



Michael Ritthoff, Dr. Karl Otto Schallaböck

Ökobilanzierung der Elektromobilität Themen und Stand der Forschung

Teilbericht im Rahmen der Umweltbegleitforschung Elektromobilität
im Förderschwerpunkt „Modellregionen Elektromobilität“
(FKZ 03KP5003)

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Verkehr, Bau
und Stadtentwicklung

Koordiniert durch:



Wuppertal, im Januar 2012

Inhalt

1. Einleitung.....	4
2. Stand der Ökobilanzierung	4
<i>Fahrzeugvergleiche</i>	5
<i>Rohstoffverfügbarkeit: Batterien für Elektro-Fahrzeuge und Treibstoffe für herkömmliche Fahrzeuge</i>	7
<i>Energiesystem</i>	12
<i>Flächeninanspruchnahme</i>	13
3. Schlussfolgerungen	14
Literatur:	16

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1	Übersicht über die Fahrzeugdaten der im Rahmen des 43. LCA Diskussionsforum vorgestellten Elektrofahrzeuge	5
Tabelle 2	Reserven zum Jahresende in EJ	10
Tabelle 3	Ressourcen zum Jahresende in EJ.....	10
Tabelle 4	CO ₂ -Potenziale der Reserven zum Jahresende in Gt.....	11
Tabelle 5	CO ₂ -Potenziale der Ressourcen zum Jahresende in Gt	11

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1	Treibhausgaspotenzial für verschiedene Fahrzeuge und Stromerzeugungsvarianten	6
Abbildung 2	Versauerungspotenzial für verschiedene Fahrzeuge und Stromerzeugungsvarianten	7

1. Einleitung

Ökobilanzen sind etablierte Instrumente zur Analyse und Bewertung sowie zum Vergleich von Umweltwirkungen von Produkten, Technologien und Unternehmen.

Ziel von Produktökobilanz, damit auch von Ökobilanzen bei der Bewertung von Technologien, ist die lebenszyklusweite Betrachtung der relevanten Umweltwirkungen. Die Durchführung von Ökobilanzstudien ist in der ISO 14040¹ und 14044² normiert. Eine Vielzahl von Ökobilanzstudien orientiert sich an diesen Normen. Insbesondere aufgrund des hohen Aufwandes solcher Studien, aber auch aufgrund einer Reihe von Einschränkungen insbesondere in Hinblick auf die Ergebnisdarstellung und -auswertung, gibt es jedoch auch zahlreiche Lebenszyklusanalysen, die nicht oder nur in Teilen der Norm entsprechen.

Gemeinsames Element von Produktökobilanzen ist jedoch die Betrachtung des kompletten Lebensweges – von der Wiege bis zur Bahre – eines Produktes. Dementsprechend liegt der methodische Schwerpunkt solcher Analysen auf der zeitlich wie räumlich möglichst vollständige Erfassung der Umweltwirkungen bzw. der ausgewählten Umweltwirkungen. Ökobilanzen zeichnen sich insofern oft durch ein hohes Maß an Vollständigkeit der Erfassung der Umweltwirkungen aus. Gleichzeitig haben sie häufig Schwächen hinsichtlich der räumlichen Zuordnung von Umweltwirkungen. Insbesondere gelingt es mit Ökobilanzen oft nicht, räumliche Emissionsspitzen adäquat abzubilden oder auch nur zu erkennen. Solche lokalen Auswirkungen auf die Umwelt können jedoch etwa im Rahmen einer Umweltverträglichkeitsprüfung abgebildet werden. Diese ist jedoch ihrerseits völlig ungeeignet, wenn es um die Erfassung globaler Effekte wie etwa dem anthropogenen Treibhauseffekt geht.

Im Bereich von Mobilität wurden bisher verschiedenste Ökobilanzen durchgeführt. Wichtig waren insbesondere:

- Vergleiche von Verkehrssystemen und Verkehrsträgern,
- Ökobilanzen von einzelnen Kraftfahrzeugen,
- Ökobilanzen zu einzelnen Fahrzeugkomponenten zur Optimierung des Fahrzeugs,
- Vergleichende ökobilanzielle Betrachtungen zu Werkstoffen und möglichen Substituten, sowie zu Einsparpotenzialen durch Verringerung des Fahrzeuggewichts,
- Vergleiche zwischen unterschiedlichen Treibstoffen.

Elektro- und Hybridfahrzeugen wurden seit Mitte der 1990ziger Jahre in solche Ökobilanzen einbezogen.

2. Stand der Ökobilanzierung

Ökobilanzen im Zusammenhang mit Elektromobilität beschäftigen sich derzeit vor allem mit drei Fragestellungen:

- dem Vergleich zwischen mit Verbrennungsmotor betriebenen Fahrzeugen, Hybridfahrzeugen (insbesondere Plug-in-Hybrid) sowie Elektrofahrzeugen,

¹ DIN EN ISO 14040:2009-11 Umweltmanagement - Ökobilanz - Grundsätze und Rahmenbedingungen.

² DIN EN ISO 14044:2006-10 Umweltmanagement - Ökobilanz - Anforderungen und Anleitungen.

- der Elektrizitätserzeugung für Elektromobilität und
- Traktionsbatterien.

Daneben wird die Frage möglicher kritischer Ressourcen für Elektromobilität, insbesondere mit Blick auf Batterien und Antriebsmotoren, intensiv diskutiert.

Fahrzeugvergleiche

Bis heute wurde eine Reihe von ökobilanziellen Vergleichen zwischen Elektrofahrzeugen, Hybridfahrzeugen und herkömmlich angetriebenen Fahrzeugen durchgeführt.

Bereits 1996 wurden mit Blick auf das Treibhausgaspotenzial des vollständigen Lebenswegs unterschiedlicher Fahrzeuge nur geringe Unterschiede zwischen konventionellen Fahrzeugen und Hybridfahrzeugen identifiziert (Weibel/Dietrich 1996). Zwischenzeitlich wurde eine Reihe weiterer einschlägiger Untersuchungen durchgeführt. Zuletzt wurden auf dem 43. LCA Diskussionsforum³ im April 2011 verschiedene neuere Ergebnisse vorgestellt.

In mehreren Untersuchungen wurden insbesondere Fahrzeuge der Kompaktklasse („Golfklasse“) sowie „kleine Stadtfahrzeuge“ mit jeweils unterschiedlichen Antriebskonzepten verglichen.

