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

von externen Effekten und Überwälzungsmöglichkeiten im Rahmen des ökonomisch-ökologischen Nettoeffekts nachhaltigere Entscheidungen unterstützen kann.

In Kapitel 2 werden der Forschungsgegenstand und die Forschungsfragen abgeleitet, in Kapitel 3 wird die Vorgehensweise der Fallstudie vertieft, während in Kapitel 4 die Ergebnisse diskutiert werden. Die Schlussfolgerungen schließen sich in Kapitel 5 an.

2 Forschungsgegenstand und -fragen

LCC und LCA berücksichtigen alle Lebenszyklusphasen sowie antizipierte externe Effekte¹, die im Planungshorizont entscheidungsrelevant werden könnten (Hunkeler et al. 2008; Swarr et al. 2011). In diesem Zusammenhang erarbeitet die Arbeitsgruppe TC 207 derzeit mit der ISO 14008 ein einheitliches Rahmenwerk zur monetären Bewertung von Emissionen und natürlichen Ressourcen, um eine gemeinsame Sprache und Begrifflichkeiten für eine transparentere Vorgehensweise zu schaffen. Die Norm, welche Ende 2018 erwartet wird, richtet sich dabei an die verschiedenen Akteure in Politik, Forschung und Unternehmen, die sich vermehrt mit monetärer Bewertung befassen (ISO 2016).

In diesem Artikel werden exemplarisch zwei Handlungsalternativen eines Entscheidungsträgers im Verkehrssektor mittels LCC und LCA bewertet und im ökonomisch-ökologischen Nettoeffekt aggregiert. Die Wahl fiel auf den Verkehrssektor, weil er von hoher Bedeutung für die Lebensqualität und Wirtschaftsleistung Deutschlands ist (Statistisches Bundesamt 2013), aber umfangreiche externe Effekte verursacht (Peters u. a. 2013; AG Energiebilanzen 2015). Letztere summierten sich 2005 auf 80,4 Mrd. Euro und beinhalten zu 50 % Umweltfolgeschäden (BMUB und Umweltbundesamt (UBA) 2011; INFRAS 2007). Mit dem 2009 vorgestellten Nationalen Entwicklungsplan Elektromobilität (Bundesregierung 2009) wurde in Deutschland ein Transformationsprozess eingeleitet, der den straßenbezogenen Personen- und Güterverkehr mittel- bis langfristig auf ein nachhaltigeres Fundament stellen soll. Mehr als zwei Milliarden Euro an Fördermitteln flossen deshalb in den vergangenen sieben Jahren in Forschungs- und Demonstrationsprojekte, um innovative Fahrzeugkonzepte und -komponenten zu entwickeln und die Markteinführung von Elektrofahrzeugen zu unterstützen (Bundesregierung 2009; Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur [BMVI] 2016).

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

Gemäß dem Regierungsprogramm Elektromobilität wurden in den bisher in Deutschland geförderten Forschungsprojekten² nicht nur technologische, sondern auch gesellschaftspolitische und ökologische Aspekte von Elektromobilität untersucht (Bundesregierung 2011). Dennoch liegt der Schwerpunkt auf ingenieur-, verkehrs- und energiewissenschaftlicher Forschung sowohl beim motorisierten 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 Elektrobussen assoziierten Umwelt- und Kostenaspekten findet zwar vereinzelt in Begleitforschungsprojekten (BMVI und Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit [BMUB] 2015) und privatwirtschaftlichen Servicedienstleistungen (Lange und Otto 2015) statt, ein mehrdimensionaler, integrierter Betrachtungsansatz, der alle relevanten Externalitäten und Überwälzungsmöglichkeiten berücksichtigt, ist jedoch nicht bekannt.

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

1. Unter welchen Bedingungen ist die Anschaffung eines reinen Elektrobusses einschließlich der Ladeinfrastruktur wettbewerbsfähig im Vergleich zu einem EUR6-Dieselsbus mit Verbrennungsmotor (Basis- sowie Alternativszenario)?
2. Welchen Einfluss haben bereits internalisierte sowie erwartete, zu internalisierende externe Sanktionskosten auf die Ergebnisse?
3. Welchen Einfluss haben Finanzierungshilfen als Möglichkeiten 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-ökologischen Nettoeffekts aggregiert. Dieser dient Entscheidungsträgern in Unternehmen, Politik und Forschung gleichsam

² Zum Beispiel „Begleitforschung“ der Modellregionen Elektromobilität 2014 in den Themenfeldern „Stadtentwicklung und Verkehrsplanung“ 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 Elektromobilität im ÖPNV initiiert: „Elektrobuslinie 79“, „Pilotlinie 64“, „Schnellladesysteme für Elektromobilität im ÖPNV“.

