

# **Gegenüberstellung verschiedener aktueller Schweizer Ökobilanzstudien im Bereich Elektromobilität**

## **Schlussbericht**

Hans-Jörg Althaus (Empa)  
Christian Bauer (PSI)

Villigen und Dübendorf, 14.11. 2011

# 1 Ausgangslage und Auftrag

In letzter Zeit wurden einige Ökobilanz-Studien publiziert, die Umweltauswirkungen von Fahrten mit einem Elektroauto mit Fahrten mit einem Diesel- oder Benzinbetriebenen Auto vergleichen. Die Ergebnisse dieser Studien sind teilweise widersprüchlich, was bei der EKZ die Frage nach den Gründen für die Unterschiede ausgelöst hat. So wurden das PSI (Labor für Energiesystem-Analysen) und die Empa (Life Cycle Assessment and Modelling Group), die beide solche Studien verfasst haben und sich im Rahmen des Thelma-Projektes intensiv mit der Ökobilanzierung von Elektrofahrzeugen befassen, beauftragt, die neuesten Schweizer Ökobilanzstudien zu vergleichen. Folgende Studien werden verglichen:

- Althaus H.J., Gauch M. (2010) Vergleichende Ökobilanz individueller Mobilität: Elektromobilität vs. Konventionelle Mobilität mit Bio- und fossilen Treibstoffen. Empa, Dübendorf, Schweiz.
- Althaus H.J. (2011) Comparative assertion of battery electric cars with various alternatives. Präsentation am 43. Ökobilanz-Diskussionsforum, Zürich, 6. April 2011.
- Bauer C., Simons A. (2010) Ökobilanz der Elektromobilität – Analyse des e-Twingos der EKZ. Paul Scherrer Institut, Villigen, Schweiz.
- Frischknecht R. (2011a) Königsweg oder Sackgasse? Das Elektroauto in der Ökobilanz. Präsentation am 2. Schweizer Forum Elektromobilität, Luzern, 26. Januar 2011.
- Frischknecht R. (2011b) Life Cycle Assessment of Driving Electric Cars and Scope Dependent LCA models. Präsentation am 43. Ökobilanz-Diskussionsforum, Zürich, 6.4.2011.
- Habermacher F. (2011) Modeling Material Inventories and environmental Impacts of electric passenger cars. Comparison of LCA results between electric and conventional vehicle scenarios Master Thesis ETH / Empa
- Notter, D. A., Gauch M., Widmer R., Wäger P., Stamp A., Zah R., Althaus H. J. (2010). "Contribution of Li-Ion Batteries to the Environmental Impact of Electric Vehicles." Environmental Science & Technology 44(17): 6550-6556.
- Simons A., Bauer C. (2011) LCA comparison of electric drivetrains in passenger cars. Präsentation am 43. Ökobilanz-Diskussionsforum, Zürich, 6. April 2011.

Die Gegenüberstellung der Studien beinhaltet folgende Aspekte:

- a) Transparente Darstellung der wichtigsten Annahmen und Rahmenbedingungen, die entscheidenden Einfluss auf die Ergebnisse der Ökobilanzen der Elektro-, Hybrid-, Diesel- und Benzinfahrzeuge haben
- b) Beurteilung der Plausibilität und Konsistenz der Annahmen
- c) Aufzeigen der Konsequenzen, die sich unter Anwendung verschiedener Bewertungsmethoden für die Ökobilanzresultate daraus ergeben
- d) Aufzeigen der grössten Unsicherheiten in den Studien
- e) Abschätzung realistischer Schwankungsbereiche wichtiger Parameter und deren Einfluss auf die Ergebnisse der Ökobilanzen
- f) Schlussfolgerungen und ein Fazit für die Umweltbelastung, die von den verschiedenen Fahrzeugtypen verursacht wird

## 2 Gegenüberstellung der beurteilten Systeme

### 2.1 Systembeschreibung und Datenhintergründe

Beim Vergleich von Ökobilanz-Studien bzw. deren Resultate, muss sichergestellt werden, dass „Goal und Scope“ der Studien vergleichbar sind. Sind sie nicht identisch, muss der Einfluss von unterschiedlichen Zielen und Betrachtungsrahmen in der Interpretation der Vergleiche berücksichtigt werden.

Die hier beurteilten Arbeiten von Empa, PSI und ESU-services weisen nicht alle den gleichen Untersuchungsrahmen auf und eignen sich nicht in allen Fällen zur Beantwortung derselben Fragestellungen.

#### Empa-Studien

Ziel der Arbeit der Empa im Bereich Batterien (Notter et al 2010) war es, die Umweltauswirkungen der Produktion einer modernen Li-Ionenbatterie für Elektromobile zu untersuchen. Es wurden Manganoxidbasierte Batterien ohne Kobalt oder Nickel untersucht. Auch wurde davon ausgegangen, dass die Kathoden auf Basis vom wässrigen Schlickern hergestellt werden. Beide Annahmen basieren vor allem darauf, dass mit dieser Technologie die Produktionskosten deutlich tiefer liegen als mit den gängigen Alternativen. Mit der so modellierten Batterie wurde ein Modell eines hypothetischen elektrischen Golfs erstellt um abzuschätzen, welche Rolle die Batterie im Kontext elektrisch angetriebener Fahrzeuge spielt.

Diese Batterie wurde auch in der Studie von Althaus und Gauch 2010 verwendet, in der es darum geht, die bestmöglichen Varianten von elektrischen und thermischen Fahrzeugen mit unterschiedlichsten Treibstoffen zu vergleichen. Alle Fahrzeuge basieren auf dem VW Golf, verfügen aber über unterschiedliche Antriebsstränge mit unterschiedlichen Materialien und Energieeffizienzen. Der Treibstoff bzw. Strombedarf für den Betrieb der Fahrzeuge wurde aufgrund von physikalischen Grundlagen, Messungen und einigen Annahmen detailliert modelliert und repräsentiert einen durchschnittlichen Alltagsgebrauch. Als Treibstoffe wurden neben konventionellem Benzin, Diesel und Erdgas auch E85, Biodiesel und Biogas betrachtet. Die Elektroautos werden mit Strom aus unterschiedlichen Erzeugungssystemen geladen. Es werden 13 verschiedene Umweltwirkungen ausgewiesen. Keine davon ist vollaggregierend, da dies gemäss ISO Norm (14'044) für vergleichende Studien nicht zulässig ist.

Aufbauend auf den Resultaten von Althaus und Gauch (2010) wurde in einer an der Empa durchgeführten Masterarbeit (Habermacher F. 2011) der Fahrzeugaufbau genauer analysiert. Ziel dieser Studie war, die Inventare der Fahrzeugerstellung, die bisher auf einer einzigen Quelle von VW basierten, auf eine breitere Basis zu stellen. Dies wurde nötig, da die Produktion und Entsorgung von Elektrofahrzeugen im Vergleich zur Betriebsphase bei Verwendung von umweltfreundlichem Strom dominant werden kann. So wurden in dieser Studie Daten für unterschiedliche Fahrzeugtypen, inkl. Leichtgewichtsvarianten, erarbeitet. Ein weiterer Fokus lag auf der Verbesserung der Datengrundlage für den elektrischen Antriebsstrang speziell für den Motor und die Leistungselektronik. Der Betrieb dieser Fahrzeuge wurde bilanziert gemäss der Methode, die in Althaus und Gauch 2010 entwickelt wurde. Diese Studie wurde mit den Hintergrunddaten von ecoinvent v2.2 erstellt. Um den Vergleich zu den Resultaten der Althaus & Gauch 2010 Studie, die noch mit der ältere Version von ecoinvent (v2.01) erstellt wurde, zu ermöglichen, werden Teile deren Ergebnisse mit neuen Hintergrunddaten neu berechnet.

Alle Studien der Empa definieren keine fixen Abschneidekriterien für die Inventarerstellung. Alle Materialien und Komponenten, die bezüglich Masse, Energie oder erwarteter Umweltauswirkung einen relevanten Anteil ausmachen könnten, werden berücksichtigt. Im Vordergrundsystem benötigen die Empa Studien keine Allokation, da Allokationen gemäss den Empfehlungen der ISO 14'044 entweder durch Aufteilung der Einheitsprozesse oder durch Systemerweiterung und

Substitution vermieden werden. Im Hintergrundsystem werden die Allokationen aus ecoinvent übernommen.

## PSI-Studien

Ziel der Arbeit des PSI im Bereich Ökobilanzen der Elektromobilität war zunächst eine Beurteilung des Engagements der EKZ im Bereich Elektromobilität bzgl. Nutzen für die Umwelt im Vergleich zu herkömmlichen Autos (Bauer & Simons 2010). Dazu wurde eine Ökobilanz des Elektrofahrzeugs der EKZ, des „e-Twingo“, erstellt und mit jener eines benzinbetriebenen Renault Twingo verglichen. Dabei wurde davon ausgegangen, dass beide Fahrzeuge vorwiegend im Stadtverkehr und regelmässig, d.h. täglich, eingesetzt werden und entsprechende Verbrauchsdaten für den Fahrzeugbetrieb in der Bilanz verwendet. Dem Rahmen der Studie entsprechend wurde untersucht, welchen Einfluss die Art der Stromquelle, die für das Laden der Batterien verwendet wird, auf die Ergebnisse der Ökobilanz hat: Die verschiedenen von den EKZ angebotenen Stromprodukte wurden mit dem Schweizer Strombezugsmix, Strom aus Erdgas-GuD Kraftwerken und als „worst case“ mit Strom aus Kohlekraftwerken verglichen. Als Indikatoren für die Umweltbelastung wurden Treibhausgasemissionen, Primärenergieverbrauch sowie die beiden vollaggregierten LCIA-Methoden „eco-Indicator 99 (H,A)“ (Goedkoop & Spriensma 2000) und „Ökologische Knappheit“ (Frischknecht et al. 2009) zur Beurteilung herangezogen.

Diese ersten Ökobilanzen von Kleinwagen wurden inzwischen erweitert und aufgrund neuer Erkenntnisse und Informationen verfeinert sowie auf eine konsistente Basis mit der Beurteilung von Fahrzeugen in der unteren Mittelklasse („Golf-Klasse“) gestellt (Simons & Bauer 2011). Neben der im e-Twingo benutzten ZEBRA-Batterie wurde die Verwendung eines Typs von Lithium-Ionen Batterien untersucht. Somit sind Ökobilanzen von Elektrofahrzeugen mit diesen beiden Batteriearten für Klein- und Mittelklassewagen verfügbar, die jeweils mit den entsprechenden Benzin- und Dieselaautos hinsichtlich negativer Auswirkungen auf Umwelt und menschliche Gesundheit verglichen werden. Als weiterer Indikator zur Bewertung der Fahrzeuge dient der Ressourcenverbrauch. Bei diesem weiter gefassten Vergleich wurde sowohl der Schweizer, als auch der Europäische Durchschnittstrom (Versorgungsmix inkl. Importe) als Option zum Laden der Batterien in Betracht gezogen.

In allen Bilanzen wird versucht, möglichst praxisnahe Daten für den Fahrzeugbetrieb zu verwenden, um eben auch praxisrelevante Resultate zu erzeugen. In diesem Zusammenhang spielt beispielsweise der Unterschied zwischen tatsächlichem Treibstoffverbrauch und dem Normverbrauch anhand von Testzyklen eine Rolle. Ausserdem werden jeweils ähnliche Fahrzeuge verglichen, d.h. solche, die für einen ähnlichen Zweck und unter ähnlichen Rahmenbedingungen (etwa vorwiegend im Stadtverkehr) zum Einsatz kommen.

In den Sachbilanzen aller dieser PSI-Studien werden sämtliche Material- und Energieflüsse sofern bekannt berücksichtigt, d.h. keine fixen Abschneidekriterien bzgl. Masse oder vermuteter Relevanz bzgl. Ergebnissen definiert. Die Inventardaten wurden den Qualitätsrichtlinien und methodischen Ansätzen der Datenbank ecoinvent v2 folgend erstellt. Das potentielle Recycling von Fahrzeugen und deren Komponenten wird dementsprechend nicht explizit innerhalb der Systemgrenzen der Studien behandelt.<sup>1</sup>

## ESU-Studie

Zum Rahmen und zur Zielsetzung der Studie von ESU-services ist im Detail wenig bekannt. Innerhalb der unteren Mittelklasse werden Elektrofahrzeuge mit Li-Ionenbatterien mit Benzin-, Diesel- und Erdgasfahrzeugen verglichen, teilweise mit Durchschnittsmodellen, tlws. mit „best in class“ Fahrzeugen. Diese Unterscheidung macht sich besonders im Treibstoffverbrauch bemerkbar. Ergänzend wird ein so genanntes „city car“ in Leichtbauweise als Elektro- oder Dieselfahrzeug bilanziert, basierend auf der Konzeptstudie von Loremo.<sup>2</sup> Als Bewertungs-

---

<sup>1</sup> Man spricht in diesem Zusammenhang auch vom so genannten „cut-off approach“.