Tabelle 1 Übersicht über die Fahrzeugdaten der im Rahmen des 43. LCA Diskussionsforum vorgestellten Elektrofahrzeuge

	Held	Lambrecht	Frischknecht	Althaus	Simons	Freire
Car weight (kg)	1,670	n.a.	1,632	1,880	1,650	1,531
Lifetime performance car (km)	171,600	150,000	150,000	150,000	n.a.	200,000
Battery weight (kg)	400	250	312	400	250	329
Lifetime performance battery (km)	114,400	100,000	75,000	150,000	n.a.	100,000
Electricity consumption (kWh/100 km)	22.9	22	20	20	20	18.8
Electricity mix	DE	DE	CH	CH	CH	PT
Climate change impact (g CO ₂ -eq/km)	240	225	150	95	110	165

Quelle: Frischknecht (2011), S.4.

Hinsichtlich des Treibhausgaspotenzials zeigt sich insbesondere eine deutliche Abhängigkeit des Ergebnisses vom eingesetzten Strommix.

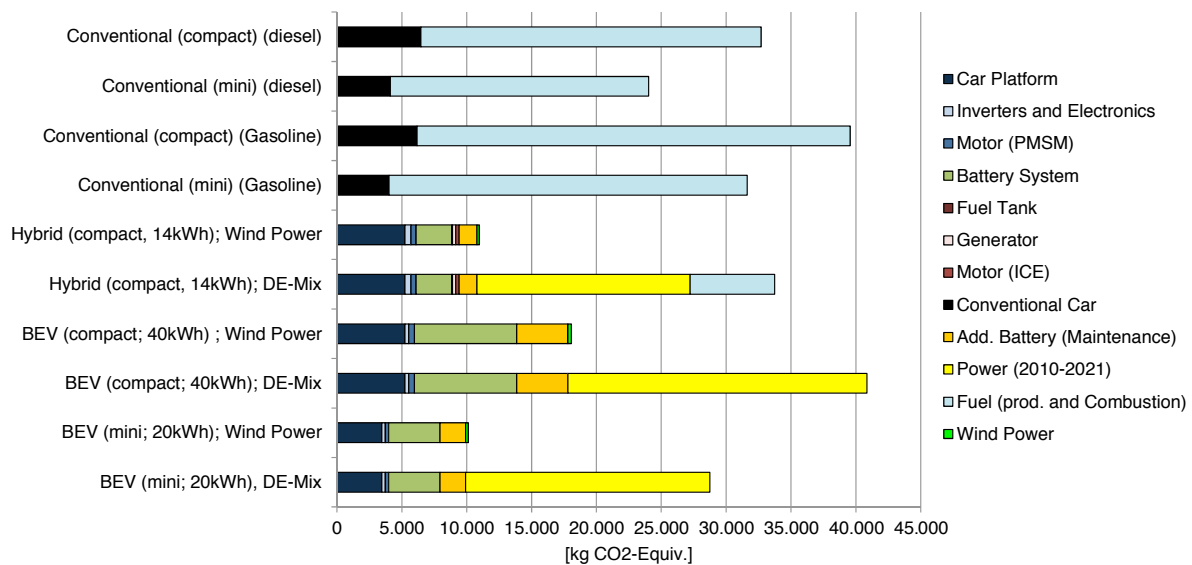
Im Rahmen von FSEM (Fraunhofer System Research for Mobility), in dem Fraunhofer Institut entlang der gesamten Wertschöpfungskette der Elektromobilität beteiligt sind, wurden Screening Ökobilanzen angefertigt, die auf FSEM interne Informationen aufbauen. Die Ergebnisse zeigen eine erhebliche Streuung der Treibhausgasemissionen in Abhängigkeit von Fahrzeuggröße und Antriebskonzept. Einen wesentlichen Einfluss hat jedoch – wie oben genannt - insbesondere der Strommix für den Betrieb der Elektrofahrzeuge (vgl. Abbildung 1).

Die betrachteten Szenarien betrachten als Strommix 100 Prozent Windenergie und einen fortgeschriebenen Strommix für Deutschland mit steigenden Anteilen erneuerbaren Energien eingerechnet (Held 2011).

³ 43rd LCA Discussion Forum, Life Cycle Assessment of Electromobility, 6th of April 2011.

Bei den Kompaktfahrzeugen gibt es hinsichtlich der lebenszyklusweiten Treibhausgasemissionen nur geringe Unterschiede zwischen den konventionell angetriebenen Fahrzeugen und den Hybrid- und Elektrofahrzeugen, wenn für die Strombereitstellung der deutsche Strommix angesetzt wird. Hierbei ergeben sich für das Dieselfahrzeug die insgesamt geringsten und das Elektrofahrzeug die insgesamt höchsten Emissionen. Dieses Ergebnis ändert sich jedoch deutlich, wenn die Elektrizität ausschließlich aus Windkraft erzeugt wird. In diesem Fall schneidet das Plug-in-Hybrid Fahrzeug, vor dem reinen Elektrofahrzeug, am besten ab, wobei für das Hybridfahrzeug in der Darstellung wohl die Emissionen aus der Verbrennung des Kraftstoffs nicht abgebildet wurden. Dennoch dürfte sich auch bei Einbeziehung dieser Emissionen die Reihenfolge nicht ändern.

Abbildung 1 Treibhausgaspotenzial für verschiedene Fahrzeuge und Stromerzeugungsvarianten



Quelle: Held (2011).

Auch von Frischknecht (2011) wurden unterschiedliche Fahrzeuge miteinander verglichen. Bei den Kompaktwagen wurde neben herkömmlichen PKW mit Diesel-, Benzin- und Erdgasantrieb zusätzlich ein besonders sparsames Dieselfahrzeug sowie ein Elektrofahrzeug betrachtet. Bei den Kleinwagen wurden ein Dieselfahrzeug und ein Elektrofahrzeug betrachtet.

