



## Alternative Antriebe – Umweltschutz und Klimanutzen

**Alternative Antriebe leisten einen Beitrag zum Klimaschutz. Wie umweltfreundlich sie darüber hinaus in der Ökobilanz sind, zeigt eine Studie für verschiedene Antriebsformen und Verkehrsmittel im Auftrag von Stadt und Kanton.**

Thomas Stoiber, Verantwortlicher Verkehr  
Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft  
Telefon 043 259 43 55  
thomas.stoiber@bd.zh.ch  
www.zh.ch/luft-strahlung → Luftschadstoffquellen → Verkehr

Peter Hofmann  
Umwelt- und Gesundheitsschutz Stadt Zürich  
Telefon 044 412 28 50  
peter.hofmann@zuerich.ch  
www.stadt-zuerich.ch/ugz

→ Artikel «Sind alternative Antriebe klimafreundlicher?», ZUP 97

Welcher Antrieb ist am vorteilhaftesten für die Umwelt?  
Es macht einen Unterschied, ob man die Frage lokal oder global betrachtet.  
Quelle: PRINT\_FCC\_24625645967\_9a03842ece\_0

In der letzten Ausgabe der Zürcher Umweltpraxis wurde gezeigt, dass batterieelektrische Fahrzeuge heute im Personen- und Nutzfahrzeugbereich über den gesamten Lebenszyklus deutlich weniger Treibhausgase ausstossen als fossil angetriebene Fahrzeuge (Artikel «Sind alternative Antriebe klimafreundlicher?», ZUP 97). In der Ökobilanz wurden alle relevanten Prozesse berücksichtigt: Erstellung und Unterhalt der Strasseninfrastruktur, Herstellung und Entsorgung der Fahrzeuge (Antrieb, Karosserie, Energiespeicher wie Batterie oder Tank), Wartung, Herstellung von Strom und Treibstoff und schliesslich direkte Emissionen aus dem Fahrbetrieb.

Wie sieht dieselbe Bilanz aus, wenn neben der Auswirkung auf das Klima weitere Umweltindikatoren berücksichtigt werden, wie zum Beispiel Luftschadstoffe, Lärm oder Flächenverbrauch? Und wie schneiden mit Strom oder Wasserstoff angetriebene Personenwagen im Vergleich zu anderen Verkehrsmitteln ab? Dieser Artikel beleuchtet die Umweltwirkungen verschiedener Antriebsformen für unterschiedliche Fahrzeugtypen heute und in Zukunft.

### Treibhausgase: Klarer Vorteil der Elektrofahrzeuge auch in Zukunft

Bezüglich Treibhausgasemissionen weisen batterieelektrisch und mit Wasserstoff (Brennstoffzelle) betriebene Fahrzeuge gegenüber konventionellen Verbrennungsmotoren einen klaren Vorteil auf (ZUP 97). Obwohl in Zukunft gemäss Prognosen diesel- und benzinbetriebene

Fahrzeuge wegen zunehmender Hybridisierung weniger Kraftstoff verbrauchen sollen, bleiben Elektrofahrzeuge weiterhin im Vorteil. Dies gilt besonders dann, wenn der Strom für den Betrieb und für die weiteren Prozesse vollständig aus fossilfreien Quellen stammt.

### Luftschadstoffe: Die Fahrzeugherstellung ist relevant

Für Luftschadstoffe ist der Vorteil der alternativen Antriebe im gesamten Lebenszyklus hingegen nicht gegeben. Die Abbildung «Feinstaubbilanz Personenwagen» Seite 8 zeigt, dass batterieelektrische Fahrzeuge hier keine Vorteile aufweisen. Zwar entstehen im Betrieb keine motorischen Emissionen, und die Zurrückgewinnung von Bremsenergie lässt beim Bremsen weniger Abriebpartikel entstehen als bei herkömmlichen Antrieben. Dagegen zeigen sie aber keinen Unterschied beim Abrieb von Pneu und Strassenbelägen, und bei der Batterieproduktion fallen grosse Mengen an Feinstaub an. Dies liegt an einigen emissionsintensiven Prozessen wie Materialaufbereitung, Strom- und Wärmeversorgung. Aufgrund technologischer Verbesserungen wird angenommen, dass die Batterien von Personenwagen in Zukunft leichter werden und dadurch die PM10-Emissionen aus der Produktion verringert werden.