<sup>2</sup> <http://www.loremo.com/>

Indikatoren werden bevorzugt Treibhausgasemissionen, Primärenergieverbrauch, Volumen an radioaktiven Abfällen, und Umweltbelastungspunkte nach der Methode der Ökologischen Knappheit gezeigt.

Auch über Abschneidekriterien und Allokationsprinzipien wird nichts gesagt. Offensichtlich werden aber die Fahrzeuge und Komponenten, die an ihrem Lebensende rezykliert werden, in dieser Studie abgeschnitten („cut-off“).

## 2.2 Schlüsselparameter

In Tabelle 1 bis Tabelle 4 sind die wichtigsten Basisdaten und Annahmen der verschiedenen Ökobilanzen soweit verfügbar zusammengefasst.

Die grössten Unterschiede zwischen den verschiedenen Analysen bestehen beim Energieverbrauch für den Fahrzeugbetrieb. Während in den Studien der Empa und des PSI vergleichbare, den Praxisbetrieb reflektierende Verbrauchsdaten für sämtliche Fahrzeugtypen verwendet werden, sind diese Werte in (Frischknecht 2010/2011) tlws. inkonsistent: Die Verbrauchsdaten der Benzin- und Dieselfahrzeuge entsprechen den Normverbrauchswerten, der Verbrauch des heutigen Elektrofahrzeugs sollte dem Praxisbetrieb nahekommen. In (Frischknecht 2010/2011) werden Personenwagen unterschiedlicher Klassen und Technologiestandards verglichen, in den PSI- und Empa-Studien wird jeweils klar unterschieden zwischen verschiedenen Fahrzeugklassen. Deutlich unterschiedlich wird auch in der Bilanzierung der Batterieherstellung der e-Fahrzeuge vorgegangen (siehe Kap. 2.4).

**Tabelle 1 Schlüsselparameter für die Ökobilanzen in (Althaus & Gauch 2010).**

| Studie<br>Treibstoff                     | Empa (Althaus & Gauch 2010)   |                              |                     |                      |                      |                            |                      |                      |                            |
|--|---|------------------------------|---------------------|----------------------|----------------------|----------------------------|----------------------|----------------------|----------------------------|
|  | Elektrisch  | Plug-in-Hybrid               | Hybrid (Benzin)     | Benzin               | Diesel               | Gas                        | Biodiesel            | E85                  | Biogas                     |
| <b>Fahrzeug</b>                          |   |                              |                     |                      |                      |                            |                      |                      |                            |
| Typ                                      | Golf  | Golf                         | Golf                | Golf                 | Golf                 | Golf                       | Golf                 | Golf                 | Golf                       |
| Masse (total) [kg]                       | 1'484   | 1'444                        | 1'284               | 1'234                | 1'314                | 1'234                      | 1'314                | 1'234                | 1'234                      |
| Leistung [kW]                            | 100   | 100/10                       | 40/50               | 77                   | 77                   | 77                         | 77                   | 77                   | 77                         |
| <b>Betrieb</b>                           |   |                              |                     |                      |                      |                            |                      |                      |                            |
| EURO-Standard                            | -   | Euro 5                       | Euro 5              | Euro 5               | Euro 5               | Euro 5                     | Euro 5               | Euro 5               | Euro 5                     |
| Verbrauch [kWh/100km]                    | 20  | 16                           | -                   | -                    | -                    | -                          | -                    | -                    | -                          |
| Verbrauch [l/100km]                      | -   | 0.98                         | 4.9                 | 6.8                  | 4.9                  | -                          | 5.44                 | 8.07                 | -                          |
| Verbrauch [Nm <sup>3</sup> /100km]       | -   | -                            | -                   | -                    | -                    | 6.3                        | -                    | -                    | 6.3                        |
| Verbrauch [MJ/km]                        | 0.72  | 0.89                         | 1.56                | 2.17                 | 1.76                 | 2.17                       | 1.76                 | 2.17                 | 2.17                       |
| Fahrzyklus                               | real<br>(NEFZ + 15%)  | real<br>(NEFZ + 15%)         | real<br>(NEFZ + 8%) | real<br>(NEFZ + 13%) | real<br>(NEFZ + 13%) | real<br>(NEFZ + 13%)       | real<br>(NEFZ + 13%) | real<br>(NEFZ + 13%) | real<br>(NEFZ + 13%)       |
| Nebenverbraucher                         | 2.7 kWh/100km   | 2.2 kWh/100km & 0.16 l/100km | 0.8 l/100km         | 0.9 l/100km          | 0.6 l/100km          | 0.8 Nm <sup>3</sup> /100km | 0.6 l/100km          | 0.9 l/100km          | 0.8 Nm <sup>3</sup> /100km |
| Lebensdauer [Jahre]                      | 12.7  | 12.7                         | 12.7                | 12.7                 | 12.7                 | 12.7                       | 12.7                 | 12.7                 | 12.7                       |
| Lebensfahrleistung [km]                  | 150'000   | 150'000                      | 150'000             | 150'000              | 150'000              | 150'000                    | 150'000              | 150'000              | 150'000                    |
| <b>Batterie</b>                          |   |                              |                     |                      |                      |                            |                      |                      |                            |
| Typ                                      | Li-Ion (LiMn2O4)  | Li-Ion (LiMn2O4)             | Li-Ion (LiMn2O4)    |                      |                      |                            |                      |                      |                            |
| Masse                                    | 400   | 100                          | 100                 |                      |                      |                            |                      |                      |                            |
| Energiedichte [Wh/kg]                    | 114   | 114                          | 114                 |                      |                      |                            |                      |                      |                            |
| Reichweite / Ladung [km]                 | 200   | -                            | -                   |                      |                      |                            |                      |                      |                            |
| Entladungstiefe                          | 88%   | -                            | -                   |                      |                      |                            |                      |                      |                            |
| Anzahl / Lebenszyklus                    | 1.5   | 1                            | 1                   |                      |                      |                            |                      |                      |                            |
| <b>LCI Daten</b>                         |   |                              |                     |                      |                      |                            |                      |                      |                            |
| Hintergrunddaten                         | ecoinvent v2.01   |                              |                     |                      |                      |                            |                      |                      |                            |
| Fahrzeug (Glider)                        | ecoinvent v2.01, aufgesplittet  |                              |                     |                      |                      |                            |                      |                      |                            |
| Fahrzeug (Drivetrain)                    | ICE: ecoinvent v2.01 aufgesplittet; Elektrisch: Brusa   |                              |                     |                      |                      |                            |                      |                      |                            |
| Treibstoff / Strom                       | ecoinvent v2.01 (Strom: Mix CH, Mix UCTE, KKW CH, Gas-Kombi UCTE, Kohle UCTE, PV CH)  |                              |                     |                      |                      |                            |                      |                      |                            |
| EOL-recycling-Modellierung               | Systemerweiterung und Substitution im Vordergrundsystem. Cut-off in Sensitivitätsbetrachtung  |                              |                     |                      |                      |                            |                      |                      |                            |
| Batterie                                 | Notter et al. 2010 (später ecoinvent v2.2)  |                              |                     |                      |                      |                            |                      |                      |                            |
| Modellierungsansatz                      | Bottom-up   |                              |                     |                      |                      |                            |                      |                      |                            |
| Datenquellen                             | Prozessbeschreibungen, Herstellerdaten  |                              |                     |                      |                      |                            |                      |                      |                            |
| "Wiege bis Tor" Strombedarf              | 6.2 kWh/kg  |                              |                     |                      |                      |                            |                      |                      |                            |
| Strommix für Produktion                  | v.a. China (Produktionsschritte an unterschiedlichen Orten)   |                              |                     |                      |                      |                            |                      |                      |                            |
| "Wiege bis Tor" Wärmebedarf <sup>1</sup> | 15.2 MJ/kg  |                              |                     |                      |                      |                            |                      |                      |                            |
| <b>Goal &amp; Scope</b>                  |   |                              |                     |                      |                      |                            |                      |                      |                            |
| Systemgrenze                             | Wiege bis Wiege, cut-off nur bei Insignifikanz nach Masse, Energie und erwartetem Umweltimpact  |                              |                     |                      |                      |                            |                      |                      |                            |
| Funktionale Einheit                      | Fahren mit einem modernen 5-plätzigem PKW der Golfklasse mit tiefstem Verbrauch und üblicher Leistung, Komfort und Sicherheit   |                              |                     |                      |                      |                            |                      |                      |                            |
| Referenzfluss                            | 1 Fahrzeug-Kilometer  |                              |                     |                      |                      |                            |                      |                      |                            |
| Impact assessment Methoden               | GWP 100, HTP inf., POCP (high NOx), LUC, EP, CED fossil, CED nuklear, CExD-Metalle, CExD-Mineralien, Schaden an menschlicher Gesundheit (EI99 HH), Schaden an Ökosystemqualität (EI99 EQ), Schaden an Ressourcenqualität, (EI99 RQ) |                              |                     |                      |                      |                            |                      |                      |                            |