Tab. 1 Angewandtes Untersuchungsdesign

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
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
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
Datenursprung	Unternehmensdaten wurden für Mengen- und Kostenangaben herangezogen, Hintergrunddaten basieren auf generischen Prozessdaten insb. aus EcoInvent 3.1

als Kommunikations- und Entscheidungsgrundlage für die Entscheidungsfindung. Damit stellt unsere Forschung fundierte Handlungsempfehlungen und Argumentationshilfen bereit und schafft Voraussetzungen für eine zukünftig stärkere Berücksichtigung von Umweltaspekten in Nachhaltigkeitsstrategien zum ÖPNV.

3 Vorgehensweise

Für alle Lebenszyklusphasen von der Wiege bis zur Bahre (engl. cradle-to-grave) werden mit Hilfe von LCA und LCC signifikante Umweltwirkungen und Kosten identifiziert und bewertet. Zur verdichteten, entscheidungsorientierten Ergebnisdarstellung dient eine Adaption des sogenannten ökonomisch-ökologischen Nettoeffekts.

Während sich LCA für die Abbildung von ökologischen externen Effekten eignet, bietet sich LCC für die ökonomische Perspektive an (Hoogmartens et al. 2014; Kurczveil et al. 2015). LCA umfasst eine systematische Bewertung von Umweltwirkungen eines Produktsystems über dessen gesamten Lebenszyklus (ISO 14040: 2006; ISO 14044: 2006). LCC evaluiert hingegen alle (direkten und indirekten) Kosten und Erlöse, d. h. Cashflows, die innerhalb des definierten Lebenszyklus für die Investitionsentscheidung als entscheidungsrelevant einzustufen sind (Höhne 2009; Ilg et al. 2016). Die für LCA einschlägigen Normen (ISO 14040: 2006; ISO 14044: 2006) empfehlen eine vierstufige Vorgehensweise, welche um die Kostenerfassung, -modellierung und -analyse der LCC ergänzt wird:

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

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 ökologieorientierten 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

⁴ Um Umweltwirkungen und Kosten nicht auf die Zukunft zu verschieben, wurde der Empfehlung 2001/453/EG folgend eine Bewertung zum Barwert mit 0 % als Idealwert festgelegt (Europäische Kommission 2001).

Tab. 2 Mengen- und Kostenbilanz

	Mengenbilanz					Kostenbilanz				
	Solaris Urbino 12	Solaris Urbino 12 electric	Solaris Urbino 12	Solaris Urbino 12 electric	Einh.	Solaris Urbino 12	Solaris Urbino 12 electric	Solaris Urbino 12	Solaris Urbino 12 electric	Einh.
	Basisszenario		Alternativszenario			Basisszenario		Alternativszenario		
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
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
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

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

Tab. 3 Berücksichtigte Wirkungs- und Kostenindikatoren

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

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

der adaptierte ökonomisch-ökologische Nettoeffekt somit entweder eine aktive, ökologieorientierte Strategiewahl (Reduktion von Kosten und Umweltwirkungen) oder passive, nicht-ökologieorientierte Strategiewahl (Reduktion von Kosten und Vernachlässigung von Umweltwirkungen). Überschreitet die Summe aus Kosten bzw. Umweltwirkungen der Sanktionierung sowie ggf. deren Überwälzung jene der Aktion und ggf. deren Überwälzung, sollte der Akteur die aktive, ökologieorientierte Strategie wählen (vgl. Abb. 2) (in Erweiterung von Günther 2008).

Im vorliegenden Fallbeispiel werden ein Elektrobuss als auch ein EUR6-Dieselsbus als zwei Beschaffungsalternativen zur Substitution eines herkömmlichen Dieselsbusses ökonomisch und ökologisch bewertet, um aktive, ökologieorientierte als auch passive, nicht-ökologieorientierte Strategien abzuleiten und Beschaffungsentscheidungen zu unterstützen. Für jede dieser Alternativen sind Konsequenzen der Aktion, der Sanktionierung und ggf. der Überwäl-

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

Der Begriff Sanktionierung umfasst Kosten und Umweltwirkungen, die dem Akteur durch Nicht-Handeln entstehen und nicht in dessen direkten Einflussbereich liegen (Günther 2008). Dazu zählen auch erwartete, zu internalisierende externe Kosten, die für den Planungshorizont von 12 Jahren 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 externe 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.

