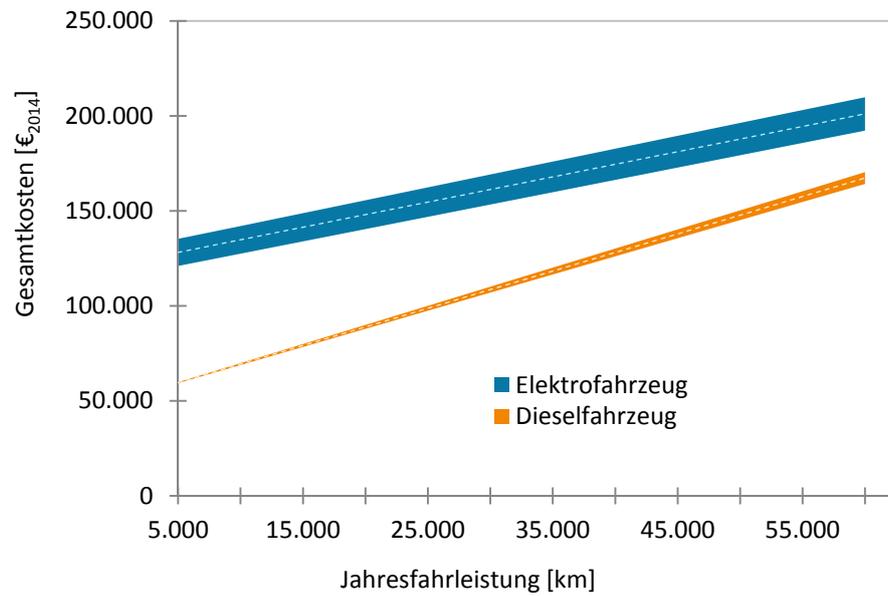


Abbildung 44: Lkw mit einem zGG von 12 t im städtischen Lieferverkehr mit Anschaffungsjahr 2014. Gesamtkosten in Abhängigkeit der Fahrleistung.

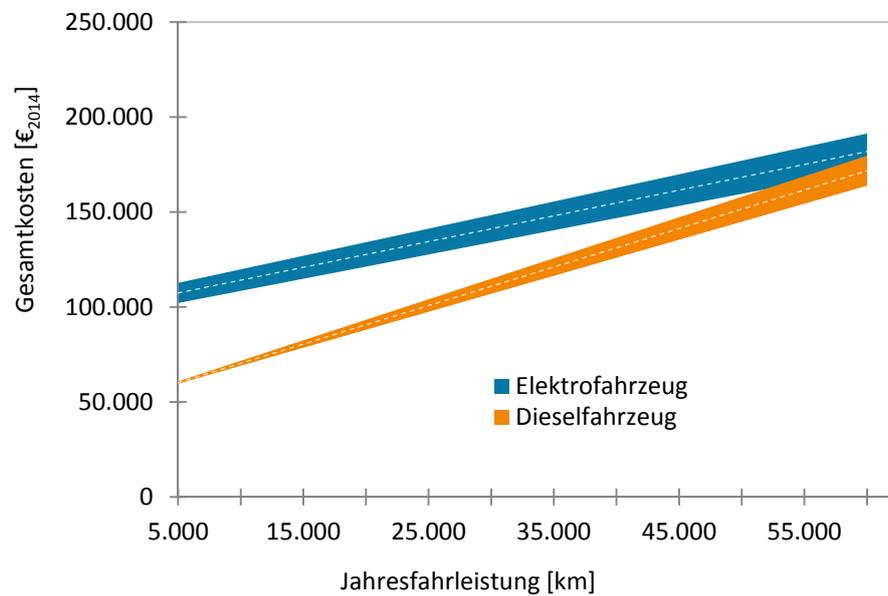


Abbildung 45: Lkw mit einem zGG von 12 t im städtischen Lieferverkehr mit Anschaffungsjahr 2020. Gesamtkosten in Abhängigkeit der Fahrleistung.

### 4.2.3 Variation des Strompreises und Sonder-AfA

Wie in Abschnitt 2.3.1 beschrieben, berücksichtigt der veranschlagte Standardstrompreis keine Rabatte für Gewerbekunden sowie mögliche Vergünstigungen durch die Nutzung lastvariabler Tarife bzw. die mögliche Befreiung von Netzentgelten, wodurch gegebenenfalls ein günstigerer Stromtarif für die gewerbliche Nutzung von Elektrofahrzeugen bezogen werden kann.

Abbildung 46 zeigt deshalb für das mittlere Szenario auf, wie sich die Gesamtkosten eines Lkw mit dem Anschaffungsjahr 2014 unter Variation des Strompreises darstellen. Neben der standardmäßig unterstellten Strompreisentwicklung ist dargestellt, wie sich ein um 6 ct/kWh (red. Strompreis I) bzw. ein um 12 ct/kWh geringerer Strompreis (red. Strompreis II) auf die Gesamtkosten auswirkt.

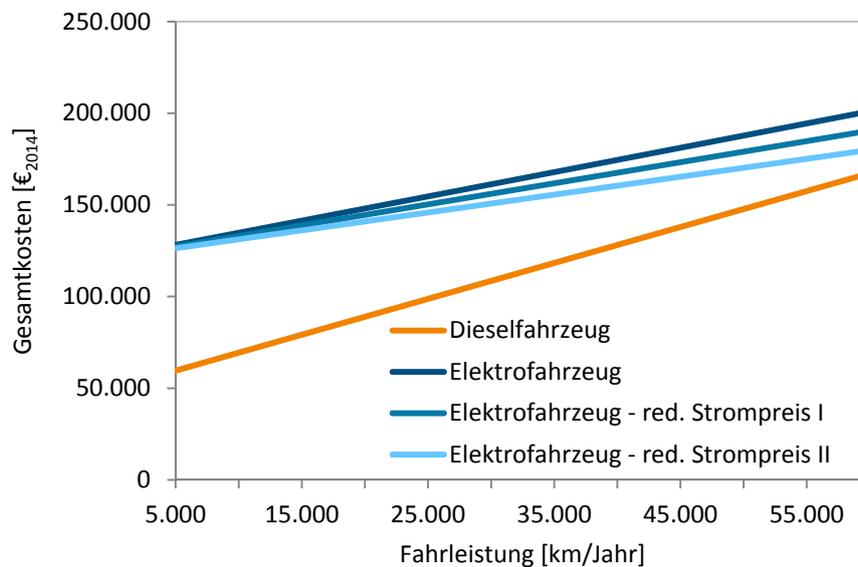


Abbildung 46: Lkw mit einem zGG von 12 t im städtischen Lieferverkehr mit Anschaffungsjahr 2014 unter Annahme des mittleren Szenarios. Elektrofahrzeugvariante mit und ohne Reduktion des Strompreises. Gesamtkosten in Abhängigkeit der Fahrleistung.

Unabhängig von der Höhe des veranschlagten Strompreises kann keine Kostengleichheit erreicht werden. Bei der in den Berechnungen veranschlagten Fahrleistung von 30.000 km verringern sich die Mehrkosten gegenüber einem Dieselfahrzeug von rund 53.000 € um rund 5.300 € (red. Strompreis I) bzw. 10.500 € (red. Strompreis II). Bei hohen Fahrleistungen von 55.000 km pro Jahr verringern sich die Mehrkosten gegenüber einem Dieselfahrzeug von rund 37.000 € um rund 9.700 € bei einem um 6 ct niedrigerem Strompreis bzw. um 17.600 € bei einem um 12 ct niedrigerem Strompreis.

Wie bereits in Abschnitt 3.1.4 für Pkw dargelegt, wird derzeit die Einführung einer Sonder-AfA für Elektrofahrzeuge als zentrale Marktanreizmaßnahme diskutiert (NPE 2014, vgl. Abschnitt 2.3.3). Unter der getroffenen Annahme einer Nutzungsdauer von sechs Jahren führt eine Sonder-AfA bei Lkw durch vorgezogene Steuereinsparungen aufgrund des veranschlagten Zinssatzes zu

Kostenminderungen. Eine Sonder-AfA hätte daher Kostenminderungen von nur rund 1.700 € (Anschaffungsjahr 2014) bzw. 1.400 € (Anschaffungsjahr 2020) zur Folge.

#### 4.2.4 Gesamtkosten in Abhängigkeit des Anschaffungsjahres

Abbildung 47 zeigt die Gesamtkosten eines elektrischen mittelschweren Lkw unter Annahme von zwei unterschiedlichen Batteriepreisentwicklungen (vgl. Abschnitt 4.1.6) im Vergleich zu einem Diesel-Lkw mit einer zugrunde gelegten Jahresfahrleistung von 30.000 km für das mittlere Szenario. Für die Diskussion des mittelschweren Lkw wurde auf die Abbildung von Kostenbändern an dieser Stelle verzichtet, da der Einfluss der unterstellten Batteriepreisentwicklung zentraler scheint. Die entsprechende Abbildung findet sich im Anhang (Abschnitt 6.4.3). Mit der standardmäßig unterstellten Batteriepreisentwicklung wird eine Wirtschaftlichkeit der elektrischen Lkw in keinem der drei Szenarien erreicht. Aus Abbildung 47 ist zu entnehmen, dass für die in Abschnitt 2.3.1 aufgeführte alternative (steiler sinkende) Batteriepreisentwicklung im Anschaffungsjahr nahezu Kostengleichheit zwischen dem Elektro- und Diesel-Lkw im Jahr 2025 erreicht wird. Die Gesamtkostendifferenz zur konventionellen Fahrzeugvariante beträgt aktuell für beide Entwicklungen etwa 53.000 €. Im Anschaffungsjahr 2020 liegen die Gesamtkosten der Elektrofahrzeuge rund 30.000 € über denen der Dieselfahrzeuge. Unter Berücksichtigung der alternativen Batteriepreisentwicklung betragen die Mehrkosten im mittleren Szenario im Anschaffungsjahr 2020 rund 10.000 €.

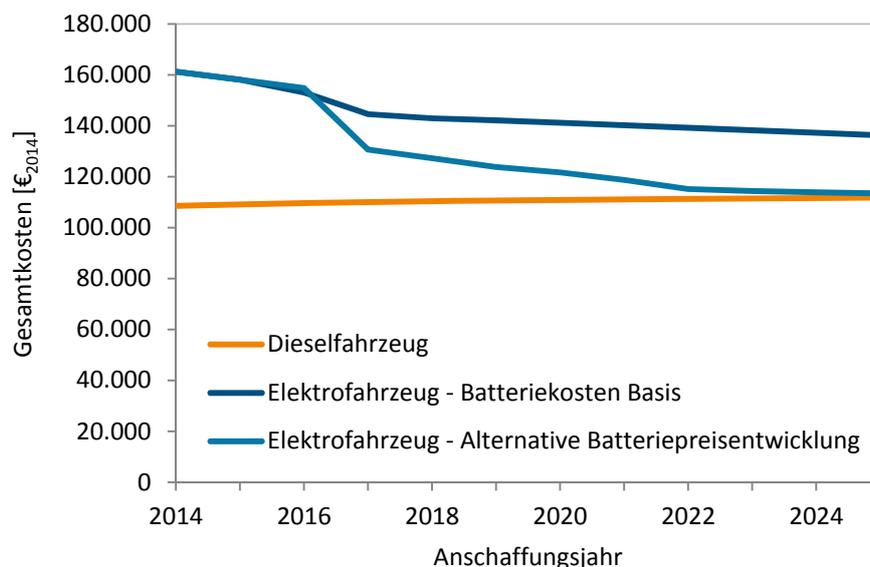


Abbildung 47: Lkw mit einem zGG von 12 t im städtischen Lieferverkehr mit einer Fahrleistung von 30.000 km/a unter Annahme des mittleren Szenarios. Im Vergleich für die Elektrofahrzeugvariante: Szenarien der Batteriepreisentwicklung im Vergleich. Gesamtkosten in Abhängigkeit des Anschaffungsjahres.

### 4.2.5 Gesamtkostenvergleich im Detail

Abbildung 48 zeigt die Gesamtkosten eines mittelschweren Lkw als Elektro- und Dieselfahrzeug aufgeschlüsselt nach Kostenblöcken für die Anschaffungsjahre 2014 und 2020 im mittleren Szenario.

Der Kraftstoffkostenvorteil des Elektrofahrzeugs beträgt in der Nutzungszeit von sechs Jahren rund 15.000 €. Dem gegenüber stehen in 2014 etwa dreimal so hohe Kosten für die Fahrzeuganschaffung beim Elektro-Lkw. Die Kosten für die Anschaffung der Elektrofahrzeuge verringern sich mit der Zeit, betragen im Jahr 2020 aber weiterhin das Zweieinhalbfache eines verbrennungsmotorischen Lkw. Insgesamt hat die Dieselve Variante einen Gesamtkostenvorteil von rund 53.000 € in 2014 bzw. 30.000 € in 2020.

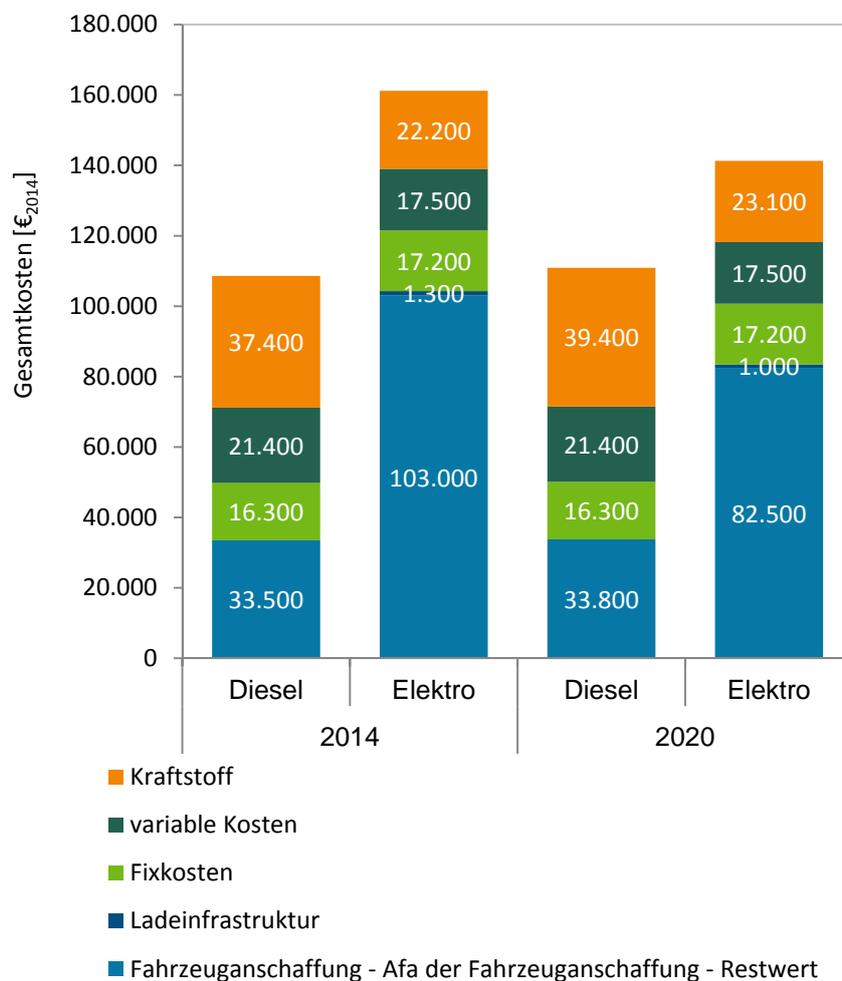


Abbildung 48: Gesamtkosten eines Lkw mit einem zGG von 12 t im städtischen Lieferverkehr für die Jahre 2014 und 2020 im Vergleich

Die Ergebnisse zeigen, dass unter den getroffenen Annahmen mittelschwere Elektro-Lkw für das gegebene Einsatzprofil auch mittelfristig nicht wirtschaftlich einsetzbar sind. Um in den Bereich eines wirtschaftlichen Einsatzes zu kommen, müssten sich die Batteriepreise dem Preisniveau für Batteriesysteme für Pkw-Anwendungen annähern.

### 4.3 Mögliche CO<sub>2</sub>-Minderung in den Anwendungen der schweren Nutzfahrzeuge

Abbildung 49 zeigt die durchschnittlichen Treibhausgasemissionen schwerer Nutzfahrzeuge. Aufgrund der hohen jährlichen Fahrleistung von 60.000 km und des hohen Kraftstoffverbrauchs fallen bei den Gelenkbussen mit rund 111 Tonnen die höchsten Emissionen an. Durch den Einsatz eines Elektrobus lassen sich mit 58 Tonnen (Strommix) bzw. 110 Tonnen (Strom aus 100 % erneuerbaren Energie) 53 % bzw. 99 % dieser Emissionen einsparen. Bei den Standardbussen reduzieren sich die Emissionen durch den Einsatz eines Elektrobus von 85 Tonnen auf 40 Tonnen bzw. auf 1 Tonne (100 % EE-Strom) Treibhausgasemissionen. Dass die Emissionen auch bei Bezug von Strom aus 100 % erneuerbaren Energien nicht Null betragen ist durch den enthaltenen Anteil von Strom aus Biomasse begründet (vgl. Abschnitt 2.5).

Bei den mittelschweren Lkw würde der Einsatz eines Elektrofahrzeuges die Emissionen von 18 Tonnen um 56 % auf 10 Tonnen (Strommix) bzw. um 99 % auf 0,2 Tonnen (100 % EE-Strom) reduzieren.

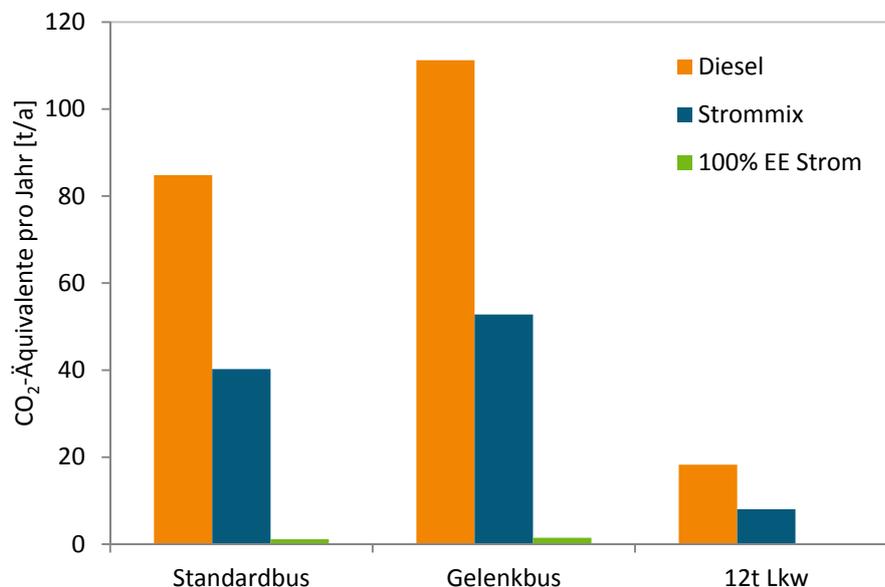


Abbildung 49: Durchschnittliche CO<sub>2</sub>-Äquivalent-Emissionen der einzelnen Anwendungen pro Fahrzeug und pro Jahr im Vergleich für verschiedene Kraftstoffe (Anschaffungsjahr 2014).