Somit werden bei batteriebetriebenen Fahrzeugen die Emissionen aus dem Betrieb in die Vorketten der Fahrzeugherstellung verlagert und fallen am jeweiligen Produktionsstandort an. Die Schwere der

Auswirkungen ist abhängig von der Bevölkerungsdichte in der Umgebung der Fabriken und kann nicht generell beurteilt werden. Grundsätzlich besteht hier Potenzial zur Verbesserung der Produktionsprozesse, was jedoch nicht in der Bilanz berücksichtigt ist. Ein ähnliches Bild zeigt sich auch für die Emissionen von Stickoxiden (NO<sub>x</sub>).

Wenn jedoch der Antrieb von Fahrzeugen massgebliche Zusatzaufgaben erledigt (reinigen, pumpen etc.), verbessert sich die Bilanz der Luftschadstoffe von batteriebetriebenen Fahrzeugen gegenüber Verbrennern deutlich. Dies ist zum Beispiel für Strassenkehrmaschinen von kommunalen Werkhöfen von Bedeutung.

### Energieverbrauch: Niedrige Effizienz von Wasserstoff

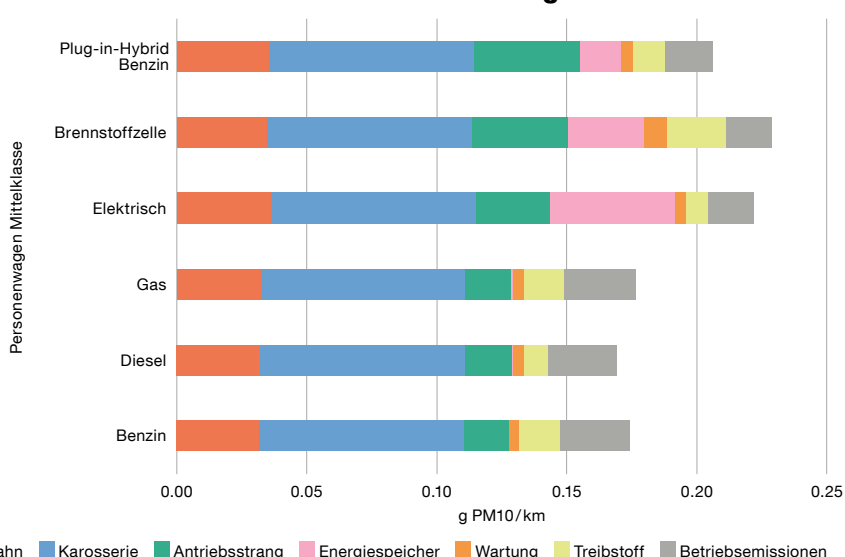
Der Energieverbrauch – sowohl aus fossilen wie aus fossilfreien Quellen – ist ein wichtiger Indikator, um die gesamte Effizienz eines Antriebssystems beurteilen zu können. Alle Fahrzeugtypen zeigen ein ähnliches Muster, dieses gilt heute wie auch in Zukunft: Batteriebetriebene Fahrzeuge verbrauchen im Betrieb weniger Energie als mit Benzin und Diesel betriebene Fahrzeuge. Der Grund liegt im deutlich höheren Wirkungsgrad des Elektromotors.

Die mit Wasserstoff betriebenen Brennstoffzellenfahrzeuge weisen bei Weitem den höchsten Energieverbrauch auf, da die Herstellung von Wasserstoff sehr energieaufwendig ist. Unter bestimmten Umständen kann dies jedoch in Kauf genommen werden, und zwar dann, wenn hohe Reichweiten mit schweren Nutzfahrzeugen erforderlich sind und wenn der Wasserstoff aus Überschussstrom aus fossilfreien Quellen hergestellt ist. Dann eignet sich Wasserstoff als Speichermedium, um während des ganzen Jahrs über Energie aus fossilfreien Quellen zu verfügen.