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

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

(Europäische Union 2009)

aber nach Zistel (2015) durch den Gesetzgeber ebenso auf 80 % der EEG-Umlage erhöht werden. Beide Varianten rechnen wir im Nettoeffekt durch. Für den Dieseldieselkraftstoff 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 Elektrobusses im prozentualen Vergleich zum Dieseldieselbus.

Forschungsfrage 1 zur Wettbewerbsfähigkeit des Elektrobusses im Vergleich zum EUR6-Dieseldieselbus lässt sich daher wie folgt beantworten: Die Investitionsstrategie in Elektromobilität ist im Alternativszenario (mit Beschaffung im Jahr 2027 unter veränderten Rahmenbedingungen), nicht aber im Basisszenario gegenüber einer Investitionsstrategie in Dieseldieselmobilität wettbewerbsfähig. Betragen die Lebenszykluskosten für die Anschaffung des Elektrobusses inkl. Ladeinfrastruktur im Basisszenario noch ca. 470.000 EUR, d.h. ca. 20 %, mehr als die des Dieseldieselbusses, so liegen sie im Alternativszenario ca. 9.000 EUR, d.h. 0,3 %, niedriger. Kosten, Emissionen und Umweltwirkungen ergeben sich für beide Szenarien beim Dieseldieselbus insb. aus der Dieseldieselkraftstoffherstellung und -verbrennung, Instandhaltung sowie 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 Dieseldieselbus für den abiotischen Ressourcenverbrauch elementarer Ressourcen und das Humantoxizitätspotential besser ab. Für die Versauerungs-, Eutrophierungs- und Treibhausgaspotential sind die Unterschiede zwischen beiden Antriebsalternativen minimal. Es ist allerdings zu erwarten, dass die Umweltwirkungen im Basisszenario bis 2026 tendenziell eher niedriger ausfallen werden, da der Ausbau der erneuerbaren Energien

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)
Mehrkosten für Elektrobus und Batterien	503.027,63 EUR	– 201.211,05 EUR	– 201.211,05 EUR
Ladegerät	18.400,00 EUR	– 7360,00 EUR	– 14.720,00 EUR
Ladestation	33.600,00 EUR	– 13.440,00 EUR	– 26.880,00 EUR
Gesamt	555.027,63 EUR	– 222.011,05 EUR	– 242.811,05 EUR

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

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)

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

Tab. 6 Berechnung des ökonomisch-ökologischen Nettoeffekts

		Basisszenario (2015–2026)			Alternativszenario (2027–2038)		
		Solaris Urbino 12 electric	Solaris Urbino 12	Differenz	Solaris Urbino 12 electric	Solaris Urbino 12	Differenz
Umweltwirkungen							
<i>Aktion (lebenszyklusbasierte Umweltwirkungen)</i>							
Nutzung	kg CO ₂ e	1,15E+06	1,13E+06	2,46E+04	9,36E+04	1,13E+06	– 1,04E+06
Herstellung + End-of-Life	kg CO ₂ e	6,09E+04	3,51E+04	2,58E+04	6,09E+04	3,51E+04	2,58E+04
Infrastruktur	kg CO ₂ e	1,22E+04	5,56E+01	1,21E+04	3,48E+03	5,56E+01	3,43E+03
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>							
CO ₂ -Emissionen	kg	1,07E+06	1,08E+06	– 1,17E+04	8,57E+04	1,08E+06	– 9,98E+05
NO _x -Emissionen	kg	9,49E+02	1,22E+03	– 2,72E+02	2,21E+02	1,22E+03	– 9,99E+02
PM-Emissionen	kg	6,44E+02	3,01E+02	3,44E+02	2,26E+02	3,01E+02	– 7,49E+01
NMHC-Emissionen	kg	1,81E+00	1,16E+00	6,47E–01	7,14E–01	1,16E+00	– 4,48E–01
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>							
Nutzung (ohne Vers.)	EUR	7,97E+05	7,70E+05	2,65E+04	1,05E+06	1,10E+06	–4,43E+04
Herstellung + End-of-Life	EUR	6,06E+05	2,24E+05	3,82E+05	2,54E+05	2,46E+05	8,35E+03
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>							
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)
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)
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)
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>							
CO ₂ -Emissionen	EUR	3,75E+04	3,79E+04	– 4,08E+02	3,00E+03	3,79E+04	– 3,49E+04
NO _x -Emissionen	EUR	4,17E–03	5,37E–03	– 1,20E–03	9,72E–04	5,37E–03	– 4,40E–03
PM-Emissionen	EUR	5,61E–02	2,62E–02	2,99E–02	1,97E–02	2,62E–02	– 6,51E–03
NMHC-Emissionen	EUR	1,81E–06	1,16E–06	6,47E–07	7,14E–07	1,16E–06	– 4,48E–07
Lärm-Emissionen	EUR	0,00E+00 ⁴	4,83E+03	– 4,83E+03	0,00E+00	4,83E+03	– 4,83E+03
Versicherungsbeiträge	EUR	1,42E+04	1,42E+04	0,00E+00	2,02E+04	2,02E+04	0,00E+00
Steuern	EUR	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
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)