<sup>1</sup> nur als Wärme benötigt wird

**Tabelle 2 Schlüsselparameter für die Ökobilanzen in (Habermaacher 2011).**

| Studie                                   | Treibstoff  | Empa (Habermaacher 2011)   |                             |                              |                              |                           |                           |                            |                            |                              |                              |                               |                               |
|--|---|--|-----------------------------|------------------------------|------------------------------|---------------------------|---------------------------|----------------------------|----------------------------|------------------------------|------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
|  |   | Diesel   | Elektrisch                  | Elektrisch                   | Elektrisch                   | Diesel                    | Elektrisch                | Elektrisch                 | Elektrisch                 | Diesel                       | Elektrisch                   | Elektrisch                    | Elektrisch                    |
| Fahrzeug                                 | Typ   | Compact, baseline (Golf VI)  | Compact, baseline (Golf VI) | Compact, light Alu (Golf VI) | Compact, light CFK (Golf VI) | City, baseline (Fiat 500) | City, baseline (Fiat 500) | City, light Alu (Fiat 500) | City, light CFK (Fiat 500) | Mini, baseline (Smart 4 two) | Mini, baseline (Smart 4 two) | Mini, light Alu (Smart 4 two) | Mini, light CFK (Smart 4 two) |
|  | Masse (total) [kg]  | 1314   | 1253                        | 799                          | 790                          | 1055                      | 976                       | 659                        | 652                        | 845                          | 889                          | 616                           | 610                           |
| Betrieb                                  | Leistung [kW]   | 77   | 100                         | 50                           | 50                           | 55                        | 50                        | 50                         | 50                         | 40                           | 50                           | 50                            | 50                            |
|  | EURO-Standard   | Euro 5   | -                           | -                            | -                            | Euro 5                    | -                         | -                          | -                          | Euro 5                       | -                            | -                             | -                             |
|  | Verbrauch [kWh/100km]                                       | -  | 20                          | 15.8                         | 15.7                         | -                         | 17.1                      | 14.2                       | 14.2                       | -                            | 17                           | 14.5                          | 14.5                          |
|  | Verbrauch [l/100km]   | 4.9  | -                           | -                            | -                            | 5.3                       | -                         | -                          | -                          | 4.3                          | -                            | -                             | -                             |
|  | Verbrauch [Nm <sup>3</sup> /100km]                          | -  | -                           | -                            | -                            | -                         | -                         | -                          | -                          | -                            | -                            | -                             | -                             |
|  | Verbrauch [MJ/km]   | 1.76   | 0.72                        | 0.57                         | 0.57                         | 1.91                      | 0.62                      | 0.51                       | 0.51                       | 1.55                         | 0.61                         | 0.52                          | 0.52                          |
|  | Fahrzyklus  | real (NEFZ + 13%)  | real (NEFZ + 15%)           | real (NEFZ + 15%)            | real (NEFZ + 15%)            | real (NEFZ + 13%)         | real (NEFZ + 15%)         | real (NEFZ + 15%)          | real (NEFZ + 15%)          | real (NEFZ + 13%)            | real (NEFZ + 15%)            | real (NEFZ + 15%)             | real (NEFZ + 15%)             |
|  | Nebenverbraucher  | 0.6 l/100km  | 2.7 l/100km                 | 2.7 l/100km                  | 2.7 l/100km                  | 0.6 l/100km               | 2.7 l/100km               | 2.7 l/100km                | 2.7 l/100km                | 0.6 l/100km                  | 2.7 l/100km                  | 2.7 l/100km                   | 2.7 l/100km                   |
|  | Lebensdauer [Jahre]   | 12.7   | 12.7                        | 12.7                         | 12.7                         | 12.7                      | 12.7                      | 12.7                       | 12.7                       | 12.7                         | 12.7                         | 12.7                          | 12.7                          |
|  | Lebensfahrleistung [km]                                     | 150'000  | 150'000                     | 150'000                      | 150'000                      | 150'000                   | 150'000                   | 150'000                    | 150'000                    | 150'000                      | 150'000                      | 150'000                       | 150'000                       |
| Batterie                                 | Typ   | -  | Li-Ion (LiMn2O4)            | Li-Ion (LiMn2O4)             | Li-Ion (LiMn2O4)             | -                         | Li-Ion (LiMn2O4)          | Li-Ion (LiMn2O4)           | Li-Ion (LiMn2O4)           | -                            | Li-Ion (LiMn2O4)             | Li-Ion (LiMn2O4)              | Li-Ion (LiMn2O4)              |
|  | Masse   | -  | 262                         | 208                          | 207                          | -                         | 225                       | 187                        | 187                        | -                            | 224                          | 191                           | 191                           |
|  | Energiedichte [Wh/kg]                                       | -  | 114                         | 114                          | 114                          | -                         | 114                       | 114                        | 114                        | -                            | 114                          | 114                           | 114                           |
|  | Reichweite / Ladung [km]                                    | -  | 120                         | 120                          | 120                          | -                         | 120                       | 120                        | 120                        | -                            | 120                          | 120                           | 120                           |
|  | Entladungstiefe   | -  | 80%                         | 80%                          | 80%                          | -                         | 80%                       | 80%                        | 80%                        | -                            | 80%                          | 80%                           | 80%                           |
| LCI Daten                                | Anzahl / Lebenszyklus                                       | -  | 1.5                         | 1.5                          | 1.5                          | -                         | 1.5                       | 1.5                        | 1.5                        | -                            | 1.5                          | 1.5                           | 1.5                           |
|  | Hintergrunddaten  | ecoinvent v2.02  |                             |                              |                              |                           |                           |                            |                            |                              |                              |                               |                               |
|  | Fahrzeug (Glider)   | Neue Daten aus diversen primären Quellen   |                             |                              |                              |                           |                           |                            |                            |                              |                              |                               |                               |
|  | Fahrzeug (Drivetrain)                                       | ICE: ecoinvent v2.2 aufgesplittet; Elektrisch: Neue Daten von Brusa  |                             |                              |                              |                           |                           |                            |                            |                              |                              |                               |                               |
|  | Treibstoff / Strom  | ecoinvent v2.2 (Strom: Mix CH, Mix UCTE)   |                             |                              |                              |                           |                           |                            |                            |                              |                              |                               |                               |
|  | EOL-recycling-Modellierung                                  | Systemerweiterung und Substitution im Vordergrundssystem. Cut-off in Sensitivitätsbetrachtung  |                             |                              |                              |                           |                           |                            |                            |                              |                              |                               |                               |
|  | Batterie  | ecoinvent v2.02  |                             |                              |                              |                           |                           |                            |                            |                              |                              |                               |                               |
|  | Modellierungsansatz   | Bottom-up  |                             |                              |                              |                           |                           |                            |                            |                              |                              |                               |                               |
|  | Datenquellen  | Prozessbeschreibungen, Herstellerdaten   |                             |                              |                              |                           |                           |                            |                            |                              |                              |                               |                               |
|  | "Wiege bis Tor" Strombedarf                                 | 6.2 kWh  |                             |                              |                              |                           |                           |                            |                            |                              |                              |                               |                               |
| Strommix für Produktion                  | v.a. China (Produktionsschritte an unterschiedlichen Orten) |  |                             |                              |                              |                           |                           |                            |                            |                              |                              |                               |                               |
| "Wiege bis Tor" Wärmebedarf <sup>1</sup> | 15.2 MJ/kg  |  |                             |                              |                              |                           |                           |                            |                            |                              |                              |                               |                               |
| Goal & Scope                             | Systemgrenze  | Wiege bis Wiege, cut-off nur bei Insignifikanz nach Masse, Energie und erwartetem Umweltimpact   |                             |                              |                              |                           |                           |                            |                            |                              |                              |                               |                               |
|  | Funktionale Einheit   | Fahren mit einem modernen PKW von 3 verschiedenen Klassen mit typischem Verbrauch und üblicher Leistung, Komfort und Sicherheit  |                             |                              |                              |                           |                           |                            |                            |                              |                              |                               |                               |
|  | Referenzfluss   | 1 Fahrzeug-Kilometer   |                             |                              |                              |                           |                           |                            |                            |                              |                              |                               |                               |
|  | Impact assessment Methoden                                  | GWP 100, CED fossil, CED nuklear, CED total, CExD-Metalle, Schaden an menschlicher Gesundheit (EI99 HH), Schaden an Ökosystemqualität (EI99 EQ), Schaden an Ressourcenqualität, (EI99 RQ), Ecoindicator H/A (EI99 H/A), UBP 06 |                             |                              |                              |                           |                           |                            |                            |                              |                              |                               |                               |

<sup>1</sup>nur was als Wärme benötigt wird

**Tabelle 3 Schlüsselparameter für die Ökobilanzen in (Simons & Bauer 2011; Bauer & Simons 2010).**

| Studie                                   | Treibstoff                         | PSI (Bauer & Simons 2011)                  |                    |                              |   | PSI (Simons & Bauer 2011)  |   |                   |                   |
|--|------------------------------------|--|--------------------|------------------------------|---|--|---|-------------------|-------------------|
|  |                                    | Elektrisch                                 | Benzin             | Elektrisch                   | Elektrisch  | Elektrisch   | Elektrisch  | Benzin            | Diesel            |
| Fahrzeug                                 | Typ                                | Twingo                                     | Twingo             | Twingo                       | Twingo  | Golf-Klasse  | Golf-Klasse   | Golf-Klasse       | Golf-Klasse       |
|  | Masse (total) [kg]                 | 1'200                                      | 1020               | 1'200                        | 1'200   | 1530   | 1400  | 1320              | 1320              |
| Betrieb                                  | Leistung [kW]                      | 30   | 55                 | 30                           | 30  | n.s.   | n.s.  | 80                | 80                |
|  | EURO-Standard                      | -  | Euro 5             | -                            | -   | -  | -   | Euro 5            | Euro 5            |
|  | Verbrauch [kWh/100km]              | 21.8                                       | -                  | 23.2                         | 16.4  | 27.8   | 19.7  | -                 | -                 |
|  | Verbrauch [l/100km]                | -  | 8                  | -                            | -   | -  | -   | 6.3               | 5                 |
|  | Verbrauch [Nm <sup>3</sup> /100km] | -  | -                  | -                            | -   | -  | -   | -                 | -                 |
|  | Verbrauch [MJ/km]                  | 0.78                                       | 2.55               | 0.84                         | 0.59  | 1.00   | 0.71  | 2                 | 1.8               |
|  | Fahrzyklus                         | Verbrauchsdaten aus Testbetrieb            | "real" (NEFZ +20%) | "real" (NEFZ + 15%)          | "real" (NEFZ + 15%)   | "real" (NEFZ + 15%)  | "real" (NEFZ + 15%)   | real avg.EU heute | real avg.EU heute |
|  | Nebenverbraucher                   | n.s.                                       | n.s.               | 2.0 kWh/100km                | 2.0 kWh/100km   | 2.7 kWh/100km  | 2.7 kWh/100km   | n.s.              | n.s.              |
|  | Lebensdauer [Jahre]                | n.s.                                       | n.s.               | n.s.                         | n.s.  | n.s.   | n.s.  | n.s.              | n.s.              |
|  | Lebensfahrleistung [km]            | 150'000                                    | 150'000            | 150'000                      | 150'000   | 150'000  | 150'000   | 150'000           | 150'000           |
| Batterie                                 | Typ                                | ZEBRA NiCl <sub>2</sub> + Na               | -                  | ZEBRA NiCl <sub>2</sub> + Na | Li-Ion (LiNi <sub>0.8</sub> Co <sub>0.15</sub> Al <sub>0.05</sub> O <sub>2</sub> + C) | ZEBRA NiCl <sub>2</sub> + Na   | Li-Ion (LiNi <sub>0.8</sub> Co <sub>0.15</sub> Al <sub>0.05</sub> O <sub>2</sub> + C) | -                 | -                 |
|  | Masse                              | 184  | -                  | 184                          | 182   | 402  | 273   | -                 | -                 |
|  | Energiedichte [Wh/kg]              | 119  | -                  | 119                          | 132   | 119  | 132   | -                 | -                 |
|  | Reichweite / Ladung [km]           | 100  | -                  | 100                          | 100   | 150  | 150   | -                 | -                 |
|  | Entladungstiefe                    | 80%  | -                  | 80%                          | 70%   | 80%  | 80%   | -                 | -                 |
| LCI Daten                                | Anzahl / Lebenszyklus              | 1  | -                  | 1                            | 1   | 1  | 1   | -                 | -                 |
|  | Hintergrunddaten                   | ecoinvent v2.01                            |                    |                              |   | ecoinvent v2.2   |   |                   |                   |
|  | Fahrzeug (Glider)                  | ecoinvent v2.01                            |                    |                              |   | diverse Literaturquellen   |   |                   |                   |
|  | Fahrzeug (Drivetrain)              | Literatur                                  |                    |                              |   | diverse Literaturquellen   |   |                   |                   |
|  | Treibstoff / Strom                 | ecoinvent v2.01; EKZ Strommische           |                    |                              |   | ecoinvent v2.2   |   |                   |                   |
|  | EOL-recycling-Modellierung         | cut-off                                    |                    |                              |   | cut-off  |   |                   |                   |
|  | Batterie                           | bottom-up                                  |                    |                              |   | bottom-up  |   |                   |                   |
|  | Modellierungsansatz                | -  |                    |                              |   | bottom-up f.   |   |                   |                   |
|  | Datenquellen                       | Mes-Dea; C. Dustmann                       |                    |                              |   | Mes-Dea; C. Südchemie AG,  |   |                   |                   |
|  | "Wiege bis Tor" Strombedarf        | 7.92 kWh/kg                                |                    |                              |   | 7.92 kWh/kg  |   |                   |                   |
| Strommix für Produktion                  | Schweiz                            |  |                    |                              | Schweiz   |  |   |                   |                   |
| "Wiege bis Tor" Wärmebedarf <sup>1</sup> | 41.1 MJ/kg                         |  |                    |                              | 41.1 MJ/kg  |  |   |                   |                   |
| Goal & Scope                             | Systemgrenze                       | Wiege bis Bahre                            |                    |                              |   | Wiege bis Bahre  |   |                   |                   |
|  | Funktionale Einheit                | Stadtverkehr mit Kleinwagen Renault Twingo |                    |                              |   | Fahren mit modernen PKWs heutiger Technologie (bzw. bald verfügbar); Twingo repräsentativ für Kleinwagen; "Golf-Klasse" repr. F. untere Mittelklasse |   |                   |                   |
|  | Referenzfluss                      | 1 Personen-km                              |                    |                              |   | 1 Fahrzeug-Kilometer   |   |                   |                   |
|  | Impact assessment Methoden         | GWP 100a, CED, EI99(H,A), UBP              |                    |                              |   | publiziert: GWP 100a, Versauerung & Überdüngung, Ökotoxizität, Verbrauch Metallressourcen, Atemwegserkrankungen                                      |   |                   |                   |

