

PAUL SCHERRER INSTITUT



PSI, Technology Assessment / GaBE

# Ökobilanz der Elektromobilität

Analyse des e-Twingos der EKZ

Eine Studie im Auftrag der Elektrizitätswerke des Kantons Zürich (EKZ)

Autoren: Christian Bauer, Andrew Simons

Labor für Energiesystem-Analysen (LEA)

Email: [christian.bauer@psi.ch](mailto:christian.bauer@psi.ch)

Internet: <http://gabe.web.psi.ch/>

**07. April 2010**



---

# Inhaltsverzeichnis

<b>INHALTSVERZEICHNIS .....</b>	<b>1</b>
<b>VORWORT.....</b>	<b>2</b>
<b>ZUSAMMENFASSUNG .....</b>	<b>2</b>
<b>1 ÖKOBILANZ DES ELEKTRO-TWINGOS (E-TWINGO).....</b>	<b>4</b>
1.1 Allgemeines.....	4
1.2 Bilanzierung des e-Twingos.....	5
1.2.1 Herstellung der Fahrzeugkomponenten: Chassis und Antriebsstrang.....	5
1.2.2 Betrieb des Fahrzeugs.....	6
1.2.3 Stromversorgung.....	7
1.3 Bilanzierung einer Lithium-Ionen Batterie (NCA/C-Batterie).....	8
1.3.1 Aufbau der Batterie.....	8
1.3.2 Spezifizierung für den Einsatz im e-Twingo.....	8
<b>2 KONVENTIONELLES BENZINFahrZEUG .....</b>	<b>10</b>
<b>3 RESULTATE .....</b>	<b>11</b>
3.1 Ökobilanz des e-Twingos im Vergleich zum Benzin-Twingo.....	11
3.1.1 Treibhausgasemissionen.....	11
3.1.2 Primärenergieverbrauch.....	12
3.1.3 Aggregierte Ökobilanz: Eco-Indicator 99.....	13
3.1.4 Aggregierte Ökobilanz: Ökologische Knappheit 2006 (Umweltbelastungspunkte).....	14
3.2 (Vorläufiger) Vergleich verschiedener Batterietypen.....	14
3.2.1 Treibhausgasemissionen.....	15
3.2.2 Primärenergieverbrauch.....	15
3.2.3 Aggregierte Ökobilanz: Eco-Indicator 99.....	16
3.2.4 Aggregierte Ökobilanz: Ökologische Knappheit 2006 (Umweltbelastungspunkte).....	17
<b>4 SCHLUSSFOLGERUNGEN .....</b>	<b>18</b>

---

## Vorwort

Dieser Bericht „Ökobilanz der Elektromobilität“ gibt einen Überblick über den gegenwärtigen Stand des Wissens im Bereich Lebenszyklusanalysen von batteriebetriebenen Elektrofahrzeugen am PSI und ist Teil der Bestellung eines „Positionspapiers mit der Bewertung heutiger Technologien im Bereich von Elektrofahrzeugen“ der EKZ beim PSI.

Hauptinhalt ist die Bilanzierung des e-Twingos, eines Elektrofahrzeugs mit einer Na-NiCl<sub>2</sub> (ZEBRA) Batterie als Energiespeicher, von dem die EKZ eine Kleinflotte von fünf Fahrzeugen besitzt, sowie ein ökologischer Vergleich mit einem herkömmlichen Benzinfahrzeug. Weiter enthält der Bericht eine vorläufige Bilanz von Elektrofahrzeugen mit zwei Typen von Lithium-Ionen Batterien. Die Ökobilanz-Ergebnisse für diese Lithium-Ionen Elektrofahrzeuge sind als vorläufige erste Abschätzung der Umweltauswirkungen dieser Art von Energiespeicher zu verstehen und sollen mögliche grundsätzliche Unterschiede zur ökologischen Bilanz der im e-Twingo eingesetzten Na-NiCl<sub>2</sub> Batterie aufzeigen. Die Arbeit an der Bilanzierung dieser Lithium-Ionen Batterien ist jedoch noch nicht abgeschlossen – die endgültige Bilanz kann in einer aktualisierten Version dieses Berichts nachgereicht werden. Die momentan vorliegenden Ergebnisse sollten nicht für die Öffentlichkeitsarbeit der EKZ oder ähnliche Zwecke genutzt werden. Ausserdem muss beachtet werden, dass lediglich ein einziger Typ von Lithium-Ionen Batterien untersucht wurde. Die Verwendung von alternativen Elektrodenmaterialien könnte zu erheblich anderen Ökobilanz-Ergebnissen führen.

Die vorliegende Dokumentation konzentriert sich auf die überblicksmässige Darstellung der wichtigsten Daten und Annahmen innerhalb der Ökobilanzen und auf die (vorläufigen) Resultate. Ein detaillierter Bericht<sup>1</sup> mit sämtlichen Daten und Quellenangaben zur Bilanzierung des e-Twingos ist in englischer Sprache vorhanden. Eine deutlich tiefer gehende Bilanz verschiedener Typen von Lithium-Ionen Batterien ist gegenwärtig im Rahmen des CCEM/swisselectric-Projekts THELMA<sup>2</sup> in Arbeit.

## Zusammenfassung

Primäres Ziel dieser Studie ist ein ökologischer Vergleich des elektrisch angetriebenen Renault Twingo (e-Twingo), von dem die EKZ einige Exemplare betreiben, mit einem herkömmlichen Twingo mit Benzinmotor. Der e-Twingo ist mit einer so genannten ZEBRA Batterie als Energiespeicher ausgestattet, die wegen ihrer speziellen Eigenschaften wahrscheinlich nicht das System der Wahl für eine breite Anwendung in Personenwagen sein wird. Deswegen ist auch die ökologische Beurteilung von Lithium-Ionen Batterien, welche aus heutiger Sicht am meisten Erfolg in der Elektromobilität versprechen, Teil der Studie.

Mit Hilfe der Ergebnisse dieser Analyse soll die Frage beantwortet werden, ob das Engagement der EKZ im Bereich Elektromobilität aus ökologischer Sicht sinnvoll ist.

Zur Beantwortung dieser Fragestellung wurden vollständige Ökobilanzen des e-Twingos und des herkömmlichen Twingos erstellt sowie eine grobe Abschätzung der Umweltbilanz eines Typs von Lithium-Ionen Batterien vorgenommen. Dabei werden sämtliche Prozesse im Lebenszyklus der Fahrzeuge mit ihren potenziell schädlichen Umweltauswirkungen berücksichtigt: Gewinnung, Aufbereitung und Verteilung der Energieträger (Elektrizität bzw. Benzin), Herstellung, Betrieb und Entsorgung der Fahrzeuge und anderer Infrastruktur sowie alle Prozessketten, die quasi im Hintergrund für Materialproduktion, Transporte, etc. beachtet werden müssen.

---

<sup>1</sup> A. Simons, C. Bauer (2010) Methodology and life cycle inventories of electric vehicles: analysis of a small passenger car using a NaCl+Ni (ZEBRA) battery. Life Cycle Assessment of the e-Twingo. Paul Scherrer Institut, Villigen, Schweiz.

<sup>2</sup> “THELMA” steht für “Technology-centered Electric Mobility Assessment” und ist ein Projekt zur integrierten Nachhaltigkeitsbewertung der elektrischen Mobilität. Es wird unter Leitung des Labors für Energiesystem-Analysen am PSI in Zusammenarbeit mit verschiedenen Gruppen an der ETH und der Empa durchgeführt. Der Projektabschluss ist für 2014 vorgesehen.

---

Die Ergebnisse der vorliegenden Umweltbilanzen zeigen, dass der wichtigste Faktor in der ökologischen Beurteilung der Fahrzeuge der für den Betrieb genutzte Energieträger ist: Stammt der Strom für das „Betanken“ der Batterie aus umweltfreundlichen Quellen, so ist das Elektrofahrzeug aus ökologischer Sicht deutlich besser als das Benzinfahrzeug. Wird die Elektrizität aber von Kohlekraftwerken erzeugt, so fällt die Umweltbilanz des e-Twingos sogar schlechter aus als jene des Benzinfahrzeugs.

Die Bilanz der Lithium-Ionen Batterie hat zwar wegen Mangels an verlässlichen Datenquellen noch provisorischen Charakter, lässt aber den vorläufigen Schluss zu, dass dem Typ der Batterie im Vergleich Elektro- versus Benzinfahrzeug unter den hier angenommenen Rahmenbedingungen keine entscheidende Bedeutung zukommt, da der Beitrag der Batterieherstellung zur Umweltbelastung insgesamt relativ klein ist. Werden jedoch verschiedene Elektrofahrzeuge, die mit Strom aus emissionsarmen Quellen betrieben werden, untereinander verglichen, so kann die Batterietechnologie durchaus der entscheidende Einflussfaktor in den Ökobilanzen sein.

In jedem Fall kann vor dem Hintergrund dieser Studie das Engagement der EKZ im Bereich Elektromobilität aus ökologischer Sicht positiv beurteilt werden. Die unterschiedlichen von den EKZ angebotenen Stromprodukte erlauben den Konsumenten die Wahl des aus ihrer Sicht optimalen Strommix, um ihre Mobilitätsbedürfnisse möglichst umweltfreundlich befriedigen zu können.