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

Basisszenario etwa 5000 EUR Emissionskosten durch den Einsatz eines Elektrobusses einsparbar. Im Alternativszenario ließe sich durch den Einsatz von erneuerbaren Energien ein Kostenvorteil von etwa 40.000 EUR erwirken. Somit zeigt sich, dass die aus den Deselemissionen resultierenden Sanktionskosten bei weitem nicht ausreichen, um die Wahl einer aktiven Elektromobilitätsstrategie im Unternehmen zu befördern.

Die neuen Antriebssysteme, Fahrzeugkonzepte und Ladeinfrastrukturen stellen für Unternehmen im Vergleich zu bestehenden Systemen ein hohes Investitionsniveau und -risiko dar. Tragfähige Geschäftsmodelle, Finanzierungs-konzepte oder Anreizsysteme, die ein größeres Kundeninteresse bewirken würden, sind noch nicht etabliert und müssen zum Aufbau eines Leitmarktes erst noch bedarfsgerecht implementiert werden (Nationale Plattform Elektromobilität 2014; DIFU 2015). Dies spiegelt sich auch in der geringen Anzahl von derzeit ca. 25.000 zugelassenen Elektrofahrzeugen wider (Kraftfahrzeugbundesamt 2016). Die Zahl ist weit entfernt von der politischen Zielsetzung von 1 Mio. Elektrofahrzeugen bis 2020 (Bundesregierung 2011). Im ÖPNV kommen bislang 25 Elektrobusse im Rahmen von Forschungsprojekten deutschlandweit zum Einsatz (BMVI und BMUB 2015). Vor diesem Hintergrund greifen wir daher nun zur Beantwortung der Forschungsfrage 3 für den Markthochlauf diskutierte staatliche Finanzierungshilfen in Form von Investitionszuschüssen und Betriebskostenerleichterungen auf, während durch Kunden finanzierte Fahrpreisanpassungen unterbleiben sollten, um ein Abwandern zum umwelt- und klimaschädlicheren Individualverkehr zu verhindern (Deutsch u. a. 2016). Diese Überwälzungsoptionen beziehen sich dabei auf Aktionskosten, nicht aber Sanktionskosten.

Sowohl für die Investitionszuschüsse als auch Betriebskostenerleichterungen berechnen wir 2 Varianten. Ein Investitionszuschuss führt zu Einsparungen von etwa 222.000 EUR (Variante 1: 40 % der Mehrkosten für Elektrobus, Batterien und Ladeinfrastruktur) bzw. etwa 243.000 EUR (Variante 2: 40 % der Mehrkosten für Elektrobus und Batterie, 80 % der Mehrkosten für die Ladeinfrastruktur). Betriebskostenerleichterungen sind sowohl für Diesel- als auch Elektrobus zu berücksichtigen. Variante 1 (50 % Ökosteuerrabatt für Diesel, 50 % EEG-Umlagen-Rabatt für Strom) bedingt einen Nettovorteil i. H. v. etwa 34.000 EUR für den Elektrobus, Variante 2 (50 % Ökosteuerrabatt für Diesel, 80 % EEG-Umlagen-Rabatt für Strom) etwa 70.000 EUR. Somit würde die Finanzierungslücke inkl. Investitionszuschüssen und Betriebskostenerleichterungen weiterhin etwa 213.000 EUR (jeweils für die ersten Varianten) bzw. 152.000 EUR (jeweils für die zweiten Varianten) betragen.

In der Summe ließe sich die Eigenleistung der ÖPNV-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 %, senken. Sollten sich die Akteure in ÖPNV und Politik nicht auf weitere investitionsfördernde Maßnahmen einigen können, wäre nach derzeitigem Stand zumindest vorübergehend ein Ticketaufschlag im Rahmen einer aktiven, ökologieorientierten Produktdifferenzierung erforderlich, um diese Mehrkosten stemmen zu können. Dies erfordert wiederum eine Anpassung des Personenbeförderungsgesetzes und transparente und glaubwürdige Ticketpreisgestaltung, letztere im Zusammenhang mit einer aktiven, ökologieorientierten Elektromobilitätsstrategie den Bezug von Strom aus erneuerbaren Energien. Andernfalls wäre sie der Investitionsstrategie in Dieselmobilität auch ökologisch nicht vorzuziehen und somit zumindest in der kurzen Frist eine den weiteren Netzausbau der erneuerbaren Energien abwartende Mischstrategie.