<sup>1</sup>nur was als Wärme benötigt wird

**Tabelle 4 Schlüsselparameter für die Ökobilanzen in (Frisknecht 2010/2011).**

| Studie                                   | ESU (Frisknecht 2010 / 11) |                   |   |               |                |
|--|----------------------------|-------------------|---|---------------|----------------|
|  | Elektrisch (Golf)          | Elektrisch (City) | Hybrid (Benzin)   | Diesel (Golf) | Diesel (City)  |
| <b>Treibstoff</b>                        |                            |                   |   |               |                |
| <b>Fahrzeug</b>                          |                            |                   |   |               |                |
| Typ                                      | Golf                       | Leichtfahrzeug    | Golf  | Golf          | Leichtfahrzeug |
| Masse (total) [kg]                       | 1320                       | 550               | 1320  | 1320          | 550            |
| Leistung [kW]                            | 60                         | 40                | 73/60   | 77            | 20             |
| <b>Betrieb</b>                           |                            |                   |   |               |                |
| EURO-Standard                            |                            |                   | Euro 5  | Euro 5        | Euro 5         |
| Verbrauch [kWh/100km]                    | 20                         | 7                 | -   | -             | -              |
| Verbrauch [l/100km]                      | -                          | -                 | 4.3   | 3.8           | 2              |
| Verbrauch [Nm <sup>3</sup> /100km]       | -                          | -                 | -   | -             | -              |
| Verbrauch [MJ/km]                        | 0.72                       | 0.252             | 1.37  | 1.37          | 0.72           |
| Fahrzyklus                               | unspezifiziert             | unspezifiziert    | unspezifiziert  | NEFZ          | unspezifiziert |
| Nebenverbraucher                         | unspezifiziert             | unspezifiziert    | unspezifiziert  | 0             | unspezifiziert |
| Lebensdauer [Jahre]                      | 12.7                       | 12.7              | 12.7  | 12.7          | 12.7           |
| Lebensfahrleistung [km]                  | 150'000                    | 150'000           | 150'000   | 150'000       | 150'000        |
| <b>Batterie</b>                          |                            |                   |   |               |                |
| Typ                                      | Li-Ion                     | Li-Ion            | NiMeH   | -             | -              |
| Masse                                    | 312                        | 100               | 38  | -             | -              |
| Energiedichte [Wh/kg]                    | 130                        | 150               | 100   | -             | -              |
| Reichweite / Ladung [km]                 | 133                        | 143               | -   | -             | -              |
| Entladungstiefe                          | 66%                        | 67%               | -   | -             | -              |
| Anzahl / Lebenszyklus                    | 1.5 / 2                    | 1                 | 1 (?)   | -             | -              |
| <b>LCI Daten</b>                         |                            |                   |   |               |                |
| Hintergrunddaten                         |                            |                   | ecoinvent v2.2 (vermutlich)   |               |                |
| Fahrzeug (Glider)                        |                            |                   | ecoinvent v2.2 (vermutlich); nicht vom Drivetrain getrennt                                      |               |                |
| Fahrzeug (Drivetrain)                    |                            |                   | ecoinvent v2.2 (vermutlich); nicht vom Glider getrennt  |               |                |
| Treibstoff / Strom                       |                            |                   | ecoinvent v2.2 (vermutlich)   |               |                |
| EOL-recycling-Modellierung               |                            |                   | cut-off   |               |                |
| Batterie                                 |                            |                   | ESU, unpubliziert, Referenz nicht vollständig nachvollziehbar                                   |               |                |
| Modellierungsansatz                      |                            |                   | Top-down  |               |                |
| Datenquellen                             |                            |                   | ecoinvent v2.0; Umweltbericht (totaler Energiebedarf und Umsatz eines Konzerns), Batteriepreise |               |                |
| "Wiege bis Tor" Strombedarf              |                            |                   | 19.9 kWh/kg   |               |                |
| Strommix für Produktion                  |                            |                   | k.A.  |               |                |
| "Wiege bis Tor" Wärmebedarf <sup>1</sup> |                            |                   | 77.3 MJ/kg  |               |                |
| <b>Goal &amp; Scope</b>                  |                            |                   |   |               |                |
| Systemgrenze                             |                            |                   | Wiege bis Bahre   |               |                |
| Funktionale Einheit                      |                            |                   | Fahren mit einem PKW unterschiedlicher Klassen und Technologiestandards                         |               |                |
| Referenzfluss                            |                            |                   | 1 Personen-Kilometer (= 1.6 Fahrzeug-Kilometer)   |               |                |
| Impact assessment Methoden               |                            |                   | GWP, UBP 06, CED total, Hochradioaktive Abfälle   |               |                |

<sup>1</sup>nur was als Wärme benötigt wird

## 2.3 Plausibilität und Konsistenz der Mobilitätsstudien

### Empa-Studien

Die Empa-Studie (Althaus & Gauch 2010) wurde als einzige der verglichenen Studien einem externen kritischen Review gemäss ISO 14'040/44 unterzogen. Die Gutachter unter dem Vorsitz von Rolf Frisknecht kamen zum Schluss, dass die Lebenszyklen der Fahrzeuge korrekt und sorgfältig modelliert wurden und dass die wichtigen Annahmen realitätsnah, plausibel und innerhalb der Studie konsistent sind.

Die Massen der Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren (ICE-Fahrzeuge) entsprechen den Angaben von VW zu ihren Golf-Blue-Motion Typen mit Diesel- und Benzinmotoren. Die Massen der Elektrofahrzeuge sind von den ICE Fahrzeugen berechnet durch Subtraktion der Massen von nicht benötigten Komponenten (Motor, Getriebe, Kühlsystem, Tank, Auspuffanlage,...) und Addition der Massen der für Elektrofahrzeuge spezifischen Komponenten (Batterie, Elektromotor, Getriebe, Controller, Spannungswandler, Ladegerät,...). Die Massen der Hybride wurden analog berechnet.

Der Energiebedarf zum Fahren der Autos repräsentiert einen Wert, der im Alltagsgebrauch der Autos erreicht werden dürfte. Er basiert auf dem gemessenen (ICE-Fahrzeuge) bzw. berechneten (E-Mobile) Bedarf im Neuen Europäischen Fahrzyklus (NEFZ) sowie einem Fahrzeug-technologieabhängigen Realitätszuschlag und einem Bedarf für Nebenverbraucher (Heizen, Klima, Licht, Radio,...), die bei der NEFZ-Messung ausgeschaltet sind. Sowohl die NEFZ-Messungen der Diesel und Benzinfahrzeuge als auch die NEFZ-Berechnung für das E-Mobil bildet eine „best in class“-Technologie ab.

Die Batteriemasse und damit die Reichweite liegt im Vergleich zu Elektrofahrzeugen, die momentan auf dem Markt sind, im oberen Bereich. Der Tesla-Roadster und der BYD e6 sind

momentan die einzigen Serienfahrzeuge, die eine grössere Batterie haben. Die „normalen“ Elektromobile haben oft etwa ein Drittel weniger Batterien an Bord und erreichen entsprechend nur etwa 130 km Reichweite. Wir nehmen an, dass die Batterie im Durchschnitt eine Lebensdauer von 100'000 km erreicht. Aufgrund der Zyklenbeständigkeit moderner Batterien könnte mit einer Lebensdauer von 150'000 km gerechnet werden. Es muss aber berücksichtigt werden, dass 150'000 km in der Schweiz in durchschnittlich 12.7 Jahren gefahren werden. So muss aufgrund der kürzeren kalendarischen Lebensdauer von Li-Ionen-Batterien damit gerechnet werden, dass nicht alle Batterien die 150'000 km erreichen.

Die Abgasemissionen der thermischen Autos wurden berechnet aus dem Treibstoffbedarf und der Euro 5 Vorgabe. Schenkte man der Behauptung glauben, dass v.a. die NOx Emissionen von Euro 5 Dieselfahrzeugen im realen Einsatz bis zu 5 Mal über dem Grenzwert (der im NEFZ gemessen wird) liegen kann, würden damit die Abgasemissionen für Diesel-, Benzin- und Gasfahrzeuge unterschätzt. Die Abriebemissionen wurden für ICE Fahrzeuge aus den ecoinvent Datensätzen übernommen. Für Elektro- und Hybridfahrzeuge wurde die Bremsabriebemission auf 10% des originalen Wertes reduziert um zu berücksichtigen, dass mit solchen Fahrzeugen durch die Möglichkeit des Rekuperierens kaum mehr konventionell gebremst werden muss.

Die LCI Daten basieren auf Herstellerangaben und Prozessbeschreibungen und sind sehr detailliert modelliert. Alle möglicherweise relevanten Unterschiede zwischen den Fahrzeugen unterschiedlicher Technologien wurden dabei berücksichtigt.

Die darauf aufbauende Studie von Habermacher modelliert die Herstellung der Fahrzeuge noch detaillierter. Insbesondere werden hier neben neuen Inventaren für Standardfahrzeuge auch Daten zur Materialisierung von Leichtgewichtsfahrzeugen kompiliert. Ausserdem wurden in der Studie neue, detailliertere Daten zu Elektromotoren und Leistungselektronik erarbeitet. Ergebnisse werden präsentiert für Golf-Klasse Fahrzeuge sowie für City- und Mini-Fahrzeuge (Fiat 500 / Smart). Diese Studie ist bezüglich Verbrauchsberechnung voll kompatibel mit Althaus & Gauch 2010. Allerdings wurde die Reichweite der Fahrzeuge und damit die Antriebsbatteriemasse gegenüber Althaus & Gauch deutlich reduziert (auf 120 km Reichweite, Batteriemasse je nach Verbrauch).

Die Althaus & Gauch-Studie beinhaltet eine extensive Sensitivitätsanalyse um Aussagen über die Unsicherheiten der Ergebnisse machen zu können. Neben Szenarien zu Energie- bzw. Treibstoffbedarf, Batterielebensdauer, Emissionsreduktion durch Rekuperieren und zum Anteil von Netzstrom an der Betriebsenergie der Plug-in-Hybride wird auch der Einfluss der Allokation bei der Modellierung des Lebensendes (End-of-Life, EOL) untersucht.

## PSI-Studien

In den neuesten Ökobilanzen des PSI (Simons & Bauer 2011) werden ebenso wie in der Studie der Empa die einzelnen Komponenten der Fahrzeuge möglichst realitätsnah anhand der Massen der Fahrzeugteile in den Ökobilanzdaten abgebildet. Teilweise wurden dafür die Daten der Empa übernommen, teilweise andere Literaturquellen herangezogen. In der älteren Arbeit (Bauer & Simons 2010) wurde dieser Teil der Ökobilanz vergleichsweise einfacher behandelt und auf damals vorhandene Inventardaten aus der ecoinvent Datenbank zurückgegriffen (Spielmann et al. 2007), allerdings ohne grossen Einfluss auf die darin dargestellten Bewertungsindikatoren.

Für die Verbrauchsdaten des Betriebs der Fahrzeuge wurden Praxiswerte bilanziert: entweder basierend auf dem Betrieb der Fahrzeuge im Flottentest und den Erfahrungen der EKZ (Bauer & Simons 2010), durchschnittlichen Verbrauchsdaten aus der REMOVE-Datenbank<sup>3</sup>, die den heutigen europäischen Fahrzeugbestand abbildet (Simons & Bauer 2011), oder realitätsnahen Zuschlägen auf die Verbrauchsdaten im Normzyklus (Simons & Bauer 2011, Bauer & Simons 2010).

Die Reichweiten der Elektrofahrzeuge (100 km für Stadtfahrzeuge, 150 km für „Golf-Klasse“) und damit die Batteriemassen liegen im Bereich der Angaben für die heute am Markt erhältlichen

---

<sup>3</sup> <http://www.tremove.org/>



Modelle. Die Lebensdauer der Fahrzeuge wird in Übereinstimmung mit anderen Studien generell mit 150'000 km angenommen. Es wird davon ausgegangen, dass die Batterien währenddessen nicht ersetzt werden müssen, was eine vergleichsweise optimistische Annahme darstellt, besonders aus Sicht der kalendarischen Lebensdauer, falls die Fahrzeuge nicht sehr intensiv (>15'000 km pro Jahr) genutzt werden. Erfahrungen aus der Praxis bzgl. Lebensdauer fehlen heute noch.

Die nicht aus der Verbrennung des Treibstoffs resultierenden Emissionen beim Fahrzeugbetrieb – Abrieb von Strasse, Reifen und Bremsen sowie die Emissionen von flüchtigen Verbindungen aus dem Verdampfen von Benzin und Diesel – wurden in der neuesten Studie überarbeitet und aktualisiert und werden somit in Abhängigkeit vom Fahrzeuggewicht bilanziert. Mangels belastbarer Informationen zur Zeit der Erstellung der Studien und wegen der derzeit teilweise wenig bedienungsfreundlichen Lösung<sup>4</sup> der Energierückgewinnung durch rekuperatives Bremsen in Elektromobilen wurden für den Abrieb aus Bremsen die gleichen Werte für sämtliche Fahrzeuge bilanziert.

Die LCI Daten der Fahrzeuge und deren Komponenten basieren auf Herstellerangaben und Prozessbeschreibungen und sind grossteils detailliert modelliert. Alle möglicherweise relevanten Unterschiede zwischen den Fahrzeugen unterschiedlicher Technologien mit potenziellen signifikanten Auswirkungen auf die Ergebnisse der Ökobilanzen wurden dabei berücksichtigt.

## ESU-Studie

Die ESU-Studie (Frischknecht 2011) stellt Resultate von nicht direkt vergleichbaren Fahrzeugen gegenüber. Es ist vermutlich auch nicht die Idee des Autors, dass jedes mit jedem Fahrzeug verglichen wird.

Die Massen der ICE Fahrzeuge entsprechen etwa einem Diesel-Golf. Damit ist das Benzin- und das Erdgasfahrzeug rund 100 kg zu schwer und das Elektrofahrzeug (wenn die angegebene Masse inkl. Batterie ist) etwa 150 kg zu leicht. Die Massen für die City Fahrzeuge (ICE und Elektrisch 550 kg) sind für heute erhältliche 4-Plätzer klar zu tief. Es gibt einen elektrischen 2-Plätzer, der in etwa so schwer ist (SAM II), aber schon ein Smart (825 kg) oder ein Fiat 500 (940 kg) wiegen über die Hälfte mehr. Das heisst, diese City Fahrzeuge stellen heute nicht erhältliche Zukunftskonzepte dar.

