

Dieses Dokument ist eine Zweitveröffentlichung (Postprint) /

This is a self-archiving document (accepted version):

Ramona Rieckhof, Nadine May, Christoph Scope, Edeltraud Guenther

Ökonomisch-ökologischer Nettoeffekt der Elektromobilität im öffentlichen Personennahverkehr

Erstveröffentlichung in / First published in:

Umwelt-Wirtschafts-Forum. 2016, 24(1), S. 107 - 119 [Zugriff am: 16.08.2021]. Springer. ISSN 1432-2293.

DOI: <https://doi.org/10.1007/s00550-016-0403-x>

Diese Version ist verfügbar / This version is available on:

<https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:14-qucosa2-757376>

Ökonomisch-ökologischer Nettoeffekt der Elektromobilität im öffentlichen Personennahverkehr

Ramona Rieckhof¹ · Nadine May¹ · Christoph Scope¹ · Edeltraud Günther¹

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2016

Zusammenfassung Im Rahmen einer Elektromobilitäts-Fallstudie kombinieren wir zwei lebenszyklusbasierte Methoden und veranschaulichen die Ergebnisse zur Kommunikations- und Entscheidungsunterstützung mittels der Methode des ökonomisch-ökologischen Nettoeffekts. Die Ergebnisse zeigen, dass Elektrofahrzeuge im Vergleich zur EURO6-Dieselfahrzeugen erst in langer Frist ökonomisch und ökologisch wettbewerbsfähig sind.

Abstract Building on a case study on electric mobility, we integrate two life cycle methods and visualize the results for communication and decision-support using the economic-environmental trade-off. Results suggest that in comparison to EURO6 diesel vehicles electric vehicles are only in the long run economically and environmentally competitive.

1 Einleitung

Die lebenszyklusbasierte, systematische Untersuchung von Produkten und Prozessen ist inzwischen etabliert in der industrieökologischen Forschung, um Kosten und Umweltwirkungen menschlicher technologischer Aktivitäten zu bewerten und zu reduzieren (Graedel 1994; Lifset und Grädel 2002). Führende Fachzeitschriften stellen dabei an Fallstudien vermehrt die Anforderungen, neue Daten oder neue Methoden anzuwenden oder ein spezifisches Problem zu behandeln, um das methodische Wissen und die praktische

Anwendung zu verbessern (Lifset 2013; Klöpffer und Curran 2014). Gleichzeitig sollen Umweltwirkungen von Unternehmen systematischer gemessen und interdisziplinäre Ansätze unter Integration von Management-, Umweltmanagement-, Ingenieurs- und Naturwissenschaften eingesetzt werden (Whiteman et al. 2013; Hoffman et al. 2014; Günther et al. 2015).

In der Literatur werden für die integrierte ökonomisch-ökologische Bewertung oft Ökobilanzierung (engl. Life Cycle Assessment, LCA) und Lebenszykluskostenrechnung (engl. Life Cycle Costing, LCC) verwendet und miteinander kombiniert (Klöpffer 2008; Hoogmartens et al. 2014; Bierer et al. 2015). Unternehmen setzen solche systematischen, interdisziplinären Ansätze vermehrt ein, um jenseits von ökologischen Grenzwertüberwachungen und Vorgaben Produkte und Prozesse nachhaltig zu innovieren (Graedel 1994; Lifset und Grädel 2002; Baitz et al. 2013). Allerdings erfolgt bei der Bewertung der Entscheidungsalternativen keine Differenzierung in Aktions-, Sanktionierungs- und Überwälzungsmöglichkeiten.

In diesem Beitrag zeigen wir anhand einer Fallstudie, wie die Ergebnisse einer integrierten Bewertung mittels LCC und LCA in den ökonomisch-ökologischen Nettoeffekt überführt werden und somit die Konsequenzen externer Effekte und Überwälzungsmöglichkeiten bei der Bewertung von Entscheidungsalternativen besser berücksichtigt werden können. Die Fallstudie bezieht sich auf die ökonomisch-ökologische Bewertung der Elektromobilität im öffentlichen Personennahverkehr (ÖPNV) und entstand in einem interdisziplinären Forschungsprojekt der Bereiche Betriebliche Umweltökonomie und Automobiltechnik der Technischen Universität Dresden sowie der Dresdner Verkehrsbetriebe AG (DVB). Ziel ist zu untersuchen, ob ein reiner Elektrobuss einem EURO6-Dieselsbus im ÖPNV ökologisch und ökonomisch vorzuziehen ist und ob der Einbezug

✉ Edeltraud Günther
ema@mailbox.tu-dresden.de

¹ Fakultät Wirtschaftswissenschaften, Lehrstuhl für BWL, insb. Betriebliche Umweltökonomie, Technische Universität Dresden, 01062 Dresden, Deutschland

54 von externen Effekten und Überwälzungsmöglichkeiten im
55 Rahmen des ökonomisch-ökologischen Nettoeffekts nach-
56 haltigere Entscheidungen unterstützen kann.

57 In Kapitel 2 werden der Forschungsgegenstand und die
58 Forschungsfragen abgeleitet, in Kapitel 3 wird die Vor-
59 gehensweise der Fallstudie vertieft, während in Kapitel 4
60 die Ergebnisse diskutiert werden. Die Schlussfolgerungen
61 schließen sich in Kapitel 5 an.

64 2 Forschungsgegenstand und -fragen

66 LCC und LCA berücksichtigen alle Lebenszyklusphasen
67 sowie antizipierte externe Effekte¹, die im Planungshori-
68 zont entscheidungsrelevant werden könnten (Hunkeler et al.
69 2008; Swarr et al. 2011). In diesem Zusammenhang erarbei-
70 tet die Arbeitsgruppe TC 207 derzeit mit der ISO 14008 ein
71 einheitliches Rahmenwerk zur monetären Bewertung von
72 Emissionen und natürlichen Ressourcen, um eine gemein-
73 same Sprache und Begrifflichkeiten für eine transparentere
74 Vorgehensweise zu schaffen. Die Norm, welche Ende
75 2018 erwartet wird, richtet sich dabei an die verschiedenen
76 Akteure in Politik, Forschung und Unternehmen, die sich
77 vermehrt mit monetärer Bewertung befassen (ISO 2016).

78 In diesem Artikel werden exemplarisch zwei Handlungs-
79 alternativen eines Entscheidungsträgers im Verkehrssektor
80 mittels LCC und LCA bewertet und im ökonomisch-ökologi-
81 schen Nettoeffekt aggregiert. Die Wahl fiel auf den Ver-
82 kehrssektor, weil er von hoher Bedeutung für die Lebens-
83 qualität und Wirtschaftsleistung Deutschlands ist (Statis-
84 tisches Bundesamt 2013), aber umfangreiche externe Ef-
85 fekte verursacht (Peters u. a. 2013; AG Energiebilanzen
86 2015). Letztere summierten sich 2005 auf 80,4 Mrd. Eu-
87 ro und beinhalten zu 50 % Umweltfolgeschäden (BMUB
88 und Umweltbundesamt (UBA) 2011; INFRAS 2007). Mit
89 dem 2009 vorgestellten Nationalen Entwicklungsplan Elek-
90 tromobilität (Bundesregierung 2009) wurde in Deutschland
91 ein Transformationsprozess eingeleitet, der den straßenbe-
92 zogenen Personen- und Güterverkehr mittel- bis langfris-
93 tig auf ein nachhaltigeres Fundament stellen soll. Mehr
94 als zwei Milliarden Euro an Fördermitteln flossen deshalb
95 in den vergangenen sieben Jahren in Forschungs- und De-
96 monstrationsprojekte, um innovative Fahrzeugkonzepte und
97 -komponenten zu entwickeln und die Markteinführung von
98 Elektrofahrzeugen zu unterstützen (Bundesregierung 2009;
99 Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur
100 [BMVI] 2016).

102 ¹ Externalitäten (auch externe Effekte oder externe Kosten) bezeich-
103 nen Auswirkungen ökonomischer Entscheidungen, die den direkten
104 Nutzen anderer betreffen, aber nicht von dem verursachenden Akteur
105 getragen werden könnten (Günther 2008). Sie werden nicht eingepreist
106 und greifen so nicht steuernd auf den Akteur ein (Rüdenauer et al.
2007).

Gemäß dem Regierungsprogramm Elektromobilität wur-
den in den bisher in Deutschland geförderten Forschungs-
projekten² nicht nur technologische, sondern auch
gesellschaftspolitische und ökologische Aspekte von Elek-
tromobilität untersucht (Bundesregierung 2011). Dennoch
liegt der Schwerpunkt auf ingenieur-, verkehrs- und ener-
giewissenschaftlicher Forschung sowohl beim motorisier-
ten Individualverkehr als auch beim ÖPNV (Meier zu
Köcker et al. 2015; z. B. Funke und Gauger 2015; Müller-
Hellmann und Thurm 2015). Die Bewertung von mit Elek-
trobussen assoziierten Umwelt- und Kostenaspekten findet
zwar vereinzelt in Begleitforschungsprojekten (BMVI und
Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Re-
aktorsicherheit [BMUB] 2015) und privatwirtschaftlichen
Servicedienstleistungen (Lange und Otto 2015) statt, ein
mehrdimensionaler, integrierter Betrachtungsansatz, der
alle relevanten Externalitäten und Überwälzungsmöglich-
keiten berücksichtigt, ist jedoch nicht bekannt.

Im Rahmen der Begleitforschung des dieser Fallstudie
zugrunde liegenden Forschungsprojekts „Pilotlinie 64“³ ist
daher das Ziel, eine multikriterielle Entscheidungsgrund-
lage für die sequentielle Einführung von Elektrobussen in
Dresden zu erarbeiten. Es werden dabei sowohl relevan-
te ökonomische und ökologische Aspekte als auch externe
Effekte berücksichtigt. Folgende Forschungsfragen lei-
ten die Analyse der Bedingungen der ökonomisch-ökologi-
schen Wettbewerbsfähigkeit von Elektromobilität:

1. Unter welchen Bedingungen ist die Anschaffung eines
reinen Elektrobusses einschließlich der Ladeinfrastruktur
wettbewerbsfähig im Vergleich zu einem EUR6-Diesel-
bus mit Verbrennungsmotor (Basis- sowie Alternativszena-
rio)?
2. Welchen Einfluss haben bereits internalisierte sowie er-
wartete, zu internalisierende externe Sanktionskosten auf
die Ergebnisse?
3. Welchen Einfluss haben Finanzierungshilfen als Mög-
lichkeiten der Kostenüberwälzung auf die Ergebnisse?