### Rohstoffe: Batterien binden Ressourcen

Beim Rohstoff- und Wasserverbrauch zeigt sich ebenfalls bei beinahe allen Fahrzeugarten heute sowie künftig ein ähnliches Bild. Bei batterieelektrischen Fahrzeugen bindet die Produktion der Batterien Ressourcen. Das Recycling der Metalle ist in der Bilanz allerdings nur ansatzweise abgebildet. Hier sind jedoch für die Zukunft deutliche Verbesserungen prognostiziert.

Feinstaubbilanz Personenwagen Mittelklasse 2020



Alternative Antriebe bieten bezüglich Luftschadstoffen über den gesamten Lebenszyklus betrachtet keinen Vorteil. Ihr Betrieb verursacht zwar keine motorischen Emissionen, es entsteht aber weiterhin Abrieb. Und bei der Batterieproduktion fallen grosse Mengen Feinstaub an.

Quelle: INFRAS, PSI, Quantis (2020): Umweltauswirkungen von Fahrzeugen im urbanen Kontext.

Auch bei der Treibstoffherstellung gibt es Unterschiede. Mit Solaranlagen hergestellter Strom oder Wasserstoff nimmt leicht mehr Ressourcen in Anspruch. Der Grund liegt in der Produktion der Photovoltaikmodule.

Im Personenwagensegment gibt es einige Besonderheiten: Es wird prognostiziert,

dass Batterien leichter werden, sodass im Energiespeicher (Batterie) gebundene Ressourcen eingespart werden können. Diskussionswürdig sind auch Plug-in-Hybridfahrzeuge: Ihr doppelter Antriebsstrang führt zu einer deutlich erhöhten Inanspruchnahme von Rohstoffen und Wasser bei der Produktion.

### ZMU: Für den Kanton Zürich angepasste Ökobilanzierung

Um verschiedene Umweltindikatoren miteinander zu vergleichen, braucht es Aggregationsmethoden. Dabei werden die Auswirkungen für jeden Umweltindikator zunächst separat beurteilt. Um gesellschaftliche Wertmassstäbe zu berücksichtigen, werden die verschiedenen Schäden normiert, relativ zueinander gewichtet und so in ein Punktesystem überführt. Speziell für die Studie wurde der Zürich-Mobilitäts-Umwelt-Index (ZMU) entwickelt, um die spezifische Situation im Kanton Zürich abzubilden. Im Gegensatz zu anderen Verfahren werden dabei auch Lärm und Flächenbedarf berücksichtigt.

#### Lokale und globale Variante

Um die Stabilität der Ergebnisse zu überprüfen und mögliche unterschiedliche Wertmassstäbe in der Gesellschaft zu berücksichtigen, wurde der ZMU in

zwei verschiedenen Perspektiven angewendet.

Bei der Perspektive «lokal» haben die in Stadt und Kanton lokal relevanten Umweltindikatoren Luftverschmutzung, Lärm, Natur/Ökosystem und Raumbedarf ein besonderes Gewicht.

Bei der Perspektive «global» geht es um die weltweit relevanten Auswirkungen mit einer stärkeren Gewichtung der Umweltbereiche Treibhausgase, Natur-/Ökosystem sowie Rohstoff-, Energie- und Wasserverbrauch.

Die Ergebnisse der Variante «global» entsprechen weitgehend denjenigen nach der Methode ReCiPe. Hierbei handelt es sich um einen globalen Standard für die Gewichtung von Umweltindikatoren in Ökobilanzen. Die einzelnen Indikatoren werden zu drei Schutzbereichen aggregiert: Menschliche Gesundheit, Natur/Ökosysteme und Ressourcen.