## 4.4 Zwischenfazit

- Elektrische Linienbusse profitieren vom Bezug günstiger Stromtarife und können bei einer auf die Einsatzzwecke hin optimierten Dimensionierung der Batterie unter günstigen Rahmenbedingungen schon vor 2020 die Wirtschaftlichkeitsschwelle überschreiten.
- Angesichts der hohen spezifischen Batteriekosten bietet die Option einer geringeren Dimensionierung der Batteriekapazität in Kombination mit Zwischenladungen im Betrieb („opportunity-charging“) wirtschaftliche Vorteile gegenüber der Variante mit ausschließlicher Nachtladung und entsprechend größerer Batterieauslegung („overnight-charging“). Diese Vorteile sind jedoch nur bei einer hohen Auslastung der Ladeinfrastruktur und moderaten Infrastrukturkosten realisierbar.
- Während im mittleren Szenario bis zum Jahr 2020 mit rund 800 Fahrzeugen nur geringe Potenziale bestehen, Elektrobusse wirtschaftlich zu betreiben, könnten im optimistischen Szenario unter den getroffenen Annahmen bis zum Jahr 2020 etwa 40 % des Gesamtbestands an Stadtbussen wirtschaftlich mit Elektrofahrzeugen betrieben werden. Dieses Potenzial setzt niedrige Kosten für die Ladeinfrastruktur voraus.
- Würde das Potenzial aus dem optimistischen Szenario an Elektrobussen bis 2020 vollständig realisiert und der Strombezug aus rein erneuerbaren Quellen sichergestellt, könnten im Jahr 2020 etwa 1,3 Millionen Tonnen Treibhausgasemissionen eingespart werden.
- Mittelschwere Elektro-Lkw im innerstädtischen Verteilverkehr können unter den getroffenen Annahmen bis 2020 vermutlich nicht wirtschaftlich betrieben werden. Das Erreichen der Wirtschaftlichkeitsschwelle würde eine deutlich stärkere Batteriepreisminderung als in den Szenarien hinterlegt voraussetzen.
- Für Lkw bieten sich ggf. alternative Konzepte wie ein Batteriewechselsystem an, um die Kostenparität zwischen Dieselfahrzeugen und Elektrofahrzeugen früher zu erreichen, da diese eine höhere jährliche Fahrleistung zulassen.

## 4.5 Exkurs: Elektromobilität in der Intralogistik am Beispiel Flughafen

In der Intralogistik stellt der elektrische Antrieb, insbesondere bei Flurförderfahrzeugen, schon heute die dominierende Technologie dar. Anforderungen des Arbeitsschutzes, wie beispielsweise der emissionsfreie Betrieb von Fahrzeugen in geschlossenen Räumen, die besonderen Vorteile des Elektromotors im Betrieb sowie geeignete Nutzungsprofile der Fahrzeuge mit relativ geringen Tagesfahrleistungen und der damit verbundenen Möglichkeit zum Einsatz der bereits lange etablierten Blei-Säure-Batterietechnologie, haben in der Intralogistik bereits frühzeitig zu einem verstärkten Einsatz von elektrisch betriebenen Fahrzeugen geführt.

Die Vorfeldmobilität an Flughäfen zeichnet sich durch besondere Anforderungen an die eingesetzten Förderfahrzeuge aus. Im Vergleich zu anderen Anwendungen in der Intralogistik kommen an Flughäfen jedoch bisher weiterhin vorwiegend konventionelle dieselbetriebene bzw. hybridisierte Antriebskonzepte zum Einsatz. Eine hohe Robustheit der Fahrzeuge, geringe Ausfallzeiten und eine uneingeschränkte Verfügbarkeit der Fahrzeuge sind zentrale Einsatzkriterien im Betrieb. In mehreren aktuellen Pilotvorhaben, beispielsweise an den Flughäfen Frankfurt und Stuttgart<sup>36</sup>, werden jedoch mittlerweile auch batterieelektrische Antriebssysteme in unterschiedlichen Fahrzeugkategorien im Alltagsbetrieb erprobt und deren Einsatz wissenschaftlich begleitet. Wichtiger Treiber für die zunehmende Erprobung von Elektrofahrzeugen in der Vorfeldmobilität ist das verstärkte Bestreben der Flughafenbetreiber, die Emissionen der Flugzeugabfertigung zu reduzieren. Dabei sind neben den globalen Treibhausgasemissionen insbesondere auch die lokal wirksamen Lärm- und Luftschadstoffemissionen von Relevanz und deren Minderung vor dem Hintergrund von Arbeitsschutz und öffentlicher Akzeptanz des Flugbetriebs von zunehmender Bedeutung. Zudem konnten erste Studien – beispielsweise des Öko-Instituts im Auftrag der Fraport AG (Schüler et al. 2013) – aufzeigen, dass in der Vorfeldmobilität in mehreren Anwendungen bereits kurzfristig ein wirtschaftliches Potenzial für den Einsatz von Elektrofahrzeugen besteht.

Im Folgenden soll am Beispiel der drei Fahrzeugkategorien Flugzeugschlepper, Fracht- und Gepäckschlepper veranschaulicht werden, wie sich die Gesamtkosten der jeweiligen elektrischen im Vergleich zur konventionellen Fahrzeugvariante aktuell darstellen und welche weiteren Potenziale, aber auch Herausforderungen, für den Einsatz von Elektrofahrzeugen in den genannten Anwendungen möglicherweise bestehen.

Die folgenden Analysen beruhen im Wesentlichen auf den aktuellen Erfahrungen und Einschätzungen von Experten aus dem Bereich des Flughafenfuhrparkbetriebs sowie von Herstellern entsprechender Fahrzeuge. Umfangreiche Informationen zu Fahrzeugeigenschaften und -einsatz wurden im Rahmen von schriftlichen Befragungen und persönlichen Gesprächen bereitgestellt durch Herrn Dr. Matthias Baur (Geschäftsführer, VOLK Fahrzeugbau GmbH), Herrn Thomas Berger (Projektleiter, Schopf Maschinenbau GmbH) und Herrn Boris Weber (Bodenverkehrsdienste, FRAPORT AG).

Insbesondere zu den anschließenden Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen ist zu beachten, dass diese lediglich orientierenden Charakter haben, da die dargestellten Fahrzeuge momentan noch in Erprobung sind und bisher nur teilweise Erfahrungswerte aus der Praxis vorliegen. Bestandteil der oben genannten laufenden Förderprojekte ist eine umfassende wissenschaftliche Begleitforschung, die perspektivisch Analysen auf Basis umfassender empirischer Daten ermöglicht. Die hier durchgeführten Analysen können daher nur erste Anhaltspunkte zum wirtschaftlichen Einsatz von Elektrofahrzeugen liefern.

<sup>36</sup> Förderprojekte E-PORT AN ([www.e-port-an.de](http://www.e-port-an.de)) am Flughafen Frankfurt und eFleet am Flughafen Stuttgart

### 4.5.1 Flugzeugschlepper

#### Hintergrund

Flugzeugschlepper kommen auf dem Flughafenvorfeld vorwiegend für den sogenannten „Push-out“ der Flugzeuge zum Einsatz. Turbinengetriebenen Flugzeugen ist zwar grundsätzlich durch Schubumkehr ein Rückwärtsrollen aus eigener Kraft möglich, auf der Rückwärtsbewegung von der Position am Terminalgebäude auf die Rollbahn ist jedoch der Einsatz der Turbinen aus Lärmschutz- und Sicherheitsgründen nicht erlaubt. Die Rückwärtsbewegung, also der „Push-out“, erfolgt daher mit Flugzeugschleppern, die über eine Schleppstange bzw. direkt über das Bugrad mit dem Flugzeug verbunden sind und dieses bis auf den Rollweg zurückschieben, bevor das Flugzeug eigenständig turbinengetrieben zur Startposition rollt.



Abbildung 50: Elektrischer Flugzeugschlepper Schopf F110 electric im Einsatz am Flughafen Stuttgart (Quelle: Schopf)

Gängige Mittelstreckenflugzeuge (z. B. Airbus A 320, Boeing 757) weisen ein maximales Abfluggewicht von bis zu 100 Tonnen auf. Großraumflugzeuge (z. B. Airbus A 380) erreichen ein maximales Abfluggewicht von über 500 Tonnen. Entsprechend hohe Anforderungen werden an das Eigengewicht und die Leistung von Flugzeugschleppern gestellt. Abgesehen von den internationalen Flughäfen Frankfurt und München werden an deutschen Flughäfen vorwiegend Flugzeugschlepper der 12-Tonnen-Klasse eingesetzt, die für den Push-out von Mittelstreckenflugzeugen ausreichend sind. Am Flughafen Frankfurt werden vorwiegend Flugzeugschlepper höherer Klassen eingesetzt, um auch während der Tagesspitzen alle Flugzeugklassen abfertigen zu können.

## Gesamtkostenvergleich

Bisher werden Flugzeugschlepper vorwiegend mit einem konventionellen Dieselmotor angetrieben. In der 12-Tonnen-Klasse sind mittlerweile jedoch erste batterieelektrische Fahrzeuge verfügbar und werden in der Praxis erprobt<sup>37</sup>. Diese Fahrzeugklasse bildet die Grundlage für den folgenden Gesamtkostenvergleich einer konventionellen und einer batterieelektrischen Fahrzeugvariante. Anders als bei Pkw ist bei Flugzeugschleppern ein hohes Eigengewicht der Fahrzeuge erforderlich, so dass eine geringe Energiedichte der Batterie kein grundlegendes Problem darstellt. Daher kommen in dieser Anwendung bisher günstige Blei-Säure-Batterien mit spezifischen Batteriekosten von etwa 80 €/kWh zum Einsatz.

Auf Grundlage aktuell verfügbarer Fahrzeuge werden im Gesamtkostenvergleich Zusatzkosten der batterieelektrischen Variante von 20 % unterstellt. Diese begründen sich im Wesentlichen mit den Kosten für die erforderliche Batterie mit einer Gesamtkapazität von etwa 150 kWh. Weitere Kosten (5.000 €) sind mit dem notwendigen Ladegerät verbunden, da eine Batterieladung mit hoher Leistung – und damit eine Ladedauer von weniger als acht Stunden – für den Betrieb am Flughafen erforderlich ist. Weitere Kosten, die mit der Ertüchtigung des Stromnetzes verbunden sein können, sind nicht berücksichtigt.

Da Elektromotoren im Vergleich zu Verbrennungsmotoren praktisch wartungsfrei sind, wird die Annahme getroffen, dass sich die jährlichen Wartungskosten um ein Viertel reduzieren. Der Einsatz von Blei-Säure-Batterien erfordert einen regelmäßigen Elektrolyttausch. Bei guter Pflege können die Batterien bis zu acht Jahre im Einsatz bleiben, bevor sie aufgrund des Kapazitätsverlusts ersetzt werden müssen. In der Gesamtkostenbetrachtung werden eine Nutzungsdauer des Fahrzeugs von 10 Jahren sowie – als konservative Abschätzung – ein Batterieersatz nach sechs Jahren angenommen und die entsprechenden Kosten des Batterieersatzes berücksichtigt. Der Restwert der Batterie wird mit 10 % des Anschaffungspreises und der Restwert des Fahrzeugs am Ende der Nutzungsdauer jeweils mit 30 % der Investitionskosten abgeschätzt.

Für den Gesamtkostenvergleich sind mögliche Kraftstoffkostenvorteile der batterieelektrischen Variante von besonderer Bedeutung. Für den Vergleich der Antriebsoptionen kann auf erste Messwerte aus Praxisversuchen zurückgegriffen werden. So erreicht das Dieselfahrzeug in einer Betriebsstunde mit durchschnittlich etwa fünf Pushbacks einen mittleren Kraftstoffverbrauch von 7,5 l Dieselmotorkraftstoff, während die elektrische Variante einen Stromverbrauch (inklusive Ladeverluste) von 32,5 kWh pro Betriebsstunde erzielt.

<sup>37</sup> Zum Beispiel der batterieelektrische Flugzeugschlepper Schopf F 110 electric am Flughafen Stuttgart.

Die Anzahl der jährlichen Betriebsstunden kann je nach Flughafen und Einsatzzweck stark variieren. Für die im Folgenden dargestellten Gesamtkosten wird eine mittlere Betriebsstundenzahl von 2.000 pro Jahr zu Grunde gelegt.

Die Annahmen zu Kraftstoff- bzw. Strompreisen orientieren sich für alle Flughafenwendungen an heutigen Dieselmotorkraftstoffpreisen von etwa 1,16 €/l und dem Strompreis für Industrieunternehmen mit einem Jahresverbrauch von 160 bis 20.000 MWh in Höhe von 0,15 €/kWh (jeweils ohne Mehrwertsteuer).

Tabelle 31: Parameterausprägungen für den Kostenvergleich in der Fahrzeugklasse Flugzeugschlepper.

Parameter	Dieselfahrzeug	Elektrofahrzeug
Aufpreis Elektrofahrzeug	-	20 %
Ladeinfrastrukturkosten	-	5.000 €
Haltedauer	10 Jahre	10 Jahre
Jährliche Wartungskosten	4.000 €	3.000 €
Energieverbrauch	7,5 l/Bh	32,5 kWh/Bh
Jährliche Betriebsstunden	2.000 Bh	2.000 Bh
Restwert nach Haltedauer	36.000 €	42.000 €
Batteriegröße	-	147 kWh
Batterielebensdauer	-	6 Jahre
Batterieersatzkosten	-	ca. 10.500 €
Energiepreise (ohne MwSt.)	1,16 €/l	0,15 €/kWh

Der Kostenvergleich für die heute vorherrschende dieselmotorische und die batterieelektrische Variante (siehe Abbildung 51) zeigt unter den getroffenen Annahmen bereits heute deutliche Kostenvorteile für den Einsatz batterieelektrischer Flugzeugschlepper. Zwar sind mit der batterieelektrischen Fahrzeugvariante etwas höhere Investitionskosten für das Fahrzeug, den Batterieersatz und die Ladeinfrastruktur notwendig. Diese werden jedoch im Laufe der Nutzung über deutliche Einsparungen bei den Betriebskosten – insbesondere den Energiekosten – im Vergleich zur Dieselvariante mehr als kompensiert und führen über die Gesamtnutzungsdauer zu einer Kostenersparnis in der Größenordnung von knapp 50.000 €.

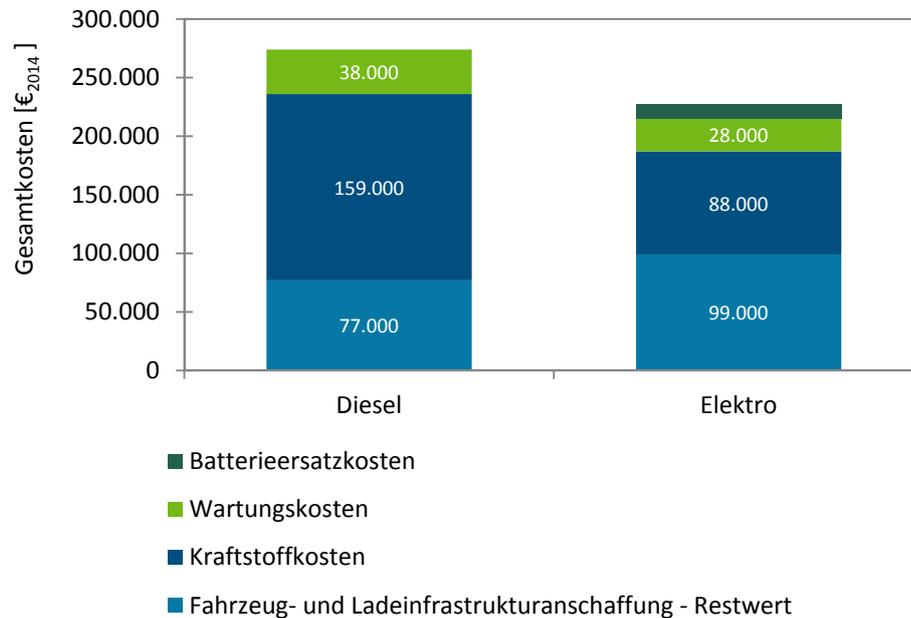


Abbildung 51: Gesamtkosten eines Flugzeugschleppers im Vergleich für ein Dieselfahrzeug und ein Elektrofahrzeug im Jahr 2014.

## Hemmnisse und Potenziale batterieelektrischer Fahrzeuge

Trotz der deutlichen Kostenvorteile und weiterer Vorteile in der Nutzung (wie beispielsweise emissionsfreier Betrieb, hohes Drehmoment des Motors, geringe Wartungsintensität) spielen Elektrofahrzeuge in diesem Anwendungsfeld bisher eine noch untergeordnete Rolle.

Die weitere Dominanz verbrennungsmotorischer Antriebe lässt sich laut Experten unter anderem mit dem hohen Zeitdruck bei der Flugzeugabfertigung und den erheblichen wirtschaftlichen Folgekosten eines möglichen Ausfalls von Fahrzeugen erklären. In der Vergangenheit wurde daher in der Vorfeldmobilität vorzugsweise auf bewährte technische Lösungen gesetzt. Die Erprobung neuer Technologien erfolgt im Regelfall zunächst in einzelnen Pilotanwendungen. Ferner kann die beschränkte Reichweite elektrischer Fahrzeuge und die längeren Ladezeiten als Einsatzhemmnis empfunden werden, welches eine Anpassung der etablierten Fahrzeugdisposition erfordern würde. Ein Mix aus konventionellen und batterieelektrischen Fahrzeugen im Fuhrpark könnte beispielsweise mögliche Nutzungsrestriktionen zu Tagesspitzen kompensieren.

Eine umfassende Umstellung der Flugzeugschlepperflotte auf batterieelektrische Antriebssysteme erfordert hohe elektrische Anschlussleistungen, die möglicherweise mit einer weitreichenden Ertüchtigung des Stromnetzes und damit zusätzlichen Kosten verbunden sind, die in der hier durchgeführten Kostenbetrachtung nicht berücksichtigt sind. Auf der anderen Seite ist auch bei konventionellen Fahrzeugen in den nächsten Jahren im Kontext verschärfter Abgasvorschriften mit Zusatzkosten für die Abgasnachbehandlung zu rechnen.

Anders als bei Pkw stellt die Lithium-Ionen-Technologie keine notwendige Voraussetzung für den Markterfolg in diesem Segment dar. Nach Einschätzung der konsultierten Experten ist eher damit zu rechnen, dass auch zukünftig vorrangig die wesentlich günstigere Blei-Säure-Batterietechnologie zum Einsatz kommt, da die geringere Energiedichte keine Nutzungsrestriktionen bedeutet. Der Einsatz der Lithium-Ionen-Technologie wird von den konsultierten Experten angesichts aktueller Marktpreise von etwa 1.000 €/kWh erst nach einer deutlichen Kostendegression (um den Faktor 5 bis 10) erwartet. Der Einsatz von Lithium-Ionen-Batterien könnte perspektivisch die Ladedauer deutlich verringern und den Einsatzzeitraum der Fahrzeuge erhöhen, so dass weniger Fahrzeuge im Fuhrpark vorgehalten müssten.

Zwar handelt es sich mit etwa 150 Flugzeugschleppern in Deutschland um einen relativ kleinen Markt. Dieser wird aktuell noch fast ausschließlich mit konventionellen Fahrzeugen betrieben, er weist jedoch perspektivisch ein hohes ökonomisches Potenzial für den Einsatz batterieelektrischer Fahrzeugvarianten auf. Die laufenden Praxisvorhaben können bei einem erfolgreichen Verlauf einen wichtigen Schritt für die zukünftige Verbreitung von elektrischen Flugzeugschleppern darstellen.

## 4.5.2 Frachtschlepper

### Hintergrund

Frachtschlepper kommen am Flughafen für den Frachttransport zum Einsatz und werden bisher vor allem dieselmotorisch betrieben. Die Zugmaschine bewegt bis zu vier Frachtpaletten mit jeweils maximal 3,5 Tonnen Last. Typischerweise werden hierfür 6 Tonnen-Zugmaschinen mit einer maximalen Anhängelast von 17,2 Tonnen eingesetzt. Grundsätzlich werden an die Zugmaschinen hohe Leistungsanforderungen gestellt. Die maximale Motorleistung wird allerdings jeweils nur kurzzeitig beim Anfahren bzw. Beschleunigen benötigt. Insbesondere bei großen Flughäfen legen die Schlepper teilweise erhebliche Distanzen auf dem Flughafengelände mit Einzelstrecken von bis zu 6 km zurück. Ein Teil der Fahrzeuge wird nur während der Spitzenlast im Tagesverlauf eingesetzt.

### Gesamtkostenvergleich

Auf Grund der hohen Leistungsanforderungen und teilweise relativ hoher Tagesfahrleistungen gehören batterieelektrische Frachtschlepper bisher nicht zum Standardfuhrpark in der Vorfeldmobilität. Mittlerweile sind jedoch erste Fahrzeuge in dieser Leistungsklasse mit batterieelektrischem Antrieb verfügbar und werden in ersten Pilotanwendungen erprobt<sup>38</sup>. Diese bilden die Grundlage für den hier dargestellten Kostenvergleich.