Um die aktuell noch zu hohen mit Elektromobilität assoziierten Umweltwirkungen zu reduzieren, sind folgende Maßnahmen auf verschiedenen Entscheidungsebenen erforderlich.

Auf ÖPNV-Unternehmens-Ebene sind ein zeitnaher Bezug von CO₂-frei zertifiziertem Strom aus erneuerbaren Energien und Verbandstätigkeiten zur Promovierung von Betriebskostenerleichterungen, Investitionszuschüssen und ggf. weiteren Finanzierungshilfen zielführend. Auch übernimmt der ÖPNV für die positive Wahrnehmung von Elektromobilität eine besondere Verantwortung: viele Menschen kommen über den Einsatz von Elektro- und Hybridbussen im Linienverkehr erstmalig mit den neuen Antriebskonzepten in Berührung. In Forschungsk Kooperationen können ÖPNV-Unternehmen Verbesserungen im Hinblick auf Strombedarf und Batterienachladung während der Nutzung sowie End-of-Life-Potentiale für Bus und Batterie untersuchen. In Technologiepartnerschaften mit Lieferanten können sie gemeinsame Skaleneffekte und somit Kostensenkungspotentiale über den gesamten Lebenszyklus erschließen. Auch bietet es sich an, bei der Standardisierung bspw. der Ladeinfrastruktur bei gleichzeitig technikoffener Gestaltung (Zistel 2015) oder Monetarisierung von Umweltwirkungen (ISO 2016) mitzuwirken.

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

2011) dar. Allerdings sollten Finanzierungshilfen an konkrete Bedingungen geknüpft werden, die die tatsächliche Nutzung, nicht nur die Beschaffung eines lärm- und emissionsärmeren Elektrobusses fördern. Hier bieten sich z. B. Auflagen zur Verschrottung emissionsintensiverer Modelle (BAFA 2015; KFZ Kompass 2015; Mortsiefer 2015) sowie zum Bezug von Strom aus erneuerbaren Energien an.

5 Schlussfolgerungen

Produkte und Prozesse werden zunehmend über den gesamten Lebensweg auf ihre Kosten und Umweltwirkungen untersucht. Im Bereich der Elektromobilität gibt es hier zwar ökonomisch-ökologische Begleitforschung, allerdings noch nicht in Form eines mehrdimensionalen, integrierten Betrachtungsansatzes, der alle entscheidungsrelevanten Externalitäten berücksichtigt.

In dieser Fallstudie wird am Beispiel des öffentlichen Busverkehrs der Stadt Dresden untersucht, unter welchen Voraussetzungen ein Elektrobus mit einem EUR6-Dieselsbus ökologisch und ökonomisch wettbewerbsfähig ist. Zu diesem Zweck haben wir eine kombinierte ökologisch-ökonomische Bewertung auf Basis der beiden lebenszyklusorientierten Methoden LCA und LCC durchgeführt. Erstere schätzt die zumeist nicht internalisierten Umweltwirkungen, letztere ermittelt in ihrer ökologischen Ausprägung neben den tatsächlichen Kosten auch die über den Entscheidungshorizont internalisierbaren externen Umweltkosten.

Die LCA- und LCC-Ergebnisse zeigen, dass im langfristigen Alternativszenario, nicht aber im kurzfristigen Basis-szenario, die Investitionsstrategie in Elektromobilität ökologisch und ökonomisch wettbewerbsfähig ist. Die reife Dieselantriebstechnologie besticht kurzfristig durch niedrigere Kosten und Umweltwirkungen für Herstellung und Infrastruktur, verursacht aber hohe Umweltwirkungen bei der Dieselherstellung und -verbrennung. Die sich noch entwickelnde Elektroantriebstechnologie wiederum kann zumindest im Basis-szenario die hohen Kosten und Umweltwirkungen für Herstellung und Infrastruktur in der Nutzungsphase nicht ausgleichen. Mit der Gegenüberstellung von Basis- und Alternativszenario konnten wir verdeutlichen, dass generelle Aussagen dazu, dass sich Elektromobilität ökologisch wie ökonomisch nicht lohnen würde, wie sie immer wieder auch in den nicht-wissenschaftlichen Medien publiziert werden (z. B. in Tuil 2015), nicht zielführend sind. Der Batterieantrieb ist vielmehr noch keine reife Technologie, bei der für die nächsten Jahre noch enormer Spielraum bei der Technologie- und Preisentwicklung zu erwarten ist.

