

Kombinierte Lebenszyklus- und Verflechtungsanalyse zur Bilanzierung der CO₂-Emissionen von Elektrofahrzeugen

A. Auf der Maur¹, M. Treiber², S. Lämmer³

Technische Universität Dresden, Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“,
Institut für Wirtschaft und Verkehr, Professur für Verkehrsökonomie und -statistik

Würzburger Str. 35, 01062 Dresden, Deutschland

Kurzfassung:

Um die klimarelevanten Treibhausgas-Emissionen von Fahrzeugen mit verschiedenen Antriebskonzepten abzuschätzen, müssen alle direkten und indirekten Beiträge von der Herstellung über den Betrieb bis zur Entsorgung einschließlich aller volkswirtschaftlichen Verflechtungseffekte erfasst werden. In diesem Beitrag werden die CO₂-Emissionen eines Elektrofahrzeugs der Kompaktklasse mit entsprechenden Plugin-Hybrid- und Diesel-Pkw verglichen.

Das Besondere im vorgestellten Ansatz besteht darin, die ökonomischen Standardverfahren „Ökobilanz“ bzw. „Lebenszyklusanalyse“ (LCA) für die direkten Effekte und die „Input-Output-Analyse“ (IOA) für die volkswirtschaftlichen Verflechtungen mit Hilfe des „Economic Input-Output Lifecycle Assessment“ (EIO-LCA) zu kombinieren. Während die klassische LCA dem Elektrofahrzeug noch eine geringfügig geringere CO₂-Emission gegenüber den beiden Vergleichsfahrzeugen attestiert, kehren sich die Verhältnisse bei Berücksichtigung aller Verflechtungen durch die EIO-LCA um.

Schlagnworte:

Elektromobilität, CO₂-Emissionen, ökonomisches Verflechtungsmodell, Economic Input-Output Lifecycle Assessment (EIO-LCA)

¹ Korrespondierender Autor: E-Mail: alex.aufdermaur@gmail.com

² E-Mail: treiber@vwi.tu-dresden.de

³ E-Mail: stefan.laemmer@tu-dresden.de

1 Einleitung

Seit geraumer Zeit steht die Förderung der Elektromobilität auf der politischen Agenda. In erster Linie wird dem Elektroauto das Potenzial zur Erreichung umweltpolitischer Ziele zugeschrieben. Die vorliegende Arbeit quantifiziert dieses „Potenzial“ hinsichtlich Treibhausgasemissionen durch den Vergleich eines reinen Elektro- mit einem (Plugin-)Hybrid- und einem Diesel-Pkw der Kompaktklasse.

Während fossile Kraftstoffe bei der Verbrennung im Motor umweltschädliche Treibhausgase verursachen, sind batteriebetriebene Fahrzeuge im Betrieb tatsächlich CO₂-neutral. Bei der Beurteilung der indirekten Emissionen führen verschiedene Bewertungsansätze zu verschiedenen Resultaten. Je nach Studie variieren deshalb die CO₂-Emissionen der mit Strom betriebenen Fahrzeuge. Die meisten Studien kommen zum Schluss, dass die Substitution von Benzin oder Diesel mit Strom nur geringfügig den CO₂-Ausstoß minimiert [5,8]. Andere Untersuchungen attestieren dem Elektroauto gar eine schlechtere Umweltbilanz [1].

Alle betrachteten Studien beruhen auf der Methode der Ökobilanz bzw. Life Cycle Assessment (LCA) [4,8]. Diese berücksichtigt zwar die in allen Lebensphasen anfallenden Emissionen einschließlich der linearen Vorkette, nicht jedoch volkswirtschaftliche Verflechtungen und Rückkopplungen. Das klassische Verfahren, um derartige Verflechtungen zu analysieren, ist die maßgeblich von Wassily Leontief geprägt Input-Output Analyse (IOA). Dabei wird die Volkswirtschaft in mehrere verschiedene Sektoren aufgegliedert. Das Kernelement der IOA ist die Matrix des vollen Aufwandes. Diese Matrix enthält die Information, wie viel Wirtschaftsleistung nötig ist, um eine Einheit eines Gutes der Endnachfrage zur Verfügung zu stellen. Dabei werden alle Zuliefersektoren sowie dessen Zulieferer usw. berücksichtigt [7].

