

24. Verkehrswissenschaftliche Tage 2014

- Sind Elektroautos wirklich umweltfreundlich? -

B.Sc. Daniel Martin¹, Dr. Martin Treiber¹

¹ TU Dresden, Institut für Wirtschaft und Verkehr, Dresden

1. Einleitung

Das „Regierungsprogramm Elektromobilität“, das im Mai 2011 verabschiedet wurde und den „nationalen Entwicklungsplan Elektromobilität“ ablöste, soll die Rahmenbedingungen dafür schaffen, dass Deutschland sowohl der Leitmarkt als auch -anbieter in Sachen Elektromobilität wird. Die Zielsetzung ist ein Bestand von einer Million rein elektrisch betriebener Kraftfahrzeuge 2020 bzw. sechs Millionen im Jahre 2030. [1] Der Status quo sieht allerdings anders aus: 7114 Elektroautos waren Anfang 2013 in Deutschland verzeichnet [2], wobei ein prägnanter Anteil davon Fahrzeuge, die im Rahmen von Forschungsprojekten zugelassen wurden (ca. 2000), darstellt. [1]

Die Begeisterung der Bevölkerung im Lande ist dementsprechend noch sehr zurückhaltend. Die Politik setzt allerdings zu 100 % auf die Elektromobilität. Bundeskanzlerin Angela Merkel (CDU) bezeichnete die Umstellung vom Fahrzeug mit Verbrennungsmotor zum Elektroauto als ähnlich bedeutend wie die einstige Umstellung von der Kutsche zum Kraftfahrzeug. [3]

Ein weiterer Indikator für den hohen Stellenwert elektrischer Antriebe ist die Höhe der Ausgaben durch die Bundesregierung: 1,5 Mrd. Euro werden bis zum Ende der laufenden Legislaturperiode in die Forschung und Entwicklung von Elektromobilität investiert worden sein. Der Grund dafür ist die geplante Umstellung weg von endlichen, fossilen Brennstoffen, hin zur davon unabhängigen, „CO₂-freien Mobilität“, die damit trotz steigender Rohölpreise erschwinglich bleibt. [1]

Sicher ist, dass der Rohölbestand eines Tages erloschen sein wird, weswegen unter anderem die Antriebsumstellung der Individualmobilität vonnöten ist. Doch schlägt die Bundesregierung mit der Elektromobilität den richtigen Weg ein? Ist die Emissionsbilanz des Elektroautos im Hinblick auf die CO₂-Emissionen wirklich besser einzustufen als die der Fahrzeuge mit herkömmlichem Verbrennungsmotor? Die vorliegende Arbeit wird sich mit dieser Fragestellung beschäftigen und die Klimafreundlichkeit von Elektroautos mit bisher im Alltag gebräuchlichen Fahrzeugen vergleichen.

Hierzu wird die Methode des Verflechtungsmodells „Economic Input-Output Life Cycle Assessment“ angewandt, welche die innerhalb eines Lebenszyklus von PKW anfallenden Emissionen inklusive aller Verbindungen mit der Gesamtkonomie ermittelt. Als Untersuchungsobjekt dienen dabei drei Antriebsvarianten der sechsten Generation des VW Golf.

¹ Korrespondierender Autor: DanyMartin@gmx.de

2. Vorstellung der angewandten Methode

Die EU-Politik zielt einzig und allein auf die Treibhausgasemissionen ab, die im Laufe des Betriebs eines PKW anfallen. Dabei wird ausschließlich auf die direkten, lokalen Emissionen Wert gelegt (Tank-to-Wheel: „Vom Tank zum Rad“), so dass ein E-Auto konsequenterweise als 0 g-Emissions-Fahrzeug deklariert wird. Diese beschränkte Betrachtungsweise wird in den folgenden Kapiteln auf den gesamten Lebenszyklus der Fahrzeugmodelle ausgeweitet.