<sup>38</sup> Am Flughafen Stuttgart wird beispielsweise der batterieelektrische Frachtschlepper Volk EFZ 80 N im Rahmen des Förderprojekts eFleet eingesetzt.

Gegenüber dem dieselmotorischen Vergleichsfahrzeug weist die elektrische Variante eine geringere Motorleistung auf, da der Elektromotor kurzfristig eine deutlich höhere Leistung – für Anfahrts- bzw. Beschleunigungsvorgänge – bereitstellen kann. Neben den grundsätzlichen Betriebsvorteilen des Elektromotors kann durch dieses Motor-Downsizing der Effizienzvorteil gegenüber der verbrennungsmotorischen Variante weiter gesteigert werden.



Abbildung 52: Elektrische Fracht- und Gepäckschlepper im Einsatz am Flughafen Stuttgart (Quelle: Volk)

Um den hohen Anforderungen an den Fahrzeugeinsatz gerecht zu werden, kommt eine relativ große Blei-Säure-Batterie mit 124 kWh Kapazität zum Einsatz. Die Annahmen zu Batteriepreis, Lebensdauer der Batterie, Batterieersatzkosten und Nutzungsdauer des Fahrzeugs (10 Jahre) sind analog zu Flugzeugschleppern getroffen. Laut Hersteller ist der Fertigungsaufwand der elektrischen im Vergleich zu den konventionell betriebenen Fahrzeugvarianten deutlich geringer, so dass Personalkosten in erheblichem Maße eingespart werden können. Bezüglich der zusätzlichen Investitionskosten für die batterieelektrische Variante stellt die getroffene Annahme eines Aufpreises von 10 % gegenüber der konventionellen Vergleichsvariante eine eher konservative Abschätzung dar.

Analog zu Flugzeugschleppern werden Kosten für das Ladegerät von 5.000 € veranschlagt. Die Wartungskosten des elektrischen Fahrzeugs werden gegenüber dem konventionellen Vergleichsfahrzeug gemäß erster Praxiserfahrungen um ein Drittel reduziert. Der Restwert der Fahrzeuge am Ende der Nutzungsdauer fällt mit 5 % der Anschaffungskosten relativ gering aus.

Für die Betrachtung der Gesamtnutzungskosten wurde eine mittlere Einsatzdauer der Fahrzeuge von 2.000 Betriebsstunden pro Jahr angesetzt. Auf Basis aktueller Pilotanwendungen wird ein Energieverbrauch von 7 l Dieselkraftstoff bzw. 27 kWh Strom pro Betriebsstunde zu Grunde gelegt. Die Energiepreisanahmen wurden analog zur Betrachtung der Flugzeugschlepper getroffen.

Tabelle 32: Parameterausprägungen für den Kostenvergleich in der Fahrzeugklasse Frachtschlepper.

Parameter	Dieselfahrzeug	Elektrofahrzeug
Aufpreis Elektrofahrzeug	-	10 %
Ladeinfrastrukturkosten	-	5.000 €
Haltedauer	10 Jahre	10 Jahre
Jährliche Wartungskosten	3.000 €	2.000 €
Energieverbrauch	7 l/Bh	27 kWh/Bh
Jährliche Betriebsstunden	2.000 Bh	2.000 Bh
Restwert nach Haltedauer	4.500 €	5.000 €
Batteriegröße	-	124 kWh
Batterielebensdauer	-	6 Jahre
Batterieersatzkosten	-	ca. 10.000 €
Energiepreise (ohne MwSt.)	1,16 €/l	0,15 €/kWh

Wie der Gesamtkostenvergleich in Abbildung 53 zeigt, können auch bei dieser Anwendung die zusätzlichen Investitionskosten für die batterieelektrische Fahrzeugvariante über die Nutzungsdauer mehr als kompensiert und ein Kostenvorteil von etwa 60.000 € unter den getroffenen Annahmen erzielt werden.

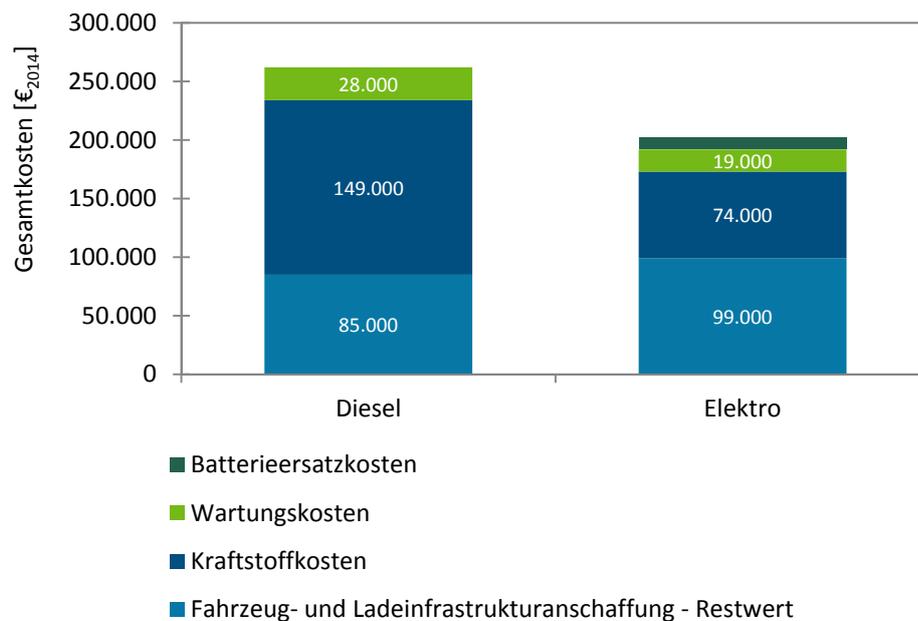


Abbildung 53: Gesamtkosten eines Frachtschleppers im Vergleich für ein Dieselfahrzeug und ein Elektrofahrzeug im Jahr 2014.

## Hemmnisse und Potenziale batterieelektrischer Fahrzeuge

Bezüglich der Hemmnisse und Potenziale von batterieelektrischen Frachtschleppern kann grundsätzlich auf die Ausführungen zu Flugzeugschleppern verwiesen werden. Trotz möglicher Kostenvorteile dominieren auch in diesem Bereich weiterhin konventionelle Fahrzeuge, die sich im Praxiseinsatz lange bewährt haben und sich beim Einsatz durch weniger Restriktionen (Reichweite, Standzeiten) auszeichnen. Durch die relativ große Auslegung der Batterie wird den Vorbehalten gegenüber der Reichweite der Fahrzeuge in aktuellen Pilotanwendungen begegnet. Perspektivisch könnten auf Basis der aktuell gewonnenen Erfahrungen batterieelektrische Fahrzeuge zunächst für die Abdeckung der Spitzenzeiten eingesetzt werden. Langfristig wäre jedoch auch eine weitergehende Substitution von dieselbetriebenen Fahrzeugen bei entsprechender Anpassung der Infrastruktur und der Betriebsstrategie möglich.

Aktuell befinden sich in dieser Fahrzeugkategorie etwa 500 Fahrzeuge im Flughafeneinsatz sowie etwa weitere 500 Fahrzeugen in anderen gewerblichen Anwendungen.

### 4.5.3 Gepäckschlepper

#### Hintergrund

Gepäckschlepper werden für den Transport des Gepäcks vom Terminalgebäude zum Flugzeug bzw. vom Flugzeug zur Gepäcksortieranlage eingesetzt. Da die Fahrzeuge beim Gepäcktransport auch in das Terminalgebäude einfahren, werden in dieser Anwendung schon seit mehr als zwei Jahrzehnten aus Arbeitsschutzgründen standardmäßig Hybridfahrzeuge eingesetzt, die innerhalb des Gebäudes einen elektrischen und damit emissionsfreien Betrieb ermöglichen.

Im Regelfall handelt es sich um serielle Hybridfahrzeuge. Bei diesem Antriebskonzept erfolgt der eigentliche Antrieb ausschließlich elektrisch. Der Dieselmotor fungiert lediglich als Generator, der den notwendigen Strom zum Antrieb des Elektromotors erzeugt. Überschussleistung wird in einer Batterie gespeichert. Eine externe Ladung der Batterie über das Stromnetz ist jedoch nicht möglich. Batterieelektrische Gepäckschlepper kamen in der Vergangenheit ausschließlich in gebäudenahen Bereichen zum Einsatz, jedoch aufgrund der erheblichen Wegstrecken und der begrenzten elektrischen Reichweite nicht auf dem Flughafenvorfeld.

#### Gesamtkostenvergleich

Die folgende Gesamtkostenbetrachtung vergleicht zwischen einem dieselmotorischen Hybridfahrzeug, welches den aktuellen Standard im Gepäcktransport repräsentiert und einem batterieelektrischen Vergleichsfahrzeug, wie es momentan in ersten Pilotanwendungen erprobt wird.

Da sich das Hybridfahrzeug durch einen aufwändigeren Antrieb auszeichnet werden für das batterieelektrische Fahrzeug 5 % geringere Anschaffungskosten angenommen. Die Annahmen zu Batterie, Batteriehaltbarkeit und Fahrzeugnutzungsdauer sind analog zu den beiden anderen Anwendungen getroffen. Aus der Batteriekapazität von etwa 30 kWh beim seriellen Hybridfahrzeug bzw. 112 kWh bei der batterieelektrischen Variante ergeben sich Batterieersatzkosten nach 6 Jahren von 3.700 € bzw. etwa 9.000 €. Die Kosten für die Ladeinfrastruktur orientieren sich an den oben getroffenen Annahmen. Ein Restwert von 5 % am Ende der Nutzungsdauer des Fahrzeugs sowie eine Minderung der Wartungskosten für die batterieelektrische Variante um ein Drittel sind analog zur Abschätzung für Frachtschlepper.

Die Annahmen zum Energieverbrauch von 4,5 l Dieselkraftstoff bzw. 14 kWh Strom pro Betriebsstunde orientieren sich an ersten Praxiserfahrungen mit batterieelektrischen Gepäckschleppern bzw. langjährigen Erfahrungen mit Hybridfahrzeugen. Die Energiepreisannahmen sind gegenüber den anderen Anwendungen unverändert. Die angenommenen 1.500 Betriebsstunden pro Jahr stellen eine durchschnittliche Nutzung dar. Je nach Flughafengröße kann diese zwischen 1.000 und 2.000 Stunden variieren.

*Tabelle 33: Parameterausprägungen für den Kostenvergleich in der Fahrzeugklasse Gepäckschlepper.*

Parameter	Serielles Dieselhybridfahrzeug	Elektrofahrzeug
Aufpreis Elektrofahrzeug	-	- 5 %
Ladeinfrastrukturkosten	-	5.000 €
Haltedauer	10 Jahre	10 Jahre
Jährliche Wartungskosten	3.000 €	2.000 €
Energieverbrauch	4,5 l/Bh	14 kWh/Bh
Jährliche Betriebsstunden	1.500 Bh	1.500 Bh
Restwert nach Haltedauer	4.000 €	3.700 €
Batteriegröße	30 kWh	112 kWh
Batterielebensdauer	6 Jahre	6 Jahre
Batterieersatzkosten	ca. 3.700 €	ca. 9.000 €
Energiepreise (ohne MwSt.)	1,16 €/l	0,15 €/kWh

Auch hier zeigt der Gesamtkostenvergleich der beiden Antriebsvarianten, dass die batterieelektrische Variante unter den getroffenen Annahmen bereits heute – auch im Vergleich mit der bereits verhältnismäßig effizienten Hybridvariante – erhebliche Kostenvorteile in der Größenordnung von 45.000 € über den Nutzungszeitraum aufweist. Laut Expertenmeinung könnte sich dieser Kostenvorteil zukünftig bei verschärften Abgasvorgaben für konventionelle Fahrzeuge weiter vergrößern.

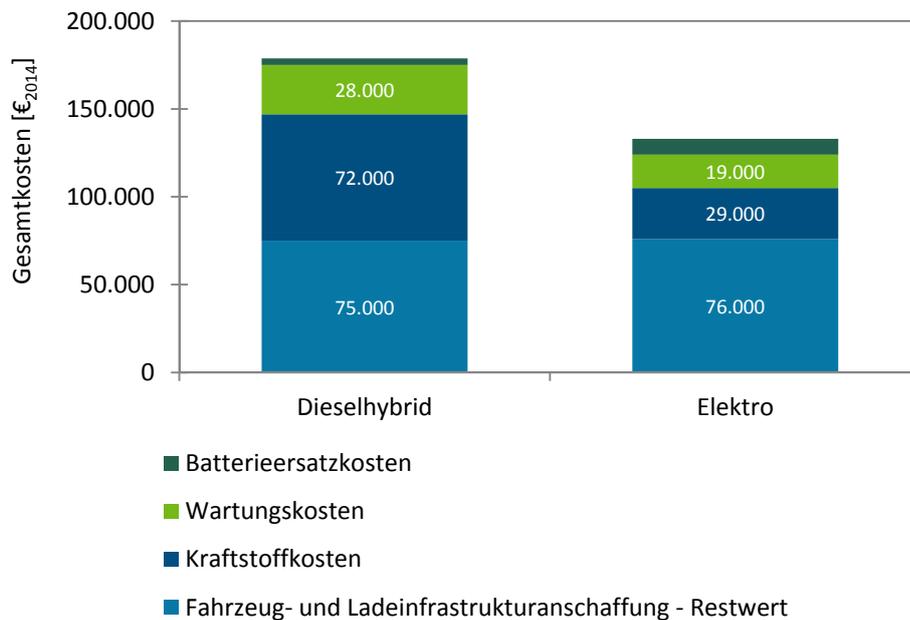


Abbildung 54: Gesamtkosten eines Gepäckschleppers im Vergleich für ein serielles Dieselhybridfahrzeug und ein Elektrofahrzeug im Jahr 2014.

## Hemmnisse und Potenziale batterieelektrischer Fahrzeuge

Auch im Bereich der Gepäckschlepper spielen batterieelektrische Fahrzeugvarianten trotz der Kostenvorteile weiterhin eine untergeordnete Rolle. Die Hemmnisse für größere Marktanteile stellen auch hier die Nutzungsrestriktionen bzw. die notwendigen Anpassungen im Fahrzeugeinsatz sowie der Infrastruktur dar. Die Konkurrenz mit einer etablierten Technologie, die sich im Alltagseinsatz langfristig bewährt hat, stellt ein weiteres Hemmnis dar.

Analog zu den zuvor diskutierten Anwendungen könnte der Einsatz von batterieelektrischen Fahrzeugen zu den Spitzenlastzeiten einen sinnvollen Einstieg in den Alltagsbetrieb darstellen. Der Einsatz von Batterien mit relativ hoher Batteriekapazität könnte insbesondere in der frühen Marktphase möglichen Vorbehalten bezüglich der Reichweite der Fahrzeuge entgegenwirken.

Während aktuell noch wenige der etwa 700 Gepäckschlepper in Deutschland batterieelektrisch betrieben werden, werden in anderen gewerblichen Anwendungsbereichen – insbesondere der Intralogistik – in dieser Fahrzeugkategorie etwa 90 % der rund 3.000 Fahrzeuge bereits heute elektrisch betrieben.

#### 4.5.4 CO<sub>2</sub>-Einsparung durch den Einsatz batterieelektrischer Fahrzeuge am Flughafen

Die mögliche Minderung der Treibhausgasemissionen stellt aus Umweltsicht das zentrale Bewertungskriterium im Vergleich der verbrennungsmotorischen und batterieelektrischen Fahrzeugvariante dar.

Abbildung 55 zeigt die jährlichen Treibhausgasemissionen für die betrachteten Flughafenanwendungen. Der Vergleich berücksichtigt die jeweilige Dieselvariante mit dem batterieelektrischen Vergleichsfahrzeug. Da die Treibhausgasbilanz des Elektrofahrzeugs sehr stark von der Art der Strombereitstellung abhängig ist, berücksichtigt die Darstellung zum einen die CO<sub>2</sub>-Intensität der heutigen Gesamtstromerzeugung in Deutschland und zum anderen eine Strombereitstellung auf Basis von 100 % regenerativen Energien.

Die Analysen zeigen, dass auch beim heutigen Strommix batterieelektrische Fahrzeuge die Treibhausgasemissionen im Vergleich zur konventionellen Fahrzeugvariante bereits um 40 bis 60 % reduzieren können. Mit zunehmendem Anteil der erneuerbaren Energien am Strommix erhöht sich der Treibhausgasvorteil der elektrischen Variante weiter. Beim Einsatz von ausschließlich regenerativem Strom können je nach Fahrzeugkategorie zwischen 30 und 50 Tonnen Treibhausgasemissionen pro Jahr und Fahrzeug vermieden werden.

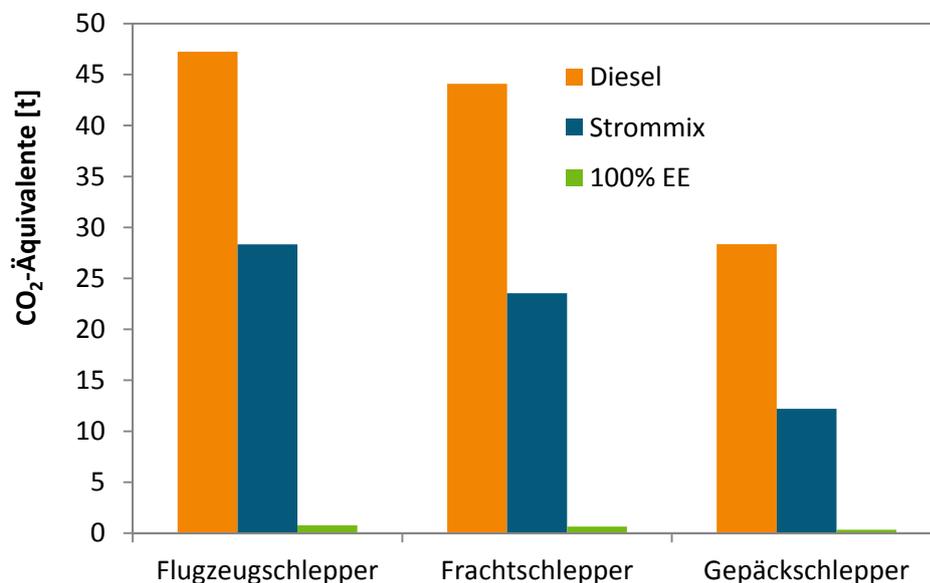


Abbildung 55: Treibhausgasemissionen der einzelnen Anwendungen pro Fahrzeug und pro Jahr im Vergleich für verschiedene Kraftstoffe im Jahr 2014.

# 5 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

## 5.1 Hintergrund und Ziele des Vorhabens

Deutschland hat sich ambitionierte Ziele für die Marktentwicklung von Elektromobilität gesetzt. Bisher spielen Elektrofahrzeuge im Fahrzeugmarkt jedoch noch eine untergeordnete Rolle und stellen zum aktuellen Zeitpunkt noch einen Nischenmarkt dar. Mehrere Studien haben bereits in der jüngeren Vergangenheit auf die besondere Eignung von Elektrofahrzeugen in gewerblichen Anwendungen hingewiesen und auch der vierte Fortschrittsbericht der Nationalen Plattform Elektromobilität (NPE 2014) weist auf die besondere Bedeutung von gewerblich zugelassenen Fahrzeugen für den frühen Markthochlauf von Elektromobilität hin.

