

Fossil und elektrisch angetriebene Kommunalfahrzeuge im Vergleich

Bund, Kantone und Gemeinden müssen sich mit dem Ersatz ihrer Fahrzeugflotten durch Elektrofahrzeuge auseinandersetzen, wenn sie ihre Netto-Null-Ziele erreichen und den klimaschädlichen Kohlendioxidausstoss von fossil betriebenen Fahrzeugen reduzieren wollen. Der Vergleich der CO₂-Emissionen von fossil und elektrisch angetriebenen Kommunalfahrzeugen zeigt klar: Bereits nach einer Laufleistung von 10 000 bis 30 000 Kilometern verursacht das Elektrofahrzeug über seine gesamte Lebensdauer deutlich weniger CO₂ als das fossil betriebene Fahrzeug. Bei einer Neuanschaffung ist deshalb in jedem Fall die Option eines Elektrofahrzeugs zu überprüfen.



VON
ROGER REINAUER
Dr. sc. techn., Dipl. Ing. ETH,
Kantonsingenieur, Leiter Tiefbauamt
Basel-Stadt



VON
CARMEN JEKER
Betriebsökonomin FH,
Leiterin Geschäftsbereich Betrieb –
Tiefbauamt Basel-Stadt



VON
FRANÇOIS PETITPIERRE
Flottenverwalter Tiefbauamt Basel-Stadt

Comparaison entre les véhicules communaux thermiques et électriques

La Confédération, les cantons et les communes doivent prévoir le remplacement des véhicules de leurs parcs par des modèles électriques, afin d'atteindre l'objectif de zéro net et de réduire les émissions de dioxyde de carbone des véhicules thermiques, qui sont nocives pour le climat. La comparaison des émissions de CO₂ produites par les véhicules communaux thermiques et électriques le montre: après seulement 10 000 à 30 000 kilomètres, le véhicule électrique émet, sur l'ensemble de son cycle de vie, nettement moins de CO₂ que le véhicule thermique. Lors de l'achat d'un véhicule neuf, le modèle électrique est donc une option envisageable dans tous les cas.

- 1 | Abfallrecycling in Basel mit einem elektrisch angetriebenen Kommunalfahrzeug.
- 1 | Recyclage des déchets à Bâle avec un véhicule communal électrique.



Bei der Bewirtschaftung von Fahrzeugflotten stand bisher die Frage im Vordergrund, wann ein Fahrzeug ersetzt werden muss, um die Gesamtkosten über die Nutzungsdauer zu minimieren. Die dazu geeignete Methode ist in Reinauer und Egli (2010)^[1] beschrieben und liefert den optimalen Ersatzzeitpunkt.

Um am Ende der wirtschaftlichen resp. technischen Nutzungsdauer eines fossil betriebenen Fahrzeugs eine fundierte Entscheidung treffen zu können, ob dieses durch ein elektrisch betriebenes Fahrzeug ersetzt werden soll, muss ein Variantenvergleich der CO₂-Emissionen über die Lebensdauer der Fahrzeuge durchgeführt werden. Dieser Vergleich liefert eine wichtige Grundlage, um die Entscheidung für die Antriebsart zu erleichtern.

Mit der Einführung elektrisch angetriebener Fahrzeuge stellt sich auch die Frage, ob fossil angetriebene Fahrzeuge, die ihren ökonomisch optimalen Ersatzzeitpunkt noch nicht erreicht haben, allein aus ökologischen Gründen durch ein elektrisch angetriebenes Fahrzeug ersetzt werden sollten, um die CO₂-Reduktion rasch voranzutreiben. Es ist deshalb zu untersuchen, ob ein früherer Ersatz unter Berücksichtigung grauer Energien insgesamt zu geringeren CO₂-Emissionen führt als der Weiterbetrieb des fossil angetriebenen Fahrzeugs bis zum ökonomisch optimalen Ersatzzeitpunkt (OPEZ) und erst danach der Ersatz durch ein elektrisch angetriebenes Fahrzeug erfolgt.

Auparavant, pour gérer un parc de véhicules, il fallait surtout savoir à quel moment il était opportun de remplacer un véhicule, afin de réduire au minimum le coût total sur l'ensemble de la durée d'utilisation. La méthode adaptée à cet effet est décrite dans Reinauer et Egli (2010)^[1] et permet de définir la date optimale de remplacement.

Afin de pouvoir déterminer s'il est judicieux de remplacer un véhicule thermique par un véhicule électrique au terme de sa durée d'utilisation économique ou technique, il est nécessaire de comparer les émissions de CO₂ des deux variantes sur l'ensemble de leur durée de vie. Cette comparaison fournit une base importante qui facilite la décision en faveur de tel ou tel type de motorisation.