Das klassische Verfahren zur Ermittlung aller im Laufe einer gesamten Wertschöpfungskette anfallenden Emissionen ist die Ökobilanz bzw. das Life Cycle Assessment, welches alle Emissionen umfasst, die direkt bei der Herstellung, dem Betrieb und der Entsorgung anfallen. Volkswirtschaftliche Verflechtungen und Rückkopplungen sind darin allerdings nicht enthalten. Zur Ermittlung aller Emissionen, die sowohl mittelbar als auch unmittelbar durch die Herstellung, Nutzung und Entsorgung des Fahrzeugs anfallen, ist eine Kombination der LCA mit einer sog. „Input-Output-Analyse“ vonnöten. Diese Analysemethode wird als „Economic Input-Output-LCA“ bezeichnet. [4, 5]

Die Methode der EIO-LCA geht mit einer aggregierten Sichtweise aller Sektoren, die alle möglichen Güter und Dienstleistungen in einer Volkswirtschaft erstellen, ans Werk. Dazu werden zwei Vereinfachungen angenommen:

- Alle Produktions- und Dienstleistungseinrichtungen können in Sektoren zusammengefasst werden.
- Wenn der Output (eines Sektors) um einen bestimmten Prozentbetrag erhöht wird, müssen alle Inputs dieses Sektors um den gleichen Prozentsatz erhöht werden. [5]

Veranschaulicht werden kann der Vorteil des Verflechtungsmodells anhand der Produktion eines PKW-Lenkrads: Die Produktion an sich bringt Emissionen mit sich, zudem werden Materialien benötigt, wie z.B. Kunststoffe. Bei der Herstellung von Kunststoffen fallen ebenfalls Emissionen an, zudem werden auch hier Materialien benötigt (z.B. Öl). Auch die Ölförderung läuft nicht ohne Treibhausgasemissionen ab, außerdem müssen die entsprechenden Anlagen der Erdölförderung erst bereitgestellt werden. Die Kette zur Herstellung des Lenkrads ist sicherlich noch weitaus größer. Die EIO-LCA fasst alle anfallenden Emissionen (z.B. bei der Herstellung des Lenkrades an sich oder bei der Erdölförderung zur Produktion des für das Lenkrad benötigten Kunststoffes) innerhalb des gesamten Lebenszyklus eines Produkts zusammen. [5]

Zur Ermittlung der Emissionen sind die Emissionskoeffizienten (mittlere CO₂-Emission/€) der einzelnen Sektoren festzustellen. Hierbei lässt sich ein Nachteil der EIO-LCA feststellen: Sie benutzt zusammengefasste Daten für jeden Sektor anstatt jeden Prozess einzeln zu betrachten. Die tatsächlichen Emissionen weichen also mehr oder weniger stark vom berechneten Mittelwert ab. [5] Werden diese Koeffizienten mit dem Produkt aus Leontief-Inverse und Nachfragevektor multipliziert, erhält man die indirekten Emissionen pro Zeiteinheit. Das Endergebnis der EIO-LCA ergibt sich dann aus der Summe der direkten und indirekten Emissionen. [4]

Zur Durchführung dieses Verfahrens sind folgende konkrete Schritte durchzuführen:

- Aufstellung der Sachbilanz
- Abbildung der Sachbilanz auf die volkswirtschaftlichen Sektoren
- Berechnung der Emissionsfaktoren
- Ermittlung der Gesamtemissionen [4]

3. Rechnungsdurchführung

3.1. Aufstellung der Sachbilanz

Die ermittelten, teils geschätzten, Materialbedürfnisse der drei untersuchten Varianten des VW Golf sind Tabelle 4 zu entnehmen. Die Gesamtgewichte der drei Fahrzeuge stimmen mit den tatsächlichen Angaben des Herstellers überein.

Tabelle 1: Geschätzter Materialbedarf der drei Varianten des VW Golf

	Diesel	Benzin	Elektro
Basisfahrzeug (kg)			
Eisen und Stahl	686	686	686
Kupfer	18	18	18
Zink	4	4	4
Aluminium	43	43	43
Titan	1	1	1
Kunststoffe	199	199	199
Gummi	17	17	17
Glas	21	21	21
Baumwolle	11	11	11
Öle und Schmierstoffe	50	50	50
Antriebsspezifika (kg)			
Eisen und Stahl	131	70	90
Blei	10	4	5
Aluminium	39	42	54
Kunststoffe	20	14	18
Öle und Schmierstoffe	10	7	9
Keramiken	6	3	4
Akkumulator (kg)			
Lithium	0	0	16
Mangan	0	0	16
Kupfer	0	0	79
Eisen und Stahl	0	0	94
Kunststoff	0	0	31
Aluminium	0	0	79
Fahrzeuggewicht (kg)	1266	1190	1545