Da die Gesamtnutzungskosten bei der gewerblichen Beschaffung von Fahrzeugen eine zentrale Rolle spielen, ist der Kostenvergleich zwischen Elektrofahrzeug und konventionellen Fahrzeugvarianten ein wichtiges Indiz für die Potenziale von Elektromobilität. Ziel dieser Studie ist es daher, für verschiedene Fahrzeugkategorien und unterschiedliche gewerbliche Anwendungsfälle die Gesamtkosten im Vergleich von batterieelektrischer und verbrennungsmotorischer Fahrzeugvariante zu analysieren und mögliche ökonomische Potenziale von Elektrofahrzeugen sowie die damit verbundene Möglichkeit zur Minderung der verkehrsbedingten Treibhausgasemissionen für den Zeitraum von heute bis zum Jahr 2020 zu veranschaulichen. Die Betrachtung von Elektrofahrzeugen beschränkt sich in dieser Studie auf batterieelektrische Antriebskonzepte. Plug-in-Hybridfahrzeuge sind nicht Bestandteil der Betrachtungen. Die Analysen umfassen neben Pkw auch die Fahrzeugkategorien leichte Nutzfahrzeuge, Lkw, Linienbusse sowie Sonderfahrzeuge in der Intralogistik.

## 5.2 Methodisches Vorgehen

Kern des Vorhabens ist der Gesamtkostenvergleich von batterieelektrischen und verbrennungsmotorischen Fahrzeugvarianten. Hierfür wurde im Rahmen des Vorhabens ein TCO-Modell entwickelt und auf die jeweils betrachtete Fahrzeugkategorie fallspezifisch angepasst.

Die Grundlage für die Kostenrechnungen stellt die Definition von Szenarien dar, die die Entwicklung wichtiger Rahmenbedingungen, wie z. B. Energie- und Batteriepreise, für den Betrachtungszeitraum definieren. Ferner wurden für die betrachteten Fahrzeugkategorien jeweils typische antriebsspezifische Fahrzeugeigenschaften definiert, die die Grundlage für den Kostenvergleich darstellen. Neben dem allgemeinen Kostenvergleich der jeweiligen batterieelektrischen und verbrennungsmotorischen Fahrzeugvarianten auf Basis charakteristischer Annahmen zu Fahrzeugeinsatz und -haltedauer, wurden ferner

detailliertere Analysen für konkrete Anwendungsfälle für den Betrachtungszeitraum von heute bis 2020 durchgeführt.

Auf Basis der Ergebnisse des Gesamtkostenvergleichs wurde anschließend unter Berücksichtigung repräsentativer Daten zum Fahrzeugbestand und -einsatz das ökonomische Potenzial zur Substitution konventioneller Fahrzeuge durch Elektrofahrzeuge in der jeweiligen Fahrzeugkategorie sowie die damit verbundene mögliche Minderung der Treibhausgasemissionen für den Betrachtungszeitraum bis zum Jahr 2020 quantifiziert.

## 5.3 Zentrale Ergebnisse

### Pkw und leichte Nutzfahrzeuge

Die Gesamtkostenanalysen zeigen, dass batterieelektrische Fahrzeuge bereits heute bei hoher Jahresfahrleistung und langer Haltedauer Kostenvorteile gegenüber konventionellen Antriebsvarianten erzielen können. In den nächsten Jahren bis 2020 wird eine deutliche Kostenminderung bei batterieelektrischen Fahrzeugen erwartet, sodass in vielen gewerblichen Anwendungen die Nutzung eines elektrischen Fahrzeugs zunehmend wirtschaftlich vorteilhaft wird.

Ein batterieelektrischer Pkw mittlerer Größe liegt in den Gesamtkosten im optimistischen Szenario 2014 bereits mit einer Jahresfahrleistung von 30.000 km mit einem Dieselfahrzeug gleich auf. Im Jahr 2020 wird Kostengleichheit im optimistischen Szenario bei einer Jahresfahrleistung von 8.000 km und im mittleren Szenario bei 30.000 km erreicht. Leichte Nutzfahrzeuge in der größeren Kategorie des Mercedes Sprinter rechnen sich im Jahr 2014 im optimistischen Szenario bei einer Jahresfahrleistung von 20.000 km. Im Jahr 2020 ist Kostenparität im mittleren Szenario bei einer Jahresfahrleistung von etwa 17.000 km und im optimistischen Szenario bereits bei einer Fahrleistung von 6.000 km erreicht.

Die weitere Entwicklung des Batteriepreises, der maßgeblich die Zusatzkosten von Elektrofahrzeugen definiert, hat einen zentralen Einfluss auf die Gesamtkostendifferenz zwischen einem Elektrofahrzeug und einem verbrennungsmotorischen Fahrzeug. Ebenfalls stark beeinflussen die Energiepreise, also der Kraftstoff- und Strompreis, die Differenz der Gesamtkosten. Die Entwicklung dieser Einflussgrößen ist mit großen Unsicherheiten behaftet. Die Spannbreite der Gesamtkosten bezüglich dieser Einflussgrößen beträgt in den betrachteten Szenarien für einen mittelgroßen Pkw etwa 4.200 €. Dies unterstreicht zum einen die Bedeutung dieser Einflussgrößen, wie auch die damit verbundenen Unsicherheiten hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit von Elektromobilität.

Eine weitere zentrale Einflussgröße für die Wirtschaftlichkeit, so zeigen die Analysen, stellt die Restwertentwicklung von Elektrofahrzeugen dar. Doch auch diese ist angesichts des frühen Marktstadiums noch mit hoher Unsicherheit behaftet.

Elektrofahrzeuge in gewerblichen Anwendungen haben gegenüber privat zugelassenen Fahrzeugen Kostenvorteile durch den Wegfall der Mehrwertsteuer und die Möglichkeit zur steuerlichen Absetzung der Investitions- und Betriebskosten. Zudem bietet sich in einigen gewerblichen Anwendungen die Möglichkeit, einen reduzierten Gewerbestromtarif zu beziehen, z. B. auf Grund eines hohen Jahresverbrauchs. Wie Sensitivitätsbetrachtungen zeigen, könnte durch die Einführung einer Sonder-AfA die Gesamtkostendifferenz für einen Pkw mittlerer Größe um etwas mehr als 400 € zu Gunsten des Elektrofahrzeugs gesenkt werden. Der Bezug eines reduzierten Gewerbestromtarifs oder die Befreiung vom Netzentgelt für Elektrofahrzeuge führt für ein mittelgroßes Fahrzeug zu einer Minderung der Gesamtkostendifferenz um etwa 600 €.

Im mittleren Szenario ergibt sich im Jahr 2020 ein ökonomisches Potenzial von 80.000 gewerblichen batterieelektrischen Fahrzeugen. Im optimistischen Szenario erhöht sich diese Anzahl auf 700.000 Fahrzeuge bis zum Jahr 2020. Die Einführung einer Sonder-AfA als Fördermaßnahme hätte unter Annahme des mittleren Szenarios einen Anstieg des wirtschaftlich substituierbaren Fahrzeugbestands bis 2020 auf etwa 125.000 Elektrofahrzeuge zur Folge. Etwa 240.000 Fahrzeuge haben im mittleren Szenario maximal einen Gesamtkostennachteil von 1.000 €. Große Pkw und leichte Nutzfahrzeuge haben das in absoluten Stückzahlen größte wirtschaftliche Elektrifizierungspotenzial. Anteilig am Gesamtbestand fallen die großen Pkw hinter den Nutzfahrzeugen ab, da erstere durch den vorwiegenden Einsatz als Dienstwagen sehr hohe Jahresfahrleistungen verbunden mit einem großen Einsatzradius aufweisen und damit die Substitution durch Elektrofahrzeuge mit einer elektrischen Reichweite von 150 km häufig nicht ohne Nutzungskonflikte erlaubt. Die Substitution von konventionellen leichten Nutzfahrzeugen durch batterieelektrische Varianten wird aktuell insbesondere durch die mangelnde Verfügbarkeit von Serienfahrzeugen erschwert.

Die Elektrifizierung von 700.000 Fahrzeugen im gewerblichen Bereich bis 2020 würde bei einer vollständigen Bereitstellung des Strombedarfs aus erneuerbaren Energien eine Einsparung von 2,6 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalenten allein im Jahr 2020 zur Folge haben. Dies entspricht einer Minderung der jährlichen Gesamtemissionen des Straßenverkehrs um etwa 1,4 %.

Die ergänzende Analyse konkreter Anwendungsfälle zeigt mögliche vielversprechende frühe Einsatzfelder für Elektrofahrzeuge mit relativ hoher Jahresfahrleistung bzw. langer Haltedauer auf.

### **Pkw im Lieferverkehr**

Der Betrieb von kleinen elektrischen Pkw im Lieferverkehr (Anwendung I) ist heute schon nahe an der Wirtschaftlichkeit. Der berechnete Vergleich bezieht sich auf ein Dieselfahrzeug. Da gerade in den unteren KBA-Segmenten auch ein erheblicher Anteil an Benzinfahrzeugen eingesetzt wird, bleibt zu beachten, dass im Vergleich mit einem Benzinfahrzeug schon heute Kostenvorteile bestehen, die bis 2020 stark zunehmen.

### **Pkw im Taxigewerbe**

Im Taxigewerbe (Anwendung II) können Elektrofahrzeuge bereits heute angesichts hoher Jahresfahrleistungen nahezu wirtschaftlich betrieben werden. Dies würde jedoch die Bereitstellung von Schnellladeinfrastruktur erforderlich machen, um mit Elektrofahrzeugen mindestens einen Ein-Schicht-Betrieb zu ermöglichen. Eine Elektrifizierung von Taxifloten ist aus diesem Grund zunächst in dichter besiedelten Gebieten oder Städten realistisch. Die im Taxibetrieb eingesetzten Fahrzeuge stammen überwiegend aus höheren KBA-Segmenten, wie obere Mittelklasse oder Oberklasse. Die breite Akzeptanz von Hybridfahrzeugen von Fahrer- als auch Kundenseite als alternativ angetriebenes Taxifahrzeug legt nahe, dass ein ähnlicher Größenklassensprung bei Elektrofahrzeugen möglich sein könnte. Dies würde eine schnellere Wirtschaftlichkeit von Elektrofahrzeugen deutlich begünstigen, zumal rein elektrisch betriebene Fahrzeuge in den oberen KBA-Segmenten bisher nur sehr eingeschränkt verfügbar sind.

### **Leichte Nutzfahrzeuge im Handwerk**

Der Einsatz von Elektrofahrzeugen in Touren, beispielsweise im Handwerk (Anwendung III), bewegt sich ebenfalls bereits heute nahe an der Wirtschaftlichkeit und im Jahr 2020 könnten sich erhebliche Kostenvorteile einstellen. Gegebenenfalls würden jedoch auch in diesem Fall teilweise Zwischenladungen tagsüber erforderlich sein und somit das Vorhandensein einer öffentlichen (Schnell-) Ladeinfrastruktur eine Voraussetzung darstellen.

### **Leichte Nutzfahrzeuge im KEP-Einsatz**

Im KEP-Einsatz (Anwendung IV und V) ist das Einsatzgebiet der Fahrzeuge eine zentrale Größe für die Wirtschaftlichkeit. Die Fahrleistungen sind im Stadtgebiet im Regelfall deutlich geringer (hier: 12.000 km/a) als im ländlichen Raum (hier: 27.000 km/a). So wäre der Einsatz von elektrischen großen Nutzfahrzeugen im ländlichen Raum schon heute wirtschaftlich, in der Stadt erst im Jahr 2020.

Durch die Elektrifizierung von Fahrzeugen in den betrachteten Anwendungen können bei Bezug von Strom aus rein erneuerbaren Quellen pro Jahr und Fahrzeug zwischen etwa 3 und 8 Tonnen CO<sub>2</sub> eingespart werden.

## **Linienbusse, Lkw und sonstige Nutzfahrzeuge**

### **Linienbus**

Für Linienbusse stellt der Bezug von günstigem Fahrstrom einen Vorteil für den Einsatz von Elektrofahrzeugen dar. Auch spielt der Restwert auf Grund der langen Haltedauern eine untergeordnete Rolle, da dieser am Ende der üblichen Haltedauer von etwa 12 Jahren ohnehin – unabhängig vom Antriebssystem – sehr gering ist. Die größten Unsicherheiten in Bezug auf die Wirtschaftlichkeit sind bei Linienbussen mit der Entwicklung der Batteriekosten sowie der Kosten der Ladeinfrastruktur verbunden.

Die unterschiedlichen Realisierungsmöglichkeiten eines batterieelektrisch betriebenen Linienbusses verursachen große Unterschiede in den Gesamtkostendifferenzen zu einem vergleichbaren Dieselbus. Ein Linienbus der vorwiegend nachts und ausschließlich auf dem Betriebsgelände geladen wird („overnight charging“-Variante) verfügt über eine große Batterie, die einen wesentlichen Anteil in den Gesamtkosten ausmacht, allerdings wird bei einer solchen Busausstattung nur eine relativ kostengünstige Basis-Lademöglichkeit benötigt. Die Umsetzungsvariante mit regelmäßigen Zwischenladungen während des Betriebs („opportunity charging“) ist mit dem Einsatz einer kleineren Batterie verbunden, benötigt aber eine aufwendigere Schnellladeinfrastruktur auf dem Einsatzweg. Durch die geringere Batteriegröße kann der „opportunity-charging“-Bus schneller wirtschaftlich betrieben werden unter der Voraussetzung, dass die kostenintensive Ladeinfrastruktur sich auf eine entsprechend große Flotte verteilt.

Ein 12 m-Standardbus erreicht mit „overnight-charging“-Ausstattung im Anschaffungsjahr 2014 keine Kostenparität mit der Dieselvariante. Im Jahr 2020 wird im optimistischen Szenario Kostengleichheit bei einer Jahresfahrleistung von etwa 50.000 km erreicht.

Für eine „opportunity-charging“-Ausstattung eines 12 m-Busses wird bei einer Jahresfahrleistung von 60.000 km und niedrigen Infrastrukturkosten im optimistischen Szenario bereits 2015 und im mittleren Szenario im Jahr 2021 Kostengleichheit erreicht.

Der Batteriepreis hat, wie auch bei Pkw und leichten Nutzfahrzeugen, einen großen Einfluss auf die Gesamtkosten des elektrisch betriebenen Busses, insbesondere in der „overnight-charging“- Variante mit entsprechend großer Batterie. Durch die fehlende Serienproduktion und das sehr frühe Marktstadium liegen die spezifischen Batteriepreise für Busanwendungen aktuell noch wesentlich höher als bei Pkw und leichten Nutzfahrzeugen. Unterstellt man einen schnelleren Preisabfall durch stärkere Lerneffekte und eine schnelle Markteinführung erreicht man mit dem „overnight-charging“-Bus im mittleren Szenario bereits 2017 bei einer Jahresfahrleistung von 60.000 km Kostengleichheit.

### **Mittelschwere Lkw**

Für mittelschwere Lkw mit einem zulässigen Gesamtgewicht von bis zu 12 Tonnen stellt sich das ökonomische Potenzial unter den getroffenen Rahmenbedingungen auch mittelfristig noch relativ ungünstig dar. Im betrachteten Anwendungsfall, dem städtischen Lieferverkehr mit Volumengütern, kann bei einer durchschnittlichen Jahresfahrleistung von 30.000 km die Schwelle der Wirtschaftlichkeit im mittleren Szenario auch bis zum Jahr 2020 nicht erreicht werden. Bei einer Jahresfahrleistung von 55.000 km wird die Schwelle der Wirtschaftlichkeit im optimistischen Szenario in 2020 zwar erreicht, aufgrund der relativ niedrigen Batteriekapazität und der damit verbundenen Reichweitenrestriktion bedingt die Realisierung einer solch hohen Fahrleistung jedoch bei der gewählten Batterieauslegung eine Verlängerung der Reichweite durch Zwischenladen am Tage. Nur unter Annahme einer schnelle-

ren Batteriepreisdegression wird die Wirtschaftlichkeitsschwelle im mittleren Szenario knapp für das Anschaffungsjahr 2024 erreicht.

### **Nutzfahrzeuge in der Intralogistik am Beispiel Flughafen**

Die Betrachtung elektrischer Fahrzeugalternativen in der Intralogistik am Beispiel der Vorfeldmobilität am Flughafen zeigt wirtschaftliche Potenziale für die Substitution konventioneller Schleppfahrzeuge auf. Trotz der hohen Leistungsanforderungen wirkt sich in diesem Anwendungsbereich die fehlende Gewichtsbegrenzung positiv auf die Gesamtkosten aus. Angesichts des erforderlichen Zuggewichts der Schleppfahrzeuge kann in diesen Anwendungen auch perspektivisch die kostengünstige Blei-Säure-Batterietechnologie zum Einsatz kommen. Der Einsatz der Lithium-Ionen-Technologie könnte zwar perspektivisch die Nutzungsrestriktionen angesichts größerer Reichweiten und kürzerer Ladedauern verringern, ein wirtschaftlicher Einsatz würde jedoch eine deutliche Batteriekostendegression voraussetzen. Bereits heute könnten Fahrzeuge in den betrachteten Anwendungen jedoch in der batterieelektrischen Variante auf Basis von Blei-Säure-Batterien mit deutlichen Gesamtkostenvorteilen betrieben werden. Sollten laufende Pilotvorhaben erfolgreich verlaufen, so bietet die Anwendung Potenziale für den verstärkten Einsatz von Elektrofahrzeugen. Damit würde die ohnehin bereits bestehende hohe Elektrifizierungsquote in der Intralogistik bei Flurförderfahrzeugen auch in der Vorfeldmobilität ihre Fortführung finden. In diesem Kontext ist jedoch zu beachten, dass es sich bei diesem Segment im Vergleich zu den anderen betrachteten Fahrzeugkategorien um einen erheblich kleineren Fahrzeugbestand handelt.

## **5.4 Einordnung der Ergebnisse**

Die Analysen zeigen, dass eine frühe Wirtschaftlichkeit von Elektromobilität insbesondere bei einer hohen Jahresfahrleistung erreicht werden kann. Eine Substitution von konventionellen durch batterieelektrische Fahrzeuge ist jedoch nur realistisch, wenn die Fahrzeugnutzung gleichzeitig durch möglichst regelmäßige Tagesfahrleistungen gekennzeichnet ist. Bei gewerblichen Fahrzeugen sind entsprechende Nutzungsmuster relativ weit verbreitet, so dass die Eignung für den Einsatz von Elektrofahrzeugen nicht nur ökonomisch, sondern auch aus Nutzungssicht bis zum Jahr 2020 relativ häufig gegeben ist.

Zentrale Einflussgrößen für die Wirtschaftlichkeit von Elektrofahrzeugen stellen die Entwicklung der Batteriekosten und damit der Anschaffungskosten von Elektrofahrzeugen, die Entwicklung der Energiepreise, des Fahrzeugrestwerts sowie der jeweilige Fahrzeugeinsatz (Fahrleistung und Haltedauer) dar. Insbesondere die Entwicklung der Kostenparameter ist jedoch mit hohen Unsicherheiten behaftet. Wie auch die Szenarioanalysen veranschaulichen, sind die Kostenunterschiede, die sich aus der Unsicherheit über die zukünftige Parameterausprägung ergeben, teilweise größer als die Kostendifferenz zwischen den batterieelektrischen und konventionellen Fahrzeugvarianten. Positiv formuliert bedeutet dies, dass sich die Kostennachteile von Elektrofahrzeugen bereits kurzfristig im Bereich der allgemeinen Unsicherheit zukünftiger Rahmenbedingungen bewegen.

## Weitere Einflussgrößen

Die durchgeführten Wirtschaftlichkeitsanalysen und Potenzialbetrachtungen liefern wichtige Erkenntnisse zum möglichen wirtschaftlichen Einsatz von Elektromobilität in gewerblichen Anwendungen. Mit Blick auf die generelle Aussagekraft der Analysen – auch im Vergleich zu verwandten Studien zur Wirtschaftlichkeit und dem Marktpotenzial von Elektromobilität in gewerblichen Anwendungen – sind jedoch wichtige Einschränkungen bezüglich der Interpretation der Ergebnisse festzuhalten.

### Allgemein

Der Modellansatz fokussiert auf den Wirtschaftlichkeitsvergleich unterschiedlicher Antriebsoptionen, da die Gesamtnutzungskosten (TCO) in gewerblichen Anwendungen einen zentralen Faktor bei der Fahrzeugbeschaffung darstellen. Mögliche technische Nutzungsrestriktionen und Akzeptanzaspekte werden nicht im Detail betrachtet, können aber für die Entscheidung in der Praxis von Relevanz sein. Daher können die Ergebnisse der TCO-Analysen nicht direkt in Marktanteile von Elektrofahrzeugen „übersetzt“ werden, sondern können lediglich Anhaltspunkte zum Potenzial für den wirtschaftlichen Einsatz von Elektromobilität in einer frühen Marktphase geben. Weitere relevante Einflussfaktoren werden im Folgenden diskutiert.