Die IOA wurde jedoch ursprünglich für Fragestellungen der nationalen Makroökonomie entwickelt und ist nicht direkt auf Produktebene anwendbar. Insbesondere würde jedem der drei betrachteten Fahrzeugtypen der Sektor „Herstellung von Kraftwagen und Kraftwagen-teile“ zugeordnet, so dass kein Vergleich möglich wäre. Es wird deshalb nicht direkt das Produkt Fahrzeug mit der IOA analysiert, sondern vielmehr die vorgelagerten Prozesse zur Herstellung seiner Bestandteile und Betriebsmittel. Dieses Zusammenführen beider Methoden wird durch die Methode des Economic Input-Output – Life Cycle Assessments (EIO-LCA) formalisiert [6].

In der vorliegenden Untersuchung wird die EIO-LCA zur ganzheitlichen Analyse der indirekten Emissionen von Diesel-, Plugin-Hybrid- und Elektro-Pkw der Kompaktklasse einschließlich aller Verflechtungseffekte angewandt.

2 Bewertungsmethode

Die Herstellung eines komplexen Produktes benötigt bedeutende Mengen an Vorprodukten und sonstigen Inputs, wie z. B. Energie oder Wasser. Weil die Vorprodukte und Vorvorprodukte usw. auch stets Inputs aus dem System beziehen, entsteht eine Netzstruktur, welche sich nicht trivial lösen lässt. Mit der konventionellen LCA wird dagegen meist nur eine Ebene analysiert. Alle vorgelagerten Prozesse sind im Emissionsfaktor berücksichtigt. Der Emissionsfaktor für z. B. Kunststoff kumuliert die Emissionen der Rohölgewinnung, der Verarbeitung und Veredelung sowie des Transportes, die notwendig sind, um eine bestimmte Menge an Kunststoff zu erzeugen.

Die IOA geht im Ansatz davon aus, dass jede Wirtschaftsleistung in genau einem der definierten Sektoren hergestellt wird. Dies bedeutet auch, dass jede Wirtschaftsleistung von einem der Sektoren oder der Endnachfrage bezogen wird. Bei der Input Output Methode wird jedem Prozess nur der direkte Umwelteinfluss beigemessen. Indirekte Emissionen gibt es nicht, da jede Emission von einem definierten Prozess verursacht wird. Um die Anzahl der Prozesse überschaubar zu halten, werden ähnliche Prozesse zu Sektoren aggregiert. Das Statistische Bundesamt unterscheidet 71 Sektoren und liefert einen makroskopischen Blick auf alle Güter und Dienstleistungen, die im Inland produziert und gehandelt werden [2].

Durch die Kombination beider Analysemethoden mittels der EIO-LCA werden volkswirtschaftliche Verflechtungseffekte in die Analyse mit einbezogen. Dadurch ist die Bewertung nun nicht mehr an die Systemgrenze der LCA gebunden [9]. Um die Information der IOA zu nutzen, bedarf es einer Anpassung der LCA-Struktur. Definierte LCA-Prozesse müssen mit der IOA verknüpft werden. Dafür wird der monetäre Wert definiert, welcher dem LCA-System zufließt. Ein Beispiel soll dieses Vorgehen verdeutlichen.

In einem Dieselfahrzeug werden gemäß Sachbilanz rund 150 kg Kunststoff verarbeitet. Das Kilogramm Kunststoff als Rohmaterial wird gemäß eigenen Recherchen mit 4,23 € bewertet. Bei einer Recyclingquote von 50 % werden rund 317 € Kunststoffwert nachgefragt. Da sich die IOA auf eine Jahresbasis bezieht, wird dieser Wert durch die Lebensdauer des Fahrzeuges dividiert. Bei einer Lebensdauer von 10 Jahren beträgt die Nachfrage des Sektors 25.20 „Kunststoffwaren“ 31,70 € pro Jahr und Diesel-Fahrzeug. Die anderen Materialien und Energieformen werden analog analysiert und resultieren in einem auf eine Zeiteinheit bezogenen Nachfragevektor der Fahrzeugherstellung, -nutzung und -entsorgung, welcher alle relevanten volkswirtschaftlichen Sektoren umfasst. Um die Übersicht zu wahren, werden die 71 Sektoren nach Emissionsintensität gefiltert und nur die 24 wichtigsten betrachtet.