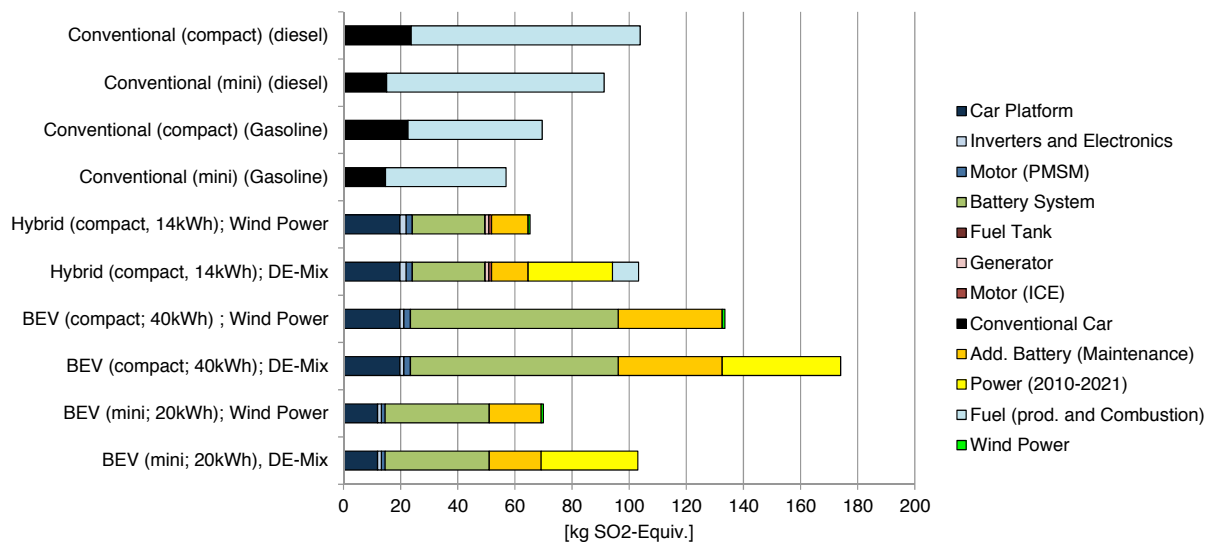
Hierbei zeigt sich, dass bei den Kompaktwagen das Elektrofahrzeug lebenszyklusweit signifikant weniger Treibhausgasemissionen erzeugt als die herkömmlichen Benzin-, Diesel- und Erdgasfahrzeuge, der Unterschied zu einem verbrauchsarmen Diesel jedoch nur minimal ist. Bei den betrachteten Kleinwagen war der Unterschied größer, da hier von einer längeren Lebensdauer der Batterie ausgegangen wurde.

In einer portugiesischen Studie (Marques/Freire 2011) wurden ebenfalls Fahrzeuge der Kompaktklasse betrachtet. Hierbei wurde als zusätzliche Differenzierung noch der Unterschied zwischen innerstädtischem und außerstädtischem Verkehr untersucht. Bei Anwendung des portugiesischen Strommixes, hatten die Elektrofahrzeuge grundsätzlich Vorteile. Für den Fall, dass der Strom mit Kohle erzeugt werden muss, ergeben sich jedoch auch hier für das Elektrofahrzeug höhere Treibhausgasemissionen.

Ähnlich deutlich auf die Relevanz des Strommixes weisen die Ergebnisse von Althaus (2011) hin. Hierbei wurde ein "zukünftiges Elektrofahrzeug" mit einem effizienten Dieselfahrzeug verglichen. Wird der Mix aus dem UCTE-Netz verwendet, ergeben sich vergleichbare Ergebnisse. Beim Einsatz von Kohlestrom ergeben sich Vorteile für das Dieselfahrzeug, bei Einsatz von Kernenergie Vorteile für das Elektrofahrzeug,

Die Ergebnisse der Vergleiche ändern sich, wenn nicht nur das Treibhausgaspotenzial betrachtet wird, sondern ebenfalls andere Umweltindikatoren. So ergeben sich bei der FSEM Studie für den Indikator Versauerungspotenzial für die Hybrid- und Batteriefahrzeuge relativ gesehen schlechtere Werte im Vergleich zu den diesel- und insbesondere benzinbetriebenen Fahrzeugen (Held 2011).

Abbildung 2 Versauerungspotenzial für verschiedene Fahrzeuge und Stromerzeugungsvarianten



Quelle: Held 2011.

Auch bei Frischknecht (2011) verschlechtern sich die Ergebnisse für die Hybrid- und Elektrofahrzeuge deutlich aufgrund anderer Emissionen bei der Herstellung der Batterien, wenn nicht alleine die Treibhausgasemissionen sondern EcoPoint 2006⁴, ein nicht ISO 14040 konformes Bewertungsverfahren für Ökobilanzen, für die Bewertung herangezogen werden.

Rohstoffverfügbarkeit: Batterien für Elektro-Fahrzeuge und Treibstoffe für herkömmliche Fahrzeuge

Batterien

Batteriesysteme für Elektrofahrzeuge wurden ebenfalls bereits 1996 untersucht. Dabei wurden jedoch nur nickel- und bleibasierte Systeme betrachtet (Weibel/Dietrich 1006). Auch Rantik (1999) untersuchte exemplarisch fünf Batterietypen auf potenzielle Umweltwirkungen von Herstellung, Nutzung und Recycling auf Grundlage der Lebensdauer eines Elektroautos.

⁴ EcoPoint ist eine u.a. in den Modellen SimaPro und Umberto unterstützte Umweltbewertungsmethode. Für einen kurzen Überblick, auch im Vergleich mit den Ansätzen von „Environmental Priority System“ und „Eco Indicator 99“ vgl. z.B. www.srl.gatech.edu/education/ME4171/LCA_metrics.ppt.

Auch bei dieser Studie wurden noch keine Lithiumbatterien untersucht. Als besonders kritisch wird die noch schlechte Effizienz der untersuchten Batterien herausgestellt, da durch die Speicherverluste höhere Umweltwirkungen entstehen können als durch die Batterieherstellung. Ergänzend wurde auch auf die schlechte Verfügbarkeit der Rohstoffe Nickel und Cadmium hingewiesen.

Auch Rydh (2003) betrachtete unterschiedliche Batterietypen aus einer Lebenszyklusperspektive, wobei mobile und industrielle Anwendungen berücksichtigt wurden und kein Schwerpunkt auf Traktionsbatterien gelegt wurde. Eine neuere LCA-Studie (Samaras/Meisterling 2007) beinhaltet Lebenszyklusanalysen von Lithium-Ionen-Batterien. Untersuchungsgegenstand sind hier aber keine reinen Elektroautos, sondern Hybrid- und Plug-in-Hybrid-Fahrzeuge.