# 1 Ökobilanz des Elektro-Twingos (e-Twingo)

## 1.1 Allgemeines

Gegenstand der vorliegenden Ökobilanz ist der e-Twingo der EKZ, welcher mit einer so genannten ZEBRA Batterie (Natriumchlorid-Nickel-Batterie, „Na-NiCl<sub>2</sub>“) ausgestattet ist. Die Batterie stammt aus der Produktion der Firma MES-DEA<sup>3</sup> im Tessin. Zusätzlich wird zu Vergleichszwecken eine Lithium-Ionen Batterie bilanziert, welche ebenfalls als Energiespeicher in einem e-Twingo eingesetzt werden könnte. Solch ein e-Twingo mit Lithium-Ionen Batterie existiert zwar nicht in der Praxis, die Ökobilanz eines solchen Fahrzeugs kann aber dazu dienen, grundsätzliche Unterschiede zwischen elektrisch betriebenen Fahrzeugen mit diesen beiden Batterietypen bezüglich deren Umweltauswirkungen abzuschätzen.

Abbildung 1.1 zeigt die schematische Darstellung der Ökobilanzierung der Elektromobilität.

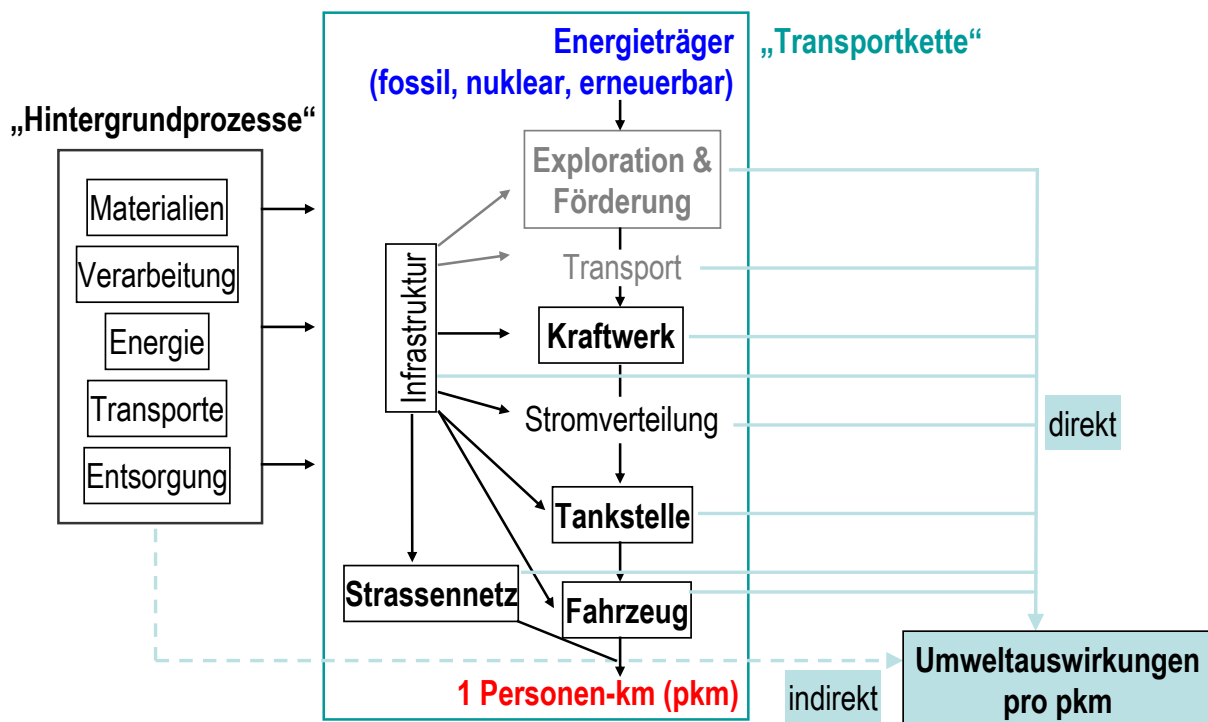


Abbildung 1.1 Schematische Darstellung der Ökobilanzierung des Personentransports mit Benzin- oder Elektrofahrzeugen.

Die Transportkette beinhaltet sämtliche Prozesse, die für die Bereitstellung der Energieträger, die Stromproduktion, die Elektrizitätsverteilung, die Herstellung des Fahrzeugs und der restlichen Infrastruktur erforderlich sind. Beim Betrieb des Fahrzeugs werden der spezifische Energieverbrauch sowie Emissionen aus Reifen- und Bremsabrieb berücksichtigt. Für diese Bilanz werden so genannte „Hintergrundprozesse“ zur Materialherstellung und -verarbeitung, Energiebereitstellung, Entsorgung, etc. nachgefragt. Die Bilanzierung dieser Hintergrundprozesse basiert auf der Ökobilanz-Datenbank ecoinvent (Datenbestand v2.0). All diese Einzelprozesse werden mit Hilfe einer Ökobilanz-Software (SimaPro v7.1.8) verknüpft, wodurch es möglich ist, die kumulierten Umweltauswirkungen für die

<sup>3</sup> MES-DEA wurde an die FZ SONICK S.A. verkauft: Seit 1. Februar 2010 bildet die frühere MES-DEA zusammen mit der FIAMM die neu gegründete FZ Sonick SA. Hauptquartier bleibt Stabio im Tessin, ([http://www.cebi.com/cebi/content/index\\_en.html?a=5&b=35&docID=395](http://www.cebi.com/cebi/content/index_en.html?a=5&b=35&docID=395)).

---

gesamte Prozesskette bezogen auf einen Fahrzeugkilometer (vkm) bzw. Personenkilometer (pkm) zu berechnen.

Hier wird von einer Belegung der Fahrzeuge mit einer Person ausgegangen, d.h. ein vkm entspricht einem pkm. So können die Ergebnisse bei Bedarf einfach an die gewünschte Belegung angepasst werden (der Durchschnitt liegt in der Schweiz insgesamt bei rund 1.6 Passagieren, beim Berufspendelverkehr bei 1.1 Passagieren pro Fahrzeug).

## 1.2 Bilanzierung des e-Twingos

### 1.2.1 Herstellung der Fahrzeugkomponenten: Chassis und Antriebsstrang

Die Bilanzierung des Fahrzeugs besteht aus zwei Teilen:

- das Chassis bzw. die Karosserie
- der Antriebsstrang: Batterie, Elektromotor, etc.

Die Bilanz der Karosserie basiert auf der Ökobilanz eines VW Golf IV (reduziert um die Anteile des herkömmlichen Antriebs mit Verbrennungsmotor), wobei das geringere Fahrzeuggewicht des Twingos zur Skalierung von Material- und Energieverbrauch bei der Herstellung verwendet wurde.

Zentrales Element des Antriebsstrangs eines batteriebetriebenen Elektrofahrzeugs ist die Batterie. Für deren Bilanzierung wurden grossteils öffentlich zugängliche Daten aus der Produktspezifikation des Herstellers MES-DEA verwendet; zusätzlich konnte für den Material- und Energiebedarf zur Herstellung auf detaillierte Herstellerangaben zurückgegriffen werden.<sup>4</sup> Die Hauptbestandteile einer Batteriezelle sind Salz, Nickel und Keramik. Beim Zellengehäuse sind es Chromstahl, Schaumstoffe und diverse Elektronikteile.

In Tabelle 1.1 sind die Schlüsselparameter der Batterie und deren Verwendung im e-Twingo zusammengefasst, Abbildung 1.2 zeigt eine Batteriezelle im Batteriepack mit einem Schema der einzelnen Bestandteile.

**Tabelle 1.1 Wichtigste Parameter der ZEBRA Batterie im e-Twingo.**

Gewicht	182	kg
Energiedichte	119	Wh/kg
Gespeicherte Energie	21.7	kWh
Lebensdauer	>10	Jahre
Zyklenzahl	1'500	Anzahl
Entladungstiefe	80	%
Zyklenwirkungsgrad	78	%
Reichweite	100	km
Spezifischer Energieverbrauch	22.3	kWh/100km

---

<sup>4</sup> Persönliche Informationen durch C. Dustmann, März 2010.

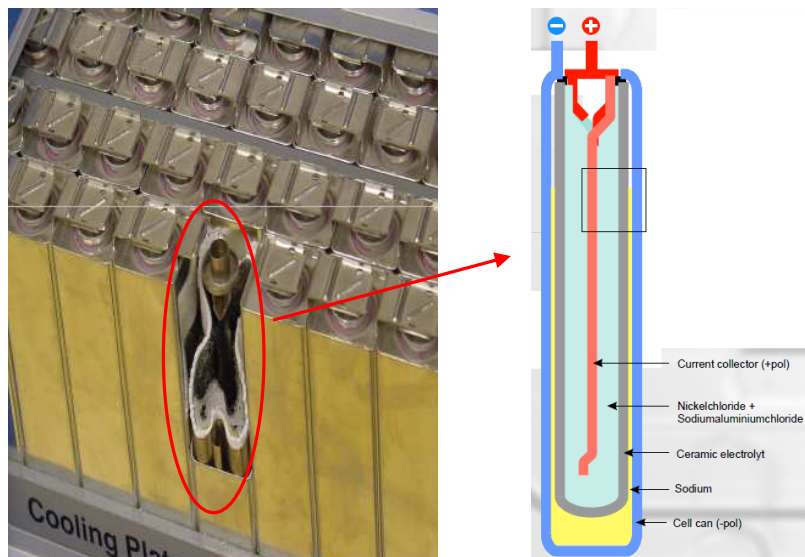


Abbildung 1.2 Batteriezeile der ZEBRA Batterie im Batteriepack.<sup>5</sup>

## 1.2.2 Betrieb des Fahrzeugs

Die Parameter im Fahrzeugbetrieb mit dem grössten Einfluss auf die Ergebnisse der Ökobilanz sind der spezifische Energieverbrauch, die Lebensdauern der Batterie und des Fahrzeugs sowie die Art der Stromquelle.