Neben den Materialbedürfnissen für die Produktion der Vehikel fallen außerdem jährlich Aufwendungen für die Versicherung, die Wartung und die Instandhaltung an. Diese werden für jeden Fahrzeugtyp spezifisch in die erweiterte Sachbilanz aufgenommen. Der Produktionsvorgang der Kraftfahrzeuge stellt einen weiteren Bestandteil dar.

3.2. Abbildung auf die volkswirtschaftlichen Sektoren

Um die Emissionen der Positionen der Sachbilanz ermitteln zu können, ist eine Zuordnung der einzelnen Materialien und Aufwendungen zu volkswirtschaftlichen Sektoren notwendig. Dabei wird in dieser Arbeit die Input-Output-Rechnung des Bundes herangezogen (aktuellste Ausgabe 2009), in der 73 Sektoren unterschieden werden. [6] Die sich ergebende Abbildung der Positionen der erweiterten Sachbilanz der Fahrzeuge auf die Sektoren des Bundes ist in Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 2: Zuordnung der Positionen der erweiterten Sachbilanzen zu Sektoren

Position	Sektorbezeichnung	Nr.
Eisen und Stahl	Roheisen, Stahl, Erzeugn. der ersten Bearbeitung von Eisen und Stahl	18
Kupfer	NE-Metalle und Halbzeug daraus	19
Zink	NE-Metalle und Halbzeug daraus	19
Aluminium	NE-Metalle und Halbzeug daraus	19
Titan	NE-Metalle und Halbzeug daraus	19
Kunststoff	Gummi- und Kunststoffwaren	15
Gummi	Gummi- und Kunststoffwaren	15
Glas	Glas und Glaswaren	16
Baumwolle	Textilien, Bekleidung, Leder- und Lederwaren	8
Öle und Schmierstoffe	Erdöl und Erdgas	5
Blei	NE-Metalle und Halbzeug daraus	19
Keramik	Keramik, bearbeitete Steine und Erden	17
Lithium	Gießereierzeugnisse	20
Mangan	Roheisen, Stahl, Erzeugn. der ersten Bearbeitung von Eisen und Stahl	18
Strom	Elektr. Strom, Dienstleistg. der Elektriz.-, Wärme- und Kälteversorg.	30
Diesel	Erdöl und Erdgas	5
Benzin	Erdöl und Erdgas	5
Fahrzeugbau	Kraftwagen und Kraftwagenteile	26
Versicherung	Dienstleistungen von Versicherungen und Pensionskassen	51
Wartung und Verschleiß	Handelsleistungen mit Kfz, Instandhaltung und Reparatur an Kfz	37
Recycling	Dienstleistg. d. Abwasser-, Abfallentsorgung und Rückgewinnung	33

Hierbei lässt sich die Problematik der Verflechtungsanalyse erkennen: Viele in den Automobilen verbauten Metalle sind im selben Sektor zusammengefasst. Die Emissionen der Herstellung dieser Metalle werden also mittels desselben Emissionsfaktors bemessen, wobei bspw. das Bereitstellen einer Einheit Aluminium reell mit mehr CO₂-Emissionen verbunden ist als das Bereitstellen einer Einheit Kupfer oder Zink. Durch die Umrechnung der Materialbedürfnisse zu gegebenen Marktpreisen egalisiert sich dieser Nachteil der EIO-LCA allerdings weitestgehend. [4]

Zudem ist ein weiteres Problem offensichtlich: Während der Materialbedarf zur Herstellung der Fahrzeuge in der Einheit kg vorliegt, werden andere Aufwendungen während der Nutzungsdauer (Wartung, Versicherung) in monetären Einheiten bemessen. Daher ist die Umrechnung der Gewichtseinheiten nötig, die die gegenwärtigen Marktpreise der Materialien berücksichtigt. Hierbei wird eine Recyclingquote von 60 % verwendet, was auch andere Studien annehmen. [5]