Une autre question se pose avec l'introduction des véhicules électriques, à savoir si un véhicule thermique n'ayant pas encore atteint la date optimale de remplacement d'un point de vue économique doit être remplacé par un véhicule électrique uniquement pour des raisons écologiques, afin d'accélérer la réduction des émissions de CO₂. Il faut donc déterminer si un remplacement précoce entraîne, en tenant compte des énergies grises, une plus forte baisse des émissions de CO₂ que si le véhicule thermique reste en service jusqu'à la date optimale de remplacement sur le plan économique et qu'il est remplacé par un modèle électrique uniquement après cette date.

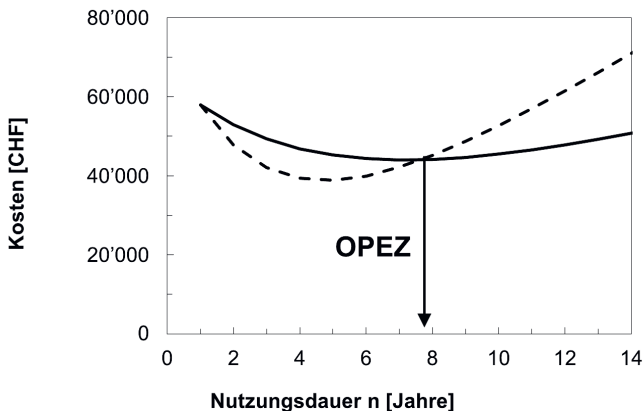
Für das Flottenmanagement stellen sich dementsprechend derzeit folgende Fragen:

- Wann muss ein Fahrzeug ersetzt werden, um die geringsten Lebenszykluskosten zu erzielen?
- Ist bei der Neubeschaffung eines bisher fossil angetriebenen Fahrzeuges der Ersatz durch ein elektrisch angetriebenes Fahrzeug umweltfreundlicher?
- Unter welchen Umständen sollten fossil angetriebene Fahrzeuge, die den ökonomisch optimalen Ersatzzeitpunkt (Ökonomischer OPEZ) noch nicht erreicht haben, aus ökologischen Gründen durch ein elektrisch angetriebenes Fahrzeug ersetzt werden?

Im Folgenden wird die Vorgehensweise zur Beantwortung der gestellten Fragen am Beispiel eines Dienstwagens im Detail dargestellt, und anschliessend werden weitere Fahrzeugkategorien des Kommunalbereichs untersucht.

Fall 1: Optimaler Ersatzzeitpunkt (OPEZ)

Der optimale Ersatzzeitpunkt (OPEZ) lässt sich durch die Gegenüberstellung der sogenannten Grenzkosten und der Durchschnittskosten über die Lebensdauer eines Fahrzeugs ermitteln. Die Grenzkosten entsprechen dabei den Gesamtkosten, d.h. der Summe aus Abschreibung, Instandhaltungskosten und Zinskosten des Betrachtungsjahres. Die Durchschnittskosten ergeben sich, indem die Gesamtkosten, die über die Jahre bis zum Betrachtungsjahr anfallen, durch die Anzahl Jahre dividiert werden. Aus der Betriebswirtschaftstheorie entspricht das Produktionsoptimum, d.h. der OPEZ, dem Minimum der Durchschnittskostenkurve. Dies ist der Punkt, an dem die Grenzkostenkurve die Durchschnittskostenkurve schneidet. Jede zusätzliche Produktionseinheit, d.h. jedes weitere Betriebsjahr eines Fahrzeugs, führt aufgrund der erforderlichen hohen Grenzkosten zu einem Anstieg der Durchschnittskosten.



2 | Optimaler Ersatzzeitpunkt (OPEZ) im Schnittpunkt der Durchschnittskostenkurve (schwarze Linie) und der Grenzkostenkurve (gestrichelte Linie).

2 | Date optimale de remplacement (OPEZ) à l'intersection de la courbe du coût moyen (ligne noire) et de la courbe du coût marginal (ligne en pointillé).

Désormais, les gestionnaires de parcs de véhicules doivent se poser les questions suivantes:

- À quel moment un véhicule doit-il être remplacé de telle sorte que le coût du cycle de vie soit le plus bas possible?
- Le remplacement par un véhicule électrique est-il plus écologique que l'achat d'un véhicule thermique neuf?
- Dans quels cas des véhicules thermiques n'ayant pas encore atteint la date optimale de remplacement d'un point de vue économique doivent-ils être remplacés par des véhicules électriques pour des raisons écologiques?