Für die Bestimmung des spezifischen Energieverbrauchs wurde von einer maximalen Reichweite von 100 km ausgegangen. Diese Annahme resultiert aus Praxiserfahrungen in der täglichen Verwendung der Fahrzeugflotte durch die EKZ und berücksichtigt auch die Energieverluste<sup>6</sup> während der Standzeiten der Fahrzeuge. Würden die Fahrzeuge seltener genutzt, so wären die relativen Selbstentladungsverluste entsprechend grösser und es müsste von einem höheren spezifischen Energieverbrauch ausgegangen werden.

Die problemlos mögliche Zyklenzahl (bei Vollentladung) wird vom Hersteller mit 1'000 bis 2'000 Zyklen angegeben. Die hier getroffene Annahme von 1'500 Zyklen entsprechen bei einer Reichweite von 100 km einer Gesamtfahrdistanz von 150'000 km, was auch der angenommenen Kilometerleistung des Fahrzeugs entspricht. Die hier angenommene Reichweite von 100 km deckt sich auch recht gut mit den Ergebnissen einer Untersuchung von Fahrzeugen mit der ZEBRA Batterie im Praxisbetrieb über einen längeren Zeitraum.<sup>7</sup>

Im Betrieb von Elektrofahrzeugen fallen zwar keine Emissionen aus der Treibstoffverbrennung an, die Emissionen von Partikeln und Schwermetallen aus Reifen- und Bremsabrieb müssen aber berücksichtigt werden. Dies geschieht hier analog zum konventionell angetriebenen Fahrzeug anhand der in der ecoinvent Datenbank verfügbaren Werte.

<sup>5</sup> Vona (2009) ZEBRA battery. 4th International Renewable Energy Storage Conference IRES Berlin 2009.

<sup>6</sup> Die Natrium-Nickelchlorid-Batterie ist eine Hochtemperaturbatterie und wird kontinuierlich in einem Temperaturbereich zwischen 250°C und 300°C gehalten. Dadurch resultieren nach eigener Erfahrung relativ hohe Verluste von bis zu 5% der Speicherkapazität innerhalb von 24 Stunden.

<sup>7</sup> Domeniconi R., Mona N., Dustmann C.H., Manzoni R., Pulfer M. (2005) Mendrisio Operating Results using NiCd and ZEBRA Batteries. Proceedings of EVS-21: 2-6 April, Monaco

### 1.2.3 Stromversorgung

Der Strom für die Ladung der Batterie kann aus verschiedenen Quellen stammen. Für diese Studie wurden jeweils die spezifischen, von der EKZ angebotenen Stromprodukte, der durchschnittliche Schweizer Stromversorgungsmix (inkl. Importe) und als Sensitivitätsanalysen Strom aus Kohle- oder Erdgaskraftwerken bilanziert (Tabelle 1.2 bzw. Abbildung 1.3).

Tabelle 1.2 Anteile der verschiedenen Energieträger am einzelnen Strommix.

	Wasserkraft	Nuklear	Biogas	Solar <sup>a</sup>	Fossil	Andere
<b>CH Verbrauchsmix</b>	35.3%	49.3%	0.1%	0.02%	10.8% <sup>b</sup>	4.5% <sup>c</sup>
<b>EKZ Mixstrom</b>	25.2%	74.7%	0.08%	0.03%		
<b>EKZ Aquastrom</b>	100.0%					
<b>EKZ Naturstrom basic</b>	95.0%		0.5%	4.5%		
<b>EKZ Naturstrom star</b>	80.0%		18.0%	2.0%		
<b>EKZ Naturstrom solar</b>				100%		
<b>Kohle (Steinkohle)<sup>d</sup></b>					100% (Kohle)	
<b>Erdgas (GuD)</b>					100% (Erdgas)	

<sup>a</sup> Photovoltaik, Durchschnitt Schweiz.

<sup>b</sup> Grossteils Import von Strom aus Kohle- und Erdgaskraftwerken.

<sup>c</sup> Grossteils Strom aus Pumpspeicherkraftwerken und Windenergie.

<sup>d</sup> Durchschnittliches Kohlekraftwerk in Deutschland.

Im Schweizer Versorgungsmix sind Importe aus dem benachbarten Ausland, vor allem Deutschland und Frankreich enthalten. Gerechnet wird hier mit Jahresdurchschnittswerten. Elektrizität rein aus Kohle- oder Erdgaskraftwerken ist zwar in dieser Form nicht für den Konsumenten erhältlich, die Verwendung dieser Energieträger soll aber aufzeigen, wie die Umweltauswirkungen der Elektromobilität zu bewerten wären, wenn der Strom aus solchen Quellen stammen würde.

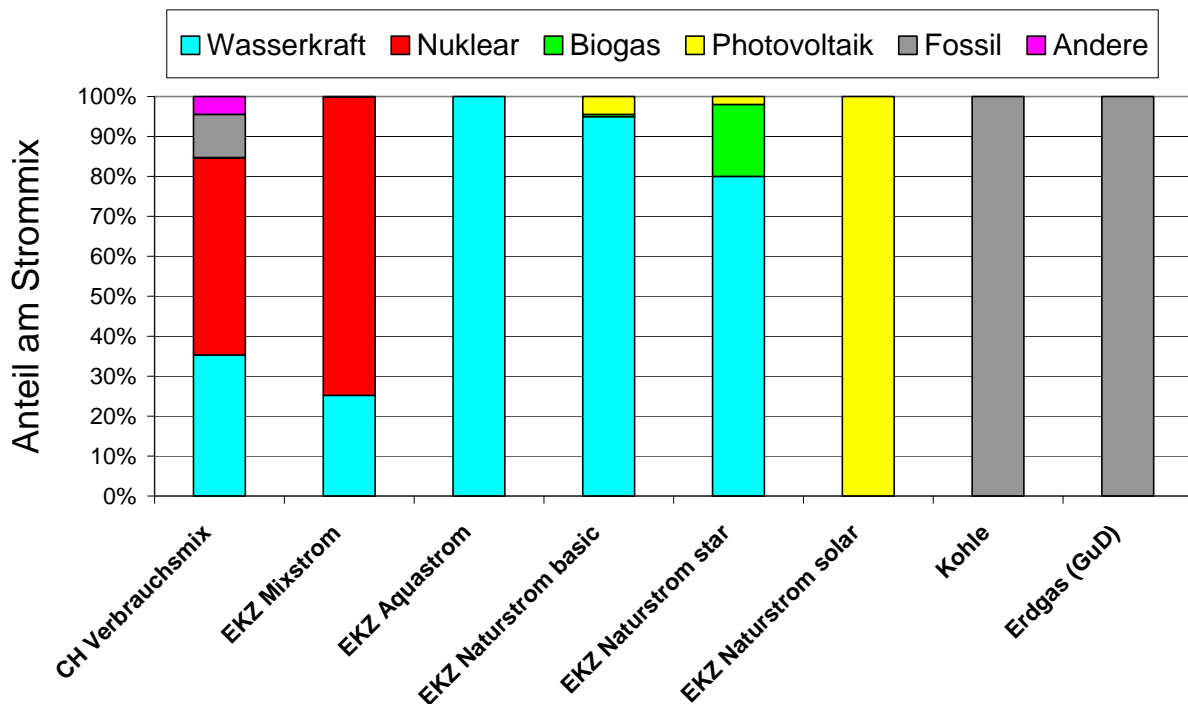


Abbildung 1.3 Anteile der verschiedenen Energieträger am einzelnen Strommix.

### 1.3 Bilanzierung einer Lithium-Ionen Batterie (NCA/C-Batterie)

Hier wird ein spezieller Typ von Lithium-Ionen Batterie für den Einsatz als Energiespeicher in reinen Batterie-Elektrofahrzeugen analysiert, nämlich eine Batterie mit der Elektrodenkombination „Lithium-Nickel-Cobalt-Aluminium“ (Kathode)/„Kohlenstoff“ (Anode), kurz: NCA/C-Batterie. Die Batterie ist für den Einsatz in Batterie-Elektrofahrzeugen als Hochenergiebatterien ausgelegt, d.h. auf eine hohe Energiedichte.

#### 1.3.1 Aufbau der Batterie

Abbildung 1.4 zeigt eine schematische Darstellung des Aufbaus einer elektrochemischen Zelle in Lithium-Ionen Batterien. Die Zelle besteht aus einer Abfolge von solchen Schichten, eingeschweisst in eine Kunststoff-Alu-Verbundfolie. Je nach angestrebtem Energieinhalt der Batterie wird ähnlich wie bei der ZEBRA Batterie (Abbildung 1.2) eine entsprechende Anzahl von Einzelzellen kombiniert und mit einem Batteriemanagementsystem zur Steuerung versehen.