### Modellverfügbarkeit

Das TCO-Modell geht von vergleichbaren Elektrofahrzeugen in allen betrachteten Fahrzeugkategorien (Pkw, Lnf, Lkw, Bus) aus. Aktuell sind aber noch nicht in allen Kategorien (insbesondere bei schweren Nutzfahrzeugen) batterieelektrische Varianten im Einsatz bzw. nur eine sehr eingeschränkte Modellauswahl verfügbar. Teilweise sind nur Umbaufahrzeuge oder Importfahrzeuge verfügbar.

### Weitere Kosten im Unternehmen

Das TCO-Modell berücksichtigt unmittelbare Investitions- und Betriebskosten des Fahrzeugeinsatzes. Mögliche weitere Kosten, die mit der Umstellung des Fuhrparks auf Elektrofahrzeuge verbunden sein könnten, wie beispielsweise die Umrüstung der Werkstatt, Mitarbeiterschulung, Kosten bei Anpassung des Fuhrparkmanagements, sind jedoch nicht berücksichtigt.

### Investitionsrisiko

Die Wirtschaftlichkeit von Elektrofahrzeugen hängt stark von der Restwertentwicklung ab, diese ist aber noch mit sehr hohen Unsicherheiten behaftet. Im Modell wird diese Unsicherheit zwar abgebildet, welchen Einfluss diese jedoch auf die grundsätzliche Fahrzeugwahl – und damit die Risikobereitschaft des jeweiligen Unternehmens – hat, kann nicht quantifiziert werden.

### **Akzeptanz / Informationsdefizit**

Die Anwendung von Elektromobilität in gewerblichen Flotten setzt neben der Wirtschaftlichkeit auch eine grundsätzliche Akzeptanz der Technologie im Unternehmen und bei den Nutzern voraus. Angesichts der veränderten Fahrzeugeigenschaften und der notwendigen Anpassung der Rahmenbedingungen (u. a. Ladeinfrastruktur) ist diese nicht automatisch gegeben. Auf Grund der frühen Marktphase bestehen teilweise auch noch erhebliche Informationsdefizite, die vermutlich ebenfalls Einfluss auf die Fahrzeugwahl haben.

### **Nutzungsrestriktionen**

Der Nutzen von Elektrofahrzeugen kann je nach Anwendung von beispielsweise der verfügbaren Ladeinfrastruktur, Nutzlastverlusten, der Reichweitenproblematik oder saisonalen Effekten beim Stromverbrauch unterschiedlich stark beeinflusst werden. Im hier gewählten Ansatz wird zwar die grundsätzliche Eignung für den Einsatz von Elektrofahrzeugen in den Potenzialanalysen berücksichtigt, der tatsächliche Einfluss der genannten Nutzungsrestriktionen auf das Potenzial von Elektrofahrzeugen kann jedoch im Rahmen dieser Analysen nicht im Detail quantifiziert werden.

### **„Emotionale“ Faktoren und positive Umweltwirkungen**

Die Fahrzeugwahl (auch in gewerblichen Flotten) wird neben dem Wirtschaftlichkeitskriterium auch von sogenannten weichen Faktoren bestimmt. Diese beinhalten die Ausstattung, den Fahrkomfort, die Präferenzen der Nutzer und das Image der Marke oder auch des Antriebsystems. Auch Umweltaspekte spielen bei der Beschaffung eine zunehmende Bedeutung (Lärm-, CO<sub>2</sub>-, Luftschadstoffemissionen). Diese nicht-monetären Einflussgrößen sind in der TCO-Betrachtung jedoch bezüglich ihrer Auswirkung auf die Fahrzeugwahl nicht berücksichtigt.

### **Mehrpreisbereitschaft**

Auch im gewerblichen Fahrzeugeinsatz weisen Studien auf eine Mehrpreisbereitschaft für Elektromobilität bei Unternehmen hin (Hacker et al. 2011; Plötz et al. 2013), d. h. in diesen Unternehmen würden ggf. auch Elektrofahrzeuge bei höheren Gesamtnutzungskosten zum Einsatz kommen. Bisher ist in den Analysen zum ökonomischen Potenzial standardmäßig keine Mehrpreisbereitschaft berücksichtigt.

### **Mögliche Anreize**

Der Einsatz von Elektrofahrzeugen kann oder wird teilweise bereits durch monetäre und nicht-monetäre Anreize gefördert. Privilegierte Zufahrtsrechte, Parkmöglichkeiten oder auch finanzielle Anreize (z. B. Förderung bei der Beschaffung, Wegfall von Parkgebühren und Steuern) könnten die Attraktivität und Wirtschaftlichkeit von Elektrofahrzeugen erhöhen. Im Modell sind bislang jedoch lediglich bereits bestehende finanzielle Anreize berücksichtigt. In einer

Sensitivität wird ferner die Einführung einer Sonder-AfA auf ihre Auswirkungen auf die Wirtschaftlichkeit sowie vergünstigte Stromtarife berücksichtigt.

### **Vergleich zu Plug-in-Hybrid- und Range-Extender-Fahrzeugen**

Das TCO-Modell vergleicht konventionelle Fahrzeugvarianten mit der jeweiligen batterieelektrischen Alternative. Plug-in-Hybrid- oder Range-Extender-Fahrzeuge sind nicht Bestandteil der Betrachtung, obwohl auch diese großteils elektrisch betrieben werden können. Insbesondere bei Fahrzeugen mit hoher Jahresfahrleistung bzw. langen Tagesfahrleistungen (und im frühen Marktstadium bei hohen Batteriepreisen und geringer Ladeinfrastruktur) können Plug-in-Hybridfahrzeuge möglicherweise bereits früher mit konventionellen Fahrzeugen konkurrieren. Insbesondere bei der Interpretation der ökonomischen Potenziale ist die hier getroffene, verhältnismäßig enge Definition von Elektromobilität zu beachten.

## **5.5 Schlussfolgerungen**

### **Allgemein**

Wie der Gesamtkostenvergleich zeigt, können Elektrofahrzeuge in gewerblichen Anwendungen teilweise bereits kurzfristig Kostenvorteile erzielen. Im Vergleich zum privaten Einsatz weisen gewerbliche Anwendungen aus Kostensicht aufgrund von Wegfall der Mehrwertsteuer und Abschreibungsmöglichkeiten sowie gleichmäßigeren Fahrleistungen (und damit weniger Nutzungskonflikte) vorteilhafte Bedingungen für Elektrofahrzeuge auf und könnten daher insbesondere in der frühen Marktentwicklung von Elektromobilität von besonderer Bedeutung sein.

Die Analysen zeigen aber auch, dass die Wirtschaftlichkeit von Elektrofahrzeugen grundsätzlich sehr stark von der Entwicklung der Energiepreise, des Batteriepreises und der Restwertentwicklung abhängig ist. Verlässlichere Aussagen zu deren zukünftigen Entwicklung würden die Investitionsrisiken reduzieren, stellen aber zum aktuellen Zeitpunkt eine Herausforderung dar.

### **Pkw und leichte Nutzfahrzeuge**

Insbesondere bei Pkw mit relativ kurzer Haltedauer des gewerblichen Erstnutzers ist die Restwertentwicklung von Elektrofahrzeugen von großer Relevanz für die Wirtschaftlichkeit, aber auch mit hoher Unsicherheit behaftet. Die tatsächliche Restwertentwicklung von Elektrofahrzeugen sollte daher in den nächsten Jahren im Blick behalten werden und möglichen Käufern von Elektrofahrzeugen als Information zur Verfügung stehen.

Obwohl sich unter den getroffenen Annahmen auch bei leichten Nutzfahrzeugen der Einsatz von elektrischen Fahrzeugvarianten schon frühzeitig rechnen kann, sind bisher kaum Serienfahrzeuge am Markt verfügbar. Eine Erweiterung der Modellvielfalt ist daher eine zwingende Voraussetzung für die Erschließung des aufgezeigten ökonomischen Potenzials.

Grundsätzlich stellt eine hohe Jahresfahrleistung einen wesentlichen Schlüssel für die Wirtschaftlichkeit von Elektromobilität dar. Vorzugsweise kommen daher im frühen Marktstadium Unternehmen mit Lademöglichkeit auf dem Betriebsgelände für den E-Fahrzeugeinsatz in Frage. Bestimmte Branchen mit hohem Potenzial (z. B. Taxigewerbe) sind jedoch für einen wirtschaftlichen Betrieb der Fahrzeuge auf öffentliche (Schnell-)Ladeinfrastruktur angewiesen.

Obwohl die Analysen eine frühzeitige Wirtschaftlichkeit von Elektrofahrzeugen in bestimmten gewerblichen Anwendungen zeigen, kann in der Praxis beobachtet werden, dass diese Potenziale bisher nur in sehr geringem Maße erschlossen werden – vermutlich bestehen weiterhin ein Informationsdefizit, andere Vorbehalte bzw. eine geringe Risikobereitschaft in Bezug auf die Restwertentwicklung, die für einen nachhaltigen Markterfolg von Elektromobilität in gewerblichen Anwendungen noch deutlich verringert werden müssen.

## **Linienbusse, Lkw und sonstige Nutzfahrzeuge**

Kurzfristig werden batterieelektrische Busse aus rein wirtschaftlichen Gesichtspunkten vermutlich nicht zur Anwendung kommen, da sie im Wirtschaftlichkeitsvergleich auch in den kommenden Jahren noch Kostennachteile aufweisen. Perspektivisch bietet der Einsatz, wie er heute bereits in Pilotvorhaben in mehreren Kommunen erprobt wird, jedoch weitere Vorteile, wie geringere Lärm- und Luftschadstoffemissionen, die insbesondere im städtischen Einsatz von hoher Relevanz sind. Bei öffentlichen Ausschreibungen könnten verschärfte Emissionsvorschriften perspektivisch die Attraktivität von Elektrobussen möglicherweise erhöhen.

Bei mittelschweren Lkw kann unter den getroffenen Annahmen ein wirtschaftlicher Betrieb angesichts der hohen Batteriekosten nur schwer erreicht werden. Alternative Konzepte wie Batteriewechselsysteme für schwere Nutzfahrzeuge können ggf. dazu beitragen, dass die Fahrzeuge die Schwelle zur Wirtschaftlichkeit schneller erreichen und sollten zukünftig genauer betrachtet werden.

Im Bereich der schweren Nutzfahrzeuge ist daher eine anwendungsspezifische Auslegung der Batteriekapazität von besonderer Bedeutung. Ferner ist nicht auszuschließen, dass Fortschritte in der Batterietechnologie für die Pkw-Anwendung zu einer schnelleren Batteriepreisminderung auch im Nutzfahrzeuggbereich führen und somit die Wirtschaftlichkeit erhöhen. Angesichts großer Energiespeicher bei schweren Nutzfahrzeugen, die in der Nutzungsphase aufgrund des fortschreitenden Kapazitätsverlusts ausgetauscht werden müssen, können perspektivisch möglicherweise Erlöse aus der stationären Zweitnutzung der Batterien erzielt werden.

Eine weitere Restriktion in diesem Anwendungsfeld stellt die Verfügbarkeit elektrisch betriebener Fahrzeugvarianten dar, die sich bei Bussen bisher auf wenige Modelle und bei Lkw auf Umbauten beschränkt. Ähnlich wie bei den leichten Nutzfahrzeugen wären daher Anreize notwendig, um die Modellvielfalt in diesem Anwendungsbereich zu erhöhen.

Bei Nutzfahrzeugen in der Intralogistik sind elektrisch betriebene Fahrzeuge hingegen heute oft bereits Standard. In vielen Anwendungsbereichen kommt auf Grund der Leistungsanforderungen die kostengünstige Blei-Säure-Batterietechnologie zum Einsatz. In den betrachteten Fallbeispielen am Flughafen werden heute vorwiegend noch konventionelle Fahrzeuge eingesetzt, obwohl auch dort der Einsatz batterieelektrischer Varianten heute schon Kostenvorteile hätte. Sollten aktuelle Praxisvorhaben erfolgreich verlaufen, so bietet sich in diesem Anwendungsfall ein weiteres Potenzial für die Elektrifizierung, auch wenn es sich dabei um einen relativ kleinen Fahrzeugmarkt handelt.

## 6 Anhang

### 6.1 Nettolistenpreise batterieelektrischer Pkw

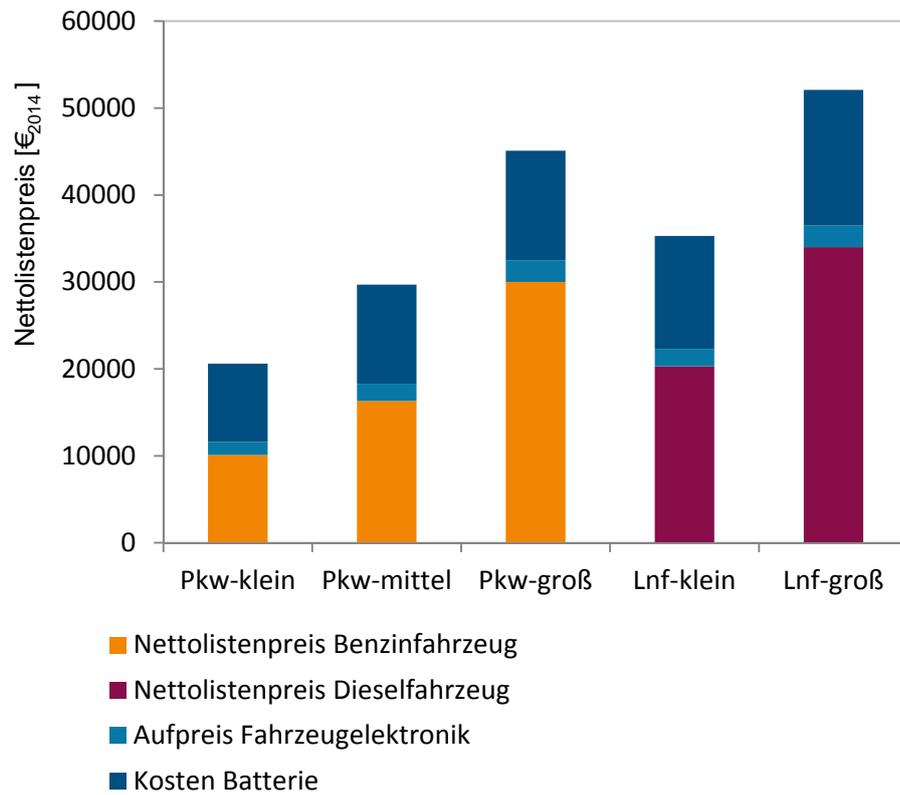


Abbildung 56: Zusammensetzung des Nettolistenpreises der Elektrofahrzeuge für das Jahr 2014 für die unterschiedlichen Fahrzeugklassen.

## 6.2 Ergebnisse Pkw und leichte Nutzfahrzeuge

### 6.2.1 Allgemeine Ergebnisse Pkw – klein

Tabelle 34: Standardparameterausprägungen für einen Pkw der Größenklasse *klein*.

Parameter	Ausprägung
Jahresfahrleistung Erstnutzer	10.000 km
Haltedauer Erstnutzer	4 Jahre
Absetzungszeitraum	6 Jahre
Ladeinfrastruktur	Wallbox 11-22 kW
Ladeverhalten	nur am Unternehmensstandort
Kalkulationszins	5 %
Unternehmenssteuersatz	30 %
Jahresfahrleistung Zweitnutzer	10.000 km
Haltedauer Zweitnutzer	6 Jahre
Reichweite	150 km

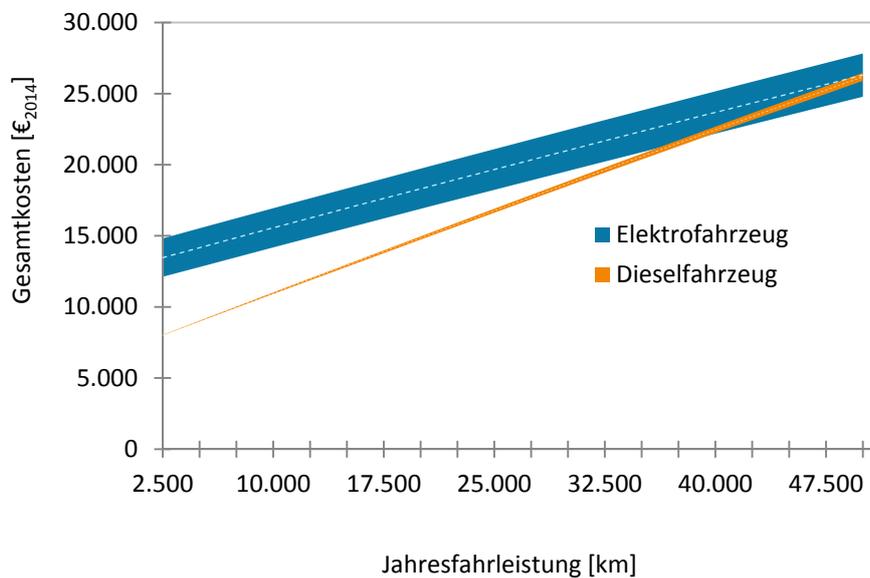


Abbildung 57: *Pkw - klein* mit Anschaffungsjahr 2014. Gesamtkosten in Abhängigkeit der Fahrleistung.

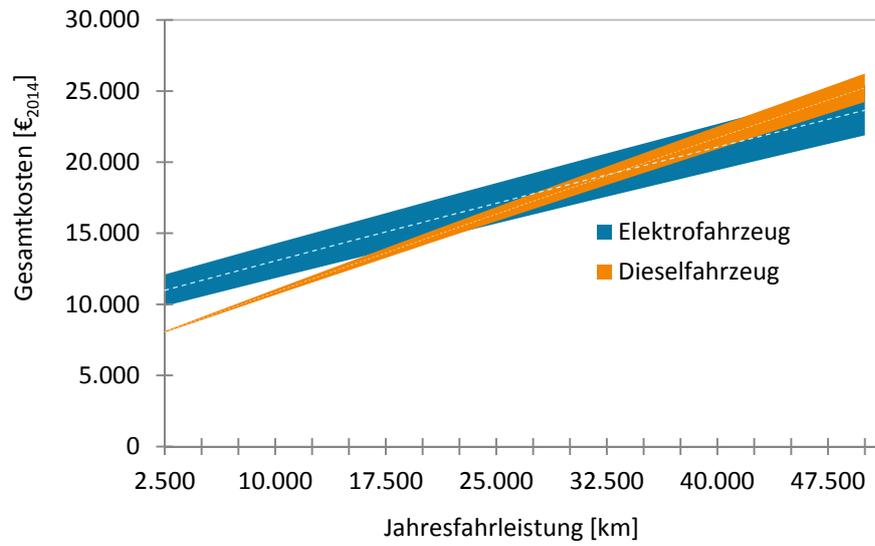


Abbildung 58: **Pkw - klein** mit Anschaffungsjahr 2020. Gesamtkosten in Abhängigkeit der Fahrleistung.