Der Treibstoff- bzw. Strombedarf der Fahrzeuge in dieser Studie ist inkonsistent. Bei den Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren gibt es einerseits die Flottenmixe der Benzin-, Diesel-, und Erdgasfahrzeuge gemäss der ecoinvent Datenbank, die einen Treibstoffbedarf aufweisen, der etwa einem durchschnittlichen Fahrzeug in der Schweiz im Jahre 2005 in einer realistischen Fahrsituation entspricht. Dem steht ein moderner Golf mit einem für diese Fahrzeugklasse einmalig tiefen Dieselbedarf gegenüber. Der Treibstoffbedarf für dieses Fahrzeug gilt für den NEFZ, der bekanntermassen ca. 20-30% unter einem realistischen Alltagsverbrauch liegt. Dasselbe Modell, das in der ESU-Studie mit 3.8 l/100km bilanziert wird, verbraucht in der Empa-Studie 4.9 l/100km. Das ICE City-Fahrzeug weist Spezifikationen auf, die auf dem Konzept des „Loremo“ basieren.<sup>5</sup> Die besten heute verfügbaren Dieselautos (VW Polo BM, Smart for two) brauchen im NEFZ 3.3 l/100km, was einem Realverbrauch von mehr als dem doppelten des angenommenen Verbrauchs von 2 l/100km entspricht. Der Strombedarf des Elektro-Golf entspricht dem Wert der Empa-Studie und kann als plausibel für einen Durchschnittsverbrauch in einer realen Fahrsituation betrachtet werden. Hingegen entspricht der Strombedarf des City-Elektroautos von 7 kWh/100km dem NEFZ-Verbrauch eines Elektrofahrzeuges mit 550 kg, Stirnfläche 1.8 m<sup>2</sup>, Cw 0.27 und einer "plug-to-wheel"-Effizienz von 82%. Der Realverbrauch eines solchen Fahrzeugs läge eher bei ca. 10-12 kWh/100km.

Die ESU-Studie bevorzugt bei den Mittelklassewagen also das Dieselfahrzeug mit einem rund 30% zu tiefen Dieselbedarf. Bei den City Fahrzeugen weisen sowohl Elektro- als auch Dieselfahrzeug

---

<sup>4</sup> Praxiserfahrung im e-Twingo

<sup>5</sup> <http://www.loremo.com/index.htm>

tiefe Verbrauchswerte auf, die für heutige Fahrzeuge nicht realistisch sind. Aber auch hier scheint der Wert des Dieselfahrzeuges vergleichsweise niedriger als der entsprechende Wert des Elektrofahrzeugs.

Die Batteriemassen der Elektrofahrzeuge liegen in einem vernünftigen Rahmen. Auch die Lebenserwartung von 75'000-100'000 km (je nach Präsentation) liegt in einem plausiblen, wenn auch eher pessimistischen Rahmen. Die Kapazität und Lebensdauer der Batterie des City-Autos scheinen hingegen eher hoch.

Emissionen aus Abrieb von Strasse, Reifen und Bremsen werden nicht explizit erwähnt; es kann aber angenommen werden, dass diese analog zu den in der ecoinvent Datenbank enthaltenen Werten bilanziert wurden. Die dort verfügbaren Daten sind jedoch teilweise inkonsistent.

Die LCI Daten für die Fahrzeuge wurden mit Ausnahme der Batteriedaten vermutlich 1:1 aus der ecoinvent Datenbank (v2.2) entnommen. Diese Daten sind nicht geeignet für einen direkten Vergleich von Fahrzeugtechnologien, da sie Unterschiede aufgrund von unterschiedlicher Technologie nicht abbilden. Dies äussert sich z.B. in den oben diskutierten zu grossen / kleinen Massen der Golfklassefahrzeugen. Als anderes Beispiel wird offensichtlich angenommen, dass die Karosserien der leichten City-Fahrzeuge, wie die der schweren Mittelklassefahrzeuge, vor allem aus Stahl gemacht sind. Ohne Leichtbau und entsprechend leichtere Materialien (Alu, Kunststoffe) kann aber ein solches Fahrzeug gar nicht hergestellt werden.

## **2.4 Plausibilität und Konsistenz der Batteriedaten**

### **Empa-Studie**

Die Empa-Studie basiert auf Batteriedaten, die in einem aufwändigen Projekt zwischen 2008 und 2010 erhoben und 2010 in einer der renommiertesten wissenschaftlichen Zeitschriften (Environmental Science & Technology) publiziert wurden (Notter et al. 2010). Bei dieser Zeitschrift wird jede Publikation eingehend auf die wissenschaftliche Korrektheit der angewandten Daten, Methoden und Resultate geprüft. Die Studie analysiert jeden Schritt in der Produktionskette von Li-Ionenbatterien im Detail auf ihren Bedarf an Energie und Roh- und Hilfsmaterialien sowie auf Emissionen in die Umwelt und baut daraus, bottom-up, einen Datensatz für eine moderne nickel- und kobaltfreie  $\text{LiMn}_2\text{O}_3$ -basierte Lithium-Ionen Batterie, deren aktive Materialien in der Produktion wassergelöst sind. Die Informationen zu den einzelnen Prozessschritten stammen teilweise von Firmen, die diese Prozesse industriell betreiben und teilweise aus Modellen, mit denen auf Basis von Prozessbeschreibungen (z.B. in Patenten), Thermodynamik (z.B. Wärmekapazität von Materialien) und Informationen zu vergleichbaren Prozessen (z.B. energetische Wirkungsgrade). Die Daten wurden nach der Publikation in die ecoinvent Datenbank (ab v.2.2) aufgenommen.

Diese Daten repräsentieren eine sehr spezifische moderne Li-Ionenbatterie. Damit ist auch klar, dass sie nicht vergleichbar sind mit Daten einer historischen oder aktuellen Durchschnittsproduktion. Die wassergelösten aktiven Materialien sparen einerseits teure Lösungsmittel ein. Andererseits, noch viel wichtiger, sparen sie viel Energie für die Trocknung der Luft in den Produktionshallen, da sie keine besonderen Ansprüche an die Produktionsatmosphäre stellen. Somit liegen die Herstellkosten und der Herstellenergiebedarf dieser Batterie deutlich tiefer als die von mit den bisher üblichen Prozessen hergestellten Batterien. Dies legt die Vermutung nahe, dass bei einer grösseren Verbreitung von Elektrofahrzeugen mit Lithiumbatterien eher solche Batterien zum Einsatz kommen werden als die bisher verbreiteten nickel- und kobalthaltigen Batterien, die mit organischen Lösemitteln produziert werden.

### **ESU-Studie**

Hier wird eine Li-Ionenbatterie mit  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$ -Elektrode bilanziert. Die Daten wurden weitgehend (vor allem den Materialverbrauch betreffend) aus der ecoinvent v2.0 Sachbilanz dieser Batterie (Hischer et al. 2007) übernommen. Allerdings wurden bestimmte Prozessemissionen sowie der Energieverbrauch (Strom und Wärme) für die Batterieproduktion neu ermittelt. Die Werte, die für den Energieverbrauch (Strom und Wärme) zur Herstellung der Batterie verwendet werden,

basieren auf Umweltberichten von Maxell aus 2003 und 2005, auf denen schon die älteren Daten in ecoinvent (Versionen v2.0 und v2.1) basierten. Allerdings wurden bestehende Fehler der entsprechenden ecoinvent Datensätze korrigiert. Die Daten aus (Hischier et al. 2007) galten für eine in Mobiltelefonen eingesetzte Batterie, wobei aber diese aber grundsätzlich in modifizierter Form auch in Fahrzeugen zur Anwendung kommen können (z.B. Tesla).

Der genannte Hersteller – auf dessen Umweltberichten der Energieverbrauch bei der Herstellung beruht – produziert keine Batterien für die Verwendung in Elektrofahrzeugen, sondern Li-Ionenbatterien für Mobiltelefone. Im Umweltbericht liegen nur Daten vor, die für die gesamte Produktpalette (CD-Rohlinge, Linsen, Tapes, Silberbatterien, ... und Handybatterien) der Maxell Corp. aggregiert sind. Der Energiebedarf für die Herstellung der Handy-Batterien wird abgeschätzt indem angenommen wird, dass für die Produktion aller Produkte dieses Herstellers pro Dollar Verkaufspreis des Produktes gleich viel Energie benötigt wurde. Da Produktpreise nicht nur vom Energiebedarf der Produktion sondern auch (und oft in höherem Masse) von Personal- und Rohmaterialkosten, von der Abschreibung von Entwicklungs- und Infrastrukturkosten sowie von der Marktsituation abhängen, gibt es keinen Anhaltspunkt, dass diese Annahme der Realität entspricht. Ein auf diese Weise ermittelter Energiebedarf kann um Größenordnungen falsch liegen.

Im Gegensatz zur Empa-Studie benutzt die ESU-Studie also teilweise historische Produktionsdaten eines Herstellers von Li-Ionenbatterien für nicht mobilitätsbezogene Anwendungen. Solche Daten sind klar nicht geeignet, um eine Aussage zu künftigen Elektrofahrzeugen zu machen. Sind die Herstellerdaten schon einige Jahre alt, resultiert deren Verwendung sehr wahrscheinlich in einer Überschätzung der durch die Batterieherstellung verursachten Umweltauswirkungen, da sich die Batterietechnologie in den letzten Jahren sehr schnell entwickelt hat. Allerdings stehen weiterhin keine aktuellen Daten aus der Batterieherstellung eines heutigen Produzenten, der Li-Ionenbatterien für den Einsatz als Energiespeicher in Elektrofahrzeugen herstellt, öffentlich und zur Verwendung in Ökobilanzen zur Verfügung.

Die konkrete Frage, ob eine Abschätzung des Energiebedarfs der Batterieproduktion, wie sie in der ESU-Studie gemacht wurde, sinnvoll sei, wurde von der Eco-Design Managerin von Saft, einem grossen Hersteller von Li-Ionenbatterien für Elektrofahrzeuge, klar verneint<sup>6</sup>. Allerdings konnte sie auch keine bessere Alternative für das Vorgehen in Ökobilanzen vorschlagen, da industrielle Daten in diesem Sektor offensichtlich der Geheimhaltung unterliegen.

## PSI-Studien

Vom PSI wurden bisher zwei verschiedene Batterietypen in Ökobilanzen analysiert: a) die ZEBRA-Batterie, die heute in verschiedenen am Markt erhältlichen Elektrofahrzeugen als Energiespeicher eingesetzt wird<sup>7</sup> (Bauer & Simons 2010); b) eine  $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.15}\text{Al}_{0.05}\text{O}_2$ -basierte Lithium-Ionen Batterie, welche eine von vielen möglichen Option für heutige Elektrofahrzeuge darstellt (Simons & Bauer 2011; Bauer 2010).

Die Angaben, die für die Bilanzierung der ZEBRA-Batterie verwendet wurden (Material- und Energiebilanz), stammen direkt vom Hersteller, aus öffentlich verfügbaren Produktunterlagen, sowie aus persönlichen Expertenauskünften<sup>8</sup>. Die Qualität dieser Informationen kann als gut und umfassend bezeichnet werden; die mit der Bilanz dieser Batterie verbundenen Unsicherheiten werden daher etwa im Vergleich zu Li-Ionen-Batterien als klein beurteilt.

Die Bilanzierung der spezifischen Li-Ionenbatterie basiert bzgl. Zusammensetzung der Batteriezellen auf einem bottom-up Ansatz, d.h. die eingesetzten Stoffmengen wurden anhand der Spezifikationen der Batterie, den elektrochemischen Eigenschaften der Elektrodenmaterialien und der Geometrie der Zellen berechnet. Diese Abschätzungen durchliefen ein informelles Review

---

<sup>6</sup> Clemence Siret-Falchetti, Saft (43. Diskussionsforum LCA, 6.4.2011, Zürich)

<sup>7</sup> <http://www.kamoo.ch/>

<sup>8</sup> C. Dustmann, 2010/2011

durch einen Experten im Bereich Elektrochemie<sup>9</sup> und sollten daher mit geringen Unsicherheiten verbunden sein. Hinsichtlich Energieverbrauch zur Herstellung der Batterien muss jedoch von einer hohen Unsicherheit ausgegangen werden, da keine produktspezifischen Daten zur Verfügung standen (und stehen). Der Strom- und Wärmebedarf wurde wie in der ESU-Studie abgeschätzt und ist daher vergleichsweise hoch. Im Gegensatz zur von der Empa bilanzierten Batterie müssen die  $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.15}\text{Al}_{0.05}\text{O}_2$ -Elektroden allerdings in einer trockenen Umgebung mit organischen Lösungsmitteln hergestellt werden, was einen höheren Energieverbrauch plausibel scheinen lässt.

## Vergleich der Empa-, PSI- und ESU-Batteriedaten im Kontext von Literaturdaten

In der wissenschaftlichen Literatur sind einige Ökobilanzen (bzw. Energie und Treibhausgasbilanzen) zu Lithiumionenbatterien zu finden. Hier diskutieren wir die Unterschiede der Empa-, PSI- und ESU-Batteriedaten zu einer neueren sowie einer älteren Publikation, die aber nach wie vor oft als Basis für viele Bilanzen benutzt wird.

Die Zahlen von Ishihara et al. 2002 sind ähnlich modelliert wie die in der Empa-Studie (Notter et al 2010). Allerdings stammen sie direkt von einem Batterieproduzenten. Die kumulierten Treibhausgasemissionen, die in dieser Studie ausgewiesen werden, liegen knapp 50% über dem Notter-Wert, was dadurch erklärbar ist, dass Notter et. al 2010 von einer wasserbasierten Chemie ausgeht während Ishihara's Batterie organische Lösemittel benutzt, welche einen hohen Energieaufwand zur Trocknung der Luft in den Produktionshallen nötig machen. Die Ergebnisse dieser Studie liegen bei etwa 60% des ESU-Wertes. Die Treibhausgasemissionen aus der Herstellung der ZEBRA-Batterie liegen nach der PSI-Studie 25% höher als jene der von der Empa bilanzierten Li-Ionenbatterie; die PSI-Resultate für die Li-Ionenbatterie entsprechen trotz gänzlich anderer Materialzusammensetzung den Werten der ESU-Studie.