Im nächsten Schritt der EIO-LCA wird mittels der Matrix des vollen Aufwandes aus dem Nachfragevektor der Produktionsvektor berechnet. Schließlich wird jedem Sektor ein Emissionskoeffizient beigemessen, welcher die mittlere CO₂-Emission pro Euro und Sektor angibt. Weil ein Sektor eine Aggregation von verschiedenen Produkten und Dienstleistungen darstellt, weicht der Mittelwert mehr oder minder stark von den tatsächlichen Emissionen ab. Als Endergebnis der EIO-LCA erhält man die indirekten Emissionen pro Zeiteinheit (ein Jahr), indem man den Produktionsvektor mit dem Vektor der Emissionskoeffizienten skalar multipliziert. Zu dieser werden die direkten Emissionen der Sachbilanz addiert.

3 Konkretes Vorgehen

Die EIO-LCA beinhaltet die Schritte

- Aufstellen der Sachbilanz,
- Abbildung auf die volkswirtschaftlichen Sektoren,
- Definition der direkten und indirekten Emissionsfaktoren und
- Berechnung des Ergebnisses unter bestimmten Annahmen.

Diese werden nun auf die drei untersuchten Fahrzeugtypen angewendet.

3.1 Sachbilanz

Das mit Diesel betriebene Fahrzeug gilt als Referenzgröße für diese Analyse. Zur Vereinfachung bestehen die Fahrzeuge aus den drei Komponenten Basisfahrzeug, Verbrennungsmotor und Batterie. Die Basismaterialien beinhalten alle Materialkomponenten eines Fahrzeuges, welche nicht im Verbrennungsmotor oder der Batterie zum Einsatz kommen. Beim Dieselfahrzeug werden alle Basismaterialien und die Materialien des Verbrennungsmotors verwendet. Beim Hybridfahrzeug werden zusätzlich Materialien der Batterie addiert, wobei der Verbrennungsmotor kleiner ausfällt als beim Referenzfahrzeug. Die rein elektrische Variante besteht aus dem Basisfahrzeug plus der Batterie. Eine Übersicht über den Materialbedarf ist Tabelle 1 zu entnehmen.

Andere Fahrzeugkomponenten, wie der Elektromotor oder die Blei-Starterbatterie werden vernachlässigt. Die Angaben beim Hybrid-Fahrzeug beziehen sich auf eine elektrische Reichweite von 50 km. Das Batteriegewicht erhöht sich um 90 % bei einer elektrischen Reichweite von 100 km beziehungsweise verringert sich um 54 % bei einem Hybrid-Modell mit einer elektrischen Reichweite von 20 km. Gleichzeitig reagiert das Gewicht des Verbrennungsmotors entsprechend. Trotzdem steigt das Fahrzeuggewicht mit steigender elektrischer Reichweite an, was auf den Gewichtsunterschied der Batterie im Gegensatz zum leichteren Verbrennungsmotor zurückzuführen ist.

3.2 Abbildung auf die volkswirtschaftlichen Sektoren

Um die Input-Output-Tabelle (IOT) des Statistischen Bundesamtes zu verwenden, bedarf es einer Zuordnung der Materialien zu den 71 Wirtschaftssektoren. Tabelle 2 enthält die Klassifikation der Materialien und der betrachteten Energieformen.

Während die direkten Emissionen weiterhin für jedes Element der Sachbilanz separat berechnet werden, kann man den Verflechtungsanteil mit der IOA nur auf der Ebene von Sektoren ermitteln. Beispielsweise werden die Metalle Kupfer, Zink, Blei und Aluminium im Wirtschaftszweig 27.40 hergestellt (vgl. Tabelle 2). Die Herstellung des Gegenwertes von einem Euro von Aluminium ist jedoch viel CO₂-intensiver als beispielsweise der von Kupfer oder Zink. Die Aggregation der Materialien zu einem Sektor ist deshalb mit einem Informationsverlust zugunsten einer ganzheitlichen Bilanzierung verbunden.