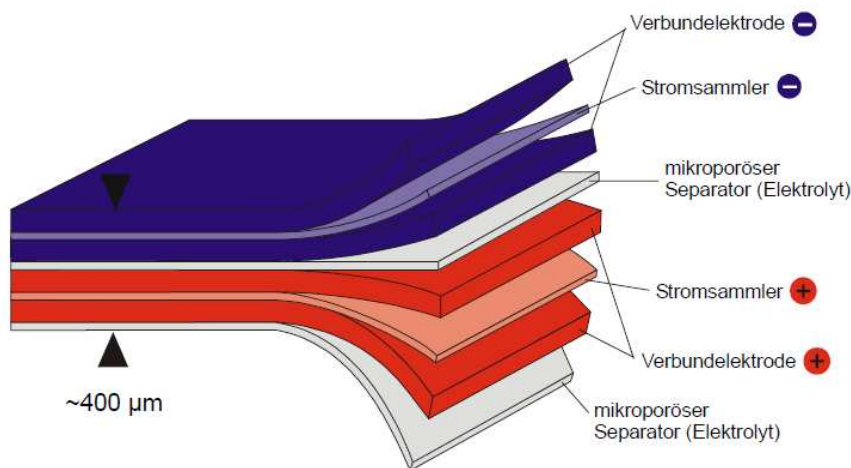


Abbildung 1.4 Schematische Darstellung der bilanzierten elektrochemischen Zellen für die Lithium-Ionen Batterie.

Im Fall der NCA/C-Batterie wird Lithium-Nickel-Cobalt-Aluminium ( $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.15}\text{Al}_{0.05}\text{O}_2$ ) für die positive Elektrode (Kathode) und Graphit für die negative Elektrode (Anode) eingesetzt. Weitere in der Batterie verwendete Materialien sind Aluminium und Kupfer (Stromsammler und -leiter), eine Elektrolytflüssigkeit ( $\text{LiPF}_6$ ), Kunststoff (PE und PP für Separator, Batteriegehäuse). Abhängig von den verwendeten Elektrodenmaterialien und den Charakteristika der Batterie variieren die Schichtdicken der Einzelbestandteile der Zellen.

#### 1.3.2 Spezifizierung für den Einsatz im e-Twingo

Für diesen Vergleich wird die NCA/C-Batterie entsprechend dem real existierenden e-Twingo ebenfalls auf eine Reichweite von 100 km ausgelegt. Der Energieverbrauch wird mit 20 kWh/100 km angenommen. In Tabelle 1.3 sind die Schlüsselparameter der bilanzierten LiIonen Batterie für den Einsatz im e-Twingo zusammengefasst.

Wie beim Twingo mit der ZEBRA Batterie wird angenommen, dass die Batterie während des Fahrzeug-Lebenszyklus von 150'000 km nicht ersetzt werden muss.

---

**Tabelle 1.3 Schlüsselparameter der NCA/C-Batterie für den Einsatz im e-Twingo.**

Gewicht	205	Kg
Energiedichte	132	Wh/kg
Gespeicherte Energie	25.3	kWh
Lebensdauer	>10	Jahre
Zyklenzahl	1'500	Anzahl
Entladungstiefe	75	%
Zyklenwirkungsgrad	95	%
Reichweite	100	km
Spezifischer Energieverbrauch	20	kWh/100km

Die hier dokumentierte Bilanzierung des Lithium-Ionen Batteriefahrzeugs ist noch nicht abgeschlossen, da derzeit für einige Parameter noch nicht genügend belastbare Datenquellen vorhanden sind. Das betrifft einerseits einige Angaben bzgl. Herstellung der Batterie (etwa für den Energieaufwand), andererseits das angenommene Verhalten der Batterie im Fahrzeugbetrieb (etwa die Entladungstiefe, den spezifischen Energieverbrauch und die Lebensdauer).

Die Ökobilanzergebnisse für das Lithium-Ionen Batteriefahrzeug in Kapitel 3.2 sind daher als vorläufige Resultate zu verstehen und nicht für die Öffentlichkeitsarbeit oder ähnliche Zwecke zu verwenden. Diese Ergebnisse können aber als erste Abschätzung angesehen werden, inwieweit sich unterschiedliche Batterietypen in Elektrofahrzeugen auf die Ökobilanz des Personentransports auswirken können.

## 2 Konventionelles Benzinfahrzeug

Die Ökobilanz des konventionellen benzinbetriebenen Twingos unterscheidet sich methodisch nicht von jener des Elektrofahrzeugs. Sämtliche Prozesse in der Transportkette und dazu die „Hintergrundprozesse“ werden berücksichtigt. Unterschiedlich ist lediglich die Versorgung mit dem Energieträger für den Fahrzeugbetrieb: Rohölförderung, -verarbeitung und -transport ersetzen die Stromerzeugung und -verteilung bzw. die Tankstelle ersetzt die Steckdose (Abbildung 2.1).

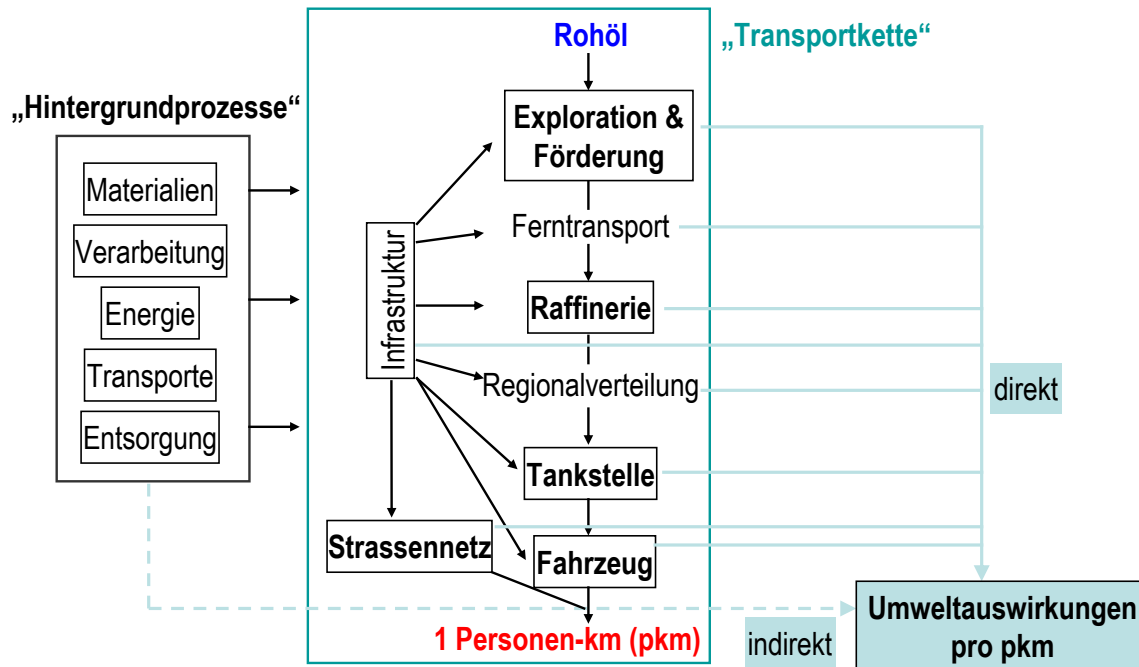


Abbildung 2.1 Schematische Darstellung der Ökobilanzierung des Personentransports mit Benzin- oder Dieselfahrzeugen.

Die Bilanzierung des konventionellen Benzinfahrzeugs basiert auf der vorhandenen Ökobilanz des Personentransports mit einem Auto in der Golfklasse in der ecoinvent Datenbank, welche in den entscheidenden Punkten an den Twingo angepasst wurde:

- Material- und Energieverbrauch für die Herstellung der Karosserie und des Antriebs wurden mit der Masse des Twingos im Verhältnis zum Golf nach unten skaliert
- Für den spezifischen Benzinverbrauch wird von 8 Litern auf 100 km ausgegangen; das entspricht den offiziellen Herstellerangaben für den Stadtverkehr.

Der Verbrauchswert für den Stadtverkehr wurde angenommen, um einen fairen Vergleich zwischen Benzin- und Elektrofahrzeug zu gewährleisten. Das Elektrofahrzeug wird aufgrund der beschränkten Reichweite vornehmlich im Stadt- und Agglomerationsverkehr eingesetzt. Auch der herkömmliche Twingo wird heute grossteils für diesen Zweck und nicht für den Reiseverkehr über lange Strecken verwendet.

### 3 Resultate

Die Resultate der Ökobilanzen werden pro Personenkilometer (entspricht hier einem Fahrzeugkilometer mit 1 Passagier) angegeben. Als Indikatoren werden die gesamten Treibhausgasemissionen, der Primärenergieverbrauch sowie die beiden vollaggregierten Ökobilanzbewertungsmethoden<sup>8</sup> „Eco-Indicator 99“ und „Ökologische Knappheit 2006 (Umweltbelastungspunkte)“ ausgewählt.