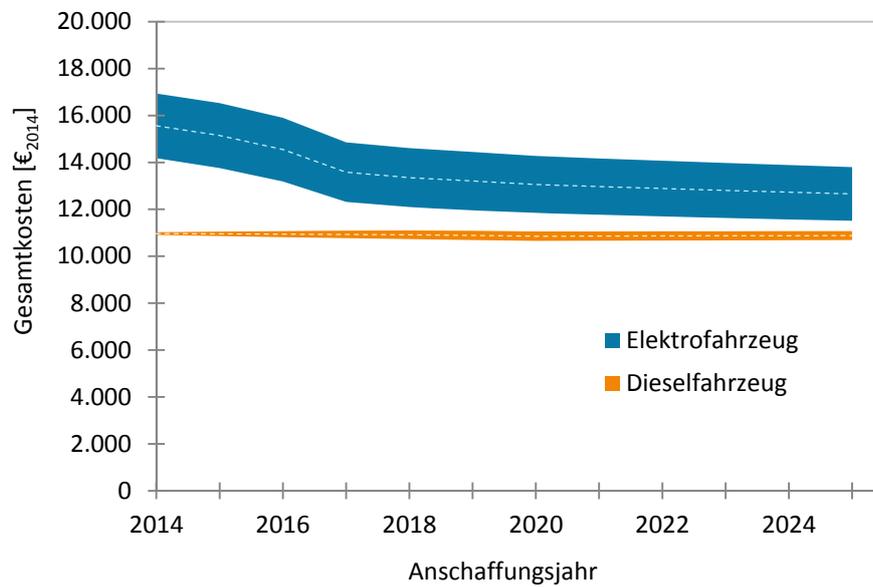


Abbildung 59: **Pkw - klein** mit einer Fahrleistung von 10.000 km/a. Gesamtkosten in Abhängigkeit des Anschaffungsjahres.

## 6.2.2 Allgemeine Ergebnisse Pkw – groß

Tabelle 35: Standardparameterausprägungen für einen Pkw der Größenklasse **groß**.

Parameter	Ausprägung
Jahresfahrleistung Erstnutzer	25.000 km
Haltezeitdauer Erstnutzer	4 Jahre
Absetzungszeitraum	6 Jahre
Ladeinfrastruktur	Wallbox 11-22 kW
Ladeverhalten	nur am Unternehmensstandort
Kalkulationszins	5 %
Unternehmenssteuersatz	30 %
Jahresfahrleistung Zweitnutzer	15.000 km
Haltezeitdauer Zweitnutzer	6 Jahre
Reichweite	150 km

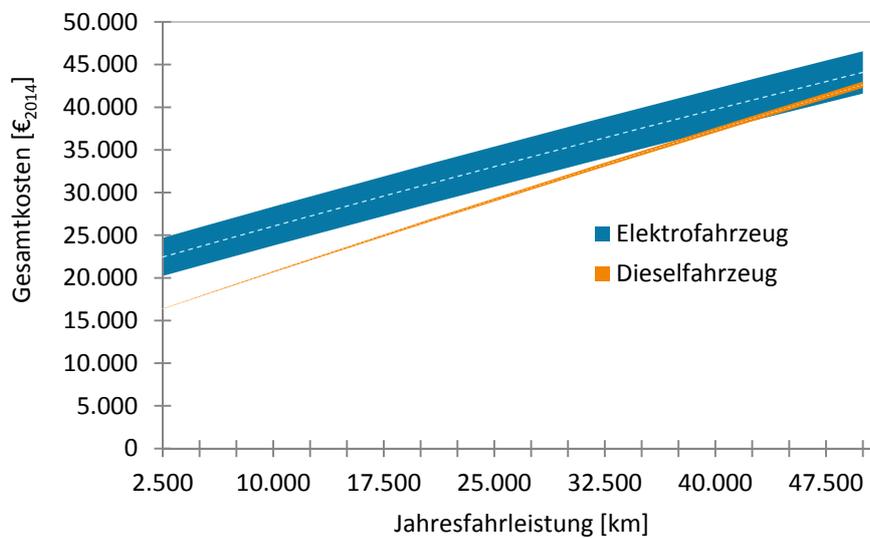


Abbildung 60: **Pkw - groß** mit Anschaffungsjahr 2014. Gesamtkosten in Abhängigkeit der Fahrleistung.

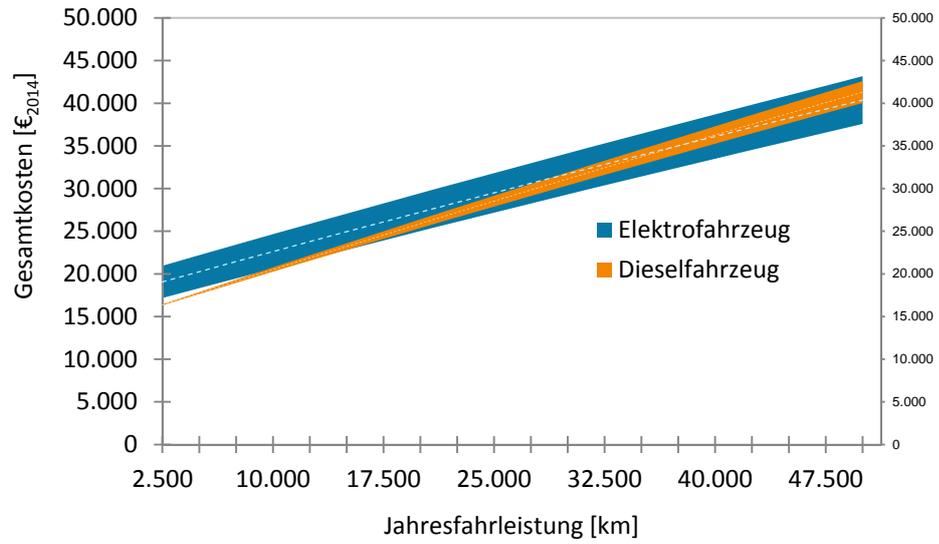


Abbildung 61: **Pkw – groß** mit Anschaffungsjahr 2020. Gesamtkosten in Abhängigkeit der Fahrleistung.

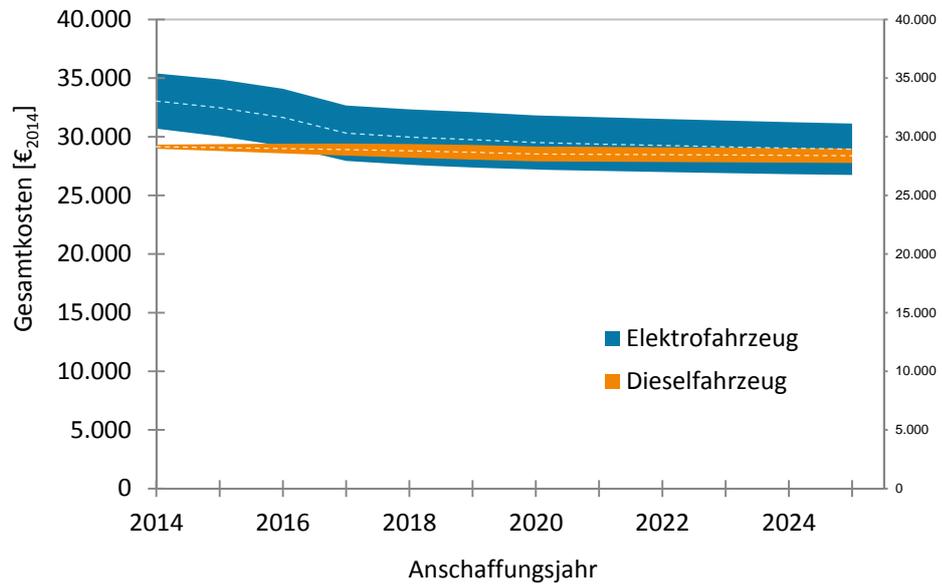


Abbildung 62: **Pkw - groß** mit einer Fahrleistung von 25.000 km/a. Gesamtkosten in Abhängigkeit des Anschaffungsjahres.

### 6.2.3 Allgemeine Ergebnisse Lnf - klein

Tabelle 36: Standardparameterausprägungen für ein Lnf der Größenklasse *klein*.

Parameter	Ausprägung
Jahresfahrleistung Erstnutzer	20.000 km
Haltedauer Erstnutzer	6 Jahre
Absetzungszeitraum	6 Jahre
Ladeinfrastruktur	Wallbox 11-22 kW
Ladeverhalten	nur am Unternehmensstandort
Kalkulationszins	5 %
Unternehmenssteuersatz	30 %
Jahresfahrleistung Zweitnutzer	15.000 km
Haltedauer Zweitnutzer	4 Jahre
Reichweite	130 km

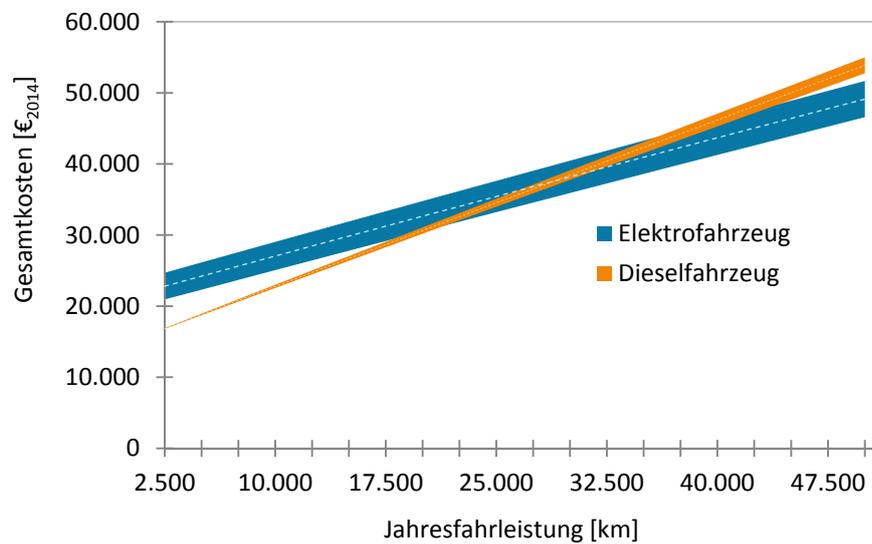


Abbildung 63: *Lnf - klein* mit Anschaffungsjahr 2014. Gesamtkosten in Abhängigkeit der Fahrleistung.

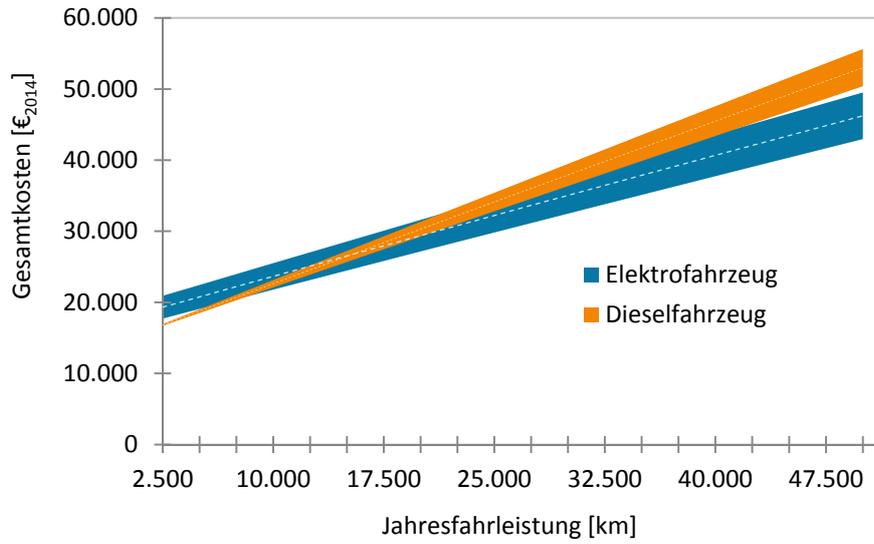


Abbildung 64: *Lnf - klein* mit Anschaffungsjahr 2020. Gesamtkosten in Abhängigkeit der Fahrleistung.

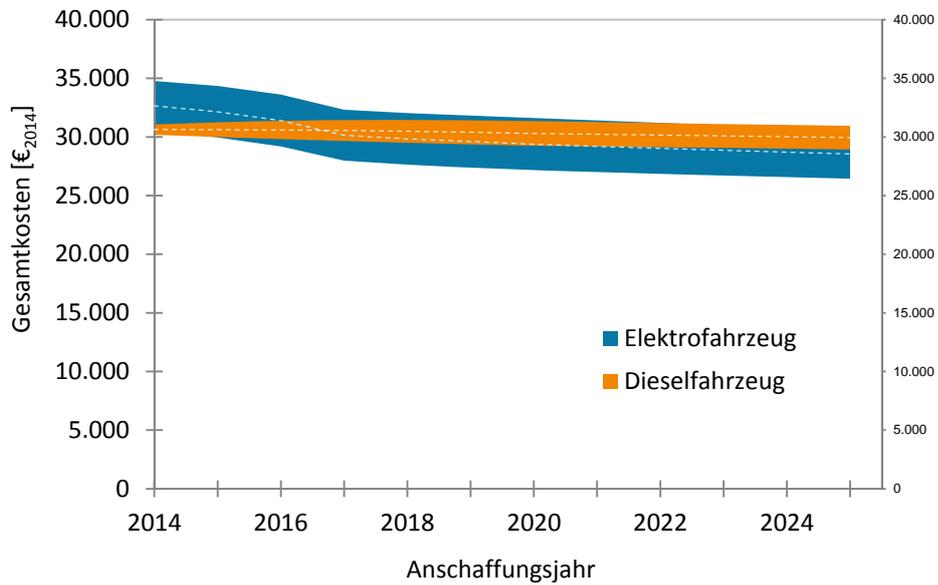


Abbildung 65: *Lnf - klein* mit einer Fahrleistung von 20.000 km/a. Gesamtkosten in Abhängigkeit des Anschaffungsjahres.

## 6.2.4 Allgemeine Ergebnisse Lnf – groß

Tabelle 37: Standardparameterausprägungen für ein Lnf der Größenklasse *mittel/groß*.

Parameter	Ausprägung
Jahresfahrleistung Erstnutzer	20.000 km
Haltezeitdauer Erstnutzer	6 Jahre
Absetzungszeitraum	6 Jahre
Ladeinfrastruktur	Wallbox 11-22 kW
Ladeverhalten	nur am Unternehmensstandort
Kalkulationszins	5 %
Unternehmenssteuersatz	30 %
Jahresfahrleistung Zweitnutzer	15.000 km
Haltezeitdauer Zweitnutzer	4 Jahre
Reichweite	130 km

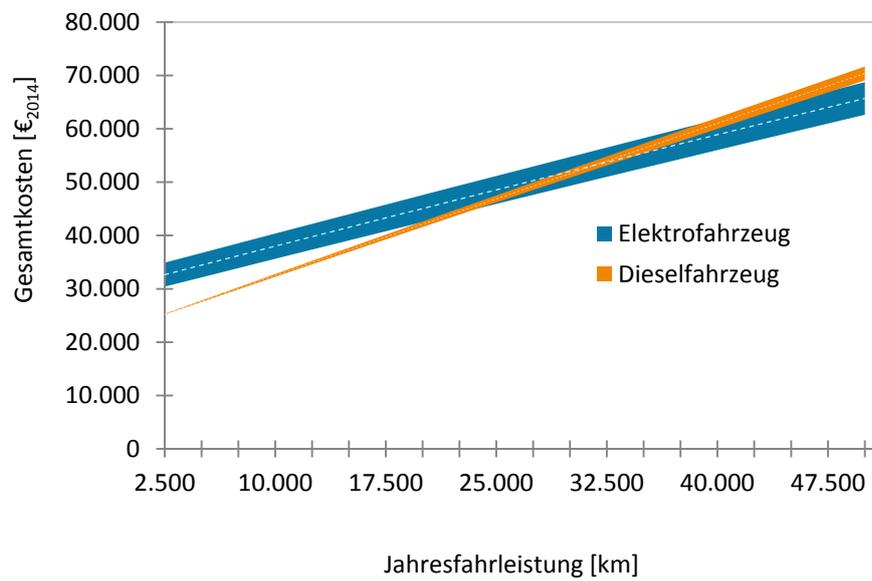


Abbildung 66: Lnf - groß mit Anschaffungsjahr 2014. Gesamtkosten in Abhängigkeit der Fahrleistung.

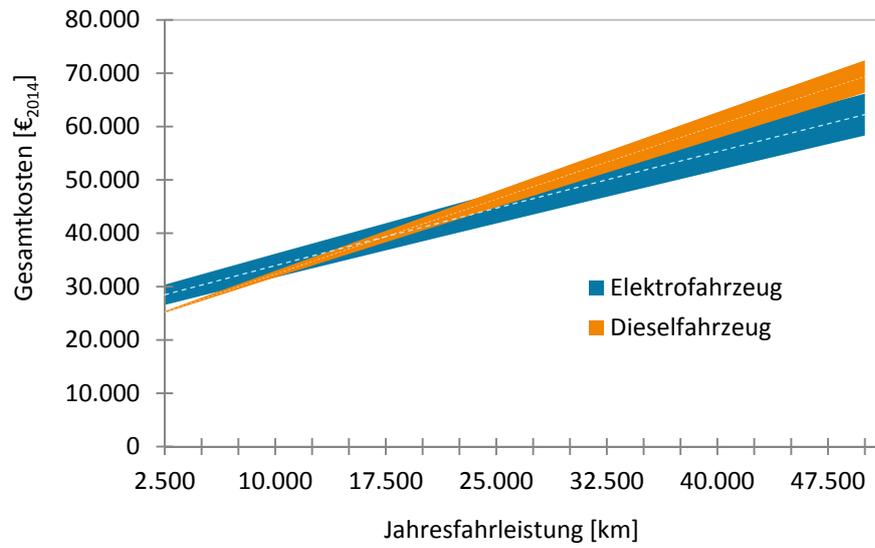


Abbildung 67: **Lnf - groß** mit Anschaffungsjahr 2020. Gesamtkosten in Abhängigkeit der Fahrleistung.

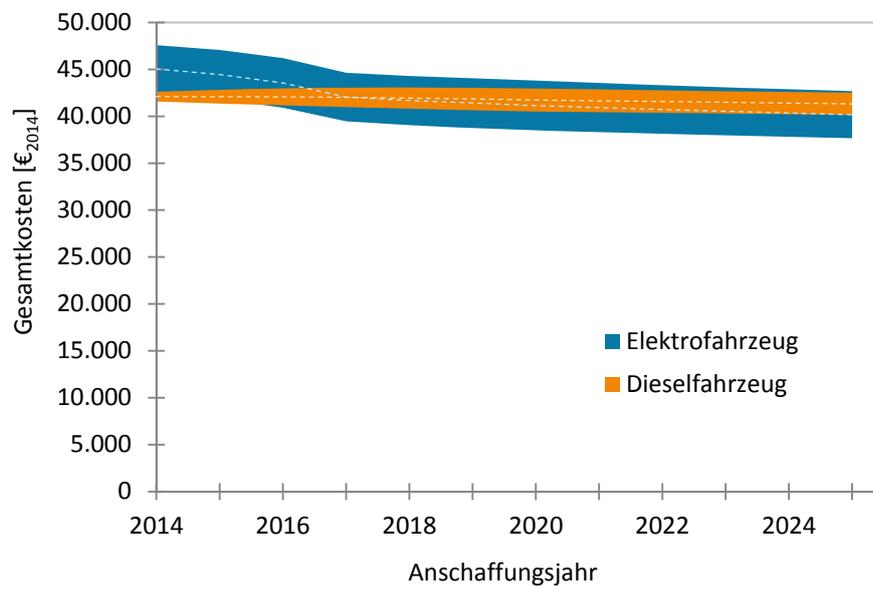


Abbildung 68: **Lnf - groß** mit einer Fahrleistung von 20.000 km/a. Gesamtkosten in Abhängigkeit des Anschaffungsjahres.