Lambrecht (2011) schätzt ab, dass bei Elektrofahrzeugen, abhängig von Lebensdauer und Speicherbedarf, ca. 17 g CO₂ äquiv. pro km nur auf die Batterieherstellung entfallen.

Insbesondere für Batterien sind Fragen der Ressourcenverfügbarkeit von hoher Relevanz. Wichtige Metalle für Traktionsbatterien, sind insbesondere Blei (und Antimon als Legierungsbestandteil), Cadmium, Nickel und Lithium.

Von diesen Metallen kann Blei bei geologischen Reserven von 79 Mio. t aber geschätzten Ressourcen⁵ von 1.500 Mio. t und einer Jahresförderung von ca. 3.8 Mio. t im Jahr 2008 (US Geological Survey) hinsichtlich der Verfügbarkeit als unkritisch eingeschätzt werden. Das gilt noch stärker für Antimon, da der Antimonanteil an den eingesetzten Bleilegierungen stetig verringert wurde und perspektivisch von antimonfreien Bleilegierungen ausgegangen wird (Carlin 2009).

Die Verfügbarkeit von Cadmium ist hinsichtlich der verfügbaren Mengen zwar deutlich kritischer zu bewerten, jedoch erscheint es aufgrund des erheblichen toxikologischen und kanzerogenen Potentials von Cadmium unwahrscheinlich, dass es gegen dem sonstigen Trend in Traktionsbatterien eine weite Verbreitung finden wird.

Deutlich kritischer gestaltet sich die Verfügbarkeit von Nickel und Lithium.

Die Edelstahlherstellung ist für mehr als 60 Prozent der Nickelverwendung verantwortlich, daneben wird es insbesondere auch für Superlegierungen eingesetzt. Insbesondere für die weitere Effizienzsteigerung von Wärmekraftwerken durch Erhöhung der Dampftemperaturen ist die Nutzung von hochtemperaturfesten neuen Stahllegierungen auf der Basis von Nickel oder von Superlegierungen notwendig und kann bisher nicht substituiert werden. Daneben wird Nickel zunehmend auch in Batterien eingesetzt. Die Verwendung von Nickel in Batterien hat stark zugenommen ist jedoch bisher dennoch nur für rund 5 Prozent der Verwendung verantwortlich.

Die Verfügbarkeit von Nickel ist kritisch, da die Nickelvorräte zwar global relativ weit verbreitet sind, es jedoch sowohl in Europa wie auch in den USA praktisch keine Vorräte gibt. Die derzeit wirtschaftlich gewinnbaren Vorräte würden auch eine stärkere Nutzung von Nickel in

⁵ Reserve: Diejenigen Mengen eines Rohstoffes, die mit großer Genauigkeit erfasst wurden und mit den derzeitigen technischen Möglichkeiten wirtschaftlich gewonnen werden können.

Ressourcen: Diejenige Mengen eines Rohstoffes, die entweder nachgewiesen, aber derzeit nicht wirtschaftlich gewinnbar sind, oder aber die Mengen, die auf Basis geologischer Indikatoren noch erwartet werden und mittels Exploration nachgewiesen werden können.

Batterien zulassen. Einer Förderung von ca. 1,6 Mio. t in 2008 stehen Reserven von rund 70 Mio. t gegenüber (U. S. Geological Survey 2009).

Lithium ist das vermutlich am meisten diskutierte Metall im Zusammenhang mit der Energiespeicherung in Pkws. Neben der Nutzung in Akkumulatoren und Batterien kommt es insbesondere in Spezialgläsern, bei der Herstellung von Aluminium und in Aluminiumlegierungen zum Einsatz. Die unterschiedlichen Einsatzbereiche von Lithium sorgen dafür, dass Lithium aus unterschiedlichen Lagerstättentypen wirtschaftlich gewonnen werden kann. Die bevorzugten Lagerstätten hängen auch von der Verwendung ab. Besonders preisgünstig lässt sich Lithium aus Lithiumlaugen von Salzseen (z. B. USA, China oder Chile) gewinnen. Für einige Anwendungen in der Glas- und Keramikindustrie werden jedoch die Minerale bevorzugt (Pohl 2005).

Derzeit wird Lithium nur von einer geringen Zahl von Ländern produziert, es sind jedoch in unterschiedlichen Regionen Lagerstätten vorhanden. Auch beim Lithium verfügt Europa jedoch nur über geringe Vorräte und eine geringe Förderung (ausschließlich Portugal), es wird jedoch eine weitere Lagerstätten in Finnland erschlossen, in mehreren anderen europäischen Ländern (Österreich, Frankreich, Irland, Spanien, Schweden) gibt es Lagerstätten lithiumhaltiger Pegmatite, die bei steigenden Preisen von Lithium wirtschaftlich abgebaut werden könnten (Jaskula 2009).

Die globalen Lithiumreserven werden vom USGS⁶ mit 4,1 Mio. t angegeben, die Ressourcen mit 13 Mio. t. Dem steht eine Förderung von 27.400 t in 2008 gegenüber. Bezogen auf die Reserven liegt die statische Reichweite derzeit damit bei rund 150 Jahren. Bei einer verstärkten Nutzung von Lithium in Traktionsbatterien und anderen Sekundärbatterien dürfte der Lithiumverbrauch jedoch deutlich ansteigen. Bereits derzeit wird der Lithiumbedarf stark vom Verbrauch in der Batterieproduktion getrieben (Jaskula 2009). Sollte es zu einem breiten Einsatz von Li-Ion-Batterien in Automobilen kommen, würde dies den bisherigen Verbrauch von Lithium deutlich steigern wie die folgende Abschätzung verdeutlicht:

Der Lithiumgehalt für eine 20-kWh-Batterie wird mit rund 1,8 kg angegeben (Mathoy 2008). Hiermit soll ein rund 1 t schweres Fahrzeug eine Reichweite von 160 km erreichen können. In 2007 wurden weltweit rund 60,5 Mio. Personenkraftwagen produziert, rund 19,5 Mio. Pkw wurden davon in der EU und rund 5,7 Mio. Pkw in Deutschland produziert. Würde man jeweils alle Pkw mit einem Elektroantrieb und Lithium-Ionen-Batterien mit jeweils 20 kWh ausstatten würde sich ein jährlicher Lithiumbedarf von global rund 108.900 t/a, in der EU von rund 35.100 t/a und in Deutschland von rund 10.260 t/a ergeben.