#### 3.1 Ökobilanz des e-Twingos im Vergleich zum Benzin-Twingo

Verglichen werden hier der e-Twingo („Elektrisch“), versorgt mit verschiedenen Stromquellen, und der herkömmliche benzinbetriebene Twingo („ICE“, Internal Combustion Engine).

##### 3.1.1 Treibhausgasemissionen

Abbildung 3.1 zeigt die gesamten Treibhausgasemissionen (hauptsächlich CO<sub>2</sub>, dazu CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O und andere Spurengase) in CO<sub>2</sub>-Äquivalenten pro Personenkilometer mit den Beiträgen aus den vier Bereichen „Karosserie“, „Antrieb“ (Motor, Batterie, Getriebe), „Betrieb“ und „Wartung, Entsorgung, Strassen“.

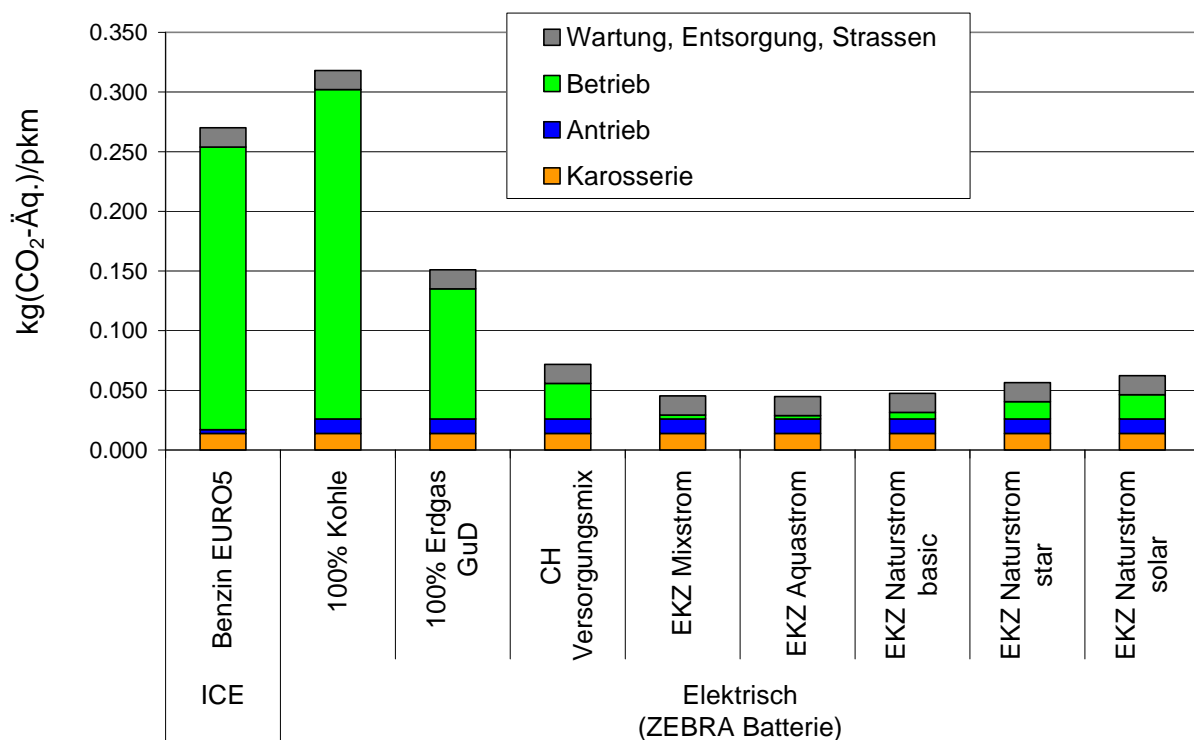


Abbildung 3.1 Treibhausgasemissionen pro Personenkilometer.

Wird CO<sub>2</sub>-armer Strom aus Kern- oder Wasserkraftwerken bzw. neuen erneuerbaren Energieträgern für den Betrieb des Elektrofahrzeugs genutzt, so werden pro Personenkilometer deutlich weniger Treibhausgase verursacht als beim Benzinfahrzeug, bei dem der Fahrzeugbetrieb den grössten Anteil

<sup>8</sup> Bewertungsmethoden, die sämtliche Umweltbelastungen wie beispielsweise Schäden an Ökosystemen und der menschlichen Gesundheit sowie Ressourcenverbrauch gewichten und in einer einzigen Masszahl zusammenfassen, werden hier als „vollaggregiert“ bezeichnet. Je höher die Masszahl, desto grösser ist die Umweltbelastung insgesamt. Die Ergebnisse können sich bei der Bewertung mit verschiedenen Bewertungsmethoden wegen unterschiedlichen methodischen Ansätzen erheblich unterscheiden.

an den Gesamtemissionen aufweist. Stammt der Strom hingegen aus durchschnittlich effizienten Kohlekraftwerken, so übersteigen die Gesamtemissionen des Elektrofahrzeugs sogar jene des Benzinfahrzeugs. Die Treibhausgasemissionen aus der Herstellung der Batterie haben beim Elektrofahrzeug keinen dominierenden Anteil am Gesamtergebnis, was aus dem Vergleich der Beiträge aus dem Teil „Antrieb“ des Benzin- und Elektrofahrzeug hervorgeht.

### 3.1.2 Primärenergieverbrauch

Abbildung 3.2 zeigt den kumulierten Primärenergieverbrauch pro Personenkilometer, d.h. den Energieinhalt, der in den verbrauchten Energieträgern enthalten ist. Bei der Interpretation muss unterschieden werden zwischen dem Verbrauch an nicht erneuerbaren Energieträgern (fossile Energieträger Erdöl, Erdgas und Kohle; Uran) sowie erneuerbaren Energieträgern (Biomasse, Sonnen- und Windenergie, Wasserkraft). Biomasse und Wasserkraft stehen allerdings auch nicht unbegrenzt zur Verfügung: Bei Biomasse ist das nutzbare Potenzial in der Schweiz noch nicht ausgeschöpft; bei Wasserkraft ist zumindest in der Schweiz kaum mehr Ausbaupotenzial verfügbar.

Das Benzinfahrzeug schneidet hier knapp am schlechtesten ab, allerdings mit deutlich weniger Abstand zu den Elektrooptionen als bei den Treibhausgasemissionen. Strommische mit einem hohen Anteil an Kernenergie sind bzgl. Primärenergieverbrauch nicht sehr effizient, da der Kraftwerkswirkungsgrad vergleichsweise niedrig ist. Die nicht vernachlässigbaren Anteile an fossiler Energie in den Ergebnissen der Elektrofahrzeuge stammen grossteils aus der Fahrzeugproduktion und Strasseninfrastruktur.

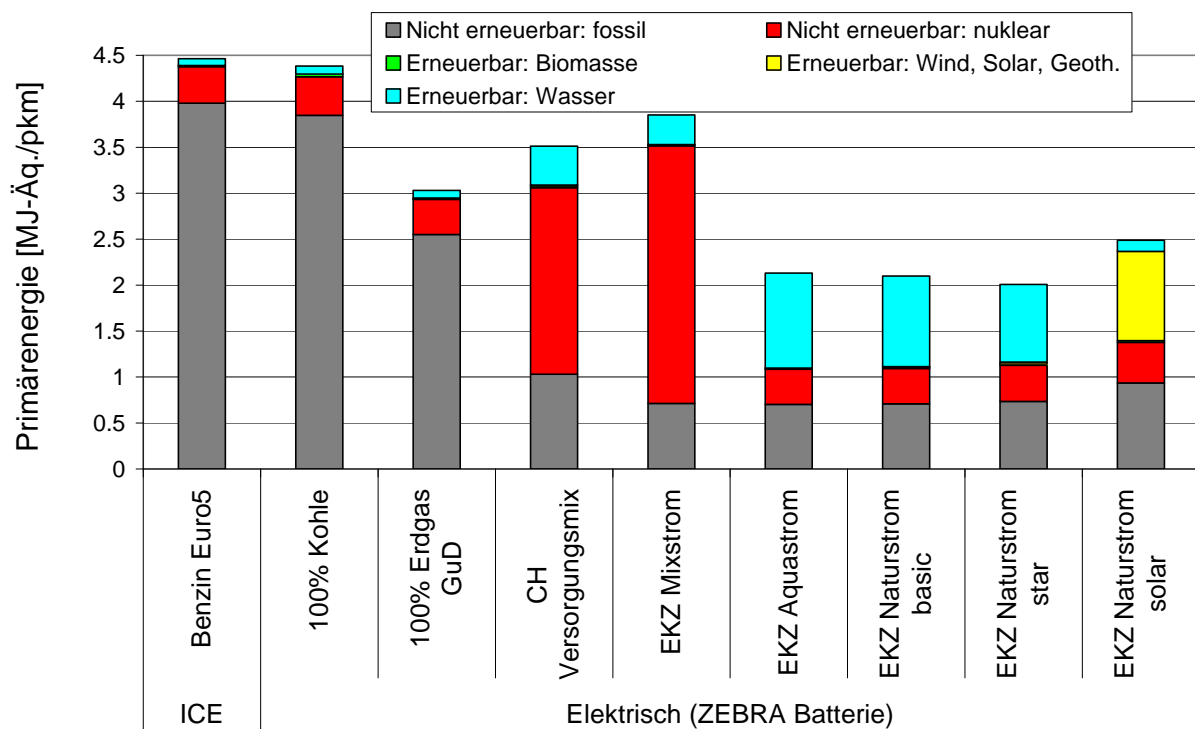


Abbildung 3.2 Primärenergieverbrauch pro Personenkilometer.