Wir erarbeiten somit einen wissenschaftlichen Beitrag zur
Verknüpfung von LCC und LCA anhand eines konkreten
Fallbeispiels zu Elektromobilität. Die Ergebnisse werden
in Form eines methodisch adaptierten ökonomisch-ökologi-
schen Nettoeffekts aggregiert. Dieser dient Entscheidungs-
trägern in Unternehmen, Politik und Forschung gleichsam

² Zum Beispiel „Begleitforschung“ der Modellregionen Elektromobi-
litaet 2014 in den Themenfeldern „Stadtentwicklung und Verkehrs-
planung“ sowie „Ordnungsrecht“ (Deutsches Institut für Urbanistik
2015).

³ Im bayrisch-sächsischen Schaufenster „Elektromobilität verbindet“
(Bayern Innovativ und SAENA 2016) wurden in Sachsen insbesondere
Pilotvorhaben zur Demonstration der Praxistauglichkeit von Elek-
tromobilität im ÖPNV initiiert: „Elektrobuslinie 79“, „Pilotlinie 64“,
„Schnellladesysteme für Elektromobilität im ÖPNV“.

107 **Tab. 1** Angewandtes Untersuchungsdesign

108 Funktionelle Einheit	Beförderung von durchschnittlich 25 Personen erbracht durch den Einsatz von jeweils einem Busfahrzeug vom Typ Solaris Urbino 12 (EUR6-Abgasnorm) bzw. Solaris Urbino 12 electric auf der Linie 79 im städtischen Straßennetz von Dresden über eine Lebensdauer von 12 Jahren mit einer Gesamtleistung von 1.000.000 vkm und resultierenden Gesamttransportleistung von 25.000.000 pkm
110 Systemgrenze	Zeitlich: cradle-to-grave Lebenszyklus (Herstellung, Nutzung und End-of-Life) für 12 Jahre Nutzungsdauer im Zeitraum 2015-2026; Geografisch: auf die Stadt Dresden begrenzt
114 Cut-off Kriterien	In Anlehnung an die ISO 14044: 2006: 1 % der gesamten Primärenergie bzw. der gesamten Masse Summe ausgeschlossener Eingangsflüsse darf dabei 5 % nicht überschreiten
117 Datenursprung	Unternehmensdaten wurden für Mengen- und Kostenangaben herangezogen, Hintergrunddaten basieren auf generischen Prozessdaten insb. aus EcoInvent 3.1

120 als Kommunikations- und Entscheidungsgrundlage für die Ent-
121 scheidungsfindung. Damit stellt unsere Forschung fundierte
122 Handlungsempfehlungen und Argumentationshilfen bereit
123 und schafft Voraussetzungen für eine zukünftig stärkere Be-
124 rücksichtigung von Umweltaspekten in Nachhaltigkeitsstra-
125 tegien zum ÖPNV.

128 3 Vorgehensweise

130 Für alle Lebenszyklusphasen von der Wiege bis zur Bah-
131 re (engl. cradle-to-grave) werden mit Hilfe von LCA und
132 LCC signifikante Umweltwirkungen und Kosten identifi-
133 ziert und bewertet. Zur verdichteten, entscheidungsorien-
134 tierten Ergebnisdarstellung dient eine Adaption des soge-
135 nannten ökonomisch-ökologischen Nettoeffekts.

136 Während sich LCA für die Abbildung von ökologischen
137 externen Effekten eignet, bietet sich LCC für die ökonomi-
138 sche Perspektive an (Hoogmartens et al. 2014; Kurcz-
139 veil et al. 2015). LCA umfasst eine systematische Bewer-
140 tung von Umweltwirkungen eines Produktsystems über des-
141 sen gesamten Lebenszyklus (ISO 14040: 2006; ISO 14044:
142 2006). LCC evaluiert hingegen alle (direkten und indirek-
143 ten) Kosten und Erlöse, d. h. Cashflows, die innerhalb des
144 definierten Lebenszyklus für die Investitionsentscheidung
145 als entscheidungsrelevant einzustufen sind (Höhne 2009;
146 Ilg et al. 2016). Die für LCA einschlägigen Normen (ISO
147 14040: 2006; ISO 14044: 2006) empfehlen eine vierstufige
148 Vorgehensweise, welche um die Kostenerfassung, -model-
149 lierung und -analyse der LCC ergänzt wird:

150 1. Ziel und Untersuchungsdesign (vgl. Tab. 1): Im Fokus
151 stehen die Umweltwirkungen und nicht diskontierten⁴
152 Kosten beider Antriebsalternativen eines Busses und
153 der notwendigen Ladeinfrastruktur. Wir diskutieren kei-

156 ⁴ Um Umweltwirkungen und Kosten nicht auf die Zukunft zu ver-
157 schieben, wurde der Empfehlung 2001/453/EG folgend eine Bewer-
158 tung zum Barwert mit 0 % als Idealwert festgelegt (Europäische Kom-
159 mission 2001).

ne weiteren, alternativen Hybride von LCA und LCC
(Heijungs et al. 2013; Pizzol et al. 2015).

2. Mengen- und Kostenbilanz (vgl. Tab. 2): Es werden die zugrundeliegenden Mengen- und Kostendaten für beide Antriebsalternativen über den gesamten Lebenszyklus dargestellt.
3. Wirkungs- und Kostenabschätzung (vgl. Tab. 3):
 - a. Zur Wirkungsabschätzung innerhalb der LCA werden 7 Wirkungsindikatoren der CML-Methode ausgewählt, die die Schutzgüter Ressourcen, Atmosphäre/Boden/Wasser sowie Ökosystem repräsentieren. Ein weitergehendes Aggregieren der Wirkungskategorien zu einem gesamten Indikator (sog. Ordnung und Gewichtung) nehmen wir einer Simplifizierung und subjektiven Bewertung vorbeugend nicht vor.
 - b. Zur Kostenabschätzung werden die über den Lebensweg ermittelten Kosten in Ergänzung zu den Umweltwirkungen abgebildet, um zu eruieren, inwieweit die ökonomische mit der ökologischen Betrachtungsperspektive übereinstimmt.
4. Auswertung und Interpretation: Im Rahmen einer Szenarioanalyse wird einem Basis- ein Alternativszenario gegenübergestellt, um Skaleneffekten beim Ausbau der Elektromobilität, Lernkurven und Kostendegressionen Rechnung zu tragen (vgl. Abb. 1).

Als Zielgröße dieser integrierten Evaluierung mittels LCA und LCC ist der ökonomisch-ökologische Nettoeffekt nach Günther (1994; 2008), ISO/TC207/SC2 (2016) und Steen u.a. (2008) gewählt: Hiernach werden für verschiedene Investitionsalternativen Möglichkeiten der Aktion, Sanktionierung sowie Überwälzung gegenübergestellt, parallel evaluiert und transparent bewertet. Für die vorliegende Untersuchung ist insofern eine methodische Adaption angewandt, als dass der Kostenaufstellung aus der ökologierorientierten LCC auch einzelne entscheidungsrelevante Wirkungskategorien aus der LCA im ökonomisch-ökologischen Nettoeffekt dargestellt werden. Durch die monetäre als auch ökologische Bewertung externer Effekte und die Möglichkeit, Kosten an Dritte weiterzugeben, ermöglicht

160 **Tab. 2** Mengen- und Kostenbilanz

	Mengenbilanz					Einh.	Kostenbilanz				
	Solaris Urbino 12	Solaris Urbino 12 electric	Solaris Urbino 12	Solaris Urbino 12 electric			Solaris Urbino 12	Solaris Urbino 12 electric	Solaris Urbino 12	Solaris Urbino 12 electric	
	<i>Basisszenario</i>		<i>Alternativszenario</i>			<i>Basisszenario</i>		<i>Alternativszenario</i>			
167 Bus - Nutzung	3,20E+05	1,75E+06	3,20E+05	1,40E+06	kg Diesel/kWh Strom	7,84E+05	8,11E+05	1,12E+06	1,07E+06	EUR	
169 Bus - Herstellung und End-of-Life	1,03E+04	1,45E+04	1,03E+04	1,45E+04	kg	2,24E+05	6,06E+05	2,46E+05	2,54E+05	EUR	
171 Ladeinfrastruktur – Herstellung und End-of-Life	–	8,59E+02	–	2,92E+02	kg	4,78E+03	6,65E+04	6,82E+03	3,37E+04	EUR	

174 Anmerkung: Im zugrundeliegenden Forschungsprojekt wurde einer der ersten Elektrobuse des Herstellers Solaris eingesetzt. Es handelt
 175 sich um einen Prototypen, der zudem für Forschungszwecke mit einer überdimensionierten Batterie ausgestattet worden ist, damit
 176 unterschiedliche wissenschaftliche Versuchsreihen zur Batterieleistungsfähigkeit durchgeführt werden konnten. Zukünftig ist hier von niedrigeren
 177 Beschaffungspreisen auszugehen. (DVB-Unternehmensdaten und eigene Berechnungen)

178 **Tab. 3** Berücksichtigte Wirkungs- und Kostenindikatoren

179 Schutzgut	Indikatorabkürzung	Indikatorbezeichnung
180 <i>Ressourcen</i>	ADPe	Abiotischer Ressourcenverbrauch elementarer Ressourcen (Abiotic Depletion elements)
	ADPf	Abiotischer Ressourcenverbrauch elementarer Ressourcen (Abiotic Depletion fossil)
182 <i>Atmosphäre, Boden, Wasser</i>	GWP	Treibhausgaspotential (Global Warming Potential)
	AP	Versauerungspotenzial (Acidification Potential)
	EP	Eutrophierungspotenzial (Eutrophication Potential)
185 <i>Ökosystem (Menschen, Tiere, Pflanzen)</i>	HTP	Humantoxizitätspotenzial (Human Toxicity Potential)
	POCP	Photochemisches Ozonbildungspotenzial (Photochem. Ozone Creation Potential)
188 <i>Kosten</i>	EUR	Lebenszykluskosten (Life Cycle Costs)

189 Anmerkung: Die Indikatorabkürzungen beziehen sich auf die geläufigen, englischen Bezeichnungen. Zum besseren Verständnis ist daher neben
 190 der deutschen jeweils auch die englische Indikatorbezeichnung in Klammern angegeben.

192 der adaptierte ökonomisch-ökologische Nettoeffekt somit
 193 entweder eine aktive, ökologieorientierte Strategiewahl
 194 (Reduktion von Kosten und Umweltwirkungen) oder pas-
 195 sive, nicht-ökologieorientierte Strategiewahl (Reduktion
 196 von Kosten und Vernachlässigung von Umweltwirkungen).
 197 Überschreitet die Summe aus Kosten bzw. Umweltwirkun-
 198 gen der Sanktionierung sowie ggf. deren Überwälzung jene
 199 der Aktion und ggf. deren Überwälzung, sollte der Ak-
 200 teur die aktive, ökologieorientierte Strategie wählen (vgl.
 201 Abb. 2) (in Erweiterung von Günther 2008).