Man wird jedoch auch davon ausgehen müssen, dass ein erheblicher Anteil des Lithiums recycelt werden kann. Für die Ausrüstung einer globalen Pkw-Flotte von 1 Mrd. Pkw würde sich ein Gesamtbedarf von rund 1,8 Mio. t Lithium ergeben. Das ist ein erheblicher Anteil der derzeitigen Reserven, erscheint aber mit Blick auf die Lithiumressourcen durchaus umsetzbar. Insofern ist beim Lithium keine rasche geologische Verknappung anzunehmen. Die Vorräte sind insgesamt groß und eine deutlich stärkere Nutzung von Lithium in Batterien erscheint möglich. Eine Kreislaufführung des eingesetzten Lithiums wird jedoch sicherlich notwendig sein.

⁶ U.S. Geological Survey (2009).

Energierohstoffe

Auf Seiten der herkömmlich angetriebenen Fahrzeuge stellt die Aussicht auf eine abnehmende Verfügbarkeit mineralöl-basierter Kraftstoffe, insbesondere gestützt auf die Diskussion um Peak-Oil eine der zentralen Motivationen für deren kritische Einschätzung und in der Folge die beabsichtigte Elektrifizierung des Antriebsstrangs dar. Nun ist einerseits die Sorge um eine zureichende Ölversorgung nicht neu, sondern spätestens seit den Ölpreiskrisen von 1973 und 1979 auch ins breite öffentliche Bewusstsein gedrungen. Auch die logisch zwingende Notwendigkeit sinkender Ölförderraten in der Zukunft sollte mindestens seit der Diskussion um die „Grenzen des Wachstums“ vor etwa 40 Jahren (Forrester 1971, Meadows 1972 etc.) verstanden sein. Andererseits sollte ebenso klar sein, dass Mineralöl nicht die einzige mögliche Basis für flüssige Kraftstoffe darstellt und elektrischer Strom nicht die einzige mögliche Alternative bildet. Außerdem sind für die konkrete, auch quantitative Bestimmung der Perspektiven selbstverständlich auch das quantitative Ausmaß der Reservenlage und die Klimarelevanz der Nutzung fossiler Energierohstoffe maßgeblich.

Eine entsprechend differenzierte Betrachtung führt zu einem Ergebnis, das von der volkstümlich vereinfachten Einordnung nicht unwesentlich abweicht. Zunächst sei die aktuelle Einschätzung über den Umfang der Reserven und Ressourcen von Energierohstoffen und die Entwicklung dieser Einschätzung in jüngerer Zeit betrachtet. Die nachfolgenden Tabellen zeigen die entsprechenden Zahlenwerte nach den Surveys der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover, die seit vielen Jahren auch international für ihre fundierten, abgewogenen Einschätzungen bekannt ist.

Tabelle 2 Reserven zum Jahresende in EJ

Energieträger	2001	2004	2007	2009
konventionelles Erdöl	6.360	6.669	6.575	6.731
nicht-konv. Erdöl	2.761	2.761	2.183	2.785
konventionelles Erdgas	5.109	5.599	6.947	7.291
nicht-konv. Erdgas	63	63	184	191
Hartkohle	17.668	18.811	18.060	17.906
Weichbraunkohle	1.963	1.963	3.113	3.216
Kernbrennstoffe	1.552	1.625	1.633	1.673
gesamt	35.477	37.492	38.695	39.794

Quelle: Zusammenstellung auf Grundlage von BGR (verschiedene Ausgaben).

Tabelle 3 Ressourcen zum Jahresende in EJ

Energieträger	2001	2004	2007	2009
konventionelles Erdöl	3.515	3.430	3.829	4.152
nicht-konv. Erdöl	10.460	10.460	12.919	12.993
konventionelles Erdgas	6.886	6.555	9.098	9.142
nicht-konv. Erdgas	48.633	48.633	103.364	103.351
Hartkohle	103.898	96.110	386.718	425.886
Weichbraunkohle	12.218	8.922	48.977	49.861
Kernbrennstoffe	8.230	8.230	6.806	7.794
gesamt	193.840	182.350	571.711	613.180

Quelle: Zusammenstellung auf Grundlage von BGR (verschiedene Ausgaben).

Auffällig ist, dass die Reserven trotz der zwischenzeitlichen teilweisen Förderung und Verwendung nicht gesunken, sondern angestiegen sind. Bei den – um mehr als eine Größenordnung höher eingeschätzten – Ressourcen sind die Mengenangaben aufgrund von Neu-

bewertungen insbesondere bei Kohlen und bei Gas sogar auf ein Mehrfaches angehoben worden. Zu beachten ist ferner, dass im Falle substanzieller künftiger Preiserhöhungen entsprechende Mengen von den – wirtschaftlich nicht nutzbaren – Ressourcen zu den – wirtschaftlich nutzbaren – Reserven umzubuchen sind. Sorgen um eine physische Verknappung der Energievorräte erscheinen daher auf absehbare Zeit nicht begründet; dies trifft auch auf flüssige Energieträger zu, da diese zu verträglichen Kosten auch aus Kohlen und Gas erzeugt werden können.

Für die Frage, wieweit die Nutzung dieser Energiemengen klimaverträglich ist, müssen insbesondere die zugehörigen CO₂-Mengen bestimmt werden. In den nachfolgenden Tabellen sind die CO₂-Potenziale der oben dargestellten BGR-Schätzgrößen für die einzelnen Energieträger entsprechend deren Kohlenstoffgehalt unter Verwendung der üblichen Umrechnungsfaktoren bestimmt.