Während LCA und LCC hilfreich sind, für die unterschiedlichen Entscheidungsträger ökologieorientierte Handlungsstrategien abzuleiten, haben wir diese im ökonomisch-ökologischen Nettoeffekt aggregiert und zusätzlich

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

Die hierzu betrachteten Emissionskosten und investitionsfördernden Betriebskostenerleichterungen und Zuschüsse reichen nicht aus, um die Finanzierungslücke der Elektromobilität zu schließen. In der Summe ließe sich die Eigenleistung der ÖPNV-Unternehmen bei der Beschaffung von Elektrobussen während 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 %, senken. Damit Elektromobilität im Sinne einer aktiven, ökologieorientierten Investitionsstrategie aber auch ökologisch konkurrenzfähig im Vergleich zur EUR6-Dieselmobilität ist, sind konkrete nutzungsfördernde Auflagen vonnöten wie bspw. die Verschrottung emissionsintensiverer Modelle und der Bezug von Strom aus erneuerbaren Energien. Weiteren Handlungsbedarf für die verschiedenen Akteure in Verkehrs- und Zuliefererunternehmen, Forschung, Politik und Normung haben wir eingehend in der Ergebnisdarstellung diskutiert.

Zukünftig werden mehrdimensionale, integrierte ökonomisch-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 besteht konkreter Forschungsbedarf bei der Optimierung des Stromverbrauchs und der Batterienachladung während der Nutzung sowie End-of-Life-Optionen für Bus und Batterie. 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 Deutschland 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: Schaufenster. <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