3.3. Ermittlung der Emissionsfaktoren

Das statistische Bundesamt stellt für die betrachteten 72 Sektoren (teils zusammengefasst) die in einem Jahr anfallenden Luftemissionen zur Verfügung. [7, 8] Zur Berechnung des CO₂-Äquivalents werden die Treibhausgaspotentiale der Vereinten Nationen (Zeithorizont 100 Jahre) herangezogen. [9] Des Weiteren enthält die IOM den gesamten Output der Sektoren innerhalb eines Jahres. Da die aktuellste Version der IOM aus

dem Jahre 2009 stammt, sind die Emissionen des Jahres 2009 relevant. Der Quotient aus CO₂-Äq. (in kg) und Gesamtoutput (in €) ergibt für jeden Sektor den spezifischen CO₂-Äq.-Emissionskoeffizienten (in kg/ €).

Die Emissionskoeffizienten des Sektors der elektrischen Stromversorgung sowie der Koeffizient des Sektors „Erdöl und Gas“ werden unabhängig davon mittels aktuellerer Daten berechnet. Die TtW-Emissionen der Verbrennung werden weiterhin separat berechnet und zu den indirekten Emissionen der EIO-LCA addiert.

3.4. Weitere Annahmen und Rechnungsdurchführung

Da es sich bei der IOA des Bundes um eine Jahresbetrachtung handelt, werden alle Einträge des Nachfragevektors durch die Laufleistung (in Jahren) der Fahrzeuge dividiert. Dadurch erhält man den Material- und Treibstoffbedarf, den Verwertungs-, Wartungs- und Versicherungsaufwand und den Wert der Fahrzeugherstellung jeweils pro Jahr.

Laut Herstellerangaben beträgt die Laufleistung der Golf-Modelle mit Verbrennungsmotor 150.000 km. [10] Die durchschnittliche jährliche Fahrleistung von in Deutschland registrierten PKW betrug im Jahre 2011 ca. 14.200 km. [11] In dieser Arbeit wird vereinfacht von einer jährlichen Fahrleistung von 15.000 km ausgegangen. Die Nutzungsdauer der beiden Fahrzeugtypen mit Verbrennungsmotor beträgt folglich zehn Jahre. Im Basisszenario entspricht dies ebenfalls der Nutzungsdauer des E-Golf, für den bezüglich der Laufleistung keine Herstellerangaben vorliegen.

Neben den drei bereits bekannten Fahrzeugvarianten wird im Basisszenario (und in allen anderen Szenarien) ebenfalls ein E-Golf betrachtet, bei dem während der Nutzungsdauer der Akkumulator ausgetauscht werden muss. Dieses Szenario wird betrachtet, da die Lebenszeit der Akkus wegen des häufigen Ladens und Entladens begrenzt ist. Die Wartungskosten der Dienstleistung des Akkumulatorwechsels werden zudem vernachlässigt.

4. Ergebnisse

Die Ergebnisse der EIO-LCA beziehen sich auf den Betrachtungszeitraum von einem Jahr. Da die angenommene jährliche Fahrleistung 15.000 km beträgt, werden durch die Division durch 150 die durchschnittlichen, insgesamt anfallenden Emissionen pro 100 km Fahrt ermittelt. Die Ergebnisse im Basisszenario sind Abbildung 1 zu entnehmen.

Die Herstellung des Akkumulators ist augenscheinlich sehr emissionsintensiv, da sowohl der Emissionswert der Materialbereitstellung als auch des Fahrzeugbaus beim E-Golf essenziell höher ist. Im Zuge der Herstellung insgesamt fallen beim E-Auto etwa 77 % mehr Emissionen an als beim Dieselfahrzeug, im Vergleich zum Benzinfahrzeug sind es sogar fast doppelt so viel (97 % mehr). Muss der Akkumulator ein zweites Mal hergestellt werden, erhöht sich die Emissionsbilanz noch einmal bedeutsam: Es werden ca. 43 % mehr CO₂-Äq. emittiert als beim E-Auto ohne Akkuwechsel. Dieser Wert entspricht damit dem Anteil der Emissionen der Batterieherstellung (inkl. Materialbereitstellung) an den Gesamtemissionen der Herstellung des E-Golf.