	Diesel	Hybrid	Elektro
Basismaterialien (kg/Basisfahrzeug)			
Eisen und Stahl	883	883	883
Kupfer	13	13	13
Zink	3	3	3
Aluminium	50	50	50
Kunststoffe	126	126	126
Gummi	19	19	19
Glas	25	25	25
Baumwolle	13	13	13
Verbrennungsmotor (kg/Motor)			
Eisen und Stahl	126	95	0
Blei	6	5	0
Aluminium	38	29	0
Kunststoffe	25	19	0
Batterie (kg/Batterie)			
Lithium	0	9	19
Mangan	0	9	19
Kupfer	0	46	94
Eisen	0	55	113
Kunststoff	0	18	38
Aluminium	0	46	94
Fahrzeuggewicht	1'325	1'460	1'507

Tab. 1: Materialbedarf der Fahrzeugvarianten im Basisszenario

LCA	IOA	
Materialien	Bezeichnung Sektor	Sektor-Code
Eisen und Stahl	Erz. von Roheisen, Stahl und Ferrol.	27.10
Kupfer	NE-Metalle und Halberz. daraus	27.40
Zink	NE-Metalle und Halberz. daraus	27.40
Blei	NE-Metalle und Halberz. daraus	27.40
Aluminium	NE-Metalle und Halberz. daraus	27.40
Kunststoffe	Kunststoffwaren	25.20
Gummi	Gummiwaren	25.10
Glas	Glas und Glaswaren	26.10
Baumwolle	Textilgewerbe	17.00
Lithium	Gießereierzeugnisse	27.50
Mangan	Erz. von Roheisen, Stahl und Ferrol.	27.10
Energie	Bezeichnung Sektor	Sektor-Code
Strom-Mix DE	Elektrizität, Fernwärme	38.00
Diesel	Erdöl, Erdgas, DL für Erdöl-, Erdgasgew.	11.00

Tab. 2: Zuordnung der Materialien und Energieformen zu Wirtschaftssektoren

3.3 Emissionsfaktoren

Die 11 betrachteten Materialien werden mit einem Emissionsfaktor mit der Einheit kg CO₂ pro kg Herstellungsmasse ermittelt. Als Quelle dient wiederum die Gemis-Datenbank für die Bewertung der direkten Emissionen, wie auch für die Berechnung der Emissionskette aller vorgelagerten Prozesse.

Material	Direkt (kg CO ₂ -Äq./kg Material)	Kette (kg CO ₂ -Äq./kg Material)
Eisen und Stahl	0.73	1.88
Kupfer	0.46	5.94
Zink	2.94	5.40
Blei	1.26	2.17
Aluminium	3.10	17.55
Kunststoffe	0.90	4.54
Gummi	0.43	3.14
Glas	0.20	1.11
Baumwolle	1.48	32.17
Lithium	3.00	18.00
Mangan	0.04	1.97

Tab. 3: Direkte und indirekte Emissionskoeffizienten der Materialien (Quelle: Gemis [3])

Bei der LCA wird die Emissionskette der Materialien verwendet, da die vorgelagerten Prozesse der Materialerzeugung außerhalb des Produktsystems liegen. Konsequenterweise werden bei EIO-LCA ausschließlich die direkten Emissionen verwendet.

Der Emissionsfaktor der Elektrizitätserzeugung hängt maßgeblich vom Kraftwerkstyp ab. Während ein Kohlekraftwerk knapp ein Kilogramm CO₂ pro kWh emittiert, sind es bei Windkraftanlagen nur etwa 20 Gramm. Sowohl bei der Nutzung des Elektrofahrzeuges als auch bei allen anderen Prozessen, welche Energie als Input benötigen, wird zur Berechnung der Emissionen der deutsche Strom-Mix von 505 g CO₂-Äq/kWh verwendet.

Die direkten CO₂-Emissionen bei der Verbrennung von Diesel (Tank to Wheel, TtW) berechnen sich aus der chemischen Reaktionsgleichung für vollständige Verbrennung. Sie sind direkt proportional zum Kraftstoffverbrauch. Der zugehörige Emissionsfaktor ist durch 2'633 Gramm CO₂ pro Liter Diesel gegeben. Ist der Verbrauch pro 100 km bekannt, so kann der direkte Emissionsfaktor von Diesel berechnet werden. Zusätzlich fallen indirekte Emissionen von rund 4,4 Gramm CO₂ in der Vorkette bei der Produktion des Kraftstoffes (Well to Tank, WtT) an.

Beim Elektroauto ist der direkte Emissionsfaktor gleich null, es wird jedoch pro 100 km eine bestimmte Elektrizitätsmenge benötigt. Der Verbrauch bzw. die benötigte Elektrizitätsmenge wird in Abhängigkeit des Fahrzeuggewichts und anderer Fahrzeugparameter mit einem physikbasierten Verbrauchsmodell berechnet [10]. Beim Elektrofahrzeug beziehen sich die WtT-Emissionen auf den Emissionsfaktor der Stromerzeugung.