202 Im vorliegenden Fallbeispiel werden ein Elektrobuss als
 203 auch ein EUR6-Dieselsbus als zwei Beschaffungsalterna-
 204 tiven zur Substitution eines herkömmlichen Dieselsbusses
 205 ökonomisch und ökologisch bewertet, um aktive, ökologie-
 206 orientierte als auch passive, nicht-ökologieorientierte Stra-
 207 tegien abzuleiten und Beschaffungsentscheidungen zu un-
 208 terstützen. Für jede dieser Alternativen sind Konsequen-
 209 zen der Aktion, der Sanktionierung und ggf. der Überwäl-

zung zu betrachten⁵. Die Möglichkeiten der Aktion um-
 fassen Konsequenzen innerhalb des eigenen Handlungsrah-
 mens eines Wirtschaftsakteurs wie der DVB als Dienstleis-
 ter des ÖPNV, die externe Effekte verursachen (Günther
 2008). Hierunter fallen in dieser Fallstudie im Status Quo
 die im Rahmen der LCC und LCA ermittelten lebenszyklus-
 bezogenen Kosten und Umweltwirkungen für den Diesel-
 bzw. Elektrobuss inkl. Ladeinfrastruktur.

Der Begriff Sanktionierung umfasst Kosten und Umwelt-
 wirkungen, die dem Akteur durch Nicht-Handeln entstehen
 und nicht in dessen direkten Einflussbereich liegen (Gün-
 ther 2008). Dazu zählen auch erwartete, zu internalisierende
 externe Kosten, die für den Planungshorizont von 12 Jah-
 ren entscheidungsrelevant sind. In dieser Fallstudie betrifft
 dies Lärm, CO₂, NO_x, PM und NMHC, weshalb für sie
 nachfolgend die Sanktionskosten ermittelt werden. Weitere
 vorläufig nicht als entscheidungsrelevant eingestufte exter-
 ne ökologische und soziale Externalitäten betreffen bspw.

⁵ Die Begriffe und Gruppierungen unterliegen aktuellen Diskussionen
 zur ISO14008 (ISO 2016) und sind noch nicht konsolidiert.

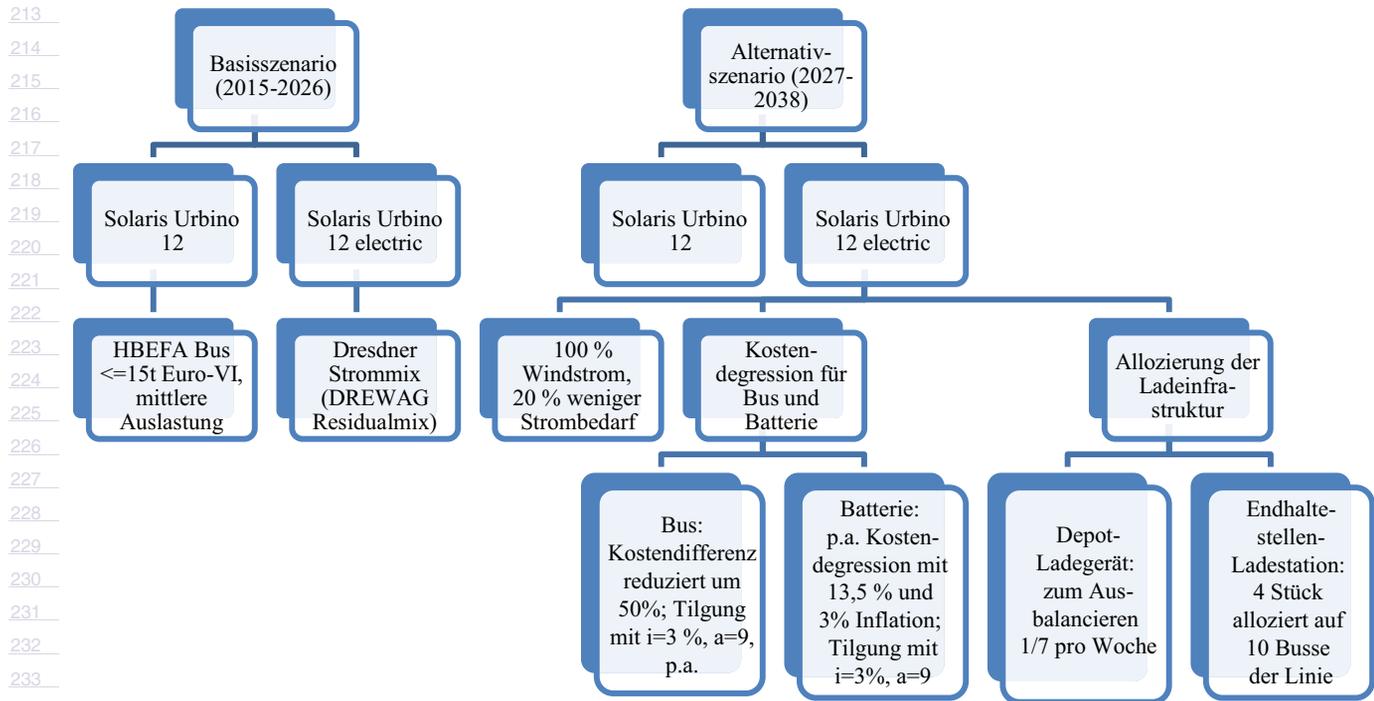


Abb. 1 Vergleich von Basis- und Alternativszenario (Eigene Darstellung)

die Flächeninanspruchnahme, Gesundheitsrisiken (z.B. Dieseldämpfe, Starkstrom), Unfallrisiken (häufig extern verursacht) und Katastrophenrisiken (z.B. Stromausfälle, Hochwasser).

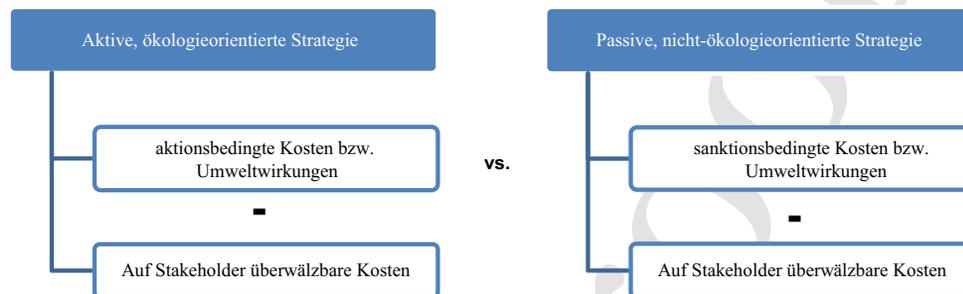
Die Auswahl orientiert sich für Lärm am Masterplan Lärminderung und Luftreinhalteplan der Stadt Dresden (Umweltamt Dresden 2009, 2011) und für die Schadstoffe an der Richtlinie 2009/33/EG (Europäische Union 2009). Für die vier Schadstoffemissionen sind die spezifischen Emissionskosten der Richtlinie 2009/33/EG (Europäische Union 2009) entnommen (vgl. Tab. 4). Durch Multiplikation dieser mit den mittels der Ökobilanzsoftware GaBi und den Datenbanken Ecoinvent 3.1 und HBEFA ermittelten Emissionen ergibt sich der Anteil der Sanktionskosten. Es stellt sich die Frage, ob nur die direkten oder auch die indirekten Emissionen zu berücksichtigen sind. Ein Elektrobus hat in der Nutzungsphase keine direkten, wohl aber indirekte Emissionen der Stromerzeugung (Noel und McCormack 2014), welche im Modell durch Verwendung des Strommixes berücksichtigt werden (García Sánchez et al. 2013; Noel und McCormack 2014). Es wird zwischen den Emissionen aus der Stromerzeugung (e-ep) und den Emissionen aus den Vorketten der Kraftstoffbereitstellung (agg) differenziert. Folglich ermitteln wir externe Kosten für direkte als auch indirekte Emissionen. Für Lärmemissionen finden sich in der Literatur zwar Berechnungen zu Lärmschutzinvestitionen (Giering 2013), aber kein geeigneter realer Wert für die Abschätzung von Lärmkosten. Daher schätzen wir

die externen Kosten von Lärm mit 0,01 Euro/km ab dem Schwellwert dB > 50.

Überwältzbare Kosten definieren die Möglichkeit zur Weitergabe von Kosten an Dritte (Günther 2008). In dieser Fallstudie werden Aktionskosten, nicht aber Sanktionskosten exemplarisch auf den Staat übergewälzt: konkret sind dies die Substitutionskosten eines herkömmlichen Dieselmotors entweder durch einen EURO6-Dieselmotors oder Elektrobus. Zur Unterstützung einer Elektromobilitätsstrategie im ÖPNV werden hier Investitionszuschüsse, Betriebskostenerleichterungen und unter Umständen Fahrpreisanpassungen diskutiert (Deutsch u. a. 2016). Im ökonomisch-ökologischen Nettoeffekt greifen wir nachfolgend exemplarisch Investitionszuschüsse und Betriebskostenerleichterungen auf, da hier bereits konkrete Förderprogramme im Gespräch sind, während durch Kunden finanzierte Fahrpreisanpassungen unterbleiben sollten, um ein Abwandern zum umwelt- und klimaschädlicheren Individualverkehr zu verhindern (Deutsch u. a. 2016).