### Umweltwirkungen insgesamt

Um die Umweltwirkungen der Antriebsarten gesamthaft zu beurteilen, wurden alle untersuchten Indikatoren aggregiert und im sogenannten Zürich-Mobilitäts-Umwelt-Index (ZMU) dargestellt (Methodenbeschreibung siehe Zusatzinfo Seite 8). Die Abbildung «Ökobilanz Personenwagen» rechts zeigt die Bilanz für einen Mittelklasse-Personenwagen für unterschiedliche Antriebsformen für die Perspektiven «ZMU lokal» und «ZMU global». Für den Bedarf an Elektrizität wurde bei Personenwagen und Velos der Zürcher Strommix im Jahr 2020 angenommen. Beim Treibstoff Gas ist ein Biogasanteil von 23 Prozent eingerechnet.

Unter diesen Annahmen zeigt sich, dass das batteriebetriebene Elektrofahrzeug bei der lokalen Perspektive geringfügig umweltfreundlicher ist als das Brennstoffzellenfahrzeug. Bei der globalen Perspektive hingegen führen die in der Batterie gebundenen Rohstoffe dazu, dass das Brennstoffzellenfahrzeug heute gesamthaft am besten abschneidet. Voraussetzung ist aber, dass Strom aus erneuerbaren Quellen für die Produktion von Wasserstoff verwendet wird. In Zukunft wird sich dieses Ergebnis jedoch wieder relativieren, da für Batterien künftig eine Abnahme des Rohstoffverbrauchs prognostiziert ist.

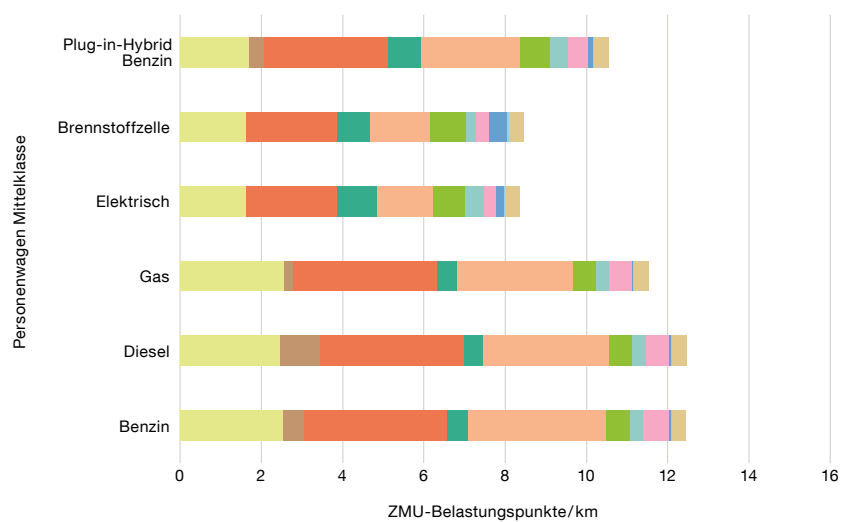
Aufgrund geringerer Treibhausgasemissionen haben Plug-in-Hybrid-Fahrzeuge lokal einen Vorteil gegenüber Benzin- und Dieselfahrzeugen, bei der globalen Variante hingegen ziehen sie aufgrund höheren Rohstoffverbrauchs mit diesen gleich.