Durch die Koppelung von LCA und IOA sind gewisse Wirtschaftssektoren direkt betroffen. Die Emissionsfaktoren der direkt betroffenen Sektoren können direkt aus den LCA-Daten abgeleitet werden. Zur Berechnung der indirekten mit dem IOM berechneten Beiträge können in der Datenbank Gemis [3] nebst den auf die physikalische Einheit (kWh, Liter oder kg Herstellungsmasse) bezogenen Emissionsfaktoren auch monetäre Emissionsfaktoren abgefragt werden (vgl. Tab. 4).

Quelle Sektor	Umweltökonomische Gesamtrechnung		Gemis 4.7	Verwendet
	1000 t CO ₂ -Äq./Sektor	kg CO ₂ /€	kg CO ₂ /€	kg CO ₂ /€
Erz. der Landwirtschaft und Jagd	41'272	1.07	1.13	1.13
Kohle und Torf	6'522	0.83	1.03	1.03
Erdöl, Erdgas, Erdgasgew.	3'546	0.06	0.00	0.00
Textilien	841	0.04	0.32	0.32
Kokereierzeugnisse, Mineralölerz.	25'952	0.35		0.35
Chemische Erzeugnisse	28'651	0.15	0.81	0.81
Gummiwaren	353	0.03	0.28	0.28
Kunststoffwaren	648	0.02	0.21	0.21
Glas und Glaswaren	2'807	0.36	0.45	0.45
Keramik, bearbeitete Steine und Erden	18'681	1.10	0.39	0.39
Roheisen, Stahl, Rohre und Halbzeug	39'209	0.42	0.86	0.86
NE-Metalle und Halbzeug daraus	2'097	0.03	0.42	0.42
Gießereierzeugnisse	742	0.10	0.13	0.13
Elektrizität	341'536	5.12	1.93	1.93
Gase, DL der Gasversorgung	3'156	0.28	0.48	0.48
Handelsver.- und Großhandelsleist.	4'456	0.03	0.10	0.10
Sonst. Transportleistungen in Rohrfernln.	8'022	0.16	0.31	0.31
Luftfahrtleistungen	25'755	1.15		1.15
DL bez. Nebentätigk. für den Verkehr	9'501	0.13		0.13
DL Wohnungswesen	12'604	0.05	0.09	0.09
DL der Vermietung beweglicher Sachen	1'352	0.05		0.05
DL der öff. Verwaltung, Verteidigung	5'384	0.04	0.40	0.40
Abfall- u. sonst. Entsorgungsleist.	14'140	0.59		0.59
Sonstige DL	20'381	0.63	0.03	0.03

Tab. 4: CO₂-Koeffizienten der betrachteten Wirtschaftssektoren

3.4 Weitere Annahmen

Um die Fahrzeugvarianten direkter miteinander zu vergleichen, wird im Basisszenario die Lebensdauer der Fahrzeuge und die jährliche Fahrleistung identisch gewählt. Es wird angenommen, dass die totale Laufleistung 100'000 Kilometer beträgt und die Batterie sowie die Fahrzeuge eine Lebensdauer von 10 Jahren aufweisen. Im Basis-Szenario ist demnach kein Batterietausch notwendig.

4 Ergebnisse

Zur ökologischen Bewertung der individuellen Elektromobilität mittels Verflechtungsanalyse werden die Emissionen in einem ersten Schritt auf die LCA Berechnungen bezogen, bevor die (indirekten) Emissionen der Wirtschaftssektoren ausgewiesen werden.

Die Material- und Energieprozesse beziehen ihre Leistungen aus den Wirtschaftssektoren des IO-Systems, welchen die CO₂-Emissionen angelastet werden. Die Prozesse „Nutzung“ und „Transport“ können keinem Wirtschaftssektor zugewiesen werden. Sie werden weiterhin mit der Methode LCA berechnet. Abbildung 1 stellt die Emissionen nach Wirtschaftssektoren dar.