Nous présentons ci-après en détail la méthode permettant de répondre à ces questions, en prenant l'exemple d'un véhicule de service. D'autres catégories de véhicules communaux sont ensuite étudiés.

Cas n° 1: date optimale de remplacement

On obtient la date optimale de remplacement en rapportant le «coût marginal» au coût moyen sur toute la durée de vie d'un véhicule. Le coût marginal correspond au coût total, à savoir à la somme des amortissements, des frais d'entretien et des intérêts de l'année considérée. Le coût moyen est calculé en divisant le coût total, qui résulte d'un cumul sur une période allant jusqu'à l'année considérée, par le nombre d'années de ladite période. Selon les bases théoriques de l'économie d'entreprise, l'optimum de production, c'est-à-dire la date optimale de remplacement, est atteint lorsqu'il correspond au seuil de la courbe du coût moyen. Il s'agit du point d'intersection entre la courbe du coût marginal et la courbe du coût moyen. Toute unité de production supplémentaire, c'est-à-dire toute année de service supplémentaire d'un véhicule, entraîne une hausse du coût moyen en raison du niveau élevé du coût marginal requis.

Fall 2: Fossiler oder elektrischer Antrieb

Im Rahmen der Untersuchung der Antriebsart mit den geringsten CO₂-Emissionen erfolgt ein Vergleich der CO₂-Emissionen, die bei der Herstellung, dem Betrieb und der Wiederverwertung der Fahrzeuge (fossil und elektrisch) über den gesamten Lebenszyklus anfallen. Dabei werden folgende Antriebsarten miteinander verglichen: zum einen herkömmliche, mit fossilen Brennstoffen betriebene Fahrzeuge, zum anderen vollelektrische Fahrzeuge.

Cas n° 2: moteur thermique ou électrique

Dans le cadre de l'étude visant à déterminer le type de motorisation avec le niveau d'émissions de CO₂ le plus faible, on effectue une comparaison des émissions de CO₂ générées lors de la fabrication, de l'exploitation et du recyclage des véhicules (thermiques et électriques) sur l'ensemble du cycle de vie. Les types de motorisation suivants sont comparés les uns aux autres: d'une part des véhicules traditionnels propulsés par des moteurs thermiques, et d'autre part des véhicules électriques.

		Fossil	Batterieelektrisch (BEV)
Herstellung	Fahrzeug	5 600 kg	4 840 kg
	HV-Batterien	0 kg	4 800 kg
		5 600 kg	9 640 kg
Betrieb	Energiezufuhr/100 km	6 l	18 kWh
	Upstream/Verluste ¹⁾	30 %	10 %
	CO ₂ /100 km ²⁾	20,67 kg	0,146 kg
	Gesamt CO₂ (100 000 km)	20 670 kg	146 kg
Wiederverwertung	Recycling Fahrzeug	1 400 kg	1 210 kg
	Rückgewinn Fahrzeug	-2 142 kg	-1 851 kg
	HV-Batterien		300 kg
	Rückgewinn HV-Batterien		-2 161 kg
		-742 kg	-2 502 kg
Gesamt		25 528 kg	7 284 kg

¹⁾Zusätzliche CO₂-Emissionen zur Herstellung und Lieferung Kraftstoff bis Tankstelle resp. Ladeverluste. Die Emissionen aus den Kraftstoffherstellungs- resp. Betankungsanlagen sowie die Ladeinfrastrukturen sind nicht berücksichtigt.