### 3.1.3 Aggregierte Ökobilanz: Eco-Indicator 99

Für die Zusammenfassung (Aggregation) der gesamten Umweltbelastungen, die ein Personenkilometer verursacht, können so genannte „Life Cycle Impact Assessment“ (LCIA)-Methoden verwendet werden. Die Methode „Eco-Indicator 99“<sup>9</sup> ist ein international häufig genutztes Beispiel dafür, es existieren einige weitere. Diese Methoden berücksichtigen üblicherweise sämtliche Emissionen sowie Land- und Ressourcenverbrauch anhand der (potenziellen) Schadenswirkung am Menschen und an Ökosystemen. Schadstoffemissionen und andere potenziell umweltschädliche Auswirkungen werden in verschiedenen so genannten „Schadenskategorien“ (z.B. „climate change“, „fossil fuels“, etc.) erfasst, welche wiederum spezifisch gewichtet werden. Je höher das Ergebnis (meist in Punkten), desto höher auch die Umweltbelastung. Verschiedene Methoden liefern jedoch wegen unterschiedlichen Wirkungsmodellen und Gewichtungsfaktoren unterschiedliche Resultate.

Der Vergleich in Abbildung 3.3 bringt wiederum für das Benzinfahrzeug das schlechteste Ergebnis, das vom Erdölverbrauch dominiert wird. Da Erdgas eine knappere Ressource ist als Kohle, schneidet das Elektrofahrzeug mit Strom aus Erdgaskraftwerken schlechter ab als jenes mit Strom aus Kohlekraftwerken. Die Schadstoffemissionen von Kohlekraftwerken sind jedoch deutlich höher als jene von Erdgas-GuD-Kraftwerken, was in einigen der übrigen Schadenskategorien sichtbar ist. Luftschadstoffemissionen des Verbrennungsmotors spielen eine vergleichsweise geringe Rolle, da ein Benzinmotor mit EURO5 Abgasnorm recht sauber betrieben wird.

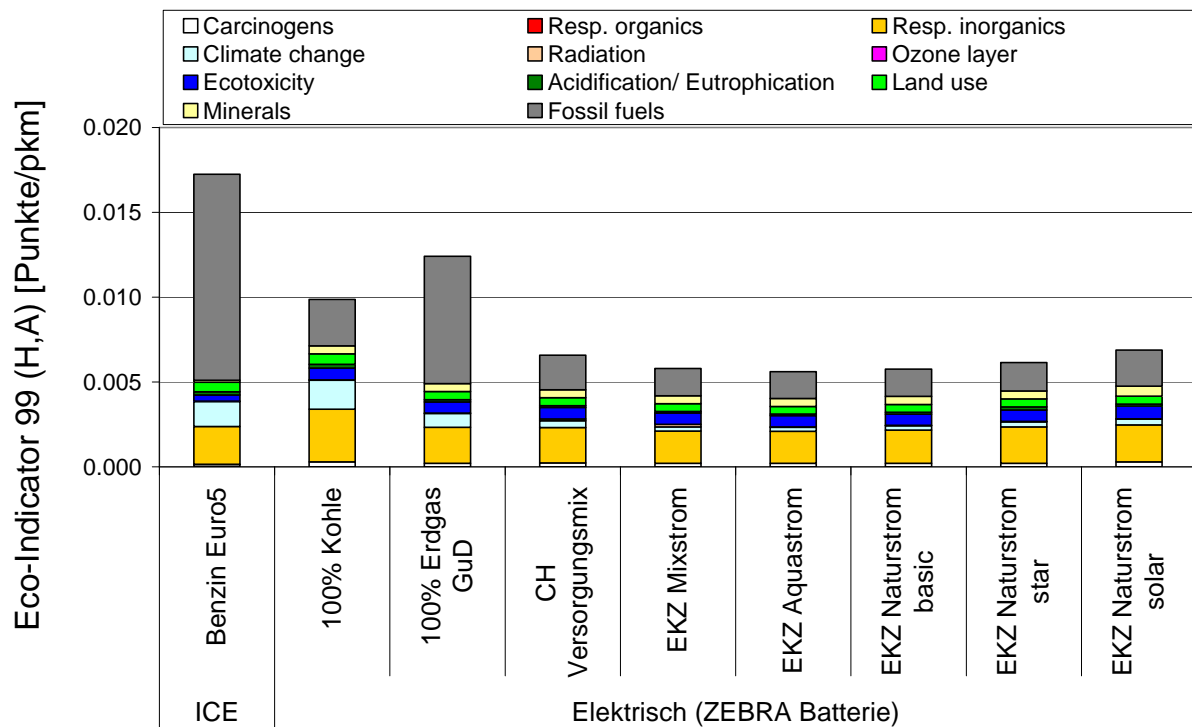


Abbildung 3.3 Relativer Vergleich der gesamten Umweltbelastung mit Eco-Indicator 99 (H, A).

<sup>9</sup> Goedkoop M., Spriensma R. (2001) The eco-indicator 99; A damage orientated method for life cycle impact assessment: Methodology Report. Third edition. PRé Consultants B.V, Amersfoort.

### 3.1.4 Aggregierte Ökobilanz: Ökologische Knappheit 2006 (Umweltbelastungspunkte)

Die Bewertungsmethoder der Ökologischen Knappheit<sup>10</sup> ist auf die Schweiz zugeschnitten und beruht grossteils auf gesetzlichen Bestimmungen im Umweltbereich. Im Vergleich zur Methode Eco-Indicator 99 fällt die vergleichsweise geringe Gewichtung des Verbrauchs an Energieressourcen auf sowie das hohe Gewicht der Entsorgung von Abfällen, insbesondere der radioaktiven. Letzteres ist auch der Hauptgrund für das vergleichsweise schlechtere Abschneiden der Elektrofahrzeuge, die mit einem hohen Anteil an Kernenergie versorgt werden.

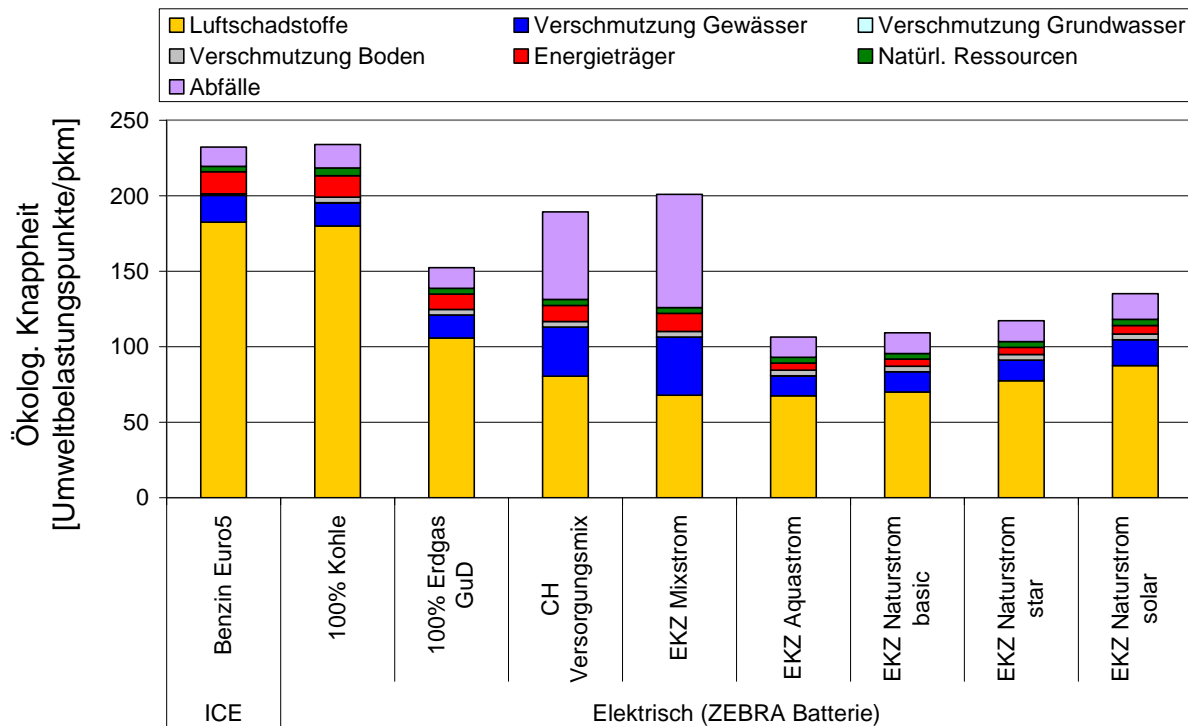


Abbildung 3.4 Bewertung der Umweltbelastung mit „Ökologischer Knappheit“ [Umweltbelastungspunkte pro Personenkilometer].