## 6.3 Ergebnisse Linienbusse und Lkw

### 6.3.1 Weitere Ergebnisse 12 m-Standardlinienbus (opportunity charging)

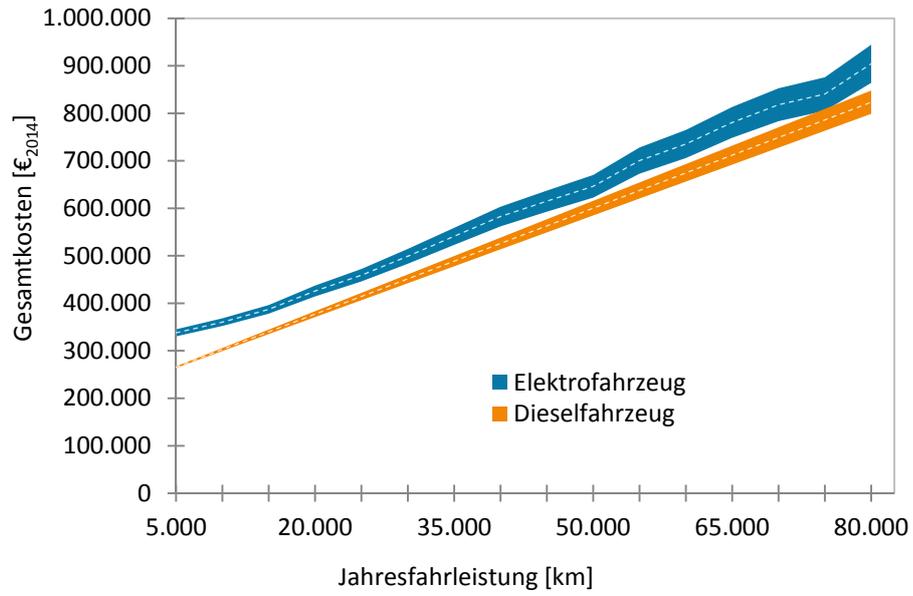


Abbildung 69: 12 m-Standardlinienbus (opportunity charging) mit Anschaffungsjahr 2014. Gesamtkosten in Abhängigkeit der Fahrleistung.

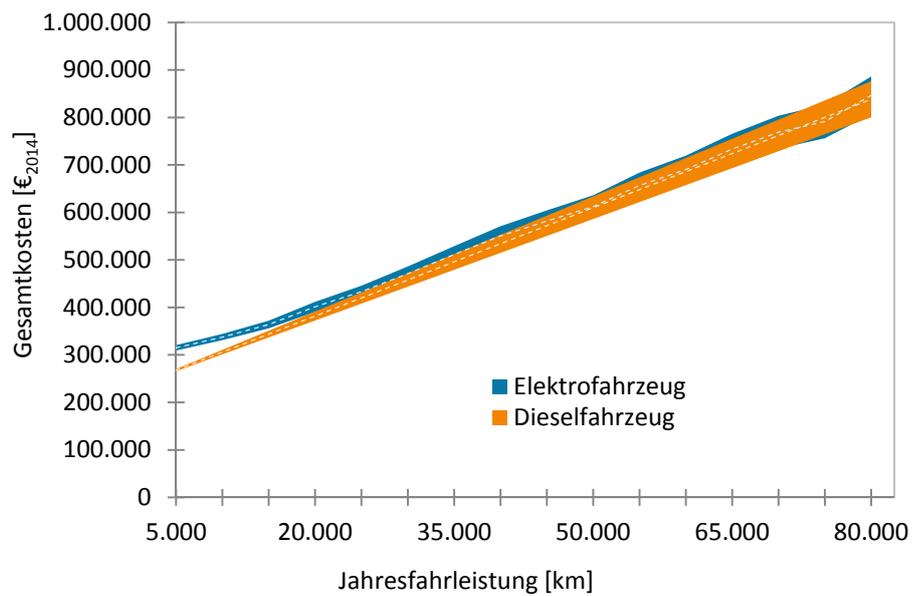


Abbildung 70: 12 m-Standardlinienbus (opportunity charging) mit Anschaffungsjahr 2020. Gesamtkosten in Abhängigkeit der Fahrleistung.

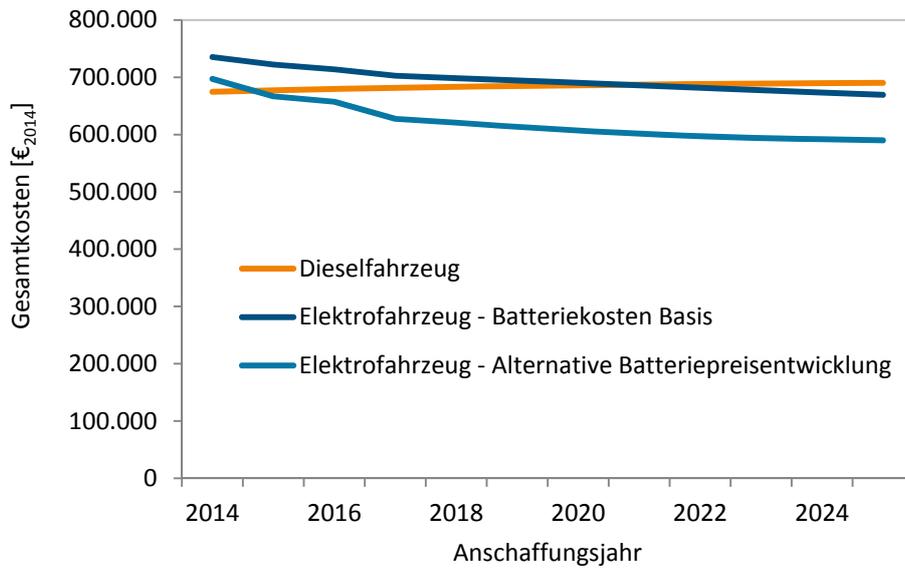


Abbildung 71: 12 m-Standardlinienbus (opportunity charging) mit einer Fahrleistung von 60.000 km/a unter Annahme des mittleren Szenarios. Im Vergleich für die Elektrofahrzeugvariante: Szenarien der Batteriekostenentwicklung im Vergleich. Gesamtkosten in Abhängigkeit des Anschaffungsjahres.

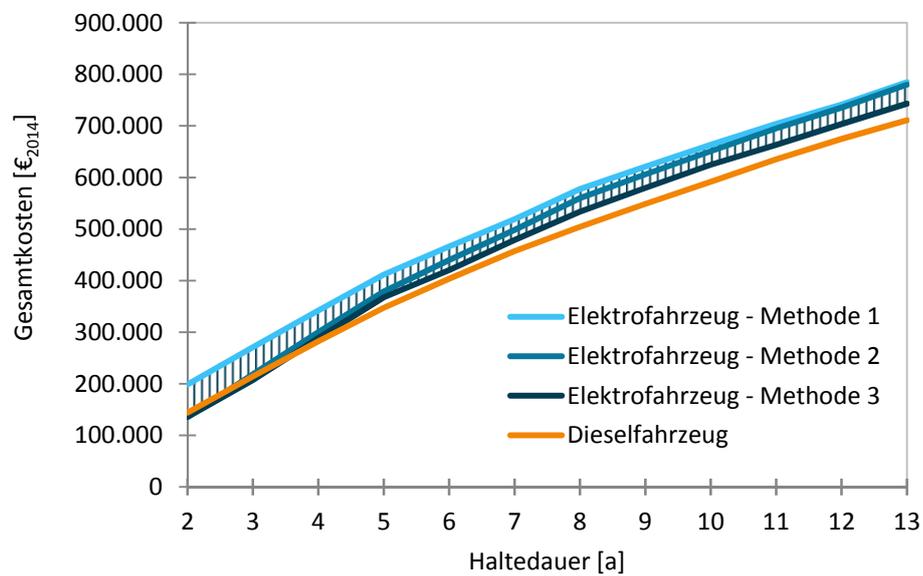


Abbildung 72: Gesamtkosten in Abhängigkeit der Haltedauer für verschiedene Methoden der Restwertberechnung für Elektrofahrzeuge. Darstellung für einen 12 m Standardlinienbus (opportunity charging) mit Anschaffungsjahr 2014, einer Fahrleistung von 60.000 km/a und unter der Annahme des mittleren Szenarios.

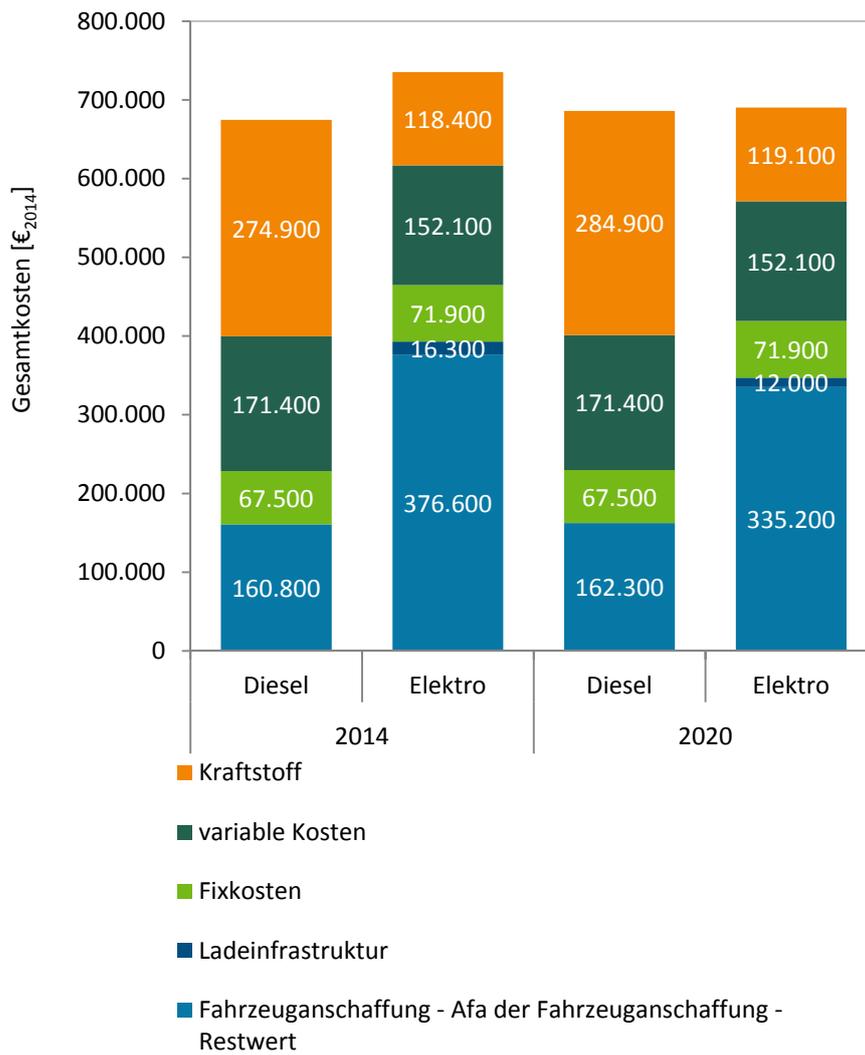


Abbildung 73: Gesamtkosten eines 12 m-Standardlinienbus (opportunity charging) für die Jahre 2014 und 2020 im Vergleich

### 6.3.2 Weitere Ergebnisse 18 m-Gelenkbus (opportunity charging)

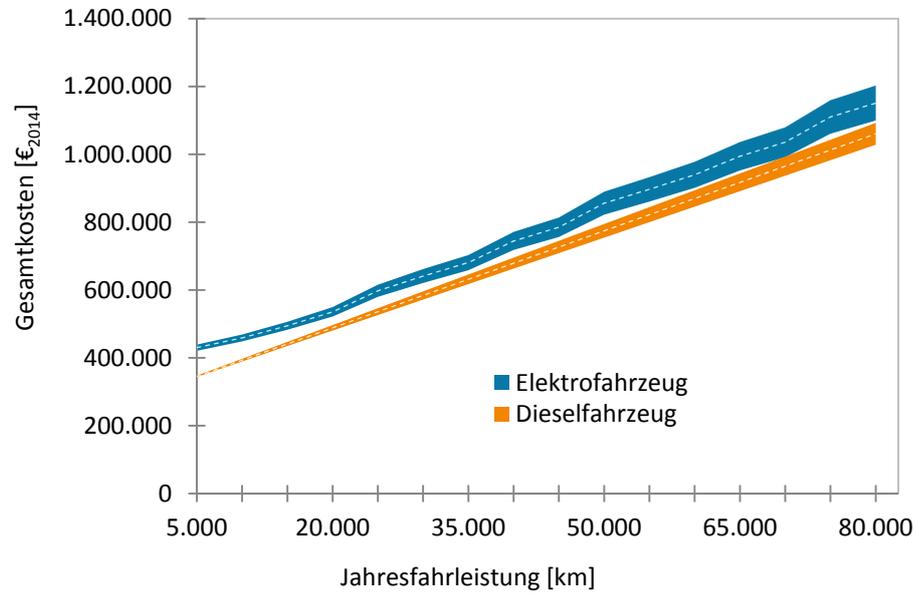


Abbildung 74: 18 m-Gelenkbus (opportunity charging) mit Anschaffungsjahr 2014. Gesamtkosten in Abhängigkeit der Fahrleistung.

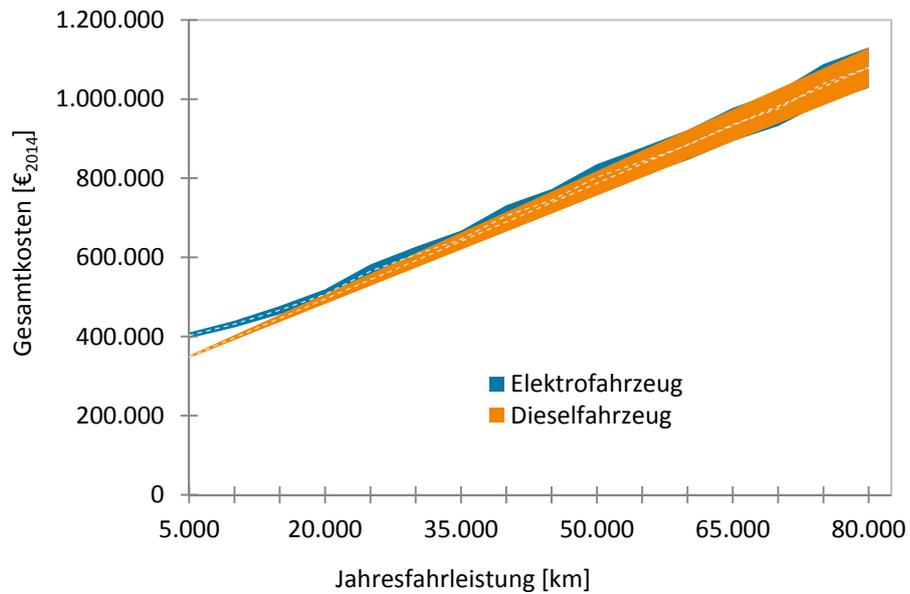


Abbildung 75: 18 m-Gelenkbus (opportunity charging) mit Anschaffungsjahr 2020. Gesamtkosten in Abhängigkeit der Fahrleistung.

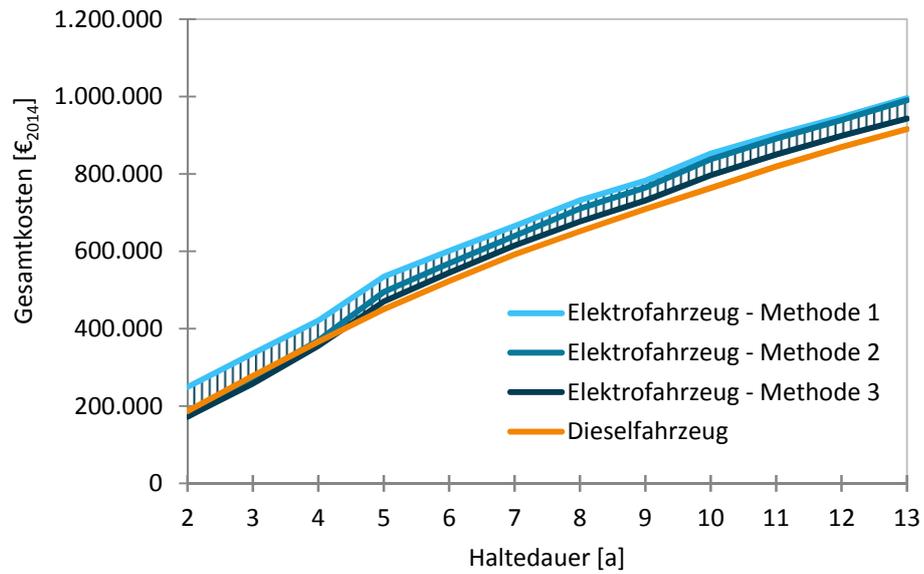


Abbildung 76: Gesamtkosten in Abhängigkeit der Haltedauer für verschiedene Methoden der Restwertberechnung für Elektrofahrzeuge. Darstellung für einen 18 m-Gelenkbus (opportunity charging) mit Anschaffungsjahr 2014, einer Fahrleistung von 60.000 km/a und unter der Annahme des mittleren Szenarios.

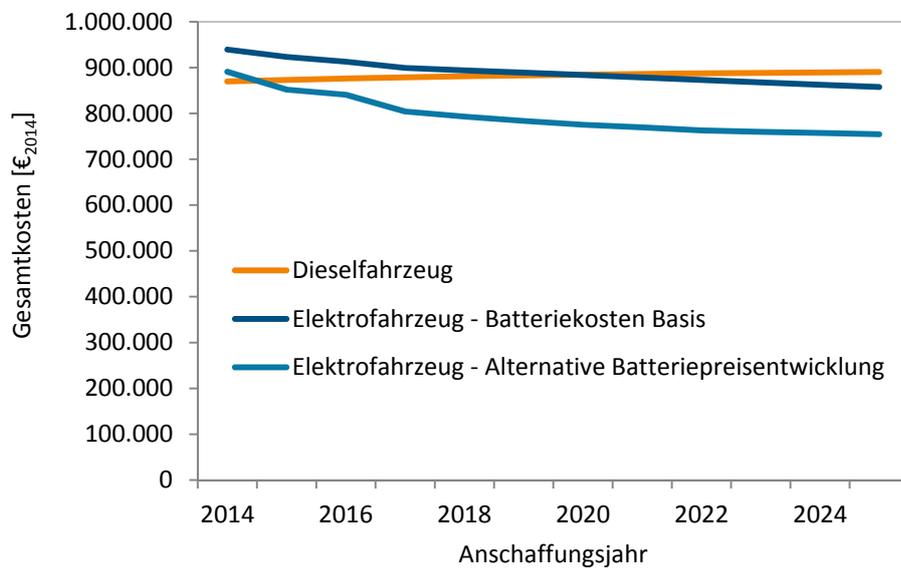


Abbildung 77: Gelenkbus (opportunity charging) mit einer Fahrleistung von 60.000 km/a unter Annahme des mittleren Szenarios. Im Vergleich für die Elektrofahrzeugvariante: Szenarien der Batteriekostenentwicklung im Vergleich. Gesamtkosten in Abhängigkeit des Anschaffungsjahres.

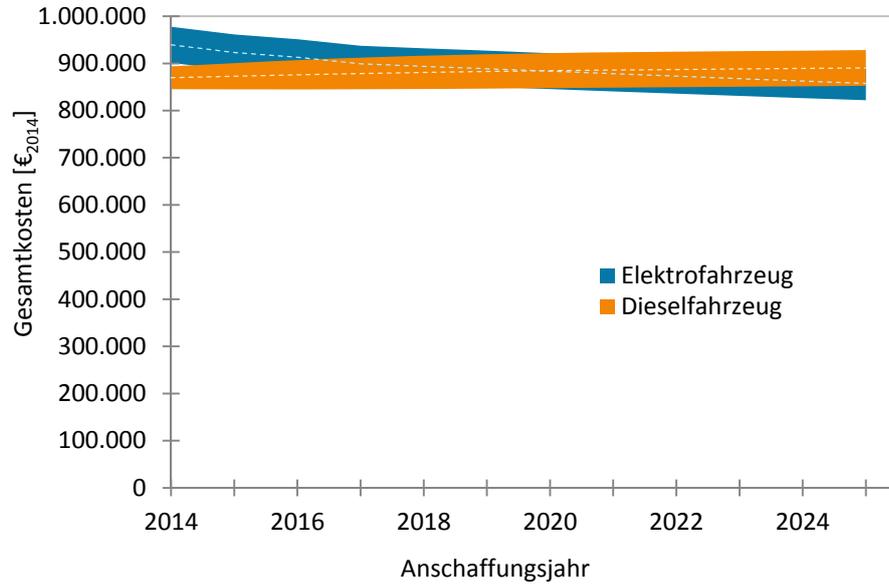


Abbildung 78: 18 m-Gelenkbus (opportunity charging) mit einer Fahrleistung von 60.000 km/a. Gesamtkosten in Abhängigkeit des Anschaffungsjahres.