Investitionszuschüsse spiegeln die Forderung von Branchenvertretern und Politikern nach einer finanziellen Unterstützung bei der Neuanschaffung von (leisen) Bussen wider (Mortsiefer 2015; Öchsner 2015). Neben dem BMVI hat auch das BMUB die Förderung von Elektrobusen angekündigt (BMVI 2015; BMUB 2016). Das BMVI gewährt dabei eine maximale Beihilfeintensität von 40 % für die Mehrkosten von Elektrofahrzeugen (inkl. Batterie) im Vergleich zu Fahrzeugen mit konventionellem Antrieb sowie die für diese Fahrzeuge erforderliche Ladeinfrastruktur

266 **Abb. 2** Schema des ökonomisch-ökologischen Nettoeffekts (in Anlehnung an Günther
 267 1994, 2008; ISO/TC207/SC2
 268 2016; Steen u.a. 2008)
 269



277 **Tab. 4** Emissionskosten

Emission (Abkürzung)	Emission	Kostensatz	Einheit
CO ₂	Kohlenstoffdioxid	0,035000	EUR/kg
NO _x	Stickoxid	0,000004	EUR/kg
PM	Feinstaub	0,000087	EUR/kg
NMHC	Nicht-Methan-Kohlenwasserstoff	0,000001	EUR/kg

285 (Europäische Union 2009)
 286

288 tur. Der Zuschuss des BMUB beträgt je nach Unternehmense
 289 mensgröße 35 % (große Unternehmen), 45 % (mittlere) und
 290 55 % (kleine) der beihilfefähigen Investitionsmehrkosten.
 291 Darüber hinaus können ÖPNV-Unternehmen ggf. Mittel
 292 i.H.v. 80 % aus dem Landesinvestitionsprogramm nach
 293 Gemeindeverkehrsfinanzierungsgesetz (GVFG) zum Auf-
 294 bau einer für mehrere Busse oder Linien zur Verfügung
 295 stehenden Ladeinfrastruktur zur Verfügung gestellt wer-
 296 den (Staatsministerium für Wirtschaft, Arbeit und Verkehr
 297 2016). In unserer Fallstudie simulieren wir zwei Investi-
 298 tionszuschussoptionen (vgl. Tab. 5): im ersten Fall legen
 299 wir die Förderrichtlinie des BMVI sowohl für Bus und
 300 Batterie als auch Ladeinfrastruktur zugrunde, im zweiten
 301 Fall setzen wir für die Ladeinfrastruktur Mittel aus dem
 302 GVFG an. Analog zur Abwrackprämie für Alt-PKW aus
 303 dem Jahr 2009 könnte der Zuschuss gewährt werden, wenn
 304 ein ÖPNV-Unternehmen ein emissionsintensiveres Modell
 305 verschrotten und einen Elektrobuss erwerben würde (Bun-
 306 desamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle [BAFA] 2015;
 307 KFZ Kompass 2015).

308 Betriebskostenerleichterungen bestehen derzeit sowohl
 309 für Dieselkraftstoff als auch Strom. Auf die Ökosteuern für
 310 Dieselkraftstoff i. H. v. 0,154 EUR/l erhalten ÖPNV-Unter-
 311 nehmen 50 % Rabatt (Wolters Kluwer Deutschland GmbH
 312 2016). Auf die jährlich neu angepasste EEG-Umlage bei
 313 Strom i. H. v. 6,170 ct/kWh erhalten ÖPNV-Unternehmen
 314 derzeit für Schienenbahnen-Fahrstrom 80 % Rabatt
 315 (Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz
 316 [BMJV] 2015). Für Elektro- und Hybridbusse sind der-
 317 zeit 50 % Rabatt im Gespräch, analog zu den bestehenden
 318 Betriebskostenerleichterungen bei Schienenbahnen sollte er

aber nach Zistel (2015) durch den Gesetzgeber ebenso auf
 80 % der EEG-Umlage erhöht werden. Beide Varianten
 rechnen wir im Nettoeffekt durch. Für den Dieselkraftstoff
 ließen sich so im Lebenszyklus ca. 36.000 EUR Ökosteuern
 überwälzen, für Strom ca. 66.500 EUR in Variante 1 und
 106.500 EUR in Variante 2.

4 Diskussion der Ergebnisse

Nachfolgend veranschaulicht Abb. 3 Kosten und einzelne
 ausgewählte Umweltwirkungen (vgl. Kapitel 3) des Elek-
 trobusses im prozentualen Vergleich zum Diesellbus.

Forschungsfrage 1 zur Wettbewerbsfähigkeit des Elek-
 trobusses im Vergleich zum EUR6-Diesellbus lässt sich da-
 her wie folgt beantworten: Die Investitionsstrategie in Elek-
 tromobilität ist im Alternativszenario (mit Beschaffung im
 Jahr 2027 unter veränderten Rahmenbedingungen), nicht
 aber im Basisszenario gegenüber einer Investitionsstrategie
 in Dieselmobilität wettbewerbsfähig. Betragen die Lebens-
 zykluskosten für die Anschaffung des Elektrobusses inkl.
 Ladeinfrastruktur im Basisszenario noch ca. 470.000 EUR,
 d.h. ca. 20 %, mehr als die des Diesellbusses, so liegen sie
 im Alternativszenario ca. 9.000 EUR, d.h. 0,3 %, niedriger.
 Kosten, Emissionen und Umweltwirkungen ergeben sich
 für beide Szenarien beim Diesellbus insb. aus der Diesell-
 kraftstoffherstellung und -verbrennung, Instandhaltung so-
 wie Busproduktion und -entsorgung. Beim Elektrobuss sind
 Instandhaltung, Strommix, Busproduktion und -entsorgung
 sowie die Batterieproduktion ausschlaggebend.

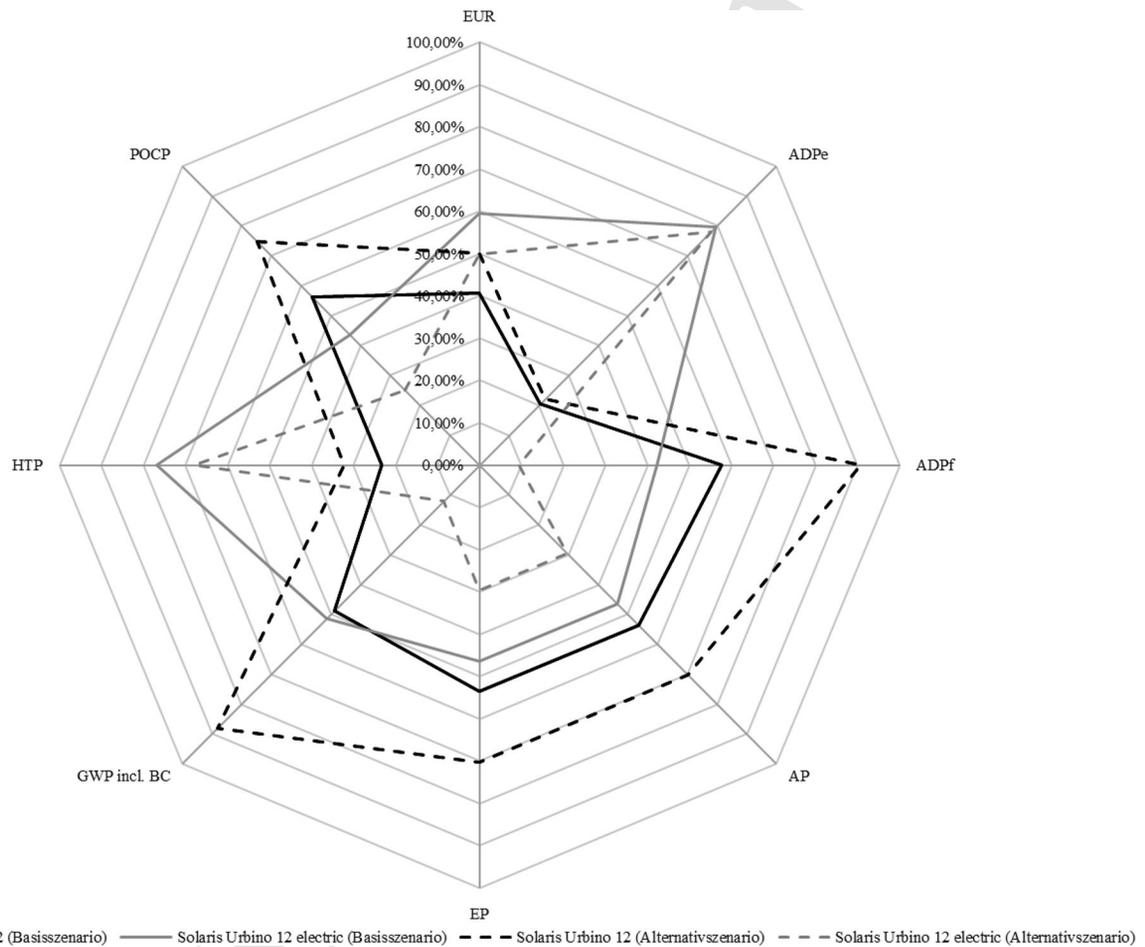
Im Basisszenario liegt einerseits der Elektrobuss für
 den abiotischen Ressourcenverbrauch fossiler Ressourcen
 und das photochemische Ozonbildungspotential vorn,
 andererseits schneidet der Diesellbus für den abiotischen
 Ressourcenverbrauch elementarer Ressourcen und das Hu-
 mantoxizitätspotential besser ab. Für die Versauerungs-,
 Eutrophierungs- und Treibhausgaspotentiale sind die Un-
 terschiede zwischen beiden Antriebsalternativen minimal.
 Es ist allerdings zu erwarten, dass die Umweltwirkungen
 im Basisszenario bis 2026 tendenziell eher niedriger aus-
 fallen werden, da der Ausbau der erneuerbaren Energien

uwf (2016)

319 **Tab. 5** Investitionszuschuss

	Anschaffungskosten (exkl. Tilgung)	Investitionszuschuss – Variante 1 (40 % der Mehrkosten für Bus, Batterien und Ladeinfrastruktur)	Investitionszuschuss – Variante 2 (40 % der Mehrkosten für Bus und Batterien, 80 % für die Ladeinfrastruktur)
323 Mehrkosten für Elektrobus und Batterien	503.027,63 EUR	– 201.211,05 EUR	– 201.211,05 EUR
324 Ladegerät	18.400,00 EUR	– 7360,00 EUR	– 14.720,00 EUR
325 Ladestation	33.600,00 EUR	– 13.440,00 EUR	– 26.880,00 EUR
326 Gesamt	555.027,63 EUR	– 222.011,05 EUR	– 242.811,05 EUR

327 (BMVI 2015; Staatsministerium für Wirtschaft, Arbeit und Verkehr 2016 und eigene Berechnungen)



358 **Abb. 3** Lebenszyklusbezogene Umweltwirkungen und Kosten des Elektrobusse im Vergleich zum Dieselbus; Kosten (EUR), abiotischer Ressourcenverbrauch elementarer Ressourcen (ADPe), abiotischer Ressourcenverbrauch fossiler Ressourcen (ADPf), Versauerungspotential (AP), Eutrophierungspotential (EP), Treibhausgaspotential inkl. biogenem Kohlenstoff, excl. Landnutzung (GWP incl. BC), Humantoxizitätspotential (HTP), photochemisches Ozonbildungspotenzial (POCP) (Eigene Darstellung)

363 kontinuierlich voranschreitet. Dagegen liegen im Alternativszenario die Emissionen und Umweltwirkungen des Elektrobusse in allen Kategorien außer dem abiotischen Ressourcenverbrauch elementarer Ressourcen und Humantoxizitätspotential deutlich niedriger. Aus gesamtwirtschaftlicher Sicht bietet eine Elektromobilitätsstrategie damit langfristig mannigfaltige Umweltentlastungspotenziale für global wirkende CO₂-Emissionen, lokal wirkende Emissionen an NO_x, PM, NMHC und Lärm sowie bedeutende

volkswirtschaftliche Potenziale zur Verringerung des nationalen Erdölbedarfs und Steigerung der Innovationskraft der deutschen Automobilindustrie. Es zeigt sich, dass die im Alternativszenario getroffenen Annahmen Bedingungen beschreiben, die erforderlich sind, um Elektromobilität innerhalb der nächsten 10 Jahre wettbewerbsfähig zu machen. Es wirkt sich positiv auf die Bilanz des Elektrobusse aus, wenn während der Nutzung 20 % weniger Strom für den Elektrobus benötigt wird und außerdem nicht wie bis-