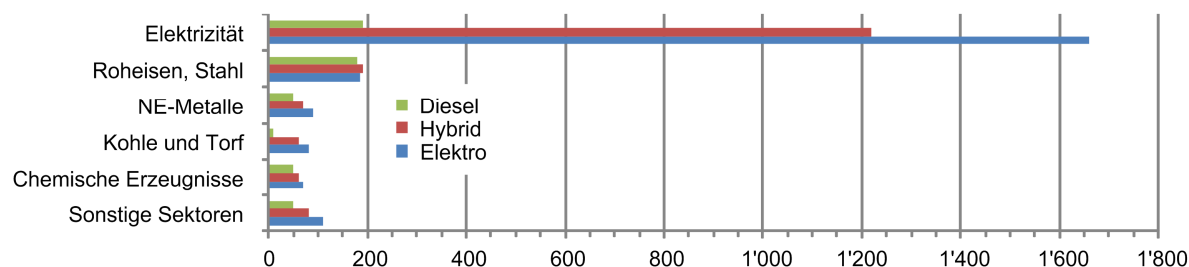


Abb. 1: Indirekte Emissionen (EIO-LCA) in kg CO2 je Fahrzeug und Jahr

Abbildung 1 stellt die CO₂-Emissionen nach Antriebsart und Sektoren differenziert dar. Der Sektor „Elektrizität“ ist für die elektrisch betriebenen Fahrzeuge mit Abstand der größte Verursacher von CO₂-Emissionen. Beim Dieselfahrzeug ist der Sektor „Roheisen und Stahl“ für die bedeutendsten indirekten Emissionen verantwortlich. Allgemein kann festgehalten werden, dass Elektrofahrzeuge pro Jahr über zwei Tonnen CO₂-Äq. emittieren. Die indirekten Emissionen bei Diesel- und Hybridfahrzeugen belaufen sich gemäß EIO-LCA auf rund 500 kg bzw. 1'700 kg CO₂ pro Jahr und Fahrzeug. Die gesamten Emissionen – also die Summe aus LCA und IOA – sind Abbildung 2 zu entnehmen.

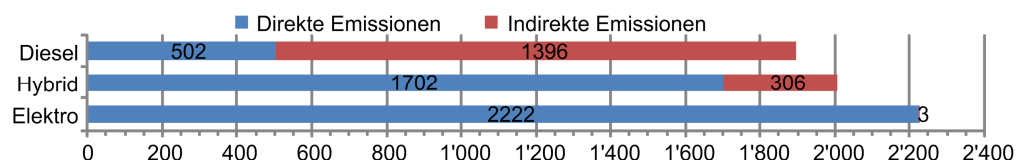


Abb. 2: Gesamte Emissionen (EIO-LCA) in kg CO2 je Fahrzeug und Jahr

Während die LCA-Methode für elektrisch betriebene Fahrzeuge noch minimal geringere CO₂ Emissionen ermittelt, zeigen die CO₂-Werte der EIO-LCA Berechnung ein anderes Bild. Die indirekten Emissionen werden bei der EIO-LCA über eine Verflechtungsanalyse der Wirtschaftssektoren ermittelt. Dadurch wird das Untersuchungsfeld erweitert. Da der Anteil der indirekten Emissionen bei elektrisch betriebenen Fahrzeugen naturgemäß größer ist, steigen die Emissionen mit einer weiter gefassten Systemgrenze an.

5 Sensitivitätsanalyse

Um die Abhängigkeit des Ergebnisses der EIO-LCA von den getroffenen Annahmen zu untersuchen, wird jeweils ein Parameter der Basiseinstellung variiert und die Analyse wiederholt. Die Tabelle 5 zeigt das Ergebnis für fünf Szenarien für Diesel- und Elektrofahrzeuge sowie Plugin-Hybrids unterschiedlicher elektrischer Reichweite. Im ersten Szenario wird angenommen, dass während der Lebenszeit zwei Batterien statt einer benötigt werden. In den weiteren Szenarien wird eine Recyclingrate von 100 % statt 50 % angenommen, der Strom-Mix von 505 g CO₂ pro kWh auf 200 g („Ökostrom“) bzw. 1000 g („Chinastrom“) verändert und schließlich das Fahrzeuggewicht reduziert.

Erwartungsgemäß ist die Annahme des Strom-Mixes bei Elektro- und Hybridfahrzeugen der wichtigste Einflussfaktor. Insbesondere schneidet das Dieselfahrzeug bei Annahme von Ökostrom mit Abstand am schlechtesten ab. Bemerkenswerterweise weist unter diesen Annahmen aber nicht das Elektrofahrzeug sondern der Plugin-Hybrid mit 100 km Reichweite die beste Bilanz auf.