### 3.2 (Vorläufiger) Vergleich verschiedener Batterietypen

Im Folgenden werden die Ergebnisse des e-Twingos mit ZEBRA Batterie mit jenen eines hypothetischen e-Twingos mit Lithium-Ionen Batterie (siehe Kap. 1.3) verglichen. Damit soll die Sensitivität der kumulierten Umweltbelastung des Personentransports in Elektrofahrzeugen bzgl. des verwendeten Batterietyps abgeschätzt werden. Dabei muss beachtet werden, dass die Bilanz des e-Twingos mit ZEBRA Batterie wegen der nennenswerten Energieverluste während der Standzeiten sehr sensitiv hinsichtlich angenommenem „Gebrauchsmuster“ ist. Wird das Fahrzeug während mehrerer Tage nicht benutzt, führt die Selbstentladung der Batterie zu einem erhöhten Energieverbrauch pro gefahrenem Kilometer.

Die Bilanzierung der Lithium-Ionen Batterie ist momentan noch nicht ausreichend mit verlässlichen Daten abgesichert und die Ergebnisse deswegen mit entsprechend grosser Unsicherheit behaftet. Folglich sind die Resultate als provisorisch zu anzusehen. Ausserdem muss beachtet werden, dass

<sup>10</sup> Frischknecht R., Steiner R., Jungbluth N. (2009) Methode der ökologischen Knappheit – Ökofaktoren 2006. Methode für die Wirkungsabschätzung in Ökobilanzen. Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern.

lediglich ein einziger Typ von Lithium-Ionen Batterien bilanziert wurde. Daraus sollten keine Schlussfolgerungen für Lithium-Ionen Batterien im Allgemeinen getroffen werden. Alternative Elektrodenmaterialien und die sich ergebenden unterschiedlichen Charakteristika der Batterie könnten zu erheblich anderen Ökobilanzergebnissen führen.

### 3.2.1 Treibhausgasemissionen

Die grösseren Beiträge des aus dem Teil „Antrieb“ beim Fahrzeug mit der Lithium-Ionen Batterie zeigen, dass die Herstellung der Lithium-Ionen Batterie treibhausgasintensiver ist als die Produktion der ZEBRA Batterie. Mit der Lithium-Ionen Batterie ist der spezifische Energieverbrauch etwa geringer, dadurch sinken die Beiträge aus dem „Betrieb“. Damit werden aber nur bei einer treibhausgasintensiven Stromversorgung (d.h. hier 100% Kohle) die höheren Emissionen aus der Batterieherstellung kompensiert.

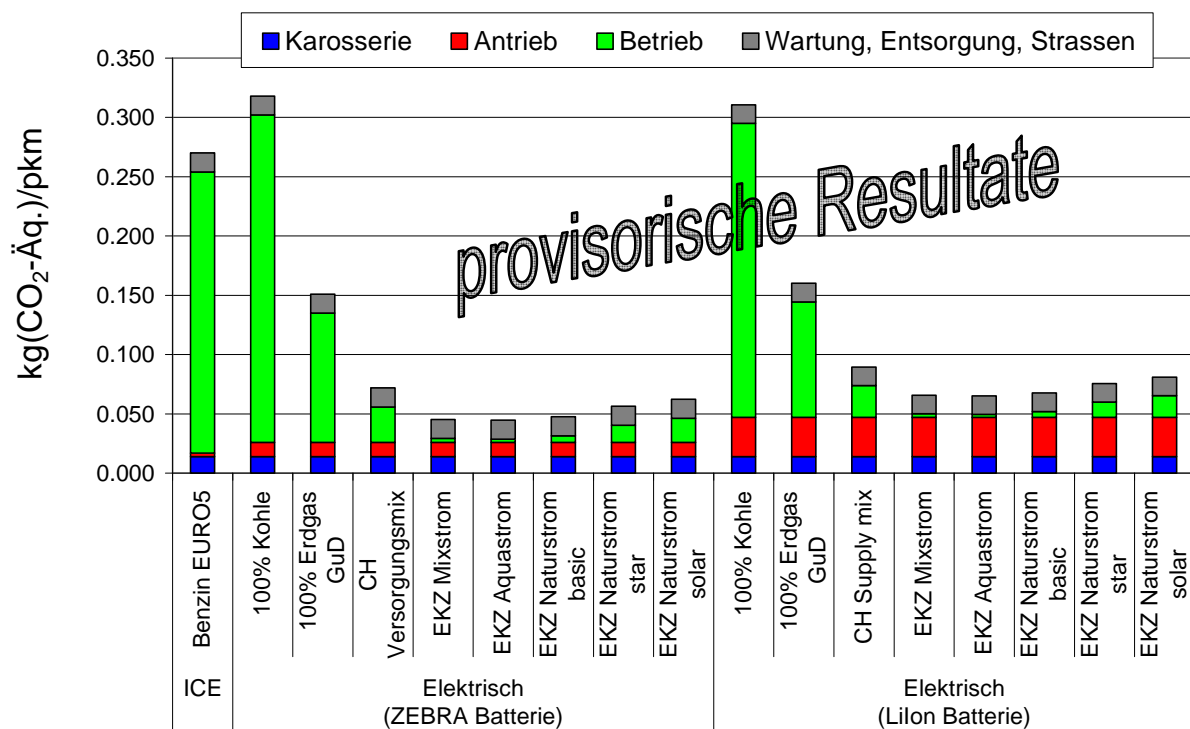


Abbildung 3.5 Treibhausgasemissionen pro Personenkilometer.

### 3.2.2 Primärenergieverbrauch

Die Unterschiede zwischen den beiden Batterietypen sind beim Primärenergieverbrauch relativ klein. Vor allem der Verbrauch fossiler Energieträger ist durch die höhere Energieintensität der Herstellung der Lithium-Ionen Batterie grösser als bei der ZEBRA Batterie. Der über den Strombedarf für den Fahrzeugbetrieb verursachte Energieverbrauch ist bei der Lithium-Ionen Batterie etwas geringer.

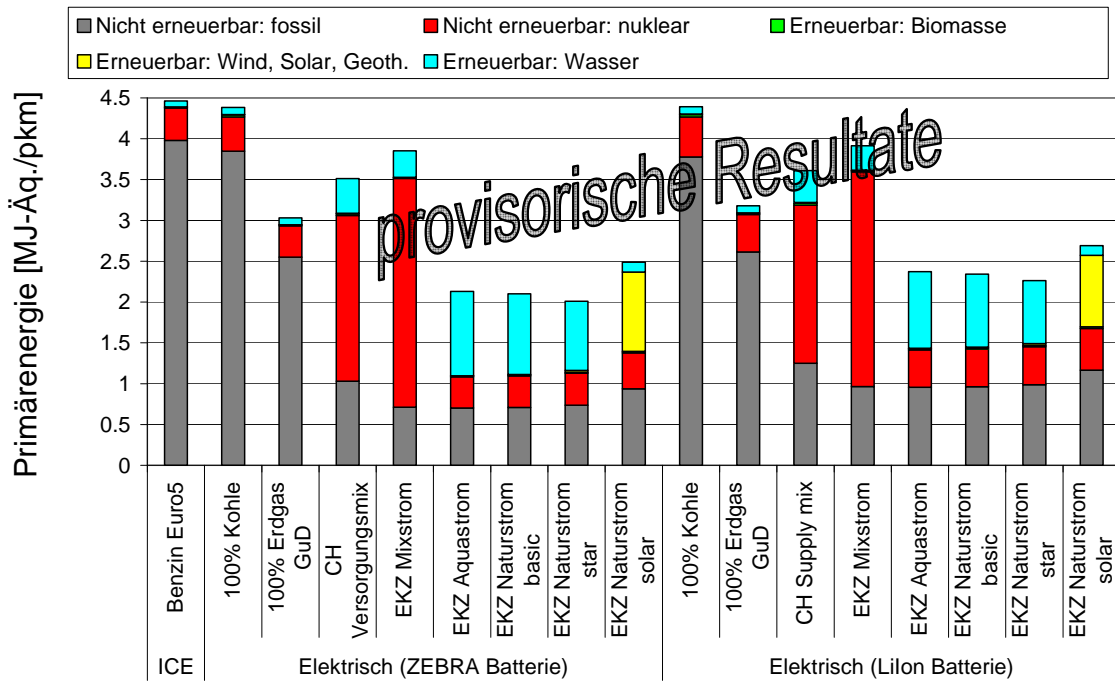


Abbildung 3.6 Primärenergieverbrauch pro Personenkilometer.

### 3.2.3 Aggregierte Ökobilanz: Eco-Indicator 99

Auch bei der Bewertung der gesamten Umweltbelastung schneidet die Lithium-Ionen Batterie wegen der aufwändigeren Produktion der Batterie etwas schlechter ab, was durch den geringeren Stromverbrauch im Fahrzeugbetrieb nicht vollständig kompensiert werden kann.