Die sonstigen betrieblich bedingten Emissionswerte (Wartung, Versicherung) kursieren bei allen drei Fahrzeugtypen um den Wert 1 kg/ 100 km Fahrt. Das Dieselfahrzeug ist hierbei der „Spitzenreiter“, der E-Golf emittiert aufgrund des geringeren Wartungs- und Instandhaltungsaufwandes diesbezüglich erwartungsgemäß am wenigsten CO₂-Äq.

Die Entsorgung des Akkumulators ist den Berechnungen zu Folge sehr emissionsintensiv und macht ca. 57 % der Gesamtemissionen der Entsorgung des E-Golf aus. Insgesamt fallen bei der Entsorgung des elektrisch betriebenen Fahrzeugs mehr als doppelt so viele Emissionen als bei den Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor an. Muss darüber hinaus ein Akkumulatorwechsel vorgenommen werden, sind es sogar gut dreieinhalbmal so viele Luftverunreinigungen.

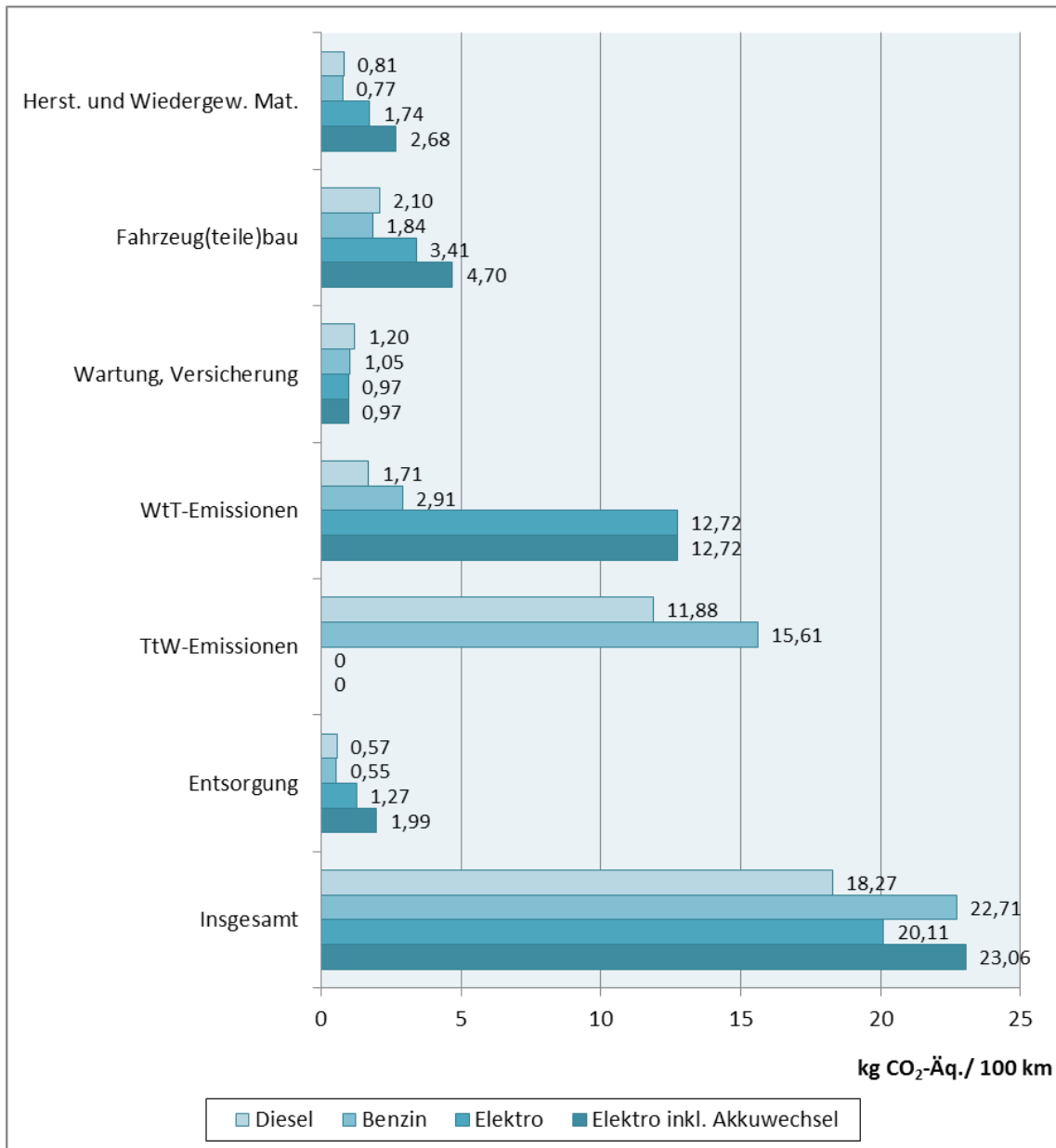


Abbildung 1: Treibhausgasemissionen in Kilogramm pro 100 km Fahrt (nach Bereichen, Basisszenario)

Bei Betrachtung der gesamten Emissionen innerhalb der Lebenszyklen der Fahrzeugvarianten inklusive aller volkswirtschaftlichen Verflechtungen liegt der E-Golf zwischen den beiden Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor: Seine Treibhausgasbilanz ist ca. 10 % schlechter als die des Dieselfahrzeugs, aber ca. 11 % besser als die des Benzinfahrzeugs. Muss der Akkumulator ausgetauscht werden, ist die Bilanz allerdings sogar geringfügig schlechter als die des Benzinfahrzeugs (ca. 2 %).

5. Sensitivitätsanalyse

Die Ergebnisse im Basisszenario sind von bestimmten Annahmen abhängig, die vornehmlich getroffen wurden. Deshalb wird im Folgenden analysiert, wie sich die Ergebnisse beim Modifizieren dieser Variablen, bzw. beim Wandel verschiedener technologischer Voraussetzungen, verändern. Tabelle 3 zeigt die CO₂-Äq.-Emissionen der Fahrzeugtypen in den verschiedenen Szenarien.