Szenario	Diesel	Hybrid_20	Hybrid_50	Hybrid_75	Hybrid_100	Elektro
Basisszenario	19.0	17.9	20.1	21.4	22.6	22.2
Batteriewechsel	19.0	18.5	21.4	23.3	25.2	24.9
Recyclingrate 100 %	18.2	17.1	19.2	20.4	21.5	21.2
Ökostrom	18.0	13.4	12.2	10.9	10.9	11.4
Chinastrom	20.5	25.2	32.9	35.9	38.8	39.8
Gewichtsred. 20 %	15.8	15.1	16.8	17.9	18.9	18.6

Tab. 5: Emissionen in kg CO₂ je 100 km nach Antriebsart und Szenario

6 Zusammenfassung und Ausblick

Diese Arbeit soll einen wissenschaftlichen Beitrag leisten, um das „ökologische Potenzial“ von elektrisch betriebenen Fahrzeugen abzuschätzen. Im Vordergrund steht die Frage, ob und falls ja unter welchen Umständen Elektro-Pkw zu einer Reduktion der CO₂-Emissionen beitragen können. Um dies zu beurteilen, ist es wichtig, alle direkten und indirekten Effekte einschließlich aller Verflechtungen zu berücksichtigen, weshalb hier die Analysemethode EIO-LCA verwendet wurde.

Unter Berücksichtigung der ökonomischen Verflechtung steigen die indirekten Emissionen im Vergleich zur LCA. Bei konventionellen Fahrzeugen sind rund 80 % der Emissionen der Nutzungsphase zuzuordnen. Bei der EIO-LCA Berechnung steigt der Anteil der indirekten Emissionen von rund 20 % auf etwa 26 % an. Bei Elektrofahrzeugen machen die indirekten Emissionen naturgemäß 100 % aus. In absoluten Zahlen gerechnet, erhöht sich die emittierte Menge an kg CO₂ um mehr als 450 kg pro Jahr gegenüber der LCA-Methode.

Da im Modell viele Annahmen zu treffen sind, kommt der Sensitivitätsanalyse eine besondere Bedeutung zu. Während es im Basis-Szenarium keine markanten Unterschiede bezüglich CO₂-Emissionen zwischen den Antriebsvarianten gibt, werden elektrische Antriebe einschließlich Hybrid-Technologien deutlich emissionsärmer, wenn man einen „grünen“ Strom-Mix annimmt. Solange in Deutschland bei der Strombereitstellung noch rund ein halbes Kilogramm Treibhausgase pro kWh produziert wird, kann das Elektroauto keinen Beitrag zur Problematik der Klimaerwärmung beitragen, sondern verschärft den Treibhauseffekt sogar geringfügig. Der Fokus sollte also auf die Reduktion der Treibhausgase im deutschen Strom-Mix gelegt werden.

7 Literatur

- [1] Ahnan, M. (2000). *Primary energy efficiency of alternative powertrains in vehicles*. Energy, 973-989.
- [2] Destatis (2010a). *Input-Output-Rechnung im Überblick*. Wiesbaden: Statistisches Bundesamt.
- [3] Gemis 4.7 (2011). Globales Emissionsmodell integrierter Systeme. <http://www.gemis.de>
- [4] Heijung, R., & Suh, S. (2002). *The Computational Structure of Life Cycle Assessment* (11. Ausg.). Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- [5] Helmers, E. (2010). *Bewertung der Umwelteffizienz moderner Autoantriebe – auf dem Weg vom Diesel-Pkw-Boom zu Elektroautos*. Energie und Umwelt. Birkenfeld: Springer Verlag.
- [6] Hendrickson, C., Luce, L., et.al. (2006). *Environmental Life Cycle Assessment of Goods and Services - An Input-Output Approach*. Washington: Resources for the Future.
- [7] Holub, H., (1994). *Input-Output-Rechnung: Input-Output-Analyse*. München: R. Oldenbourg Verlag GmbH.
- [8] Klöpffer, W. (2009). *Ökobilanz(LCA): Ein Leitfaden Für Ausbildung und Beruf*. Weinheim: Wiley VCH Verlag.
- [9] Samaras, C. & Meisterling, K. (2008). *Life Cycle Assessment Of Greenhouse Gas Emissions From Plug-In Hybrid Vehicles: Implications For Policy*. Pittsburgh: Carnegie Mellon University.
- [10] Treiber, M. & Kesting, A. (2010). *Verkehrsdynamik und -simulation: Daten, Modelle und Anwendungen der Verkehrsflussdynamik*. Springer-Verlag.