### Lastwagen und Motorräder

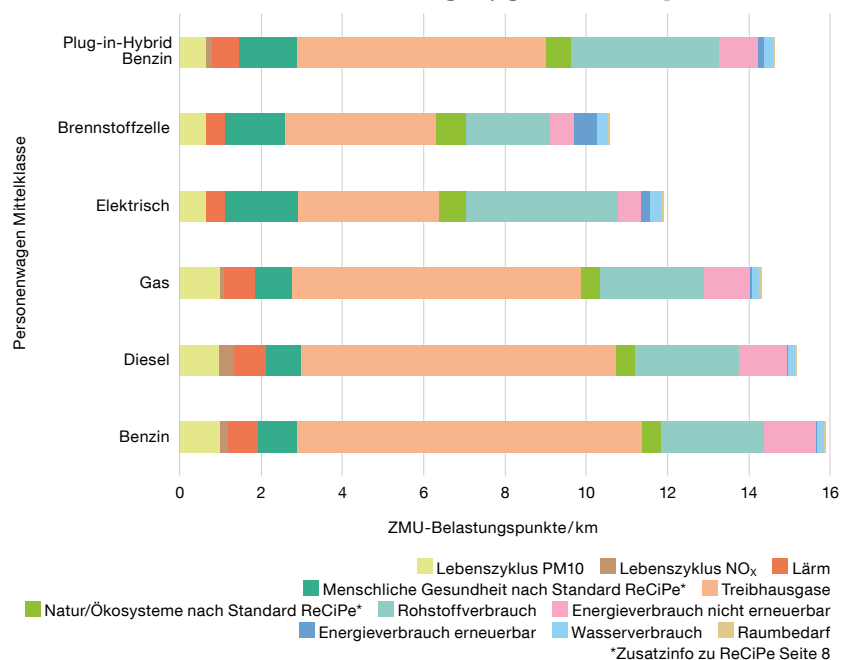
Eine ähnliche Rangfolge wie für Mittelklasse-Personenwagen zeigt sich auch für andere Fahrzeuggrößen. Wegen höheren Rohstoffverbrauchs durch grössere Batterien wird bei grossen Personenwagen oder bei grösseren Lastwagen (18t, 32t) der Brennstoffzellenantrieb zunehmend konkurrenzfähig, besonders wenn in Zukunft die vollständige Umstellung auf fossilsfreie Energie gelingt. Bereits heute beträgt der Abstand zu dieselbetriebenen Lastwagen etwa 20 Belastungspunkte (Variante global).

Im Motorradbereich verfügen die mit Benzin angetriebenen Fahrzeuge über einen sehr schlechten Wirkungsgrad und erzeugen hohe Lärmemissionen. Daher schneiden Elektromotorräder deutlich besser ab als herkömmliche Motorräder mit Benzinmotoren.

### Ökobilanz Personenwagen, lokale Perspektive 2020



### Ökobilanz Personenwagen, globale Perspektive 2020



■ Lebenszyklus PM10 ■ Lebenszyklus NO<sub>x</sub> ■ Lärm  
■ Menschliche Gesundheit nach Standard ReCiPe\* ■ Treibhausgase  
■ Natur/Ökosysteme nach Standard ReCiPe\* ■ Rohstoffverbrauch ■ Energieverbrauch nicht erneuerbar  
■ Energieverbrauch erneuerbar ■ Wasserverbrauch ■ Raumbedarf  
 \*Zusatzinfo zu ReCiPe Seite 8

Welches Verkehrsmittel und welcher Antrieb ist am vorteilhaftesten für Umwelt und Klima? Es macht einen Unterschied, ob man die Frage mit einer lokalen oder globalen Gewichtung betrachtet. Beispiel Personenwagen Mittelklasse 2020 nach dem Zürich-Mobilitäts-Umwelt-Index (ZMU).