Tabelle 4 CO₂-Potenziale der Reserven zum Jahresende in Gt

Energieträger	2001	2004	2007	2009
konventionelles Erdöl	468	491	484	495
nicht-konv. Erdöl	203	203	161	205
konventionelles Erdgas	287	314	390	409
nicht-konv. Erdgas	4	4	10	11
Hartkohle	1.672	1.780	1.709	1.695
Weichbraunkohle	186	186	295	304
Kernbrennstoffe	0	0	0	0
gesamt	2.819	2.978	3.049	3.119

Quelle: eigene Berechnungen, basierend auf BGR (verschiedene Ausgaben)

Tabelle 5 CO₂-Potenziale der Ressourcen zum Jahresende in Gt

Energieträger	2001	2004	2007	2009
konventionelles Erdöl	259	252	282	306
nicht-konv. Erdöl	770	770	951	956
konventionelles Erdgas	386	368	510	513
nicht-konv. Erdgas	2.728	2.728	5.797	5.796
Hartkohle	9.833	9.096	36.601	40.308
Weichbraunkohle	1.156	844	4.635	4.719
Kernbrennstoffe	0	0	0	0
gesamt	15.132	14.058	48.776	52.598

Quelle: eigene Berechnungen, basierend auf BGR (verschiedene Ausgaben)

Dem CO₂-Potenzial von Reserven und Ressourcen können jene Mengen gegenübergestellt werden, die als klimaverträglich anzusehen sind. Hierzu hat der WBGU (2009) Angaben für eine Einhaltung des Ziels einer Erwärmung um maximal 2°C gemacht. Für eine Einhaltung mit 67 Prozent Wahrscheinlichkeit wird die verträgliche Emissionsmenge im Zeitraum 2010-2050 mit 750 Gt CO₂ angegeben, für eine Einhaltung mit 75 Prozent Wahrscheinlichkeit mit 600 Gt; nach 2050 darf höchstens etwa ein Fünftel der Menge emittiert werden, die bis 2050 zur Verfügung steht (ebd.). Diese CO₂-Mengen werden im Wesentlichen allein bei Nutzung der (konventionellem und nicht konventionellem) Erdölreserven frei, bei Vermeidung einer weiteren Nutzung der Reserven von Erdgas und von Kohlen, sowie einem Verzicht auf den Rückgriff auf die über die Reserven hinausgehenden Ressourcen, die ein Vielfaches der Reserven und dementsprechend ein Vielfaches der CO₂-Potenziale der Reserven ausmachen. Demgegenüber decken Kohlen und Gas bekanntlich derzeit mehrheitlich den globalen

Energiebedarf ab und werden in der weiteren Entwicklung – jedenfalls zunächst – noch mit steigenden Deckungsbeiträgen angenommen.

Dies bestätigt die Richtigkeit des in Deutschland seit vielen Jahren vertretenen politischen Ziels einer Energieeinsparung und Umstellung auf regenerative Energiequellen im Rahmen einer vor gut 30 Jahren angemahnten (Krause/Bossel/Müller-Reißmann 1980) und jetzt von der Bundesregierung zum Programm erhobenen „Energiewende“. Dies bestätigt aber auch, dass das Mengenproblem mit den Energievorräten global nicht in der Knappheit dieser Vorräte besteht, sondern darin, dass wir über mehr Vorräte verfügen, als wir bislang in der Lage sind, unseren Zugriff darauf zu beschränken.

Energiesystem

Eine zentrale Bedeutung für die ökobilanziellen Ergebnisse beim Vergleich von Elektromobilität und herkömmlichen Antreiben mit Verbrennungsmotoren hat die Erzeugung des elektrischen Stroms bzw. welcher Strom der Elektromobilität zugerechnet wird.

Bei allen zuletzt veröffentlichten Ergebnissen wurde das Ergebnis hinsichtlich der betrachteten Umweltindikatoren (insbesondere Treibhausgase) durch die Wahl der Elektrizitätserzeugung entscheidend beeinflusst und in allen Fällen konnte das Ergebnis durch die Wahl der Elektrizitätserzeugung besser oder schlechter werden als die konventionellen Vergleichsfahrzeuge.

Bei der Frage, welche Elektrizitätserzeugung zugerechnet werden soll, gibt es jedoch verschiedene grundsätzliche Möglichkeiten. Längerfristig maßgeblich hierbei muss die Frage sein, ob die Entscheidung zu einer wesentlichen Änderung des Elektrizitätserzeugungssystems führt oder nicht. Handelt es sich um eine Entscheidung mit geringer Tragweite, also etwa die Nutzung eines Elektrofahrzeugs, kann man davon ausgehen, dass hierdurch die Kraftwerksstruktur nicht beeinflusst wird. In diesem Fall wird man mit dem durchschnittlichen Strommix rechnen können. Ist eine Entscheidung jedoch systemrelevant, werden also im großen Stil Elektrofahrzeuge eingeführt und dadurch die Struktur der Elektrizitätserzeugung beeinflusst, dann muss genau diese Änderung berücksichtigt werden. Es ist daher von entscheidender Bedeutung einzuschätzen, welche Kraftwerke zur Deckung des zusätzlich induzierten Strombedarfs herangezogen werden.

Hierbei sind grundsätzlich unterschiedliche Szenarien denkbar.

- Alte Kohlekraftwerke können länger als ursprünglich geplant genutzt werden, da nicht schnell genug neue Kraftwerkskapazität zugebaut werden kann.
- Es wird zusätzliche neue Kraftwerkskapazität aufgebaut. Hierbei wird es sich voraussichtlich um GuD-Kraftwerke und um Strom aus erneuerbare Energien handeln.
- Da eine genaue Zurechnung einzelner Kraftwerkstypen zu den Verbrauchern nicht möglich ist, werden der Strommix und seine Fortschreibung angesetzt.

Berücksichtigt werden muss hierbei jedoch auch, dass auch der Bedarf an zusätzlicher Kraftwerkskapazität davon abhängig ist, wann im Tagesverlauf Lastspitzen durch die Ladevorgänge von Elektrofahrzeugen zu erwarten sind und ob diese etwa in die Nacht verlagert werden können. In diesem Fall kann der Bedarf an zusätzlicher Kraftwerkskapazität reduziert werden und u.U. der Anteil an Windenergie erhöht werden (Jakob 2011).

Flächeninanspruchnahme

Bei der Flächeninanspruchnahme ist – wie beim Energieverbrauch oder anderen Parametern – zu unterscheiden zwischen der Nutzungsphase und den vor- und nachgelagerten Ketten. Hinsichtlich der spezifischen Flächenbedarfe der Produktions- und Entsorgungsphase von Batteriefahrzeugen stehen detailliertere Untersuchungen aus; hier sind wegen der teilweise unterschiedlichen Fahrzeugkomponenten mit den dort eingesetzten Materialien Unterschiede zu den herkömmlichen Fahrzeugen zu erwarten, die aber derzeit nicht beziffert werden können.