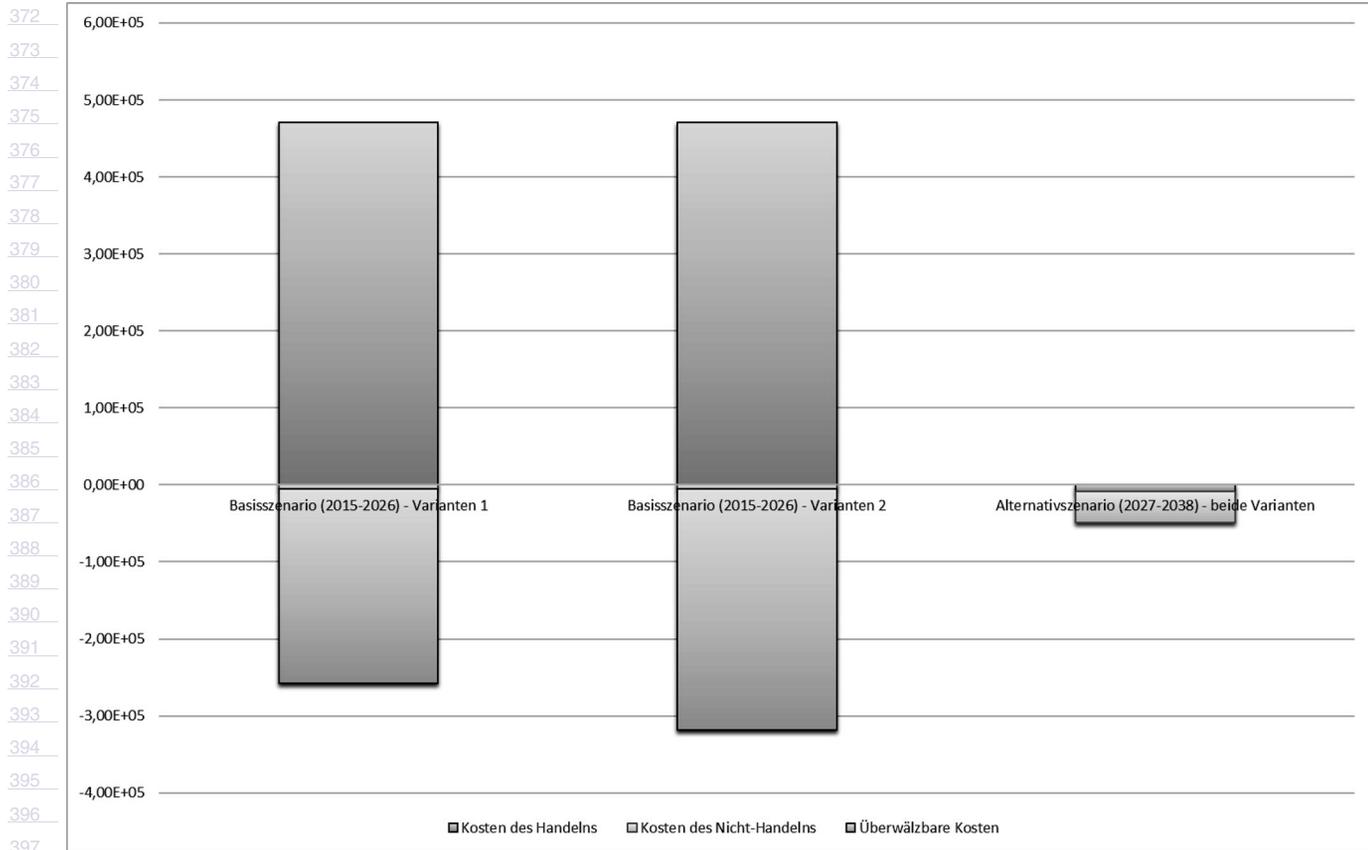


Abb. 4 Berechnung des ökonomisch-ökologischen Nettoeffekts (Eigene Darstellung)

her der städtische Strommix, sondern Windkraft (als Best Case) bezogen wird. Daneben werden auch zu erwartende Kostendegressionen die Beschaffung von Bus und Batterie begünstigen. In dieser Studie nehmen wir an, dass die Buspreis-Differenz 2027 50 % weniger betragen wird als 2015 und die Batterie-Kosten nach Inflation (3 % p.a.) einer deutlichen Kostendegression (13,5% p.a.) unterliegen. Schließlich werden Skaleneffekte beim Flottenausbau bei der Allokation von Kosten und Umweltwirkungen des Lademanagements berücksichtigt. Hier nehmen wir an, dass das Ladegerät nur alle 7 Tage pro Bus zum Ausbalancieren zum Einsatz kommt und die Ladestation-Infrastruktur entsprechend der Nutzung auf einen Elektrobus allozierbar ist (hier 4 Ladestationen auf 10 Busse).

Elektromobilität wird sich aber nicht per se auf der einzelwirtschaftlichen Ebene durchsetzen. Es gibt noch viel zu tun für die verschiedenen Akteure in Unternehmen, Politik, Forschung und Normung. Vielmehr werden die Verkehrsunternehmen den Ausbau der Elektromobilität in der Phase des Markthochlaufs nicht ohne finanzielle Unterstützung stemmen können. Im Folgenden werden wir daher die bisherigen Ergebnisse aus LCC und LCA in eine Weiterentwicklung der Methode des ökonomisch-ökologischen Nettoeffekts übertragen, um zu eruieren, in-

wiefern sich Elektromobilität aus der Perspektive eines ÖPNV-Unternehmens lohnt, und um Handlungsstrategien für die verschiedenen Entscheidungsträger ableiten zu können. Aus folgenden Gründen verwenden wir dabei den Treibhausgaspotential-Indikator exemplarisch zur Veranschaulichung. Zum einen ist er in Wissenschaft und Praxis vielbeachtet (vgl. CO₂-Fußabdruck). Zum anderen unterscheiden sich in diesem Fallbeispiel die Treibhausgasemissionen zwischen Diesel- und Elektrobus kaum, sodass eine einseitige Bevorzugung einer Antriebsalternative vermieden werden kann.

Die Berechnungen des ökonomisch-ökologischen Nettoeffekts in Abb. 4 und Tab. 6 umfassen folgende Entscheidungsalternativen: Substitution eines herkömmlichen Dieselmotors durch einen Elektrobus oder EUR6-Dieselmotors. Für beide Alternativen ergeben sich Konsequenzen der Aktion, Sanktionierung und Überwälzung. Die Konsequenzen der Aktion spiegeln die oben bereits für LCC und LCA dargestellten Kosten und Umweltwirkungen wider.

Wie lässt sich nun Forschungsfrage 2 zum Einfluss von bereits internalisierten und erwarteten, zu internalisierenden externen Sanktionskosten bewerten? Aufgrund des derzeitigen Strommixes unterscheiden sich die Sanktionskosten von Diesel- und Elektrobus kaum. Insgesamt wären im

uwf (2016)

425 **Tab. 6** Berechnung des ökonomisch-ökologischen Nettoeffekts

		Basisszenario (2015–2026)			Alternativszenario (2027–2038)			
		Solaris Urbi- no 12 electric	Solaris Urbi- no 12	Differenz	Solaris Urbi- no 12 electric	Solaris Urbi- no 12	Differenz	
Umweltwirkungen								
<i>Aktion (lebenszyklusbasierte Umweltwirkungen)</i>								
431	Nutzung	kg CO ₂ e	1,15E+06	1,13E+06	2,46E+04	9,36E+04	1,13E+06	- 1,04E+06
432	Herstellung + End-of- 433 Life	kg CO ₂ e	6,09E+04	3,51E+04	2,58E+04	6,09E+04	3,51E+04	2,58E+04
434	Infrastruktur	kg CO ₂ e	1,22E+04	5,56E+01	1,21E+04	3,48E+03	5,56E+01	3,43E+03
435	Summe	kg CO ₂ e	1,23E+06	1,17E+06	6,25E+04	1,58E+05	1,17E+06	- 1,01E+06
<i>Sanktionsrelevante Emissionen</i>								
437	CO ₂ -Emissionen	kg	1,07E+06	1,08E+06	- 1,17E+04	8,57E+04	1,08E+06	- 9,98E+05
438	NO _x -Emissionen	kg	9,49E+02	1,22E+03	- 2,72E+02	2,21E+02	1,22E+03	- 9,99E+02
439	PM-Emissionen	kg	6,44E+02	3,01E+02	3,44E+02	2,26E+02	3,01E+02	- 7,49E+01
440	NMHC-Emissionen	kg	1,81E+00	1,16E+00	6,47E-01	7,14E-01	1,16E+00	- 4,48E-01
441	Lärm-Emissionen	km mit dB > 50	0,00E+00	4,83E+05	- 4,83E+05	0,00E+00	4,83E+05	- 4,83E+05
Kosten								
<i>Aktion (lebenszyklusbasierte Kosten)</i>								
445	Nutzung (ohne Vers.)	EUR	7,97E+05	7,70E+05	2,65E+04	1,05E+06	1,10E+06	-4,43E+04
446	Herstellung + End-of- 447 Life	EUR	6,06E+05	2,24E+05	3,82E+05	2,54E+05	2,46E+05	8,35E+03
448	Infrastruktur	EUR	6,65E+04	4,78E+03	6,17E+04	3,37E+04	6,82E+03	2,69E+04
<i>Überwälzung von Aktionskosten</i>								
449	Betriebskosten ¹	EUR	-6,65E+04 (-1,06E+05)	-3,61E+04 (-3,61E+04)	-3,04E+04 (-7,03E+04)	0,00E+00 (0,00E+00)	0,00E+00 (0,00E+00)	0,00E+00 (0,00E+00)
451	Bus und Batterien ²	EUR	- 2,01E+05 (- 2,01E+05)	0,00E+00 (0,00E+00)	- 2,01E+05 (- 2,01E+05)	0,00E+00 (0,00E+00)	0,00E+00 (0,00E+00)	0,00E+00 (0,00E+00)
453	Ladegerät ²	EUR	- 7,36E+03 (- 1,47E+04)	0,00E+00 (0,00E+00)	- 7,36E+03 (- 1,47E+04)	0,00E+00 (0,00E+00)	0,00E+00 (0,00E+00)	0,00E+00 (0,00E+00)
455	Ladestation ²	EUR	- 1,34E+04 (- 2,69E+04)	0,00E+00 (0,00E+00)	- 1,34E+04 (- 2,69E+04)	0,00E+00 (0,00E+00)	0,00E+00 (0,00E+00)	0,00E+00 (0,00E+00)
<i>Sanktionierung</i>								
458	CO ₂ -Emissionen	EUR	3,75E+04	3,79E+04	- 4,08E+02	3,00E+03	3,79E+04	- 3,49E+04
459	NO _x -Emissionen	EUR	4,17E-03	5,37E-03	- 1,20E-03	9,72E-04	5,37E-03	- 4,40E-03
460	PM-Emissionen	EUR	5,61E-02	2,62E-02	2,99E-02	1,97E-02	2,62E-02	- 6,51E-03
461	NMHC-Emissionen	EUR	1,81E-06	1,16E-06	6,47E-07	7,14E-07	1,16E-06	- 4,48E-07
462	Lärm-Emissionen	EUR	0,00E+00 ⁴	4,83E+03	- 4,83E+03	0,00E+00	4,83E+03	- 4,83E+03
463	Versicherungsbeiträge	EUR	1,42E+04	1,42E+04	0,00E+00	2,02E+04	2,02E+04	0,00E+00
464	Steuern	EUR	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
465	Gesamtsumme der Kosten	EUR	1,23E+06 (1,17E+06)	1,02E+06 (1,02E+06)	2,13E+05 (1,52E+05)	1,36E+06 (1,36E+06)	1,41E+06 (1,41E+06)	-4,88E+04 (-4,88E+04)