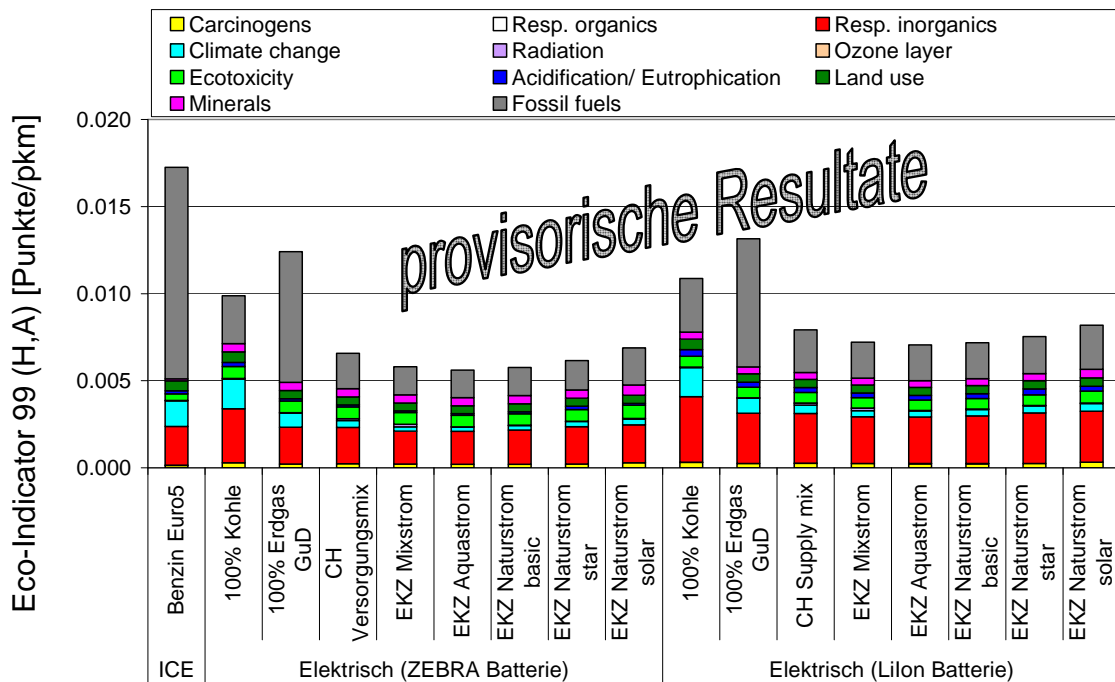


Abbildung 3.7 Bewertung der Umweltbelastung mit „Eco Indicator 99(H,A)“ [Punkte pro Personenkilometer].

### 3.2.4 Aggregierte Ökobilanz: Ökologische Knappheit 2006 (Umweltbelastungspunkte)

Auch bei dieser Bewertungsmethode sind die Ergebnisse der beiden Batterietypen recht ähnlich. Wiederum ist die Umweltbelastung des Fahrzeugs mit der Lithium-Ionen Batterie wegen der aufwändigeren Produktion der Batterie etwas höher. Der geringere Stromverbrauch im Fahrzeugbetrieb kann dies nicht vollständig kompensieren.

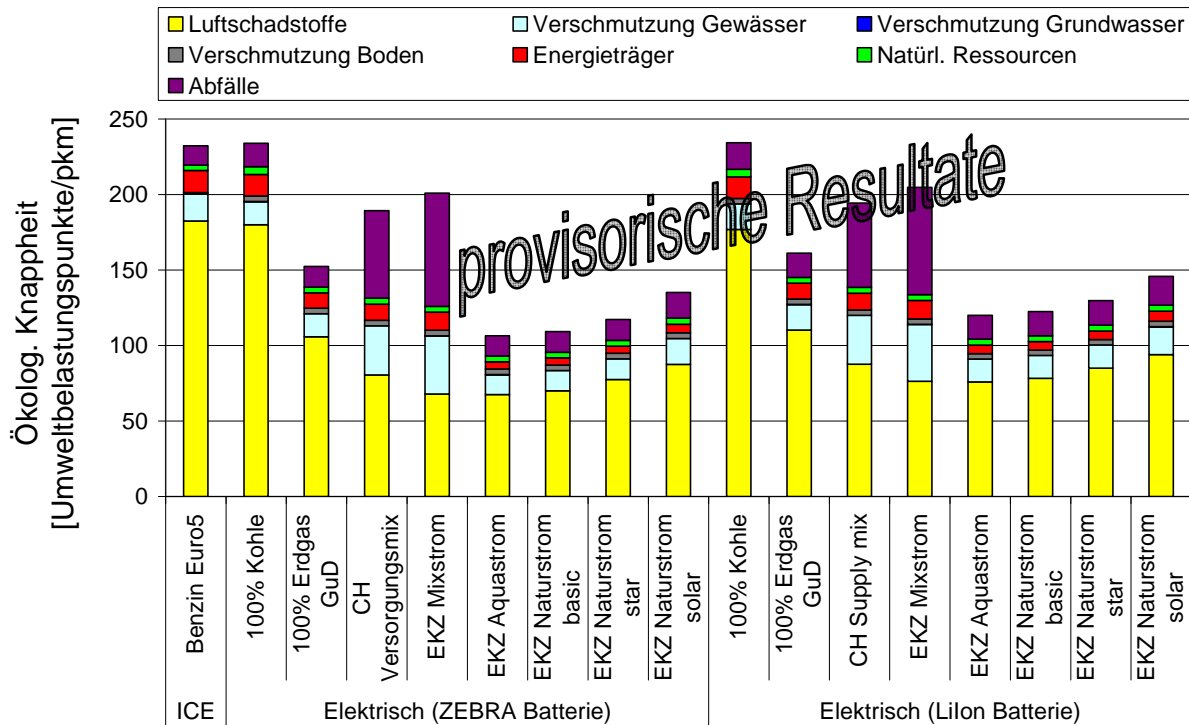


Abbildung 3.8 Bewertung der Umweltbelastung mit „Ökologischer Knappheit“ [Umweltbelastungspunkte pro Personenkilometer].

---

## 4 Schlussfolgerungen

In der vorliegenden Studie wurden die Ökobilanzen von heute am Markt erhältlichen Personenwagen mit Benzinmotor und elektrischem Antrieb (mit Batterien als Energiespeicher) verglichen. Die Fahrzeuge können in die Kompaktklasse eingeordnet werden und sind für den Einsatz im Stadt- und Agglomerationsverkehr vorgesehen. Die Ergebnisse der Vergleiche lassen folgende Schlussfolgerungen zu:

- Sofern der Strom für das „Betanken“ der Elektrofahrzeuge aus umweltfreundlichen Elektrizitätsquellen stammt, ist die Ökobilanz der Elektromobilität positiv, d.h. die schädlichen Umweltauswirkungen sind im Vergleich zu einem heutigen Benzinfahrzeug geringer. Stammt der Strom jedoch aus wenig umweltfreundlichen Quellen wie z.B. Kohlekraftwerken, kann die Ökobilanz eines vergleichbaren Benzinfahrzeugs besser ausfallen als jene des Elektrofahrzeugs.
- Welche Stromquellen als umweltfreundlich angesehen werden können, hängt von den Indikatoren für die Bewertung ab: Fossile Energieträger wie Kohle und Erdgas zur Stromerzeugung schneiden in jedem Fall schlecht ab; Kernenergie ist zwar schadstoffarm, weist aber teilweise bzgl. Energieeffizienz und radioaktiven Abfällen Nachteile gegenüber fossilen und vor allem erneuerbaren Energieträgern auf. Elektrizität aus Wasserkraftwerken und Fotovoltaikanlagen schneidet im Vergleich bei sämtlichen Indikatoren positiv ab.
- Daraus folgt, dass aus ökologischer Sicht das Engagement der EKZ im Bereich Elektromobilität mit dem Betrieb der e-Twingos in jedem Fall positiv zu bewerten ist. Mit den verschiedenen angebotenen EKZ-Stromprodukten steht den Konsumenten eine breite Auswahl an Strommischen zur Verfügung, mit denen Elektrofahrzeuge umweltfreundlich betrieben werden können. Gleichzeitig können Konsumenten durch die Wahl eines bestimmten Produkts ihren Präferenzen im Hinblick auf eine ökologische Elektrizitätsversorgung entsprechen.
- Für eine Aussage, welche Art von Batterien als Energiespeicher für Elektrofahrzeuge die beste Umweltbilanz aufweist, sind die vorliegenden Ergebnisse für Lithium-Ionen Batterien derzeit noch nicht robust genug. Es wurde auch lediglich eine einzige von vielen möglichen Lithium-Ionen Technologien untersucht. Die Resultate lassen jedoch vermuten, dass unterschiedliche Batterien nur dann entscheidenden Einfluss auf die Gesamtbilanz haben, wenn der Strom für das „Betanken“ der Elektrofahrzeuge aus sehr umweltfreundlichen Elektrizitätsquellen stammt.
- Somit sollte der genutzte Primärenergieträger Haupteinflussfaktor in der Ökobilanz des Personentransports mit heutigen Fahrzeugen sein.

Nicht geeignet ist die vorliegende Studie für die Bewertung der Umweltbilanz zukünftiger Personenfahrzeuge: Sowohl bei fossil betriebenen Personenwagen, wie auch bei Elektrofahrzeugen mit Batterien als Energiespeicher sind in den nächsten Jahren gegenüber den hier bilanzierten Technologien deutliche Verbesserungen in der Energieeffizienz und beim Schadstoffausstoß sowie bei den Produktionsprozessen zu erwarten. Zu beachten gilt es auch, dass in einer umfassenden Bewertung der Elektromobilität nicht nur die Option Batterie als Energiespeicher berücksichtigt werden muss, sondern auch Brennstoffzellenfahrzeuge, die mit Wasserstoff betrieben werden können.