Tabelle 3: Treibhausgasemissionen der Fahrzeugtypen in kg CO₂-Äq. pro 100 km Fahrt nach Szenarien

Szenario	Diesel	Benzin	Elektro	Elektro inkl. Akkuwechsel
Basisszenario	18,27	22,71	20,11	23,06
Laufleistung 15 J.	17,11	21,67	17,97	19,94
Akku-Mat.-Bedürfnisse -25%	18,27	22,71	19,70	22,23
Akkuprod. 100 €/ kWh	18,27	22,71	19,08	20,99
Ökostrom	17,00	21,57	10,21	12,57
Chinastrom	19,71	24,00	31,28	34,89
Langfristziel EU	15,55	15,46	20,11	23,06

Das erste abgewandelte Szenario geht von einer erhöhten Laufleistung von 15 statt 10 Jahren (bzw. 225.000 km statt 150.000 km) aus. Dies ist insbesondere für den E-Golf relevant, da E-Autos im Allgemeinen länger halten. [12] Hier verringert sich die Treibhausgasbelastung pro 100 km um knapp 11 % und sinkt auf ein Niveau, das unter dem des Diesels im Basisszenario liegt. Fraglich ist allerdings, ob ungeachtet des Restfahrzeugs auch beim Akkumulator eine Nutzungsdauer von 15 Jahren realistisch ist. [13] Muss der Akku gewechselt werden, liegt die Emissionsbelastung ca. 9 % über der des Dieselfahrzeugs im Basisszenario und sogar ca. 17 % darüber, falls die Lebenszeit des Diesels ebenfalls 15 Jahre beträgt.

Sowohl die Senkung des spezifischen Materialaufwands der Produktion des Akkus bei gleichbleibender Kapazität, als auch die Senkung der Produktionskosten von Akkumulatoren, was beides wohl mittelfristig realisierbar ist, lassen den E-Golf noch immer nicht besser als die Alternativen mit Verbrennungsmotor dastehen.