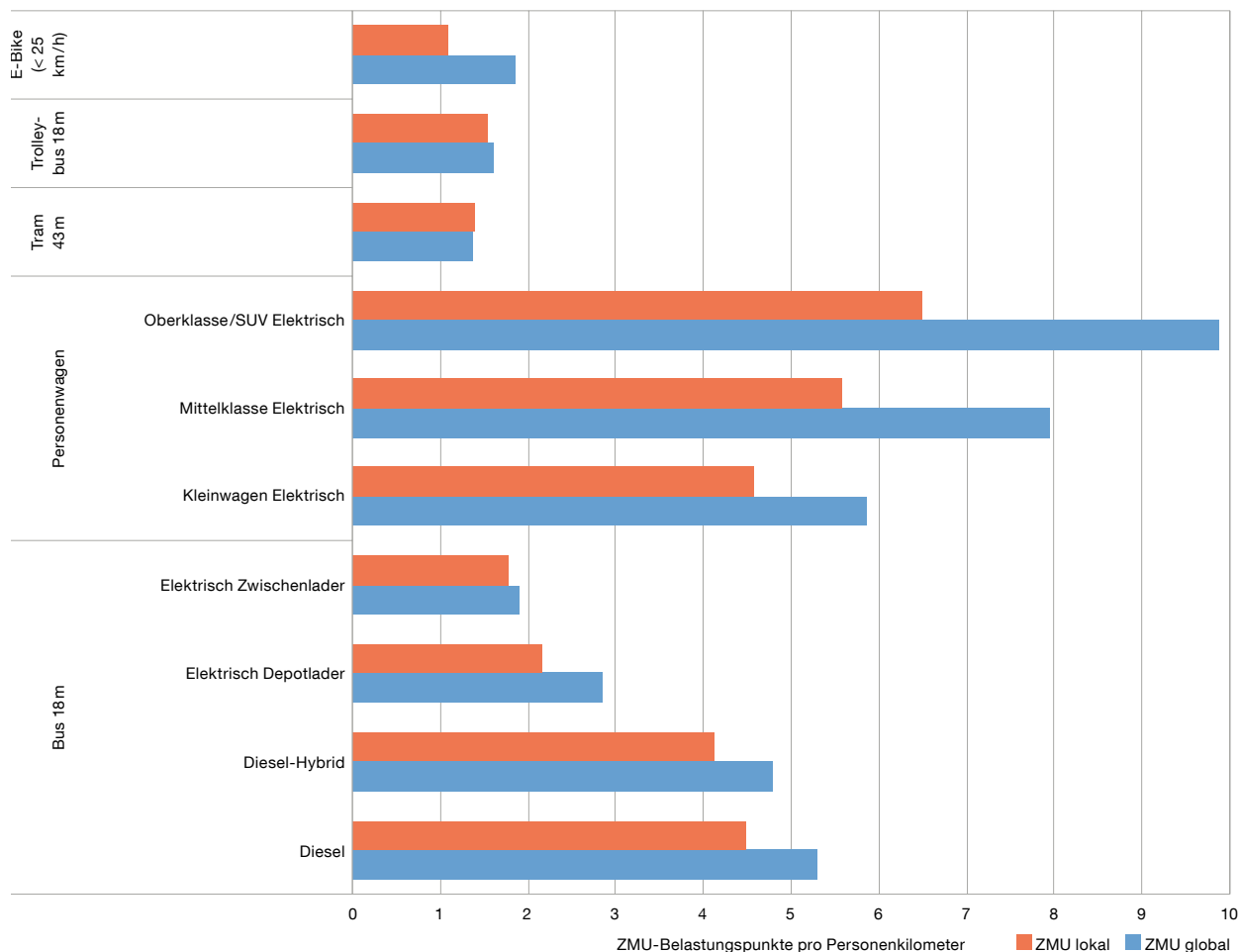
Quelle: INFRAS, PSI, Quantis (2020): Umweltauswirkungen von Fahrzeugen im urbanen Kontext.

### Besetzungsgrad und Auslastung bestimmen, was umweltfreundlich ist

Die Abbildung «Ökobilanz verschiedener Verkehrsmittel» Seite 10 zeigt die Umweltauswirkungen der verschiedenen gängigen Verkehrsmittel und wichtigsten batterieelektrisch betriebenen Fahrzeugtypen. Beim öffentlichen Verkehr (ÖV) wurde für Trams, Trolleybusse und Batteriebusse der Strommix der VBZ 2020 angenommen.

Um eine Vergleichbarkeit auf Basis von Personenkilometern zu ermöglichen, musste zunächst der durchschnittliche Besetzungsgrad ermittelt werden. Für Personenwagen wird von einem Besetzungsgrad von 1.5 Personen pro Fahrzeug ausgegangen, entsprechend Auswertungen aus dem Mikrozensus 2015 – einer Schweizer Mobilitäts-erhebung – für den Kanton Zürich. Für den öffentlichen Verkehr wurden die Fahrgaststatistiken der VBZ und des ZVV herangezogen und hieraus die durchschnittlichen Belegungen der verschiedenen Fahrzeugtypen ermittelt.