Gewisse Unterschiede sind auch bei den Komponenten zu erwarten, die sowohl in herkömmlichen als auch in batteriebetriebenen Fahrzeugen anzutreffen sind: Bei Elektrofahrzeugen wird wegen des Gewichts der Batterien das sonstige Eigengewicht des Fahrzeugs kritischer angesehen und verstärkt die Frage verfolgt, wieweit hier durch Leichtbautechniken und –materialien eine Reduktion erfolgen kann. Die hier anzusprechenden technologischen und materialtechnischen Ansätze zur Gewichtsminderung können weitgehend auch bei herkömmlich angetriebenen Fahrzeugen verbrauchssenkend eingesetzt werden. Insofern reduziert sich die Fragestellung darauf, wie sich die jeweils unter Systemgesichtspunkten zu ermittelnden Optima unterscheiden. Auch dies erscheint als eine wichtige Frage bei der technologischen Weiterentwicklung der Fahrzeugkonzepte und deren Beurteilung.

Grundsätzlich werden Flächenansprüche durch Materialgewinnung und Produktion kaum betrachtet, weil die Bewertungsprobleme eine Vergleichbarkeit von Angaben weitgehend einschränken.

Hinsichtlich der Flächeninanspruchnahme im Betrieb ist zunächst kein erheblicher Unterschied zu erkennen, worauf u.a. die Bremer Umweltbehörde hinweist (Glotz-Richter 2010).

Auch bei einer 1:1-Substitution herkömmlicher durch elektrisch angetriebener PKW kann allerdings mit eher geringfügigen zusätzlichen Flächenbedarfen für die Ladestationen der Fahrzeuge gerechnet werden. Werden die Elektrofahrzeuge zusätzlich in Verkehr gebracht, erhöht sich nicht nur der Materialeinsatz, sondern auch der Flächenverbrauch.

Andererseits kann bei einer Änderung des Verkehrssystems im Zusammenhang mit Elektrofahrzeugen auch eine erhebliche Senkung des Flächenbedarfs realisiert werden. So wird bisweilen das Bild entworfen, dass innerstädtische Verkehre mit kleinen Elektrofahrzeugen erledigt werden, die über Formen des Car Sharing genutzt werden, sowie zwischenstädtische, längere Verkehre mit öffentlichen Verkehrsmitteln, wodurch insgesamt die Anzahl von PKW signifikant reduziert werden kann – mit den entsprechenden Entlastungseffekten für die städtischen Flächenansprüche. Unabhängig von der Frage nach der zeitlichen Perspektive einer solchen Vorstellung liegt allerdings auf der Hand, dass die Flächeneinsparung nicht an die Antriebsart der Car-Sharing-Fahrzeuge gebunden ist, sondern an der geänderten Verkehrsmittelnutzung liegt.

3. Schlussfolgerungen

Hybrid- und Elektrofahrzeuge wurde in den letzten Jahren in einer Reihe von Ökobilanzen untersucht. Im Vergleich zu den konventionellen Vergleichsfahrzeugen ergibt sich bei den verschiedenen Untersuchungen hinsichtlich der Treibhausgasemission kein eindeutiges Ergebnis. Vielmehr zeigte sich durchgängig, dass die Ergebnisse vom für den Betrieb der Elektrofahrzeuge gewählten Strommix abhängen. Werden hierfür öffentliche Strommixe angesetzt, ist das Ergebnis abhängig vom jeweiligen Mix der Bezugsregion vergleichbar mit herkömmlichen Fahrzeugen. Kann Strom aus erneuerbaren Energien, insbesondere Windkraft, eingesetzt werden, ist das Ergebnis für die Elektrofahrzeuge hinsichtlich Treibhausgasemissionen deutlich günstiger. Muss Kohlestrom eingesetzt werden, ist das Ergebnis für die Elektrofahrzeuge deutlich schlechter als bei herkömmlichen Fahrzeugen. Damit wird für die Frage der Klimawirksamkeit von Elektrofahrzeugen im Vergleich zu herkömmlichen Fahrzeugen die Frage der Stromerzeugung zur Schlüsselfrage. Dabei sollte berücksichtigt werden, dass bei einer Betrachtung von Grenzeffekten eher relativ kurzfristig verfügbare und ökologisch ungünstige Kraftwerke einzurechnen sein werden. Das schließt nicht aus, dass durch einen beschleunigten Zubau emissionsarmer Kraftwerke längerfristig auch eine emissionsärmere Stromerzeugung an Bedeutung gewinnen kann.

Bei der Bewertung von Elektrofahrzeugen muss jedoch ergänzend berücksichtigt werden, dass Treibhausgasemissionen nur einen Teil der Umweltwirkungen abbilden. In Relation zu Pkw mit Verbrennungsmotor verschlechtert sich das Ergebnis für Elektrofahrzeuge, wenn weitere Umweltindikatoren, wie etwa das Versauerungspotenzial, in die Bewertung einbezogen werden.

Bei den in derzeitigen Vergleichen berücksichtigten Fahrzeugen werden meist nur wenige Fahrzeugklassen berücksichtigt. Fast durchgängig handelt es sich dabei um Fahrzeuge der Kompaktklasse („Golf“). Hinzu kommen bisweilen noch Cityfahrzeuge, die jedoch jeweils deutlich unterschiedlich definiert sind. Grundsätzlich wird bei den derzeitigen Vergleichen von vergleichbaren Nutzungsmustern bei herkömmlichen Fahrzeugen und Elektrofahrzeugen ausgegangen. Für einen Vergleich ist das zwar notwendig, gleichzeitig wird dabei aber ausgeblendet, dass sich die Nutzungsmuster durch neue Fahrzeuggattungen ändern können. Dies könnte bei einer Ökobilanz des Verkehrsverhaltens berücksichtigt werden – z.B. indem ein Teil des herkömmlichen Pkw-Verkehrs durch Pedelecs substituiert würde. Im Rahmen von reinen Produktbilanzen wie sie bisher dominieren wird dies jedoch nicht untersucht.