- BMJV (2015) Erneuerbare-Energien-Gesetz vom 21. Juli 2014 (BGBl. I S. 1066), das zuletzt durch Artikel 2 Absatz 10 des Gesetzes vom 21. Dezember 2015 (BGBl. I S. 2498) geändert worden ist
- BMUB (2016) Elektrobusse sind wichtig für nachhaltige Mobilität: Neues BMUB-Förderprogramm für Elektrobusse. <http://www.bmub.bund.de/presse/pressemitteilungen/pm/artikel/elektrobusse-sind-wichtig-fuer-nachhaltige-mobilitaet/>. Zugegriffen: 8 Mar 2016
- BMUB, UBA (2011) Umweltwirtschaftsbericht 2011: Daten und Fakten für Deutschland. BMUB, UBA, Berlin
- BMVI (2016) Elektromobilität. http://www.bmvi.de/DE/VerkehrUndMobilitaet/DigitalUndMobil/Elektromobilitaet/elektromobilitaet_node.html. Zugegriffen: 10 Jan 2016
- BMVI (2015) Förderrichtlinie Elektromobilität. BMVI, Berlin
- BMVI und BMUB (2015) Hybrid- und Elektrobus-Projekte in Deutschland: Statusbericht 2014 der Arbeitsgruppe Innovative Antriebe Bus. BMVI, BMUB, Berlin
- Bundesregierung (2009) Nationaler Entwicklungsplan Elektromobilität der Bundesregierung. Publikationsversand der Bundesregierung, Berlin
- Bundesregierung (2011) Regierungsprogramm Elektromobilität vom 18.05.2011. Publikationsversand der Bundesregierung, Berlin
- Deutsch V, Schmitz J, Schmitz M, Zistel M (2016) Elektromobilität im ÖPNV weiter fördern. VDV, Köln
- Deutsches Institut für Urbanistik (2015) Elektromobilität in der kommunalen Umsetzung: Kommunale Strategien und planerische Instrumente. difu, Berlin
- DVB (2014) Geschäftsbericht 2013. WDS Pertermann GmbH, Dresden
- Europäische Kommission (2001) Empfehlung der Kommission vom 30. Mai 2001 zur Berücksichtigung von Umweltaspekten in Jahresabschluss und Lagebericht von Unternehmen: Ausweis, Bewertung und Offenlegung (2001/453/EG). EUR-Lex, Brüssel
- Europäische Union (2009) Richtlinie 2009/33/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. April 2009 über die Förderung sauberer und energieeffizienter Straßenfahrzeuge. EUR-Lex, Brüssel
- Funke SÁ, Gauger JF (2015) Elektrische Linienbusse – vom Generalisten zum Spezialisten: Entwicklung eines Leitfadens zur Integration elektrischer Linienbusse in den öffentlichen Nahverkehr. *Nahverk* 33(3):19–22
- García SJA, López MJM, Lumberras MJ et al (2013) Impact of Spanish electricity mix, over the period 2008–2030, on the life cycle energy consumption and GHG emissions of electric, hybrid diesel-electric, fuel cell hybrid and diesel bus of the Madrid transportation system. *Energy Convers Manag* 74(Oct 2013):332–343
- Giering K (2013) Was kostet uns der Lärm? http://www.umweltdaten.landsh.de/public/umgebungslaerm/ulr/doc/Giering_Was_kostet_uns_der_Laerm.pdf. Zugegriffen: 19 Dez 2015
- Graedel T et al (1994) Industrial ecology: Definition and implementation. In: Socolow R, Andrews C, Berkhout F (Hrsg) *Industrial ecology and global change*. Cambridge University Press, Cambridge, S 23–42
- Günther E (1994) Ökologieorientiertes Controlling: Konzeption eines Systems zur ökologieorientierten Steuerung und empirische Validierung. Vahlen, München
- Günther E (2008) Ökologieorientiertes Management: Um-(weltorientiert) Denken in der BWL. Lucius & Lucius, Stuttgart
- Günther E, Jasch C, Schmidt M et al (2015) Material flow cost accounting: Looking back and ahead. *J Clean Prod* 108(PartB):1249–1254. doi:10.1016/j.jclepro.2015.10.018
- Heijungs R, Settnani E, Guinée J (2013) Toward a computational structure for life cycle sustainability analysis: Unifying LCA and LCC. *Int J Life Cycle Assess* 18(9):1722–1733. doi:10.1007/s11367-012-0461-4
- Hoffman AJ, Corbett CJ, Joglekar N, Wells P (2014) Industrial Ecology as a source of competitive advantage. *J Ind Ecol* 18(5):597–602. doi:10.1111/jiec.12196
- Höhne C (2009) Life Cycle Costing: Systematisierung bestehender Studien. *Dresdner Beitr Zur Lehre Betrieblichen Umweltök* 37(2009):1–128
- Hoogmartens R, Van Passel S, Van Acker K, Dubois M (2014) Bridging the gap between LCA, LCC and CBA as sustainability assessment tools. *Environ Impact Assess Rev* 48(Sep 2014):27–33. doi:10.1016/j.eiar.2014.05.001
- Hunkeler D, Lichtenvort K, Rebitzer G (2008) *Environmental Life Cycle Costing*. Taylor and Francis, Hoboken
- Ilg P, Höhne C, Günther E (2016) High-performance materials in infrastructure: A review of applied life cycle costing and its drivers – the case of fiber-reinforced composites. *J Clean Prod* 112(Part 1):926–945. doi:10.1016/j.jclepro.2015.07.051
- INFRAS (2007) Externe Kosten des Verkehrs in Deutschland: Aufdatierung 2005. INFRAS, Zürich
- ISO (2006a) *Environmental management: Life cycle assessment – Principles and framework (ISO 14040: 2006)*. Beuth, Berlin
- ISO (2006b) *Environmental management: Life cycle assessment – Requirements and guidelines (ISO 14044:2006)*. Beuth, Berlin
- ISO (2016) ISO 14008: Monetary Valuation of environmental impacts from specific emissions and use of natural resources (ISO/TC 207/SC 1). <https://committee.iso.org/sites/tc207sc1/home/projects/ongoing/iso-14008.html>. Zugegriffen: 14 Jan 2016
- Kompass KFZ (2015) Abwrackprämie. <https://www.kfzkompass.de/autokauf/abwrackpraemie/>. Zugegriffen: 11 Jan 2016
- Klöpper W (2008) Life cycle sustainability assessment of products. *Int J Life Cycle Assess* 13(2):89–95. doi:10.1065/lca2008.02.376
- Klöpper W, Curran MA (2014) How many case studies should we publish, if any? *Int J Life Cycle Assess* 19(1):1–2. doi:10.1007/s11367-013-0667-0
- Kraftfahrzeugbundesamt (2016) Fahrzeugbestand am 1. Januar 2016. http://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/Ueberblick/2016_b_barometer.html?nn=1133288. Zugegriffen: 15 Jan 2016
- Kurczveil T, Schnieder L, Schnieder E (2015) Optimierung des Energiemanagements induktiv geladener Busse unter Berücksichtigung betrieblicher und verkehrlicher Randbedingungen. *Straßenverkehrstechnik* 59(4):231–237
- Lange J, Otto T (2015) BeSystO Entscheidungsmodell für den ÖPNV mit Elektrobusen: Werkzeug zur Prüfung und Bewertung eines praktikablen und wirtschaftlichen Einsatzes von E-Bussen im ÖPNV. *Nahverk* 33(6):16–21
- Lifset R (2013) Raising the bar for symbiosis, life cycle assessment, and material flow analysis case studies. *J Ind Ecol* 17(1):1 doi:10.1111/jiec.12003
- Lifset R, Grädel TE (2002) Industrial ecology: goals and definitions. In: Elgar E (Hrsg) Ayres RU, Ayres LW. *A handbook of industrial ecology*. Edward Elgar, Cheltenham UK, Northampton MA, S 3–15
- Meier zu Köcker G, Künzel M, Nerger M et al (2015) Forschungsatlas Elektromobilität: Prioritäre Forschungsthemen und regionale Spezialisierung in Deutschland. Institute for Innovation and Technology in der VDI/VDE-IT, Berlin
- Mortsiefer H (2015) undesländer fordern mehr Förderung für Elektroautos. In: Tagesspiegel. <http://www.tagesspiegel.de/wirtschaft/nach-dem-vw-skandal-bundeslaender-fordern-mehr-foerderung-fuer-elektroautos/12471334.html>. Zugegriffen: 11 Jan 2016
- Müller-Hellmann A, Thurm S (2015) Batteriebusse im ÖPNV: Grundsätzliche Überlegungen und Demonstrationsprojekt in Oberhausen. *Nahverk* 33:30–34
- Nationale Plattform Elektromobilität (2014) Fortschrittsbericht 2014: Bilanz der Marktvorbereitung. Gemeinsame Geschäftsstelle Elektromobilität der Bundesregierung, Berlin
- Noel L, McCormack R (2014) A cost benefit analysis of a V2G-capable electric school bus compared to a traditional diesel school bus. *Appl Energy* 126(Aug 2014):246–255. doi:10.1016/j.apenergy.2014.04.009
- Öchsner T (2015) Bahnindustrie: Leise Sohlen für laute Züge. In: Süddeutsche. <http://www.sueddeutsche.de/wirtschaft/bahnindustrie->