## Ökobilanz verschiedener Verkehrsmittel 2020, lokale und globale Perspektive



Alle Fahrzeuge des öffentlichen Verkehrs schneiden in der Gesamtbilanz pro Personenkilometer deutlich besser ab als der am günstigsten bewertete Personenwagen (Kleinwagen). E-Bikes und elektrisch betriebene Motorräder sind deutlich umweltfreundlicher als Personenwagen. Angaben nach dem Zürich-Mobilitäts-Umwelt-Index (ZMU).

Quelle: INFRAS, PSI, Quantis (2020): Umweltauswirkungen von Fahrzeugen im urbanen Kontext

### Der öffentliche Verkehr bleibt am umweltfreundlichsten

Es zeigt sich, dass alle elektrisch betriebenen Fahrzeuge des öffentlichen Verkehrs sowohl in Bezug auf Treibhausgase, Luftschadstoffe und in der Gesamtbilanz nach ZMU pro Personenkilometer deutlich besser abschneiden, als der am günstigsten bewertete Personenwagen (Elektro-Kleinwagen). Selbst Dieselhybridbusse oder ausschliesslich dieselbetriebene Busse schneiden gesamtökologisch leicht besser ab als ein Elektro-Kleinwagen. In Bezug auf das Gesamtsystem ÖV erbringen dieselbetriebene Busse im ZVV derzeit nur rund 13 Prozent der gesamten Verkehrsleistung des öffentlichen Verkehrs im Kanton Zürich. Beim ÖV erweisen sich die Trams und Trolleybusse gegenüber den mit Batterien betriebenen Bussen als vorteilhafter. Im Bussegment bestehen Unterschiede aufgrund der Ladestrategie. Fahrzeuge, die ausschliesslich im Busdepot geladen werden, benötigen grössere

Batterien als solche, die auch an End- oder Zwischenhaltestellen aufgeladen werden.

E-Bikes und elektrisch betriebene Motorräder sind deutlich umweltfreundlicher als Personenwagen. Jedoch fällt auch bei diesen Fahrzeugen die Batterie ins Gewicht, sodass sie gegenüber dem oberleitungsbetriebenen ÖV keine Vorteile aufweisen.

### Klimanutzen der alternativen Antriebe überwiegt

Alle Fahrzeuge haben Umweltauswirkungen, egal ob sie elektrisch oder konventionell angetrieben werden – das wird auch in Zukunft so sein. Bei fast allen Fahrzeugtypen entfalten alternative Antriebe ihren grössten Nutzen bei den Treibhausgasemissionen. Die anderen Umweltbereiche werden in der Summe nicht verschlechtert. Die Anschaffung batteriebetriebener Fahrzeuge kann aus Umweltsicht daher empfohlen werden.

### Weniger Fahrten, weniger und leichtere Fahrzeuge

Aus gesamtökologischer Sicht ist es jedoch nach wie vor am besten, möglichst wenige Fahrzeuge zu produzieren sowie die Fahrleistung möglichst tief zu halten. Sharing von Fahrzeugen und Pooling von Fahrten sind wichtige Konzepte, die zur effizienten Nutzung von Fahrzeugen beitragen. Wichtig dabei ist, dass kein Rebound-Effekt entsteht. Gleichzeitig bestätigt der verkehrsmittelübergreifende Vergleich die bisherigen Strategien für eine klimafreundliche Mobilität. Fahrzeuge haben relevante Auswirkungen auf Umwelt und Klima. Am umweltfreundlichsten bleiben das Zufussgehen, das Velofahren und der öffentliche Verkehr. Werden Autofahrten ersetzt, ist auch das E-Bike eine umweltfreundliche Alternative. Sind Autofahrten nicht vermeidbar, sind besonders bei batteriebetriebenen Fahrzeugen Kleinwagen deutlich umweltfreundlicher.