466 Anmerkung: Die Berechnungen des Nettoeffekts beziehen sich auf eine Gesamtleistung von 1.000.000 vkm. Die Kosten stellen
 467 ¹ für die Betriebskostenerleichterung die ersten Angaben der Variante 1 (50 % EEG-Umlagen-Rabatt) und die Zahlen in Klammern der Variante 2
 468 (80 % EEG-Umlagen-Rabatt),
 469 ² für den Investitionszuschuss die ersten Angaben der Variante 1 (40 % allg.) und die Zahlen in Klammern der Variante 2 (40 % für Elektrobus und
 470 Batterien, 80 % für die Ladeinfrastruktur),
 471 ³ für die Summe der Kosten die ersten Angaben jeweils basierend auf den Varianten 1 und in Klammern jeweils basierend auf den Varianten 2
 472 dar.
 473 ⁴ Unter Einsatz von Winterreifen verursachen die Rollgeräusche des Elektrobusses 60 dB, die dadurch resultierenden, zu erwartenden Lärmkosten
 474 sind in diesen Berechnungen noch nicht berücksichtigt.
 475 (Eigene Berechnungen)

475
 476
 477

478 Basisszenario etwa 5000 EUR Emissionskosten durch den
479 Einsatz eines Elektrobusses einsparbar. Im Alternativszena-
480 rio ließe sich durch den Einsatz von erneuerbaren Energien
481 ein Kostenvorteil von etwa 40.000 EUR erwirken. Somit
482 zeigt sich, dass die aus den Deselemissionen resultieren-
483 den Sanktionskosten bei weitem nicht ausreichen, um die
484 Wahl einer aktiven Elektromobilitätsstrategie im Unterneh-
485 men zu befördern.

486 Die neuen Antriebssysteme, Fahrzeugkonzepte und
487 Ladeinfrastrukturen stellen für Unternehmen im Vergleich
488 zu bestehenden Systemen ein hohes Investitionsniveau und
489 -risiko dar. Tragfähige Geschäftsmodelle, Finanzierungs-
490 konzepte oder Anreizsysteme, die ein größeres Kunden-
491 interesse bewirken würden, sind noch nicht etabliert und
492 müssen zum Aufbau eines Leitmarktes erst noch bedarfs-
493 gerecht implementiert werden (Nationale Plattform Elek-
494 tromobilität 2014; DIFU 2015). Dies spiegelt sich auch in
495 der geringen Anzahl von derzeit ca. 25.000 zugelassenen
496 Elektrofahrzeugen wider (Kraftfahrzeugbundesamt 2016).
497 Die Zahl ist weit entfernt von der politischen Zielsetzung
498 von 1 Mio. Elektrofahrzeugen bis 2020 (Bundesregierung
499 2011). Im ÖPNV kommen bislang 25 Elektrobusse im
500 Rahmen von Forschungsprojekten deutschlandweit zum
501 Einsatz (BMVI und BMUB 2015). Vor diesem Hintergrund
502 greifen wir daher nun zur Beantwortung der Forschungs-
503 frage 3 für den Markthochlauf diskutierte staatliche Fi-
504 nanzierungshilfen in Form von Investitionszuschüssen und
505 Betriebskostenerleichterungen auf, während durch Kunden
506 finanzierte Fahrpreisanpassungen unterbleiben sollten, um
507 ein Abwandern zum umwelt- und klimaschädlicheren In-
508 dividualverkehr zu verhindern (Deutsch u. a. 2016). Diese
509 Überwälzungsoptionen beziehen sich dabei auf Aktions-
510 kosten, nicht aber Sanktionskosten.

511 Sowohl für die Investitionszuschüsse als auch Be-
512 triebkostenerleichterungen berechnen wir 2 Varianten.
513 Ein Investitionszuschuss führt zu Einsparungen von et-
514 wa 222.000 EUR (Variante 1: 40 % der Mehrkosten für
515 Elektrobuss, Batterien und Ladeinfrastruktur) bzw. etwa
516 243.000 EUR (Variante 2: 40 % der Mehrkosten für
517 Elektrobuss und Batterie, 80 % der Mehrkosten für die
518 Ladeinfrastruktur). Betriebskostenerleichterungen sind so-
519 wohl für Diesel- als auch Elektrobuss zu berücksichtigen.
520 Variante 1 (50 % Ökosteuerrabatt für Diesel, 50 % EEG-
521 Umlagenrabatt für Strom) bedingt einen Nettovorteil i.
522 H. v. etwa 34.000 EUR für den Elektrobuss, Variante 2
523 (50 % Ökosteuerrabatt für Diesel, 80 % EEG-Umlagen-
524 Rabatt für Strom) etwa 70.000 EUR. Somit würde die
525 Finanzierungslücke inkl. Investitionszuschüssen und Be-
526 triebkostenerleichterungen weiterhin etwa 213.000 EUR
527 (jeweils für die ersten Varianten) bzw. 152.000 EUR (je-
528 weils für die zweiten Varianten) betragen.

529 In der Summe ließe sich die Eigenleistung der ÖPNV-
530 Unternehmen bei der Beschaffung von Elektrobussen wäh-

rend des Markthochlaufs durch verschiedene Sanktions-
und Überwälzungsoptionen von ca. 470.000 EUR, d.h. ca.
20 %, auf bis zu ca. 152.000 EUR, d.h. ca. 7 %, sen-
ken. Sollten sich die Akteure in ÖPNV und Politik nicht
auf weitere investitionsfördernde Maßnahmen einigen kön-
nen, wäre nachzeitigem Stand zumindest vorüberge-
hend ein Ticketaufschlag im Rahmen einer aktiven, ökolo-
gieorientierten Produktdifferenzierung erforderlich, um die-
se Mehrkosten stemmen zu können. Dies erfordert wie-
derum eine Anpassung des Personenbeförderungsgesetzes
und transparente und glaubwürdige Ticketpreisgestaltung,
letztere im Zusammenhang mit einer aktiven, ökologieori-
entierten Elektromobilitätsstrategie den Bezug von Strom
aus erneuerbaren Energien. Andernfalls wäre sie der In-
vestitionsstrategie in Dieselmobilität auch ökologisch nicht
vorzuziehen und somit zumindest in der kurzen Frist eine
den weiteren Netzausbau der erneuerbaren Energien abwar-
tende Mischstrategie.

Um die aktuell noch zu hohen mit Elektromobilität as-
soziierten Umweltwirkungen zu reduzieren, sind folgende
Maßnahmen auf verschiedenen Entscheidungsebenen erfor-
derlich.

Auf ÖPNV-Unternehmens-Ebene sind ein zeitnahe Be-
zug von CO₂-frei zertifiziertem Strom aus erneuerbaren
Energien und Verbandstätigkeiten zur Promovierung von
Betriebskostenerleichterungen, Investitionszuschüssen und
ggf. weiteren Finanzierungshilfen zielführend. Auch über-
nimmt der ÖPNV für die positive Wahrnehmung von Elek-
tromobilität eine besondere Verantwortung: viele Menschen
kommen über den Einsatz von Elektro- und Hybridbus-
sen im Linienverkehr erstmalig mit den neuen Antriebs-
konzepten in Berührung. In Forschungsk Kooperationen kön-
nen ÖPNV-Unternehmen Verbesserungen im Hinblick auf
Strombedarf und Batterienachladung während der Nutzung
sowie End-of-Life-Potentiale für Bus und Batterie untersu-
chen. In Technologiepartnerschaften mit Lieferanten kön-
nen sie gemeinsame Skaleneffekte und somit Kostensen-
kungspotentiale über den gesamten Lebenszyklus erschlie-
ßen. Auch bietet es sich an, bei der Standardisierung bspw.
der Ladeinfrastruktur bei gleichzeitig technikoffener Ge-
staltung (Zistel 2015) oder Monetarisierung von Umwelt-
wirkungen (ISO 2016) mitzuwirken.

Politische Entscheidungsträger auf Kommunal-, Lan-
des- als auch Bundesebene könnten zur tatsächlichen
Reduktion der Umweltwirkungen Förderungen im Zusam-
menhang mit dem Ausbau von Elektromobilität bewusst
an den Ausbau erneuerbarer Energien koppeln, das Perso-
nenbeförderungsgesetz im Hinblick auf mögliche Ticke-
taufschläge anpassen und konkrete Finanzierungshilfen zur
Unterstützung des Markthochlaufs von Elektrobussen ent-
wickeln. Damit stellt die Förderung von Elektromobilität im
ÖPNV eine wirksame Maßnahme zur Einhaltung des
Luftreinhalteplans aus dem Jahr 2011 (Umweltamt Dresden

531 2011) dar. Allerdings sollten Finanzierungshilfen an konkre-
532 krete Bedingungen geknüpft werden, die die tatsächliche
533 Nutzung, nicht nur die Beschaffung eines lärm- und emis-
534 sionsärmeren Elektrobusses fördern. Hier bieten sich z. B.
535 Auflagen zur Verschrottung emissionsintensiverer Modelle
536 (BAFA 2015; KFZ Kompass 2015; Mortsiefer 2015) sowie
537 zum Bezug von Strom aus erneuerbaren Energien an.