Zackrisson et al. 2010 verwenden dasselbe Prinzip zur Abschätzung des Energieaufwandes für die Batterieherstellung wie ESU. Sie basieren auf den CSR von Saft, einem Hersteller von Produkten vor allem für die Raumfahrt- und Rüstungsindustrie. Daraus resultiert ein GWP-Wert, der etwa 3-mal höher liegt als der Wert von Notter et al. 2010. Damit ist der Wert auch deutlich höher als der Wert von ESU. Zackrisson et al 2010 analysieren auch den Unterschied für Batterien, bei deren Herstellung die Aktivmaterialien wassergelöst und solche, die aufgrund von organischen Lösemitteln für die Lithium-Manganpaste eine aufwändige Trocknung der gesamten Luft in der Produktionshalle benötigen. Die Werte unterscheiden sich nur wenig, weil durch den Modellierungsansatz kein Unterschied im Produktionsenergiebedarf berücksichtigt werden kann.

Ishihara (der den Herstellprozess wie die Empa Studie bottom up modelliert), kommt zu etwas höheren Zahlen als die Empa, weil er eine andere (ältere) Technologie betrachtet. ESU (damit auch das PSI) und Zackrisson kommen mit ihren top down Ansätzen zu deutlich höheren Werten als Ishihara und Empa. Ob der Unterschied einen technologischen Grund hat ist nicht ersichtlich, da die top-down Methode keine Möglichkeit bietet, die Technologie zu analysieren.

Generell ist für die Menge an Treibhausgasemissionen, die mit der Herstellung der Batterien verbunden ist, nicht nur der absolute Strom- und Wärmebedarf ausschlaggebend, sondern auch die bilanzierten Strom- und Wärmequellen. Beim Elektrizitätsverbrauch ist also der Ort der Herstellung und der verwendete Strommix entscheidend, bei der Prozesswärme, die Art des eingesetzten Energieträgers (heute meist fossilen Ursprungs). Diese Informationen sind nur für die Arbeiten der Empa und des PSI verfügbar (und in Tabelle 1 bis Tabelle 3 angeführt); zu anderen Studien können keine Aussagen getroffen werden.

In Abbildung 1 ist dargestellt, wie sich die Verwendung der Sachbilanzdaten zur Batterieproduktion aus diesen verschiedenen Ökobilanzen auf die Treibhausgasbilanz eines Elektrofahrzeugs der

---

<sup>9</sup> M. Holzapfel, Süd-Chemie, 2010/2011.

„Golf-Klasse“ mit jeweils gleicher Batteriekapazität auswirkt.<sup>10</sup> Für den Antrieb des Elektrofahrzeugs wird entweder EU-Strommix („EU-Mix“) oder der Schweizer Versorgungsmix inkl. Stromimporten („CH-Mix“) genutzt. Ist die Treibhausgasintensität wie beim EU-Strommix hoch, so wirken sich unterschiedliche Batteriedaten relativ gesehen weniger stark auf das Gesamtergebnis aus: Bei Verwendung des vergleichsweise CO<sub>2</sub>-armen Schweizer Mix nehmen die Treibhausgasemissionen mit der Batterie bilanziert nach (Zackrisson et al. 2010) um mehr als 50% pro Fahrzeugkilometer zu gegenüber (Notter et al. 2010); mit dem EU-Mix um knapp 30%.

Die Sachbilanz der Batterie kann also erhebliche Auswirkungen auf die Ergebnisse der Ökobilanz von Elektromobilen haben.

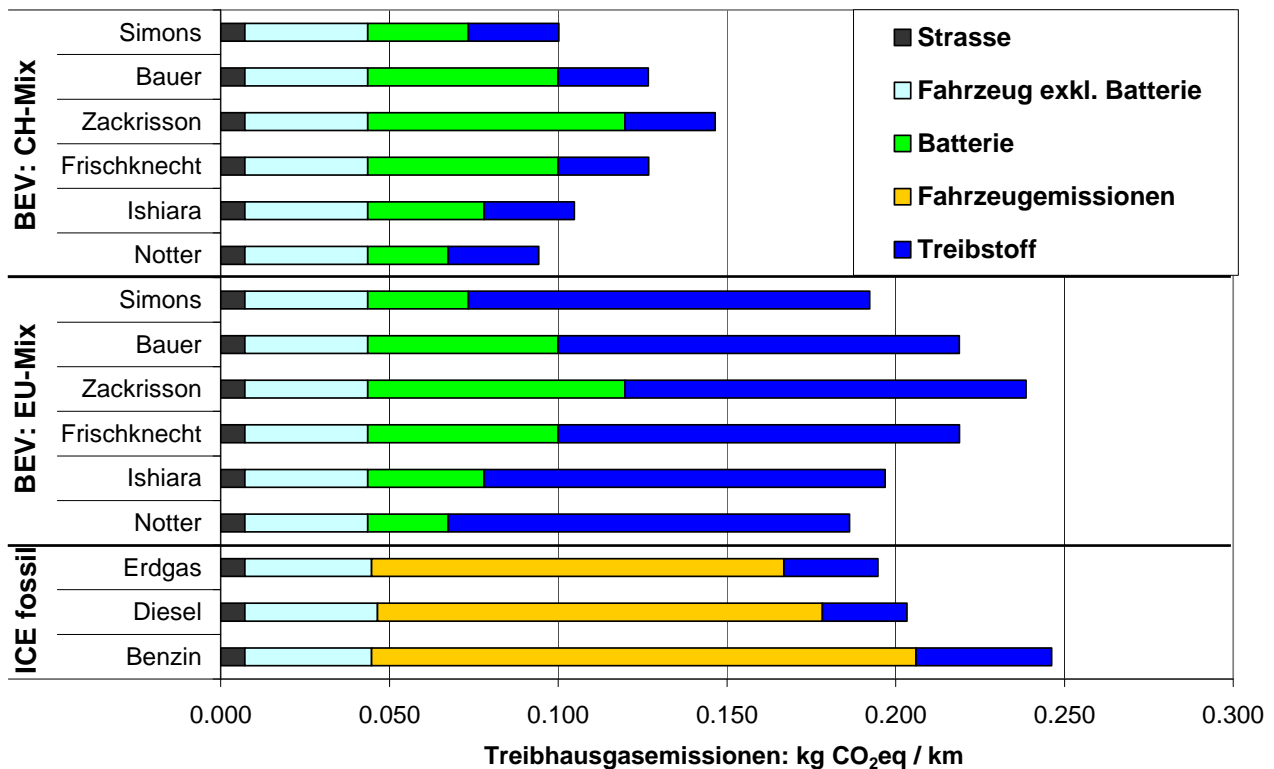


Abbildung 1 Auswirkung der Verwendung von Inventardaten zur Batterieherstellung nach verschiedenen Quellen auf die Treibhausgasbilanz von Elektrofahrzeugen pro Fahrzeugkilometer. Fahrzeugdaten (ohne Antriebsbatterie) sowie Energiebedarf gemäss Althaus & Gauch 2010. Der Energiebedarf des BEV „Simons“ wurde nicht angepasst, um die Unterschiede allein aus der Batterieherstellung deutlich zu machen.<sup>11</sup>

<sup>10</sup> Der knapp 30% höhere Energiebedarf eines Fahrzeugs mit ZEBRA-Batterie („Simons“) im Vergleich zu einer Lithonenbatterie wurde für diesen Vergleich nicht berücksichtigt.

<sup>11</sup> Eine Zebra-Batterie benötigt auch im Stillstand konstant ca. 80 W, um die hohe Betriebstemperatur aufrecht zu erhalten. Pro Jahr gibt das ca. 700 kWh. Bei 12'000 km pro Jahr und 20 kWh pro 100 km Fahrt verbraucht das Auto zum Fahren (inkl. Nebenverbraucher) 2400 kWh/a. D.h. knapp 30% des Realverbrauchs eines Autos mit Li-Batterie wird zum warm halten der Zebra-Batterie verbraucht.

## 2.5 Umweltindikatoren und Bewertungsmethoden

In seriösen Ökobilanzen wird generell ein sehr breites Spektrum an Schadstoffemissionen in Luft, Boden und Gewässer sowie an Entnahmen von Ressourcen wie Energieträger, andere Rohstoffe oder Landnutzung berücksichtigt. Beispielsweise umfasst die aktuelle Version der ecoinvent Datenbank v2.2 mehr als 700 solcher so genannter „Umweltflüsse“. Um System und Ordnung in diese grosse Zahl einzelner Ergebnisse zu bringen und um aussagekräftige Vergleiche durchführen zu können, werden diese üblicherweise zu einem gewissen Grad zusammengefasst („aggregiert“).

Dies kann auf zwei verschiedenen Ebenen gemacht werden: a) „Vollaggregation“ der Ergebnisse, d.h. Zusammenfassung aller Schadenswirkungen zu einem einzigen Indikator mit Gewichtung der verschiedenen Gesundheits- und Umweltschäden untereinander; b) Aggregation jener Umweltflüsse, die zu einer gemeinsamen Schadenskategorie beitragen und getrennte Auswertung von mehreren Schadenskategorien. Beispiele für a) sind die oft verwendeten „eco-Indikator 99-Punkte“ (Goedkoop & Spriensma 2000) oder die „Umweltbelastungspunkte“ (Frischknecht et al. 2009). Bekanntestes Beispiel für b) ist der Beitrag zum Klimawandel in Form von Treibhausgasemissionen/CO<sub>2</sub>-Äquivalenten (IPCC 2007). Weitere im Verkehrssektor relevante Beispiele für solche Schadenskategorien sind „ecotoxicity“ (Umweltschäden durch Schwermetall- und Kohlenwasserstoffemissionen) und „respiratory inorganics“ (Gesundheitsschäden durch Feinstaub-, NO<sub>x</sub>- und SO<sub>2</sub>-Emissionen) nach (Goedkoop & Spriensma 2000).

Vollaggregierende Methoden haben den Vorteil, dass aus ihnen ein eindeutiges Ergebnis in Form eines einzigen Indikators resultiert, der die Umweltbelastung insgesamt repräsentiert. Allerdings werden dabei die verschiedenen Umwelt- und Gesundheitsschäden auf nicht objektive Weise gewichtet. Die ISO Norm, in der die Erstellung von LCAs geregelt ist (ISO 14'044 2006), erlaubt aufgrund dieser Subjektivität keine vollaggregierenden Wirkungsabschätzungsmethoden für vergleichende Studien deren Ergebnisse zur Publikation bestimmt sind. Ausserdem geht oft die Information verloren, welche Art der Umweltbelastungen den Gesamtindikator dominieren. Werden die Schadenskategorien getrennt dargestellt, entfällt der Schritt der Gewichtung, d.h. es werden keine expliziten Aussagen gemacht, wie wichtig beispielsweise ökotoxische Schäden im Vergleich zu Schäden sind, die durch den Klimawandel ausgelöst werden. Allerdings ist diese Art der Darstellung der Ökobilanzergebnisse schwieriger zu interpretieren, da das Fazit selten eindeutig ausfällt.

Die Auswahl an Indikatoren, die in der Auswertung der Ökobilanzen explizit gezeigt wird, kann die vermittelte Botschaft und die daraus gezogenen Schlussfolgerungen erheblich beeinflussen. Da bei einem Vergleich von mehreren Fahrzeugen selten eines bei allen Indikatoren besser abschneidet als die anderen, sollte stets ein breites Spektrum an Indikatoren zum Technologievergleich herangezogen und nicht selektiv Indikatoren gewählt werden, die positiv für das eine und negativ für ein anderes Fahrzeug ausfallen. Die Auswahl an Indikatoren sollte auch stets das Thema der Ökobilanz berücksichtigen und die im jeweiligen Bereich relevanten Umweltauswirkungen beinhalten. Beim Thema Verkehr – mit Fokus auf fossile Treibstoffe und Elektrofahrzeuge – sind dies sicher Treibhausgasemissionen, Verbrauch an nicht erneuerbaren Energieträgern und anderen Rohstoffen, Luftschadstoffe, die zur Feinstaubbelastung und zum „Sommersmog“ durch bodennahes Ozon beitragen, sowie ökotoxisch wirkende Schadstoffe. Falls auch Agrotreibstoffe aus Biomasse Teil der Ökobilanz sind, sollten auch Landnutzung und Überdüngung abgebildet werden. Bei Elektrofahrzeugen, die mit einem relevanten Beitrag an Kernenergie betrieben werden, sollte auch ein Indikator wie die Menge an hochradioaktiven Abfällen nicht fehlen. Auch das Zielpublikum – Wissenschaft oder breitere Öffentlichkeit – sollte bei der Wahl der Indikatoren berücksichtigt werden.