Dies ändert sich, wenn statt des deutschen Strommix ein spezifischer CO₂-Emissionsfaktor der Stromerzeugung von 0,2 kg/ kWh angenommen wird („Ökostrom“). Während sich die Emissionswerte der Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor aufgrund der volkswirtschaftlichen Verflechtung mit dem Sektor der Energiebereitstellung über den gesamten Lebenszyklus geringfügig verbessern, halbieren sich die Emissionen des E-Autos sogar um knapp die Hälfte. Der E-Golf emittiert in diesem Szenario nur etwa 60 % so viel wie das Dieselmotormodell. Selbst wenn ein Akkuwechsel vonnöten ist, ist die Emissionsbilanz um gut 26 % besser als die des TDI.

Wird stattdessen angenommen, dass ein Großteil der bereitgestellten Energie in Kohlekraftwerken hergestellt wird („China-Strom“) und der Emissionsfaktor der Stromerzeugung 1 kg/ kWh beträgt, sind logischerweise genau gegenteilige Effekte festzustellen. Die Umweltbilanz des E-Golf verschlechtert sich mit und ohne nötigem Akkuwechsel um gut die Hälfte gegenüber dem Basisszenario. Auch die Bilanzen des Diesel- und des Benzinfahrzeugs verschlechtern sich (um knapp 8 % bzw. 6 %), fallen aber um gut 37 % bzw. 23 % besser aus als beim E-Golf, selbst wenn dort kein Akkuwechsel nötig ist.

Die EU gibt für das Jahr 2020 das Ziel aus, den spezifischen CO₂-Emissionskoeffizienten von PKW in Europa auf 95 g/ km zu begrenzen (siehe Kap. 2.3.2). Dies entspricht einem Treibstoffverbrauch von ca. 3,6 l/ 100 km (Diesel) bzw. 4,1 l/ 100 km (Benzin). Lässt sich ein solcher Verbrauch bei sonst gleichbleibenden Bedingungen und Materialbedürfnissen realisieren, ist plötzlich das Benzinfahrzeug das umweltfreundlichste aller betrachteten Varianten und emittiert in etwa 30 % weniger als der E-Golf. Auch der TDI ist nur geringfügig emissionsreicher und 29 % besser als der blue-e-motion. Muss der Akku getauscht werden, erhöhen sich diese Werte sogar auf gut 49 % bzw. 48 %.

6. Fazit und Ausblick

Diese Arbeit hat einen wissenschaftlichen Beitrag zur Fragestellung liefern sollen, ob Fahrzeuge, die rein elektrisch betrieben werden, weniger stark zum Treibhauseffekt beitragen als konventionelle Fahrzeuge. Hierzu wurden mittels der EIO-LCA die Emissionen aller direkt und indirekt verflochteten Aktivitäten innerhalb der deutschen Volkswirtschaft, die mit der Herstellung, dem Betrieb und der Entsorgung der untersuchten Fahrzeuge zusammenhängen, ermittelt.

Da der Betrachtungsrahmen sehr viel umfangreicher ist als der der Studien, die eine Lebenszyklusanalyse oder alleine den Betrieb der Fahrzeuge betrachten, ist das Ergebnis schlussfolgernd sehr viel aussagekräftiger: Der Golf mit Dieselantrieb ist im Status quo umweltfreundlicher als der E-Golf. Das Anwenden der EIO-LCA dreht somit die Ergebnisse einer herkömmlichen LCA (angewandt auf den VW Golf VI) um. [13]

Das einzige Szenario, das den E-Golf gegenüber dem Dieselfahrzeug im Vorteil sieht, ist der Bezug von Ökostrom. Diesbezüglich legte ein Kabinettsbeschluss im Juni 2011 die Ziele fest, dass der Anteil erneuerbarer Energie am gesamten erzeugten Strom 2020 mindestens 35 % und 2050 mindestens 80 % betragen soll, während dieser 2012 noch ca. 22 % betrug. Die Umsetzung dieser Ziele hätte eine signifikante Senkung des Emissionskoeffizienten der Stromerzeugung zur Folge. Auch international ist mit der Gründung der Internationalen Organisation für erneuerbare Energien die Grundlage für das Bestreben des Ausbaus erneuerbarer Energiequellen geschaffen. [14]