540 5 Schlussfolgerungen

541
542 Produkte und Prozesse werden zunehmend über den gesam-
543 ten Lebensweg auf ihre Kosten und Umweltwirkungen un-
544 tersucht. Im Bereich der Elektromobilität gibt es hier zwar
545 ökonomisch-ökologische Begleitforschung, allerdings noch
546 nicht in Form eines mehrdimensionalen, integrierten Be-
547 trachtungsansatzes, der alle entscheidungsrelevanten Exter-
548 nalitäten berücksichtigt.

549 In dieser Fallstudie wird am Beispiel des öffentlichen
550 Busverkehrs der Stadt Dresden untersucht, unter welchen
551 Voraussetzungen ein Elektrobus mit einem EUR6-Diesel-
552 bus ökologisch und ökonomisch wettbewerbsfähig ist. Zu
553 diesem Zweck haben wir eine kombinierte ökologisch-öko-
554 nomische Bewertung auf Basis der beiden lebenszyklusori-
555 entierten Methoden LCA und LCC durchgeführt. Erstere
556 schätzt die zumeist nicht internalisierten Umweltwirkun-
557 gen, letztere ermittelt in ihrer ökologischen Ausprägung
558 neben den tatsächlichen Kosten auch die über den Entschei-
559 dungshorizont internalisierbaren externen Umweltkosten.

560 Die LCA- und LCC-Ergebnisse zeigen, dass im langfris-
561 tigen Alternativszenario, nicht aber im kurzfristigen Basis-
562 szenario, die Investitionsstrategie in Elektromobilität öko-
563 logisch und ökonomisch wettbewerbsfähig ist. Die reife Die-
564 selantriebstechnologie besticht kurzfristig durch niedrigere
565 Kosten und Umweltwirkungen für Herstellung und Infra-
566 struktur, verursacht aber hohe Umweltwirkungen bei der
567 Dieselherstellung und -verbrennung. Die sich noch entwik-
568 kelnde Elektroantriebstechnologie wiederum kann zumin-
569 dest im Basisszenario die hohen Kosten und Umweltwir-
570 kungen für Herstellung und Infrastruktur in der Nutzungs-
571 phase nicht ausgleichen. Mit der Gegenüberstellung von
572 Basis- und Alternativszenario konnten wir verdeutlichen,
573 dass generelle Aussagen dazu, dass sich Elektromobilität
574 ökologisch wie ökonomisch nicht lohnen würde, wie sie
575 immer wieder auch in den nicht-wissenschaftlichen Medi-
576 en publiziert werden (z. B. in Tuil 2015), nicht zielfüh-
577 rend sind. Der Batterieantrieb ist vielmehr noch keine reife
578 Technologie, bei der für die nächsten Jahre noch enormer
579 Spielraum bei der Technologie- und Preisentwicklung zu
580 erwarten ist.

581 Während LCA und LCC hilfreich sind, für die un-
582 terschiedlichen Entscheidungsträger ökologieorientierte
583 Handlungsstrategien abzuleiten, haben wir diese im öko-
584 nomisch-ökologischen Nettoeffekt aggregiert und zusätzlich

den Sanktions- und Überwälzungsoptionen gegenüber-
gestellt, um den Innovations- und Investitionsbedarf für
Entscheidungsträger in Unternehmen, Politik, Forschung
und Normung ableiten zu können.

Die hierzu betrachteten Emissionskosten und investiti-
onsfördernden Betriebskostenerleichterungen und Zuschüs-
se reichen nicht aus, um die Finanzierungslücke der Elek-
tromobilität zu schließen. In der Summe ließe sich die Ei-
genleistung der ÖPNV-Unternehmen bei der Beschaffung
von Elektrobussen während des Markthochlaufs durch ver-
schiedene Sanktions- und Überwälzungsoptionen von ca.
470.000 EUR, d.h. ca. 20 %, auf bis zu ca. 152.000 EUR,
d.h. ca. 7 %, senken. Damit Elektromobilität im Sinne ei-
ner aktiven, ökologieorientierten Investitionsstrategie aber
auch ökologisch konkurrenzfähig im Vergleich zur EUR6-
Dieselmobilität ist, sind konkrete nutzungsfördernde Aufla-
gen vonnöten wie bspw. die Verschrottung emissionsinten-
siverer Modelle und der Bezug von Strom aus erneuerba-
ren Energien. Weiteren Handlungsbedarf für die verschiede-
nen Akteure in Verkehrs- und Zuliefererunternehmen, For-
schung, Politik und Normung haben wir eingehend in der
Ergebnisdarstellung diskutiert.

Zukünftig werden mehrdimensionale, integrierte öko-
nomisch-ökologische Bewertungen weiterhin von Nutzen
sein, um den sich verändernden Rahmenbedingungen in
Entscheidungsprozessen Rechnung tragen zu können. Im
Hinblick auf den ökonomisch-ökologischen Nettoeffekt
wird in naher Zukunft eine methodische Weiterentwicklung
der Begriffe und Gruppierungen in Analogie zur derzeit
erarbeiteten ISO14008 (ISO 2016) erfolgen. Daneben be-
steht konkreter Forschungsbedarf bei der Optimierung des
Stromverbrauchs und der Batterienachladung während der
Nutzung sowie End-of-Life-Optionen für Bus und Bat-
terie. Weiterhin kann es zukünftig sinnvoll sein, soziale
Externalitäten in den Bewertungen zu berücksichtigen, um
bspw. auch Gesundheits-, Unfall- und Katastrophenrisiken
abzubilden.

Literatur

- AG Energiebilanzen (2015) Energiebilanz der Bundesrepublik Deutsch-
land 2013. <http://www.ag-energiebilanzen.de/7-0-Bilanzen-1990-2013.html>. Zugegriffen: 15 Jan 2016
- BAFA (2015) Umweltprämie. <http://www.bafa.de/bafa/de/wirtschaftsfoerderung/umweltpraemie/index.html>. Zugegriffen: 11 Jan 2016
- Baitz M, Albrecht S, Brauner E et al (2013) LCA's theory and practice: like ebony and ivory living in perfect harmony? *Int J Life Cycle Assess* 18(1):5–13. doi:10.1007/s11367-012-0476-x
- Bayern Innovativ, Saena (2016) Schaufenster Elektromobilität: Schau-
fenster. <http://www.elektromobilitaet-verbindet.de/schaufenster.html>. Zugegriffen: 15 Jan 2016
- Bierer A, Götze U, Meynerts L, Sygulla R (2015) Integrating life cycle costing and life cycle assessment using extended material flow cost accounting. *J Clean Prod* 108(Part B):1289–1301. doi:10.1016/j.jclepro.2014.08.036