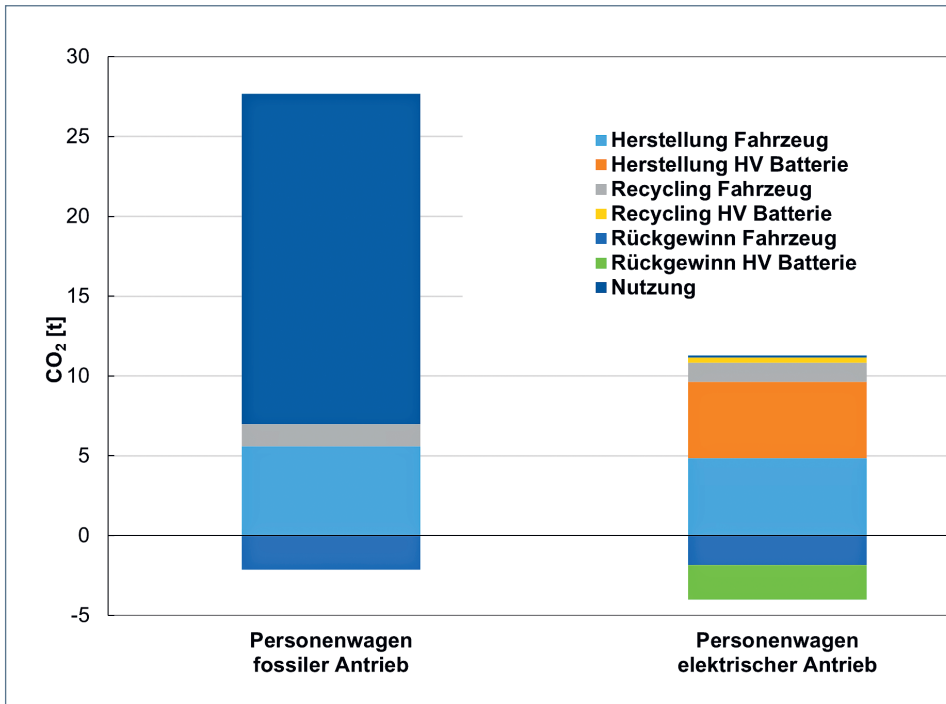
²⁾1 Liter Diesel: 2,65 kg CO₂eq, erneuerbarer Strommix Basel-Stadt: 0,0074 kg CO₂eq/kWh.

Tabelle 1: CO₂-Emissionen über den gesamten Lebenszyklus eines Personewagens.

Tableau 1: émissions de CO₂ sur l'ensemble du cycle de vie d'une voiture de tourisme.

Die Produktion eines batterieelektrischen Fahrzeugs ist mit einer höheren CO₂-Emission verbunden, die aus der Fertigung der HV-Batterien resultiert. Demgegenüber werden Komponenten, die im fossilen Fahrzeug verbaut werden, nicht benötigt. Im Rahmen der Wiederverwertung ist zum einen ein Energieeinsatz für die Zerlegung und Entsorgung erforderlich, zum anderen werden auch Rohstoffe in den Stoffkreislauf zurückgewonnen. Gegenüber der erstmaligen Gewinnung der erforderlichen Rohmaterialien für die HV-Batterien können je nach Verfahren hohe Anteile

La production d'un véhicule électrique émet davantage de CO₂ en raison de la fabrication des batteries haute tension. En revanche, certains composants qui font partie d'un véhicule thermique ne sont pas nécessaires dans un véhicule électrique. Dans le cadre du recyclage, de l'énergie est nécessaire pour le désassemblage et l'élimination; en revanche, des matières premières sont récupérées et réutilisées dans le cycle des matières. Par rapport à l'extraction unique des matières premières nécessaires à la fabrication des batteries haute tension, des quantités importantes



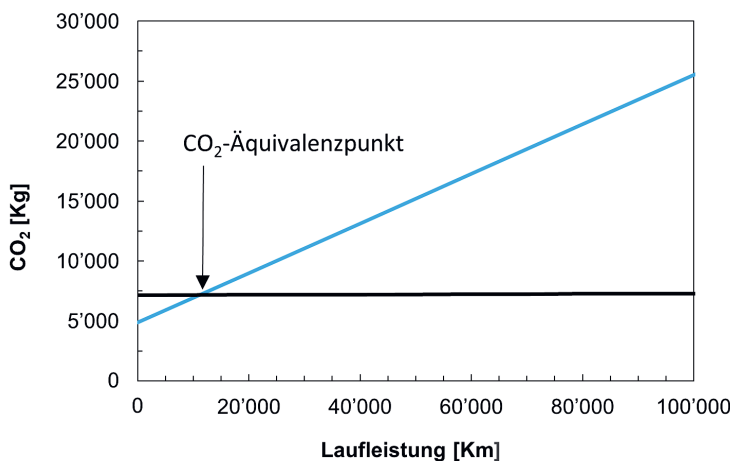
3 | CO₂-Emissionen über den gesamten Lebenszyklus eines Personewagens.
 3 | Émissions de CO₂ sur l'ensemble du cycle de vie d'une voiture de tourisme.

zurückgewonnen werden – bei deutlich reduziertem Energieeinsatz (Abb. 3). Methoden und Werte sind in Emilsson et al, 2019^[2] beschrieben oder auch auf www.duesenfeld.com/recycling_en.html zu finden.