Als grundsätzliche Einschränkung bei Untersuchung von Elektrofahrzeugen muss weiterhin berücksichtigt werden, dass der Kenntnisstand im Vergleich zu konventionellen Fahrzeugen gering ist. Das betrifft insbesondere die Batteriesysteme. Verbunden damit sind zwei vermutlich gegenläufige Aspekte. Einerseits ist davon auszugehen, dass sich die eingesetzte Technologie rasch weiterentwickeln wird und sich die Umweltlasten verringern werden. Andererseits muss man davon ausgehen, dass aufgrund des unvollständigen Wissens eine Reihe von Prozessen noch nicht angemessen berücksichtigt werden und eine umfassendere Betrachtung auch die Ergebnisse verschlechtern würde. Welcher Faktor überwiegen wird, lässt sich im Vorhinein nicht abschätzen. Man wird jedoch von insgesamt noch erheblichen Unsicherheiten bei der Ökobilanzierung der Elektromobilität ausgehen müssen.

Recht deutlich wird anhand der vorliegenden Untersuchungen, dass sich mit Elektrofahrzeugen das Gewicht der Umweltinanspruchnahme vom Betrieb des Fahrzeugs deutlich auf die Herstellung verlagert - wobei abhängig von Strommix die Nutzung weiterhin dominierend

bleibt. Hervorgerufen wird dies vor allem durch die aufwendigen Batterien. Das bedeutet auch, dass der Fahrzeugherstellung in Zukunft noch mehr Aufmerksamkeit geschenkt werden sollte. Gleichzeitig verliert dementsprechend der Nutzer an Einfluss auf die Umweltbilanz seines Fahrzeugs.

In Hinblick auf die notwendige Batterietechnologie muss die Verfügbarkeit der benötigten Rohstoffe kritisch hinterfragt werden. Insbesondere bei Nickel und Lithium besteht hier für Deutschland und die EU eine fast vollständige Abhängigkeit von Importen und damit trotz einer grundsätzlich hinreichenden geologischen Verfügbarkeit die Gefahr möglicher Versorgungsengpässe.

Zusammenfassend kommt etwa Frischknecht (2011) auf der jüngsten Fachkonferenz zu Ökobilanzen der Elektromobilität zu dem Ergebnis: Elektroautos lösen die Probleme der Individualmobilität nicht.

Literatur:

- Althaus, Hans-Jörg (2011): Comparative assertion of battery electric cars with various alternatives. 43rd LCA Discussion Forum, Life Cycle Assessment of Electromobility. 6th of April 2011.
- Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe [BGR] (Hg.): Reserven, Ressourcen und Verfügbarkeit von Energierohstoffen. Verschiedene Jahre. Hannover.
- Carlin, James F. Jr. (2009): 2007 Minerals Yearbook - Antimony [advance release], U.S. Geological Survey.
- DIN EN ISO 14040:2009-11 Umweltmanagement - Ökobilanz - Grundsätze und Rahmenbedingungen.
- DIN EN ISO 14044:2006-10 Umweltmanagement - Ökobilanz - Anforderungen und Anleitungen.
- Forrester, Jay W. (1971): World dynamics. Cambridge (Mass.).
- Frischknecht, R. (2011): Life Cycle Assessment of Driving Electric Cars and Scope Dependent LCA models. 43rd LCA Discussion Forum, Life Cycle Assessment of Electromobility. 6th of April 2011.
- Glötz-Richter, Michael (2010): The Future of Mobility. Options for sustainable transport in a low carbon society. Präsentation bei der Expo Shanghai. Freie Hansestadt Bremen. Online verfügbar unter: http://www.care-north.eu/sites/default/files/Day%201_01_Michael%20Glötz-Richter_-Intro-Bremen.pdf
- Held, M. (2011): Current LCA results and need for further research. 43rd LCA Discussion Forum, Life Cycle Assessment of Electromobility. 6th of April 2011.
- Jakob, M. (2011): Methodological approaches for determining marginal electricity mixes. 43rd LCA Discussion Forum, Life Cycle Assessment of Electromobility. 6th of April 2011.
- Jaskula, Brian W. (2009): 2007 Minerals Yearbook . Lithium [advance release]. U.S. Geological Survey.
- Krause, Florentin/Bossel, Hartmut/Müller-Reißmann, Karl-Friedrich: Energiewende (1980): Wachstum und Wohlstand ohne Erdöl und Uran – Ein Alternativ-Bericht des Öko-Instituts/Freiburg. Fischer: Frankfurt (Main).
- Lambrecht, U. (2011): Electric vehicles in a future energy system context. 43rd LCA Discussion Forum, Life Cycle Assessment of Electromobility. 6th of April 2011.
- Marques, P./Freire, F. (2011): Comparative life-cycle assessment of electric and conventional vehicles in Portugal. 43rd LCA Discussion Forum, Life Cycle Assessment of Electromobility, 6th of April 2011.
- Mathoy, Arno (2008): Die Entwicklung bei Batterien und Antriebstechnik für Elektroautos, Bulletin SEV/VSE 1/2008, S. 8-13.

- Meadows, Dennis L. et al. (1972): Die Grenzen des Wachstums. Bericht des Club of Rome zur Lage der Menschheit. Stuttgart.
- Pohl, Walter L. (2005): Mineralische und Energie-Rohstoffe. E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung. Stuttgart.
- Rantik, M. (1999): Life cycle assessment of five batteries for electric vehicles under different charging regimes. KFB. Stockholm.
- Rydh, C.J. (2003): Environmental Assessment of Battery Systems: Critical Issues for Established and Emerging Technologies. Chalmers University of Technology. Göteborg.
- Samaras, C./Meisterling, K. (2008): Life Cycle Assessment of Greenhouse Gas Emissions from Plug-in Hybrid Vehicles: Implications for Policy. In: Environmental Science and Technology. Vol. 42, No. 9. S. 3170-3176.
- U.S. Geological Survey (2009): Mineral commodity summaries 2009: U.S. Geological Survey.
- Weibel, Th./Dietrich, Ph. (1996): Ökoinventare und Wirkungsbilanzen von Antriebssystemen –Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Hybridfahrzeugen. VDI Bericht 1307. VDI/VW Gemeinschaftstagung.
- Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen [WBGU] (2009): Kassensturz für den Weltklimavertrag – Der Budgetansatz. Sondergutachten, Berlin.