- 584 BMJV (2015) Erneuerbare-Energien-Gesetz vom 21. Juli 2014 (BGBl.
585 I S. 1066), das zuletzt durch Artikel 2 Absatz 10 des Gesetzes
586 vom 21. Dezember 2015 (BGBl. I S. 2498) geändert worden ist
587 BMUB (2016) Elektrobusse sind wichtig für nachhaltige Mobilität:
588 Neues BMUB-Förderprogramm für Elektrobusse. [http://www.
589 bmub.bund.de/presse/pressemitteilungen/pm/artikel/elektrobusse-
590 sind-wichtig-fuer-nachhaltige-mobilitaet/](http://www.bmub.bund.de/presse/pressemitteilungen/pm/artikel/elektrobusse-sind-wichtig-fuer-nachhaltige-mobilitaet/). Zugegriffen: 8 Mar
591 2016
592 BMUB, UBA (2011) Umweltwirtschaftsbericht 2011: Daten und Fak-
593 ten für Deutschland. BMUB, UBA, Berlin
594 BMVI (2016) Elektromobilität. [http://www.bmvi.de/DE/
595 VerkehrUndMobilitaet/DigitalUndMobil/Elektromobilitaet/
596 elektromobilitaet_node.html](http://www.bmvi.de/DE/VerkehrUndMobilitaet/DigitalUndMobil/Elektromobilitaet/elektromobilitaet_node.html). Zugegriffen: 10 Jan 2016
597 BMVI (2015) Förderrichtlinie Elektromobilität. BMVI, Berlin
598 BMVI und BMUB (2015) Hybrid- und Elektrobus-Projekte in Deutsch-
599 land: Statusbericht 2014 der Arbeitsgruppe Innovative Antriebe
600 Bus. BMVI, BMUB, Berlin
601 Bundesregierung (2009) Nationaler Entwicklungsplan Elektromobili-
602 tät der Bundesregierung. Publikationsversand der Bundesregie-
603 rung, Berlin
604 Bundesregierung (2011) Regierungsprogramm Elektromobilität vom
605 18.05.2011. Publikationsversand der Bundesregierung, Berlin
606 Deutsch V, Schmitz J, Schmitz M, Zistel M (2016) Elektromobilität im
607 ÖPNV weiter fördern. VDV, Köln
608 Deutsches Institut für Urbanistik (2015) Elektromobilität in der kom-
609 munalen Umsetzung: Kommunale Strategien und planerische In-
610 strumente. difu, Berlin
611 DVB (2014) Geschäftsbericht 2013. WDS Pertermann GmbH, Dres-
612 den
613 Europäische Kommission (2001) Empfehlung der Kommission vom
614 30. Mai 2001 zur Berücksichtigung von Umweltaspekten in Jah-
615 resabschluss und Lagebericht von Unternehmen: Ausweis, Be-
616 wertung und Offenlegung (2001/453/EG). EUR-Lex, Brüssel
617 Europäische Union (2009) Richtlinie 2009/33/EG des Europäischen
618 Parlaments und des Rates vom 23. April 2009 über die Förde-
619 rung sauberer und energieeffizienter Straßenfahrzeuge. EUR-Lex,
620 Brüssel
621 Funke SÁ, Gauger JF (2015) Elektrische Linienbusse – vom Genera-
622 listen zum Spezialisten: Entwicklung eines Leitfadens zur Integ-
623 ration elektrischer Linienbusse in den öffentlichen Nahverkehr.
624 *Nahverk* 33(3):19–22
625 García SJA, López MJM, Lumbreras MJ et al (2013) Impact of Spanish
626 electricity mix, over the period 2008–2030, on the life cycle en-
627 ergy consumption and GHG emissions of electric, hybrid diesel-
628 electric, fuel cell hybrid and diesel bus of the Madrid transporta-
629 tion system. *Energy Convers Manag* 74(Oct 2013):332–343
630 Giering K (2013) Was kostet uns der Lärm? [http://www.umweltdaten.
631 landsh.de/public/umgebungslaerm/ulr/doc/Giering_Was_kostet_
632 uns_der_Laerm.pdf](http://www.umweltdaten.landsh.de/public/umgebungslaerm/ulr/doc/Giering_Was_kostet_uns_der_Laerm.pdf). Zugegriffen: 19 Dez 2015
633 Graedel T et al (1994) Industrial ecology: Definition and implementati-
634 on. In: Socolow R, Andrews C, Berkhout F (Hrsg) *Industrial eco-
635 logy and global change*. Cambridge University Press, Cambridge,
636 S 23–42
637 Günther E (1994) Ökologieorientiertes Controlling: Konzeption eines
638 Systems zur ökologieorientierten Steuerung und empirische Vali-
639 dierung. Vahlen, München
640 Günther E (2008) Ökologieorientiertes Management: Um-(weltorien-
641 tiert) Denken in der BWL. Lucius & Lucius, Stuttgart
642 Günther E, Jasch C, Schmidt M et al (2015) Material flow cost account-
643 ing: Looking back and ahead. *J Clean Prod* 108(PartB):1249–1254.
644 doi:10.1016/j.jclepro.2015.10.018
645 Heijungs R, Settanni E, Guinée J (2013) Toward a computational struc-
646 ture for life cycle sustainability analysis: Unifying LCA and LCC.
647 *Int J Life Cycle Assess* 18(9):1722–1733. doi:10.1007/s11367-
648 012-0461-4
649 Hoffman AJ, Corbett CJ, Joglekar N, Wells P (2014) Industri-
650 al Ecology as a source of competitive advantage. *J Ind Ecol*
651 18(5):597–602. doi:10.1111/jiec.12196
652 Höhne C (2009) Life Cycle Costing: Systematisierung bestehender
653 Studien. *Dresdner Beitr Zur Lehre Betrieblichen Umweltökon*
654 37(2009):1–128
655 Hoogmartens R, Van Passel S, Van Acker K, Dubois M (2014)
656 Bridging the gap between LCA, LCC and CBA as sustaina-
657 bility assessment tools. *Environ Impact Assess Rev* 48(Sep
658 2014):27–33. doi:10.1016/j.eiar.2014.05.001
659 Hunkeler D, Lichtenvort K, Rebitzer G (2008) *Environmental Life Cy-
660 cle Costing*. Taylor and Francis, Hoboken
661 Ilg P, Höhne C, Günther E (2016) High-performance materials in in-
662 frastructure: A review of applied life cycle costing and its drivers
663 – the case of fiber-reinforced composites. *J Clean Prod* 112(Part
664 1):926–945. doi:10.1016/j.jclepro.2015.07.051
665 INFRAS (2007) Externe Kosten des Verkehrs in Deutschland: Aufda-
666 tierung 2005. INFRAS, Zürich
667 ISO (2006a) *Environmental management: Life cycle assessment –
668 Principles and framework (ISO 14040: 2006)*. Beuth, Berlin
669 ISO (2006b) *Environmental management: Life cycle assessment – Re-
670 quirements and guidelines (ISO 14044:2006)*. Beuth, Berlin
671 ISO (2016) *ISO 14008: Monetary Valuation of environmental im-
672 pacts from specific emissions and use of natural resources
673 (ISO/TC 207/SC 1)*. [https://committee.iso.org/sites/tc207sc1/
674 home/projects/ongoing/iso-14008.html](https://committee.iso.org/sites/tc207sc1/home/projects/ongoing/iso-14008.html). Zugegriffen: 14 Jan 2016
675 Kompass KFZ (2015) Abwrackprämie. [https://www.kfzkompass.de/
676 autokauf/abwrackpraemie/](https://www.kfzkompass.de/autokauf/abwrackpraemie/). Zugegriffen: 11 Jan 2016
677 Klöpffer W (2008) Life cycle sustainability assessment of products. *Int
678 J Life Cycle Assess* 13(2):89–95. doi:10.1065/lca2008.02.376
679 Klöpffer W, Curran MA (2014) How many case studies should we
680 publish, if any? *Int J Life Cycle Assess* 19(1):1–2. doi:10.1007/
681 s11367-013-0667-0
682 Kraftfahrzeugbundesamt (2016) Fahrzeugbestand am 1. Januar 2016.
683 [http://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/Ueberblick/
684 2016_b_barometer.html?nn=1133288](http://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/Ueberblick/2016_b_barometer.html?nn=1133288). Zugegriffen: 15 Jan 2016
685 Kurczveil T, Schnieder L, Schnieder E (2015) Optimierung des Ener-
686 giemanagements induktiv geladener Busse unter Berücksichti-
687 gung betrieblicher und verkehrlicher Randbedingungen. *Straßen-
688 verkehrstechnik* 59(4):231–237
689 Lange J, Otto T (2015) BeSystO Entscheidungsmodell für den ÖPNV
690 mit Elektrobusen: Werkzeug zur Prüfung und Bewertung eines
691 praktikablen und wirtschaftlichen Einsatzes von E-Bussen im ÖP-
692 NV. *Nahverk* 33(6):16–21
693 Lifset R (2013) Raising the bar for symbiosis, life cycle assess-
694 ment, and material flow analysis case studies. *J Ind Ecol* 17(1):1
695 doi:10.1111/jiec.12003
696 Lifset R, Grädel TE (2002) *Industrial ecology: goals and definitions*.
697 In: Elgar E (Hrsg) *Ayres RU, Ayres LW. A handbook of indus-
698 trial ecology*. Edward Elgar, Cheltenham UK, Northampton MA,
699 S 3–15
700 Meier zu Köcker G, Künzel M, Nerger M et al (2015) Forschungsat-
701 las Elektromobilität: Prioritäre Forschungsthemen und regionale
702 Spezialisierung in Deutschland. *Institute for Innovation and Tech-
703 nology in der VDI/VDE-IT, Berlin*
704 Mortsiefer H (2015) undesländer fordern mehr Förderung für Elek-
705 troautos. In: *Tagesspiegel*. [http://www.tagesspiegel.de/wirtschaft/
706 nach-dem-vw-skandal-bundeslaender-fordern-mehr-foerderung-
707 fuer-elektroautos/12471334.html](http://www.tagesspiegel.de/wirtschaft/nach-dem-vw-skandal-bundeslaender-fordern-mehr-foerderung-fuer-elektroautos/12471334.html). Zugegriffen: 11 Jan 2016
708 Müller-Hellmann A, Thurm S (2015) Batteriebusse im ÖPNV: Grund-
709 sätzliche Überlegungen und Demonstrationsprojekt in Oberhau-
710 sen. *Nahverk* 33:30–34
711 Nationale Plattform Elektromobilität (2014) *Fortschrittsbericht 2014:
712 Bilanz der Marktvorbereitung*. Gemeinsame Geschäftsstelle Elek-
713 tromobilität der Bundesregierung, Berlin
714 Noel L, McCormack R (2014) A cost benefit analysis of a V2G-
715 capable electric school bus compared to a traditional diesel
716 school bus. *Appl Energy* 126(Aug 2014):246–255. doi:10.1016/j.
717 apenergy.2014.04.009
718 Öchsner T (2015) *Bahnindustrie: Leise Sohlen für laute Züge*. In: *Süd-
719 deutsche*. <http://www.sueddeutsche.de/wirtschaft/bahnindustrie->

uwf (2016)

- 637 [leise-sohlen-fuer-laute-zuege-1.2699970](#). Zugegriffen: 11 Jan
638 2016
- 639 Peters A, Doll C, Plötz P (2013) Konzepte der Elektromobilität: Ihre
640 Bedeutung für Wirtschaft, Gesellschaft und Umwelt. Edition Sig-
641 ma, Frankfurt
- 642 Pizzol M, Weidema B, Brandão M, Osset P (2015) Monetary valuat-
643 ion in life cycle assessment: A review. *J Clean Prod* 86:170–179.
644 doi:10.1016/j.jclepro.2014.08.007
- 645 Rüdenauer I, Dross M, Eberle U et al (2007) Costs and benefits of
646 green public procurement in Europe: General recommendations.
647 Öko-Institut, Freiburg
- 648 Staatsministerium für Wirtschaft, Arbeit und Verkehr (2016) ÖPNV:
649 Landesinvestitionsprogramm 2015 (Mitteinplanung). [http://](http://www.verkehr.sachsen.de/931.html)
650 www.verkehr.sachsen.de/931.html. Zugegriffen: 8 Mar 2016
- 651 Statistisches Bundesamt (2013) Verkehr auf einen Blick. Statistisches
652 Bundesamt, Wiesbaden
- 653 Steen B, Hoppe H, Hunkeler D, et al (2008) Integrating external effects
654 into life cycle costing. In: Hunkeler D, Lichtenvort K, Rebitzer
655 G (Hrsg) Environmental life cycle costing. Taylor Francis, New
656 York, NY, S 59–76
- 657 Swarr TE, Hunkeler D, Klöpffer W et al (2011) Environmental life
658 cycle costing: A code of practice. SETAC, Pensacola FL
- 659 Tuil M (2015) Zwiespältige Umweltbilanz: E-Autos – dreckiger
660 als gedacht. In: Süddeutsche. [http://www.sueddeutsche.de/auto/](http://www.sueddeutsche.de/auto/zwiespaeltige-umweltbilanz-e-autos-dreckiger-als-gedacht-1.2748493)
661 [zwiespaeltige-umweltbilanz-e-autos-dreckiger-als-gedacht-1.](http://www.sueddeutsche.de/auto/zwiespaeltige-umweltbilanz-e-autos-dreckiger-als-gedacht-1.2748493)
662 [2748493](http://www.sueddeutsche.de/auto/zwiespaeltige-umweltbilanz-e-autos-dreckiger-als-gedacht-1.2748493). Zugegriffen: 19 Jan 2016
- 663 Umweltamt Dresden (2009) Masterplan Lärminderung für die Lan-
664 deshauptstadt Dresden. Umweltamt Dresden, Dresden
- 665 Umweltamt Dresden (2011) Luftreinhalteplan für die Landeshaupt-
666 stadt Dresden 2011. Umweltamt Dresden, Dresden
- 667 Whiteman G, Walker B, Perego P (2013) Planetary boundaries: Eco-
668 logical foundations for corporate sustainability. *J Manag Stud*
669 50(2):307–336. doi:10.1111/j.1467-6486.2012.01073.x
- 670 Zistel M (2015) Überlegungen zu einem Finanzierungs- und Förder-
671 konzept für den Markthochlauf Elektrobuss in Deutschland. VDV,
672 Köln



Nadine May



Christoph Scope



Ramona Rieckhof



Edeltraud Günther

Fragen und Hinweise an den Autor

1 Seite 3

Bitte prüfen Sie die Formulierung 'Für die vorliegende Untersuchung ist insofern eine methodische Adaption angewandt, als dass der Kostenaufstellung aus der ökologieorientierten LCC auch einzelne entscheidungsrelevante Wirkungskategorien aus der LCA im ökonomisch-ökologischen Nettoeffekt dargestellt werden.'