leise-sohlen-fuer-laute-zuege-1.2699970. Zugegriffen: 11 Jan 2016

Peters A, Doll C, Plötz P (2013) Konzepte der Elektromobilität: Ihre Bedeutung für Wirtschaft, Gesellschaft und Umwelt. Edition Sigma, Frankfurt

Pizzol M, Weidema B, Brandão M, Osset P (2015) Monetary valuation in life cycle assessment: A review. *J Clean Prod* 86:170–179. doi:10.1016/j.jclepro.2014.08.007

Rüdenauer I, Dross M, Eberle U et al (2007) Costs and benefits of green public procurement in Europe: General recommendations. Öko-Institut, Freiburg

Staatsministerium für Wirtschaft, Arbeit und Verkehr (2016) ÖPNV: Landesinvestitionsprogramm 2015 (Mitteleinplanung). <http://www.verkehr.sachsen.de/931.html>. Zugegriffen: 8 Mar 2016

Statistisches Bundesamt (2013) Verkehr auf einen Blick. Statistisches Bundesamt, Wiesbaden

Steen B, Hoppe H, Hunkeler D, et al (2008) Integrating external effects into life cycle costing. In: Hunkeler D, Lichtenvort K, Rebitzer G (Hrsg) *Environmental life cycle costing*. Taylor Francis, New York, NY, S 59–76

Swarr TE, Hunkeler D, Klöpffer W et al (2011) *Environmental life cycle costing: A code of practice*. SETAC, Pensacola FL

Tuil M (2015) Zwiespältige Umweltbilanz: E-Autos – dreckiger als gedacht. In: *Süddeutsche*. <http://www.sueddeutsche.de/auto/zwiespaeltige-umweltbilanz-e-autos-dreckiger-als-gedacht-1.2748493>. Zugegriffen: 19 Jan 2016

Umweltamt Dresden (2009) Masterplan Lärminderung für die Landeshauptstadt Dresden. Umweltamt Dresden, Dresden

Umweltamt Dresden (2011) Luftreinhalteplan für die Landeshauptstadt Dresden 2011. Umweltamt Dresden, Dresden

Whiteman G, Walker B, Perego P (2013) Planetary boundaries: Ecological foundations for corporate sustainability. *J Manag Stud* 50(2):307–336. doi:10.1111/j.1467-6486.2012.01073.x

Zistel M (2015) Überlegungen zu einem Finanzierungs- und Förderkonzept für den Markthochlauf Elektrobus in Deutschland. VDV, 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.'