Diesem Anspruch an eine repräsentative Abdeckung der Umweltauswirkungen mit Fokus auf die im Verkehrsbereich wichtigen Indikatoren kommen die PSI- und Empa-Studien zweifelsfrei nach. In den Präsentationen von R. Frischknecht ist die Auswahl der Indikatoren etwas selektiv und beschränkt sich auf Treibhausgasemissionen, kumulierten Energiebedarf (erneuerbar und nicht erneuerbar), Umweltbelastungspunkte und die Menge an hochradioaktiven Abfällen. Diese Auswahl benachteiligt tendenziell Elektrofahrzeuge (vor allem, wenn Wasserkraft und Kernenergie im Strom fürs Laden der Batterie einen nennenswerten Anteil aufweist, wie das für den Schweizer

Strommix der Fall ist), da nicht zwischen erneuerbaren und nicht erneuerbaren Energieträgern unterschieden wird und radioaktive Abfälle doppelt negativ einfließen: durch hohes Gewicht innerhalb der Umweltbelastungspunkte und als direkt genutzter Indikator.

## 2.6 Unsicherheiten: Schwankungsbereiche einzelner Parameter und Auswirkungen auf Resultate

Anhand der vorliegenden Ökobilanzstudien können einige Parameter identifiziert werden, bei welchen grosse Unsicherheiten vorliegen und bei denen gleichzeitig Schwankungen starken Einfluss auf die Ergebnisse der Ökobilanzen aufweisen. Daneben gibt es – wie üblich in Ökobilanzen – einige Parameter, die zwar mit grossen Unsicherheiten verbunden sind, aber für die Ergebnisse von geringer Bedeutung sind. Auf diese wird im Folgenden nicht weiter eingegangen. Wichtig ist, dass die Annahmen zu diesen grundlegenden Parametern in den Ökobilanzen mit hohem Einfluss auf die Ergebnisse jeweils transparent ausgewiesen werden, um die Vergleichbarkeit verschiedener Studien beurteilen zu können.

- **Energieverbrauch des Fahrzeugs:**

Der Energie- bzw. Treibstoffverbrauch der Fahrzeuge ist abhängig von Faktoren wie Fahrzeugmasse, Luftwiderstand, Nebenverbraucher, Energieeffizienz des Antriebsstranges, etc. Werden mehrere Autos in Ökobilanzen miteinander verglichen, so ist entscheidend, konsistente Annahmen für alle zu treffen: d.h., es müssen entweder Verbrauchsdaten aus Testzyklen oder, idealerweise, aus dem Praxisbetrieb inkl. Nebenverbraucher verwendet werden, aber nicht für ein Fahrzeug Praxis- und für das andere Test- oder Normverbrauchsdaten. Weiter ist wichtig, nur Fahrzeuge einer Klasse mit ähnlichem Technologiestandard zu vergleichen (also nicht ein „best-in-class“ Fahrzeug mit einem Flottenmix).

- **Lebensdauer der Batterie von Elektrofahrzeugen:**

Bei Umweltindikatoren, zu denen die Herstellung der Batterie einen grossen Beitrag leistet (z.B. Verbrauch an Metallen oder ökotoxische Emissionen), ist die angenommene Lebensdauer der Batterie ein entscheidender Faktor. Die vorliegenden Ökobilanzen gehen von ein bis zwei Batterien aus, die während der Lebensdauer des Fahrzeugs von 150'000 km benötigt werden. Werden zwei statt einer Batterie gebraucht, so verdoppeln sich die zugehörigen Umweltauswirkungen in der Bilanz. Derzeit liegen keine Erfahrungswerte vor, deswegen kann nicht von „richtigen“ und „falschen“ Annahmen gesprochen werden, sondern von optimistischen (eine Batterie) und pessimistischen (zwei Batterien).

- **Technologie der Batterieproduktion (Li-Ionen) und resultierender Energieverbrauch**

Belastbare und öffentlich verfügbare Daten von industriellen Herstellern von Li-Ionen-Batterien, die in heutigen Elektrofahrzeugen eingesetzt werden, liegen nicht vor. Deswegen sind sämtliche Ökobilanzen zu diesem Thema, die derzeit veröffentlicht sind, auf mehr oder weniger gut abgestützte Annahmen zum Herstellungsprozess angewiesen. Während sich die Stoffflüsse anhand der elektrochemischen Materialeigenschaften der Elektroden und anderer Komponenten mit einigem Aufwand recht gut abschätzen lassen, sind die Unsicherheiten bzgl. Energieverbrauch (Strom und Prozesswärme, vor allem bei der Elektroden- und Zellproduktion) signifikant.

Weiter ist hier zu berücksichtigen, dass eine Vielzahl von möglichen Elektrodenmaterialien und -kombinationen zur Verfügung stehen und sich die Produktionsprozesse abhängig von der Elektrodenchemie erheblich unterscheiden können. Beispielsweise müssen Materialien, die empfindlich auf Luftfeuchtigkeit reagieren, in getrockneter Umgebungsluft hergestellt und bearbeitet werden; der damit verbundene Energieverbrauch kann beträchtlich sein, vor allem wenn die Prozesse nicht in Glove-Boxen durchgeführt werden können. Ebenso ist bei der Herstellung der Elektroden zu unterscheiden zwischen der Verwendung organischer Lösungsmittel und einem auf Wasser basierenden Prozess; organische Lösungsmittel erfordern im Gegensatz zur auf Wasser basierenden Chemie wiederum eine trockene Umgebungsluft. Allerdings ist auch hier eine Prozessierung in Glove-Boxen denkbar, was im Vergleich zur Produktion in Ultra-trockenen

Räumen zu 5-10 mal tieferem Energiebedarf in der Produktion führen kann<sup>12</sup>. Für die resultierenden Umweltauswirkungen ist zudem der angenommene Produktionsstandort wichtig: Ist z.B. der Stromverbrauch hoch, macht es einen grossen Unterschied, ob die Fertigung in der Schweiz mit CO<sub>2</sub>-armem Strom, oder in China mit Elektrizität aus wenig umweltfreundlichen Kohlekraftwerken stattfindet.

- Auslastung der Fahrzeuge

Die Ökobilanzergebnisse im Verkehrsbereich werden teils bezogen auf einen Fahrzeugkilometer [vkm] oder [km], teils auf einen Personenkilometer [pkm] dargestellt. Die Einheit pkm berücksichtigt die Auslastung der Fahrzeuge, die in der Schweiz derzeit bei etwa 1.6 Personen pro Fahrzeug für Personenwagen liegt.

- Potenzielle Wiederverwertung von Fahrzeugkomponenten („end-of-life“ (EOL) Modellierung)

Bei Mobilitätsökobilanzen stellt sich eine relevante Allokationsfrage beim Recycling der Materialien, die im Fahrzeug und in der Batterie verbaut sind. Es muss entschieden werden, welcher Teil der Umweltbelastung von der primären Materialherstellung dem Leben des Materials im Auto angerechnet werden soll und entsprechend welcher Teil dieser Umweltbelastung von diesem ersten Leben an die folgenden Nutzungen weiter gegeben wird. Gemäss ISO 14'044 soll Allokation wenn immer möglich vollständig durch Systemerweiterung und Substitution des Inputmaterials vermieden werden (siehe Abbildung 2). Andere Allokationsprinzipien (z.B. Physikalische oder ökonomische) sollen nur zur Anwendung kommen wenn die Allokation nicht vermieden werden kann. Althaus & Gauch 2011 sowie Habermacher 2011 haben in einer Sensitivitätsanalyse gezeigt, dass der Umgang mit Allokation bei der EOL-Modellierung einen beträchtlichen Einfluss auf die Resultate haben kann. Es wurde aber auch gezeigt, dass die relativen Resultate zweier unterschiedlicher Fahrzeuge mit beiden Methoden ähnlich aussehen.

Das Beispiel in Abbildung 2 zeigt, wie neben dem Hauptprodukt (Autotüre) zwei Schrottfractionen als Nebenprodukte entstehen. Somit stellt sich die Frage, welcher Teil der Umweltbelastung der Aluminiumproduktion auf das Haupt- und welcher Teil auf die Nebenprodukte alloziert werden soll. Das obere Bild zeigt einen cut-off-Ansatz, wie er in der ecoinvent Datenbank verwendet wird. Die Nebenprodukte, die rezykliert werden, verlassen das System, ohne dass ihnen ein Teil der Umweltlasten der Produktion angelastet würde. Dafür wird auf der Materialinputseite berücksichtigt, dass ein Teil (konkret 10%) des Aluminiums, das auf dem Markt erhältlich ist, aus Schrott rezykliert wurde. Der Schrott, der dafür verwendet wurde, kommt auch ohne jegliche Umweltlasten in den Recyclingprozess hinein. Das untere Bild zeigt den Ansatz der Systemerweiterung und Substitution. Das System wird um den Recyclingprozess erweitert, so dass aus den Nebenprodukten (Schrott) wieder neuwertiges Aluminium hergestellt wird. Dieses Aluminium substituiert dann neues Aluminium, das ohne den Schrott und dessen Recycling aus Erz hätte hergestellt werden müssen. Systemerweiterung wird in ISO 14'040 / 44 als erste Wahl zum Umgang mit Allokationsproblemen empfohlen.

---

<sup>12</sup> [http://www.mbraunusa.com/pdf/MBRAUN-Manufacturing\\_lithium\\_-web.pdf](http://www.mbraunusa.com/pdf/MBRAUN-Manufacturing_lithium_-web.pdf) (6.10.2011)



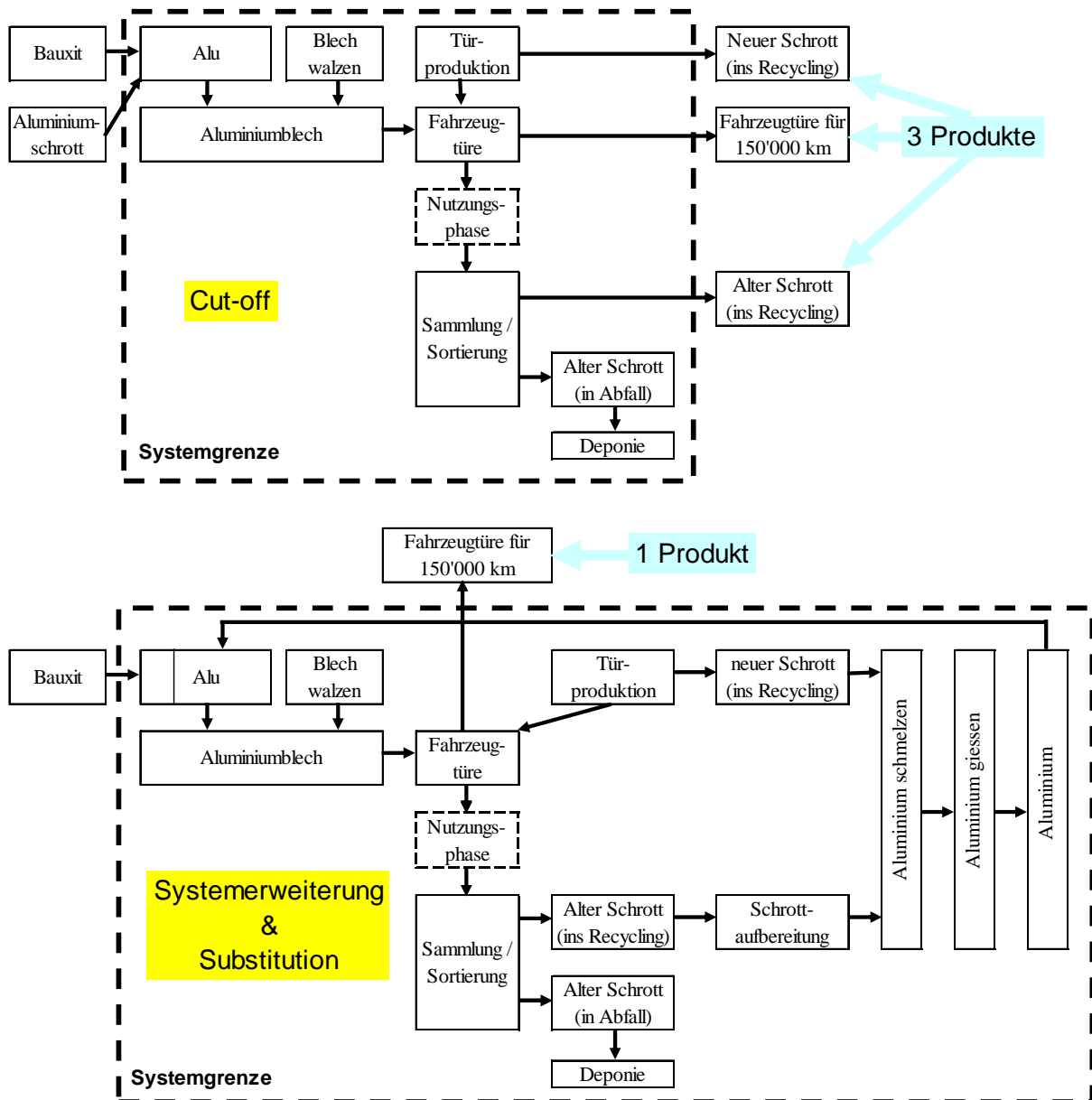


Abbildung 2 Vermeiden von Allokation durch Systemerweiterung und Substitution.