Sollen elektrisch betriebene Fahrzeuge einen Beitrag zur Verringerung der Treibhausgase in Deutschland leisten, muss die Senkung des spezifischen Emissionskoeffizienten der Energiebereitstellung die oberste Maxime der deutschen Bundesregierung sein. Vor dem Hintergrund, dass die aktuellen Modelle der siebten Generation des VW Golf sogar noch weitaus weniger Treibstoff benötigen als die in dieser Arbeit betrachteten Vehikel (Benzin: 4,9 l/ 100 km, Diesel 3,8 l/ 100 km nach NEFZ) [15] und damit den europäischen Zielvorgaben für das Jahr 2020 sehr nahe kommen, steht der E-Golf im Vergleich sogar noch schlechter da. Ein Ausbau erneuerbarer Energien im deutschen Strommix ist zur Sicherstellung der Umweltfreundlichkeit der Elektromobilität im Vergleich zu konventionellen Fahrzeugen damit unerlässlich.

7. Literatur

- [1] Die Bundesregierung (2011): *Regierungsprogramm Elektromobilität*, <http://www.bmbf.de/>, 05.08.2013.
- [2] Kraftfahrtbundesamt (2013): *Bestand an Personenkraftwagen in den Jahren 2006 bis 2013 nach ausgewählten Kraftstoffarten (Teil 2)*, <http://www.kba.de/>, 06.08.2013.
- [3] Die Bundesregierung (2013): *Rede von Bundeskanzlerin Merkel bei der Internationalen Konferenz „Elektromobilität bewegt weltweit“*, <http://www.bundesregierung.de/> 04.08.2013.
- [4] A. Auf der Maur, M. Treiber & S. Lämmer (2012): *Kombinierte Lebenszyklus- und Verflechtungsanalyse zur Bilanzierung der CO₂-Emissionen von Elektrofahrzeugen*, <http://stefanlaemmer.de/>, 16.07.2013.
- [5] C. T. Hendrickson, L. B. Lave & H. S. Matthews (2006): *Environmental Life Cycle Assessment of Goods and Services – An Input-Output Approach*, Washington DC, RFF Press.
- [6] Statistisches Bundesamt (2013): *Volkswirtschaftliche Gesamtrechnungen – Input-Output-Rechnung 2009*, <https://www.destatis.de/>, 06.08.2013.
- [7] Statistisches Bundesamt (2013): *Luftemissionen: Deutschland, Jahre, Luftemissionsart, Produktionsbereiche*, <https://www-genesis.destatis.de/>, 18.08.2013.
- [8] Statistisches Bundesamt (2012): *Umweltnutzung und Wirtschaft – Tabellen zu den Umweltökonomischen Gesamtrechnungen – Teil 3: Luftemissionen*, <https://www.destatis.de/>, 19.08.2013.
- [9] Vereinte Nationen (2013): *Global Warming Potentials*, <http://unfccc.int/>, 07.08.2013.
- [10] Volkswagen (2008): *Der Golf – Umweltprädikat – Hintergrundbericht*, <http://www.volkswagen.de/>, 31.7.2013.
- [11] U. Kunert, S. Radke, B. Chlond & M. Kagerbauer (2012): *Auto-Mobilität: Fahrleistungen steigen 2011 weiter*, <http://www.diw.de/>, 20.08.2013.
- [12] M. Lienkamp (2012): *Elektromobilität: Hype oder Revolution?*, Berlin-Heidelberg, Springer-Verlag.
- [13] H.-J. Althaus & M. Gauch (2010): *Vergleichende Ökobilanz individueller Mobilität: Elektromobilität versus konventionelle Mobilität mit Bio- und fossilen Treibstoffen*, <http://www.empa.ch/>, 13.08.2013.
- [14] Die Bundesregierung (2013): *Erneuerbare Energien – ein neues Zeitalter hat begonnen*, <http://www.bundesregierung.de/>, 02.09.2013.
- [15] Volkswagen (2012): *Der Golf – Umweltprädikat – Hintergrundbericht*, <http://www.volkswagen.de/>, 04.09.2013.