### 6.3.3 Weitere Ergebnisse 12t-Lkw im Lieferverkehr

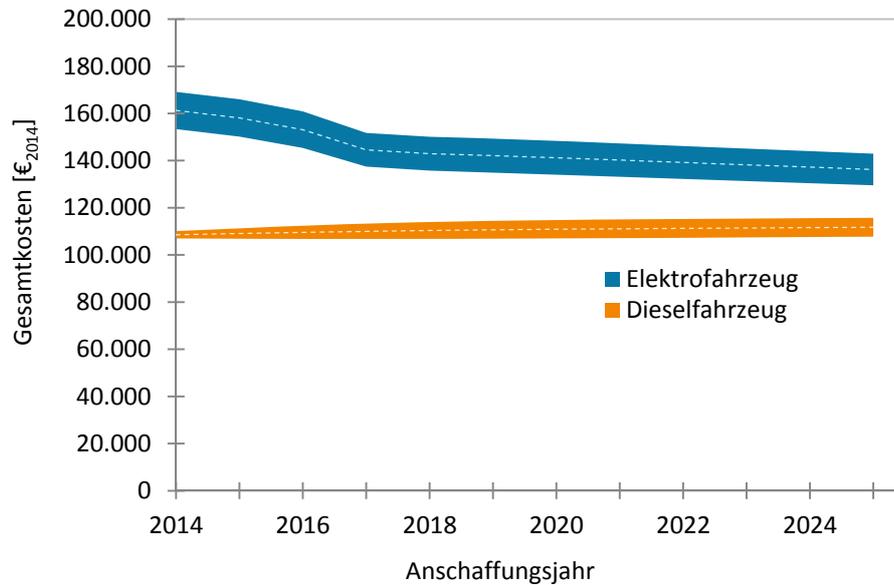


Abbildung 79: Lkw mit einem zGG von 12t im städtischen Lieferverkehr mit einer Fahrleistung von 30.000 km/a. Gesamtkosten in Abhängigkeit des Anschaffungsjahres.

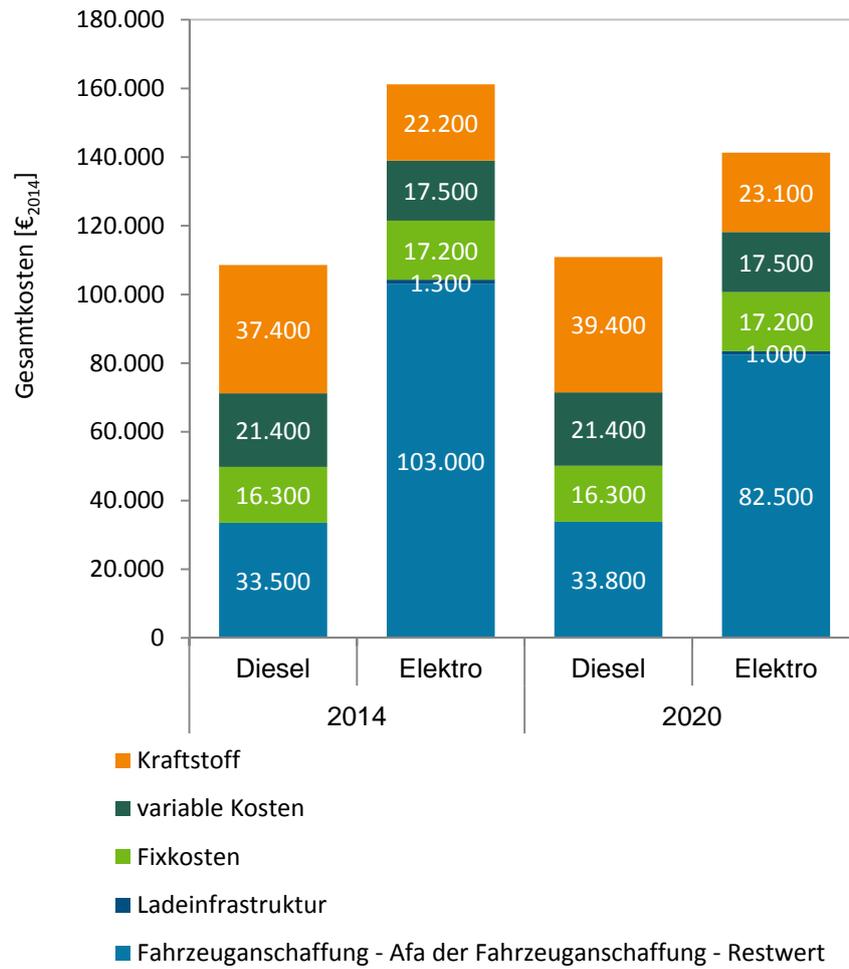


Abbildung 80: Gesamtkosten eines Lkw mit einem zGG von 12t im städtischen Lieferverkehr für die Jahre 2014 und 2020 im Vergleich

# Literatur

- Allgemeiner Deutscher Automobil-Club e.V. (ADAC) (2014). ADAC Autokosten 2014, ADAC. Verfügbar unter [www.adac-autokosten.de](http://www.adac-autokosten.de).
- Bäuml, S.; Brügelmann, R.; Dörr, K.; Herbener, R.; Hild, C.; Lehmann, C.; Raber, H.; Schaefer, T. & Welling, B. (2013). Die Steuerbelastung der Unternehmen in Deutschland. Berlin, Frankfurt am Main: Bundesverband der deutschen Industrie e.V.; Verband der chemischen Industrie.
- Bourbon, G.; Schulte, L.-E.; Rock, A.; Faltenbacher, M.; Ruhl, M.; Unger, M.; Bruns, T.; Soffel, C.; Lange, J.; Knotte, T.; Haufe, B.; Ruschmeyer, S.; Kröger, S. & Hausberger, S. (2012). Begleitendes Prüfprogramm im Rahmen der „Effizienz- und Kostenanalyse für den Linienbetrieb von Hybridbussen“. Abschlussbericht (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), Hrsg.), Berlin.
- Bundesministerium der Finanzen (BMF) (2014). Entwicklung der Energie- (vormals Mineralöl-) und Stromsteuersätze in der Bundesrepublik Deutschland, Bonn.
- Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. (BDEW) (2014). Strompreisanalyse Juni 2014, BDEW. Verfügbar unter [https://www.bdew.de/internet.nsf/id/20140702-pi-steuern-und-abgaben-am-strompreis-steigen-weiter-de/\\$file/140702%20BDEW%20Strompreisanalyse%202014%20Chartsatz.pdf](https://www.bdew.de/internet.nsf/id/20140702-pi-steuern-und-abgaben-am-strompreis-steigen-weiter-de/$file/140702%20BDEW%20Strompreisanalyse%202014%20Chartsatz.pdf), zuletzt abgerufen am 10.11.2014.
- Bundesverband mittelständischer Mineralölunternehmen e.V. (UNITI) (2012). Anteil der Mineralölwirtschaft am Steueraufkommen.
- Dallinger, D. (2012). Plug-in electric vehicles integrating fluctuating renewable electricity. Dissertation, Universität Kassel. Kassel.
- Demirkaya, Y.; Dümler, H.; Griebisch, U.; Kamutzki, K.; Klar, K.; Kunz, H.; Kuttler, M.; Pütz, R.; Schmidt, M.; Weber, H.-J. & Wiedemann, M. (2010). Life Cycle Cost (LCC) bei Linienbussen - Bewertungskriterien bei Ausschreibungen. VDV-Mitteilung 2315, 09/2010 (Verband Deutscher Verkehrsunternehmen (VDV), Hrsg.), Köln.
- Deutsche Bundesregierung (2011). Regierungsprogramm Elektromobilität, Berlin.
- Dexheimer, V. (2003). Hedonic Methods of Price Measurement for Used Cars. Statistisches Bundesamt (Destatis).
- Diekmann, L.; Gerhards, E.; Klinski, S.; Meyer, B.; Schmidt, S. & Thöne, M. (2011). Steuerliche Behandlung von Firmenwagen in Deutschland. Köln: Finanzwissenschaftliches Forschungsinstitut Universität Köln; Forum Ökologisch-Soziale Marktwirtschaft e.V.
- Dziambor, U.; Sieburg-Gräff, U.; Weiß, M.; Hilpert-Janßen, T. & Niesen, B. (2013). VDV-Statistik 2012 (Verband Deutscher Verkehrsunternehmen (VDV), Hrsg.), Köln.
- Edwards, J.; McKinnon, A. & Cullinane, S. (2009). Carbon Auditing the 'Last Mile': Modelling the Environmental Impacts of Conventional and Online Non-food Shopping. Heriot-Watt University - School of Management and Languages.
- EuroTransportMedia Verlags- und Veranstaltungs-GmbH (ETM-Verlag) (Hrsg.) (2012). Lastauto Omnibus Katalog 2013, Stuttgart.
- Faltenbacher, M.; Rock, A. & Vetter, O. (2011). Plattform Innovative Antriebe Bus.
- Fisch und Fischl GmbH (Fisch und Fischl GmbH, Hrsg.) (2014). [spritmonitor.de](http://spritmonitor.de). Verfügbar unter [www.spritmonitor.de](http://www.spritmonitor.de).

- Follmer, R.; Gruschwitz, D.; Jesske, B. & Quandt, S. (2010). *Mobilität in Deutschland 2008*. Institut für angewandte Sozialwissenschaft GmbH; Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR),.
- Gnann, T.; Plötz, P.; Zischler, F. & Wietschel, M. (2012). *Elektromobilität im Personenwirtschaftsverkehr - eine Potenzialanalyse*. Working Paper Sustainability and Innovation No. S 7/2012, Karlsruhe.
- Göhlich, D.; Kunith, A. & Gräbener, S. (2013). *Systemtechnologien für elektrische Stadtbusse - die richtige Wahl*. *Internationales Verkehrswesen* (4), S. 75–77.
- Hacker, F.; Blanck, R.; Hülsmann, F.; Kasten, P.; Loreck, C.; Ludig, S.; Mottschall, M. & Zimmer, W. (2014). *eMobil 2050 - Szenarien zum möglichen Beitrag des elektrischen Verkehrs zum langfristigen Klimaschutz*. *Gemeinsamer Endbericht zu den Vorhaben „Wissenschaftliche Unterstützung bei der Erarbeitung von Szenarien zum möglichen Beitrag der Elektromobilität zum langfristigen Klimaschutz“ (FKZ: UM 11 96 106) und „Szenarien zum möglichen Beitrag der Elektromobilität im Güter- und öffentlichen Personenverkehr zum langfristigen Klimaschutz“ (FKZ: 16 EM 1001)*. Berlin: Öko-Institut.
- Hacker, F.; Harthan, R.; Hermann, H.; Kasten, P.; Loreck, C.; Seebach, D. & Timpe C. (2011). *Betrachtung der Umweltentlastungspotenziale durch den verstärkten Einsatz von kleinen, batterieelektrischen Fahrzeugen im Rahmen des Projekts „E-Mobility“*. Berlin: Öko-Institut.
- Hermann, H.; Harthan, R. & Loreck, C. (2011). *Ökonomische Betrachtung der Speichermedien*. Arbeitspaket 6 des Forschungsvorhabens OPTUM (Optimierung der Umweltentlastungspotenziale von Elektrofahrzeugen). Berlin: Öko-Institut.
- Hülsmann, F.; Mottschall, M.; Hacker, F. & Kasten, P. (2014). *Konventionelle und alternative Fahrzeugtechnologien bei Pkw und schweren Nutzfahrzeugen – Potenziale zur Minderung des Energieverbrauchs bis 2050*. Öko-Institut Working Paper 3/2014. Berlin: Öko-Institut. Verfügbar unter <http://www.oeko.de/oekodoc/2105/2014-662-de.pdf>.
- INFRAS (2014). *Handbuch für Emissionsfaktoren des Strassenverkehrs (HBEFA)*. Verfügbar unter <http://www.hbefa.net/d/>.
- Internationales Institut für Nachhaltigkeitsanalysen und -strategien (IINAS) (2014). *Globales Emissions-Modell integrierter Systeme (GEMIS)*, IINAS. Verfügbar unter <http://www.iinas.org/gemis-info-de.html>.
- Kappus, J.; Klußmann, A.; Schmidt, M.; Mottschall, M.; Hecht, M. & Eschweiler, P. (2013). *Forschungsprojekt "Erhöhung des Anteils erneuerbarer Energie und Steigerung der Energieeffizienz im öffentlichen Personennahverkehr"*. Schlussbericht (Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS), Hrsg.).
- Kley, F. (2011). *Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge. Entwicklung und Bewertung einer Ausbaustrategie auf Basis des Fahrverhaltens*. Dissertation. Karlsruhe: Fraunhofer Institut für System- und Innovationstechnik (ISI).
- Knahl, T. & Sommer, C. (2013). *Einsatzpotenziale für Elektrofahrzeuge in der hamburgischen Wirtschaft*. Handelskammer Hamburg.
- Knörr, W.; Heidt, C. & Schacht, A. (2012). *TREMOD 5.3 Bericht 30.09.2012*. Heidelberg: Institut für Energie- und Umweltforschung.
- Kraftfahrt-Bundesamt (KBA) (2014a). *Bestandsbarometer - Personenkraftwagen am 1. Januar 2014 nach ausgewählten Merkmalen*, Flensburg.

- Kraftfahrt-Bundesamt (KBA) (2014b). Fahrzeugzulassungen (FZ). Neuzulassungen von Kraftfahrzeugen und Fahrzeuganhängern - Monatsergebnisse Januar bis Oktober 2014, Flensburg.
- Kraftfahrt-Bundesamt (KBA) (2014c). Neuzulassungen von Personenkraftwagen im Juli 2014 nach Segmenten und Modellreihen.
- MITNETZ Strom (2013). Preisblatt 2 - Netzentgelte für Entnahme ohne Leistungsmessung. gültig ab 01.01.2014.
- Mock, P.; Tietge U.; Franco, V.; German, J.; Bandivadekar, A.; Ligterink, N.; Lambrecht, U.; Kühlwein, J. & Riemersma, I. (2014). From Laboratory To Road. A 2014 update of official and "real-world" fuel consumption and CO2 values for passenger cars in Europe. Berlin: International Council of Clean Transportation (ICCT); Netherlands Organisation for Applied Scientific Research (TNO); Institut für Energie- und Umweltforschung (IFEU).
- Nationale Plattform Elektromobilität (NPE) (2011a). Zweiter Bericht der Nationalen Plattform Elektromobilität. Anhang, Berlin.
- Nationale Plattform Elektromobilität (NPE) (2011b). Zweiter Bericht der Nationalen Plattform Elektromobilität, Berlin.
- Nationale Plattform Elektromobilität (NPE) (2014). Fortschrittsbericht 2014 – Bilanz der Marktvorbereitung,.
- Pfahl, S. (2010). NPE-Workshop der AG7 / UAG Fahrzeug, „TCO-Modell und Marktanreize“. Grundlagen des TCO-Modells.
- Pfahl, S. (2012). Alternative Antriebskonzepte: Stand der Technik und Perspektiven – Die Sicht der Automobilindustrie. In P. Jochem, W.-R. Poganietz, A. Grunwald & W. Fichtner (Hrsg.), *Alternative Antriebskonzepte bei sich wandelnden Mobilitätsstilen. Tagungsbeiträge vom 08. und 09. März 2012 am KIT, Karlsruhe* (S. 81–108). Karlsruhe.
- Plötz, P.; Gnann, T.; Kühn, A. & Wietschel, M. (2013). Markthochlaufszszenarien für Elektrofahrzeuge. Endbericht. Karlsruhe: Fraunhofer Institut für System- und Innovationstechnik (ISI).
- Propfe, B.; Redelbach, M.; Santini, D. & Friedrich, H. (2012). Cost analysis of Plug-in Hybrid Electric Vehicles including Maintenance & Repair Costs and Resale Values. Los Angeles, Californien: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR); Transportation Technology R&D Center.
- Pütz, R. (2010). Modell zur ökologischen und ökonomischen Analyse und strategischen Optimierung von Linienbusflotten. Düsseldorf: Alba.
- Pütz, R. (2013). Auf dem Weg zum Elektrobuss – Analyse der Lebenszykluskosten verschiedener Busantriebskonzepte. Clean Fleets – Stadtbusse in der Beschaffung, Bremen.
- Schlesinger, M.; Hofer, P.; Kemmler, A.; Kirchner, A.; Koziel, S.; Ley, A.; Piégasa, A.; Seefeldt, F.; Straßburg, S.; Weinert, K.; Lindenberger, D.; Knaut, A.; Malischek, R.; Nick, S.; Panke, T.; Paulus, S.; Tode, C.; Wagner, J.; Lutz, C.; Lehr, U. & Ulrich, P. (2014). Entwicklung der Energiemärkte - Energiereferenzprognose. Endbericht. Basel, Köln, Osnabrück: Prognos AG; Energiewirtschaftliches Institut an der Universität zu Köln (EWI); Gesellschaft für Wirtschaftliche Strukturforschung mbH (GWS).
- Schmied, M. (2014). Elektroantrieb und Batterietechnologie. VÖV - KTBB Schulung „Schmierer, kühlen, mit Batterien fahren«, Langenthal.

- Schmied, M. & Mottschall, M. (2014). Berechnung des Energieverbrauchs und der Treibhausgasemissionen des ÖPNV - Leitfaden zur Anwendung der europäischen Norm EN 16258 (Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI), Hrsg.), Berlin.
- Schüler, D.; Stahl, H.; Buchert, M.; Blanck, R.; Mottschall, M.; Sutter, J.; Degreif, S.; Mehlhardt, G.; Hacker, F. & Harthan, R. (2013). Klimaneutrale Fraport AG: Maßnahmen, Szenarien, Strategien. Öko-Institut.
- Schwarze, J. (2014). Green-Economy: Die Kölner E-Buslinie. 4. Internationale E-Buskonferenz.
- Soffel, C. & Schwärzel, C. (2013). ÖPNV als Vorreiter und Innovationsmotor der Elektromobilität in Deutschland. Internationales Verkehrswesen (4), S. 72–74.
- Statista (2014a). Durchschnittlicher Preis für Dieselkraftstoff in Deutschland in den Jahren 1950 bis 2014, Statista. Verfügbar unter <http://de.statista.com/statistik/daten/studie/779/umfrage/durchschnittspreis-fuer-dieselmotoren-seit-dem-jahr-1950/>, zuletzt abgerufen am 10.11.2014.
- Statista (2014b). Durchschnittlicher Preis für Superbenzin in Deutschland in den Jahren 1972 bis 2014, Statista. Verfügbar unter <http://de.statista.com/statistik/daten/studie/776/umfrage/durchschnittspreis-fuer-superbenzin-seit-dem-jahr-1972/>, zuletzt abgerufen am 10.11.2014.
- Statista (2014c). Inflationsrate in Deutschland von 1992 bis 2013, Statista. Verfügbar unter <http://de.statista.com/statistik/daten/studie/1046/umfrage/inflationsrate-veraenderung-des-verbraucherpreisindexes-zum-vorjahr/>, zuletzt abgerufen am 13.12.2014.
- TÜV SÜD AG (2014). Auto Service - Gebühren für Hauptuntersuchung. Preise in Baden-Württemberg und Bayern, TÜV SÜD AG. Verfügbar unter <http://www.tuev-sued.de/hauptuntersuchung/4-gebuehren>.
- Wermuth, M.; Neef, C.; Wirth, R.; Hanitz, I.; Löhner, H.; Hautzinger, H.; Stock, W.; Pfeiffer, M.; Fuchs, M.; Lenz, B.; Ehrler, V.; Schneider, S. & Heinzmann, H.-J. (2012). Kraftfahrzeugverkehr in Deutschland 2010 (KiD 2010). Schlussbericht. Prof. Dr. Wermuth Verkehrsforschung und Infrastrukturplanung GmbH (WVI); Institut für angewandte Verkehrs- und Tourismusforschung e.V. (IVT); Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR); Kraftfahrt-Bundesamt (KBA).
- Wöhe, G. & Döring, U. (1990). Einführung in die allgemeine Betriebswirtschaftslehre (17. Aufl.).
- Zentralverband des deutschen Handwerks (2008). Was bewegt die Handwerker? ZDH-Umfrage zum Fuhrpark der Handwerksunternehmen.