## 2.7 Fazit und Schlussfolgerungen

Die Technologie von Elektrofahrzeugen und deren Komponenten befindet sich in einem raschen Entwicklungsprozess von ersten Testfahrzeugen hin zur breiten Markteinführung. Auch die herkömmlichen, mit Benzin und Diesel betriebenen Fahrzeuge – die als Referenz für jeden Vergleich der Umweltauswirkungen dienen – machen rasche Fortschritte bzgl. Verbrauchs- und Emissionsreduktion. Wie bei herkömmlichen Personenwagen existiert auch bei Elektrofahrzeugen bereits ein breites Spektrum an Modellen: vom 2-plätzigem Leichtbaukonzept über Mittelklassewagen in der Grösse eines VW Golf bis zum Sportwagen Tesla. Dazu kommen noch verschiedene Batterietechnologien, deren grossindustrielle Herstellung noch in den Anfängen steht, sowie ein breites Spektrum an Stromquellen für das Laden der Batterien der Elektrofahrzeuge.

Dementsprechend vielfältig, und teilweise auch widersprüchlich, sind die derzeit veröffentlichten Ökobilanzergebnisse für Elektrofahrzeuge und deren Gebrauch. Folglich sind diese Ergebnisse und die daraus gezogenen Schlussfolgerungen auch immer kritisch zu hinterfragen. Folgende Aspekte sollten bei der Beurteilung von Qualität und Geltungsbereich von Ökobilanzen im Bereich individuellem Personenverkehr in Zusammenhang mit der Elektromobilität in Betracht gezogen werden:

- **Technologiestandard:**

Werden die Umweltauswirkungen verschiedener Fahrzeugtechnologien verglichen, so muss sichergestellt sein, dass sie in etwa dem gleichen Technologiestandard entsprechen. So macht es im allgemeinen keinen Sinn, Elektrofahrzeuge, die gerade auf den Markt gebracht werden oder kurz davor stehen, mit Benzin- oder Dieselaautos zu vergleichen, die nicht die aktuell strengsten Abgasvorschriften (Euro 5) entsprechen. Ebenso wenig macht es Sinn, Zukunftskonzepte mit heute verfügbaren Autos zu vergleichen.

- **Fahrzeugklasse und Nutzungszweck:**

Ebenso sollten stets die Umweltauswirkungen von Fahrzeugen der gleichen Klasse verglichen werden, die für ähnlichen Zwecke eingesetzt werden. Aufgrund der heute beschränkten Reichweite von Elektrofahrzeugen im Vergleich zu Benzin- oder Dieselaautos ist hier die Vergleichbarkeit streng genommen eingeschränkt.

- **Verbrauchsdaten für den Fahrzeugbetrieb:**

Hier gilt es, zwei Aspekte zu berücksichtigen: a) Normverbrauchszyklus vs. Praxisverbrauch; b) Durchschnittsverbrauch einer Fahrzeugklasse vs. Verbrauch von „best-in-class“ Modellen. Da der Treibstoffverbrauch für den Fahrzeugbetrieb in der Praxis erheblich höher ist als der Normverbrauch, müssen Technologievergleiche entweder auf Praxis- oder Normdaten beruhen; vorzuziehen sind Praxisdaten, da der reale Energieverbrauch für verschiedene Technologien in unterschiedlichem Mass von den Normverbrauchsdaten abweichen kann.

- **Batterien von Elektrofahrzeugen – Herstellung und Betriebsverhalten:**

Die Batterien von Elektrofahrzeugen sind, vor allem bei Betrieb mit „sauberem“ Strom, ein wichtiger Teil der Ökobilanzen dieser Autos. Die Herstellung kann – abhängig von den Annahmen und Daten der Bilanzierung – einen erheblichen Teil zu bestimmten Umweltauswirkungen beitragen. „Die“ Lithium-Ionen-Batterie gibt es nicht: Es existieren verschiedene Typen, die sich in der Herstellung und in den Kenndaten wie Energiedichte etc. erheblich unterscheiden können. Auch die angenommene Lebensdauer der Batterie kann die Ökobilanzergebnisse entscheidend beeinflussen.

- **Berücksichtigung von Recycling von Fahrzeugen bzw. Komponenten:**

Die Art und Weise, wie das Recycling bzw. die Entsorgung von Fahrzeugen und Komponenten – insbesondere die Batterien von Elektrofahrzeugen – in einer Ökobilanz berücksichtigt wird, kann grossen Einfluss auf deren Ergebnisse haben. Wird angenommen, dass Teile einer Wiederverwertung zugeführt werden können und entsprechende Gutschriften in der Ökobilanz angerechnet, verbessern sich die Ergebnisse zum Teil (abhängig vom jeweiligen Indikator) erheblich. Wenn eine Ökobilanz Schlussfolgerungen zum Materialressourcenbedarf zieht, muss ein Weg der End-of-Life Modellierung gewählt worden sein, der die Stoffflüsse realistisch abbildet.

- **Stromquelle für Batteriefahrzeuge:**

Die Umweltauswirkungen von Elektrofahrzeugen werden zu einem erheblichen Teil von der Stromquelle, die für das Laden der Batterie verwendet wird, beeinflusst. Ist von „Schweizer Strom“ die Rede, so ist die Unterscheidung zwischen „Produktionsmix“ und „Verbrauchsmix“ (inkl. Importe) wichtig.

- Indikatoren zur Bewertung der Umweltbilanz:

Treibhausgasemissionen und deren Beitrag zur Klimaerwärmung stehen zwar im Fokus der energie- und umweltpolitischen Debatte, sollten aber nicht als einziger Indikator herangezogen werden, wenn die „Umweltfreundlichkeit“ verschiedener Transportmittel beurteilt werden soll. Der Verbrauch an Energie- und Materialressourcen sowie Gesundheits- und Umweltschäden durch Schadstoffemissionen müssen als Mindestanforderung auch betrachtet werden. Kommen Methoden zum Einsatz, welche die gesamten Umweltauswirkungen in einem einzigen Indikator abbilden, sollten die Ergebnisse von mehr als einer Methode dargestellt werden, um Ausgewogenheit zu gewährleisten.

- Transparenz:

Transparenz bzgl. Annahmen, Technologieparametern und Inventardaten ist eine entscheidende Anforderung, um die Qualität von Ökobilanzen generell beurteilen zu können. Die wichtigsten Kenngrößen sollten stets ausgewiesen werden.

In Bezug auf die Ergebnisse der in diesem Bericht verglichenen Ökobilanzen und hinsichtlich der Umweltbilanz der Elektromobilität im Allgemeinen können folgende Punkte festgehalten werden:

- Wenn heute Batterie-Elektrofahrzeuge mit Strom aus CO<sub>2</sub>-armen Quellen betrieben werden, fällt deren Treibhausgasbilanz deutlich besser aus als jene von konventionellen Fahrzeugen, die mit fossilen Treibstoffen betrieben werden. Mit einem durchschnittlichen Strombezug in der Schweiz werden also von Elektrofahrzeugen deutlich weniger Treibhausgasemissionen verursacht.
- Die Umweltbilanz der aktuellen Elektrofahrzeuge insgesamt muss differenzierter betrachtet werden: Bei einigen Umweltindikatoren, die zu Schäden an der menschlichen Gesundheit und Ökosystemen beitragen, schneiden Batteriefahrzeuge auch mit Strom aus sauberen Quellen schlechter ab als energieeffiziente Autos mit Verbrennungsmotoren der neuesten Technologie mit dementsprechend geringen direkten Schadstoffemissionen.
- Die Umweltbilanz verschiedener Verkehrsmittel darf nicht nur aus heutiger Sicht beurteilt werden, wenn es darum geht, umweltfreundliche Fahrzeuge für die nächsten Jahrzehnte zu entwerfen. Sowohl bei Elektro-, wie auch bei fossil betriebenen Fahrzeugen müssen die Technologien weiter in Richtung weniger Umweltbelastung weiterentwickelt werden. Ein wichtiger Aspekt ist dabei eine Gewichtsreduktion, die praktisch immer zu ökologischen Vorteilen führt. Das Entwicklungspotenzial von Batteriefahrzeugen wird als grösser eingeschätzt als jenes von Autos mit Verbrennungsmotor. Gleichzeitig muss allerdings eine umweltfreundliche Stromversorgung gewährleistet bleiben.
- Solche Analysen für zukünftige Fahrzeuge sind heute nur sehr eingeschränkt vorhanden. Das Schweizer Forschungsprojekt „THELMA“<sup>13</sup> wird diese Thematik eingehend untersuchen und die entsprechenden Ergebnisse in den kommenden beiden Jahren veröffentlichen.
- Insgesamt gilt aber auch, dass die Betrachtung von Fahrzeugen alleine nicht ausreicht um eine nachhaltige Mobilität zu erreichen. Dafür müssen die bestehenden Mobilitätsgewohnheiten und -konzepte überdacht werden.

---

<sup>13</sup> <http://www.thelma-emobility.net/>

## Literatur

- Althaus H.J., Gauch M. (2010) Vergleichende Ökobilanz individueller Mobilität: Elektromobilität vs. Konventionelle Mobilität mit Bio- und fossilen Treibstoffen. Empa, Dübendorf, Schweiz.
- Althaus H.J. (2011) Comparative assertion of battery electric cars with various alternatives. Präsentation am 43. Ökobilanz-Diskussionsforum, Zürich, 6. April 2011.
- Bauer C. (2010) Ökobilanz von Lithium-Ionen Batterien Analyse der Herstellung von Energiespeichern für den Einsatz in Batteriefahrzeugen. Eine Studie im Auftrag der Volkswagen AG. Paul Scherrer Institut, Villigen, Schweiz.
- Bauer C. & Simons A. (2010) Ökobilanz der Elektromobilität – Analyse des e-Twingos der EKZ. Paul Scherrer Institut, Villigen, Schweiz.
- Frischknecht R. et al. (2009) Methode der ökologischen Knappheit: Ökofaktoren 2006. Methode für die Wirkungsabschätzung in Ökobilanzen. Umwelt-Wissen Nr. 0906. Bundesamt für Umwelt, Bern: 188 S. Online: <http://www.bafu.admin.ch/publikationen/publikation/01031/index.html?lang=de>.
- Frischknecht R. (2011a) Königsweg oder Sackgasse? Das Elektroauto in der Ökobilanz. Präsentation am 2. Schweizer Forum Elektromobilität, Luzern, 26. Januar 2011.
- Frischknecht R. (2011b) Life Cycle Assessment of Driving Electric Cars and Scope Dependent LCA models. Präsentation am 43. Ökobilanz-Diskussionsforum, Zürich, 6.4.2011.
- Goedkoop M. & Spriensma R. (2000) The Eco-indicator 99. A damage oriented method for Life Cycle Impact Assessment. PRé Consultants, Amersfoort, The Netherlands. Online: [http://simapro.rmit.edu.au/LIT/LCA/EI99\\_METHODODOLOGY\\_V2.PDF](http://simapro.rmit.edu.au/LIT/LCA/EI99_METHODODOLOGY_V2.PDF)
- Habermacher F. (2010) Modeling Material Inventories and environmental Impacts of electric passenger cars. Comparison of LCA results between electric and conventional vehicle scenarios Master Thesis ETH / Empa
- Hischier R. et al. (2007) Life cycle inventories of Electric and Electronic Equipment: Production, Use and Disposal. ecoinvent report No. 18, v2.0. Empa / Technology & Society Lab, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, Switzerland.
- IPCC (2007) Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. Online: [http://www.ipcc.ch/publications\\_and\\_data/publications\\_and\\_data\\_reports.shtml#1](http://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_and_data_reports.shtml#1)
- Ishihara, K. et al. (2002). Environmental Burdens of Large Lithium-Ion Batteries Developed in a Japanese National Project. Electrochemical Society 202nd meeting: C1 - Battery/Energy Technology Joint General Session. Salt Lake City, UT.
- Notter D. et al. (2010) Contribution of Li-Ion Batteries to the Environmental Impact of Electric Vehicles. In: Environ. Sci. Technol. 2010, 44, 6550–6556.
- Simons A. & Bauer C. (2011) LCA comparison of electric drivetrains in passenger cars. Präsentation am 43. Ökobilanz-Diskussionsforum, Zürich, 6. April 2011.
- Spielmann M. et al. (2007) Transport Services. ecoinvent report No. 14, v2.0. Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, Switzerland.
- Zackrisson, M. et al. (2010). "Life cycle assessment of lithium-ion batteries for plug-in hybrid electric vehicles - Critical issues." Journal of Cleaner Production 18(15): 1519-1529.