Die Abbildung 4 veranschaulicht am Beispiel eines Personewagens, dass bei der Herstellung und Wiederverwertung eines elektrisch angetriebenen Fahrzeugs mehr CO₂ verbraucht wird als bei der Herstellung und Wiederverwertung eines mit fossilen Brennstoffen betriebenen Fahrzeugs. Während der Betriebsphase hingegen zeigt sich, dass das Fahrzeug mit fossilem Antrieb das Elektrofahrzeug bereits bei einer Laufleistung von rund 11 000 km überholt. Unter Berücksichtigung des gesamten Lebenszyklus von 100 000 km weist das Elektrofahr-

zeug mehr CO₂ emittieren als das Fahrzeug mit fossilem Antrieb, und es wird mit einer deutlich reduzierten Energieeinsatz (fig. 3). Les méthodes et valeurs sont décrites dans Emilsson et al, 2019^[2] ou peuvent être consultées sur www.duesenfeld.com/recycling_en.html.

En prenant l'exemple d'une voiture de tourisme, la figure 4 montre que la fabrication et le recyclage d'un véhicule électrique émettent davantage de CO₂ que la fabrication et le recyclage d'un véhicule thermique. En revanche, pendant la phase d'exploitation, il s'avère que les émissions du véhicule thermique dépassent celles du véhicule électrique dès que l'on atteint un kilométrage d'environ 11 000 km. En prenant pour base un cycle de vie complet de 100 000 km, le véhicule électrique émet nettement moins de CO₂.



4 | Vergleich der CO₂-Emissionen für elektrischen (schwarze Linie) und fossilen (blaue Linie) Antrieb über die technische Lebensdauer eines Personewagens.

4 | Comparaison des émissions de CO₂ d'une voiture de tourisme électrique (ligne noire) avec celles d'une voiture de tourisme thermique (ligne bleue) sur toute sa durée de vie technique.

5 | Das elektrisch angetriebene Glassammelfahrzeug erzeugt über den gesamten Lebenszyklus deutlich weniger CO₂.
 5 | Le véhicule électrique de collecte du verre émet nettement moins de CO₂ sur l'ensemble de son cycle de vie.



zeug deutlich geringere CO₂-Emissionen auf, sodass bei einer Variantenentscheidung das elektrisch angetriebene Fahrzeug klar vorzuziehen ist. Auch wenn die Emissionen des Recyclings und die Rückgewinne ausser Acht gelassen werden, verändert sich die Entscheidung zugunsten des elektrischen Fahrzeugs nicht. Der Dienstwagen mit dem elektrischen Antrieb schneidet dann ab einer Laufleistung von rund 20 000 km gegenüber dem entsprechenden Fahrzeug mit fossilem Antrieb besser ab, was immer noch deutlich unter der Laufleistung des gesamten Lebenszyklus liegt.

Der Schnittpunkt (CO₂-Äquivalenzpunkt) kann auch rechnerisch bestimmt werden. Dazu werden die Funktionen für die CO₂-Emissionen der beiden Antriebsarten gleichgesetzt (Gleichung 1) und nach der Fahrleistung aufgelöst (Gleichung 2):

$$(1) \text{CO}_{\text{Fos. Graue Energie}} + \text{CO}_{\text{Fos. Verbrauch}} \cdot \text{km} = \text{CO}_{\text{Elek. Graue Energie}} + \text{CO}_{\text{Elek. Verbrauch}} \cdot \text{km}$$

$$(2) \text{km} = \frac{\text{CO}_{\text{Elek. Graue Energie}} - \text{CO}_{\text{Fos. Graue Energie}}}{\text{CO}_{\text{Fos. Verbrauch}} - \text{CO}_{\text{Elek. Verbrauch}}}$$

Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung wird der CO₂-Wert der Herstellung sowie der Wiederverwertung addiert, um den Wert der sogenannten grauen Energie zu ermitteln.

Für weitere Fahrzeugkategorien lassen sich folgende CO₂-Werte ermitteln, wobei der CO₂-Verbrauch mit dem in Basel-Stadt erhältlichen Strommix berechnet wurde:

Il convient donc de privilégier clairement la motorisation électrique lors du choix du type de véhicule. Même lorsque l'on ne tient pas compte des émissions liées au recyclage ni des matières récupérées, le véhicule électrique reste le choix le plus judicieux. Le véhicule de service avec un moteur électrique présente un meilleur bilan que le véhicule thermique dès un kilométrage d'environ 20 000 km, un chiffre encore bien inférieur au kilométrage correspondant au cycle de vie complet.

Le point d'intersection (point d'équivalence CO₂) peut aussi être déterminé par le calcul. Pour ce faire, les fonctions pour les émissions de CO₂ des deux types de motorisation sont mises en équation (équation 1) et décomposées en fonction du kilométrage (équation 2):

$$\text{CO}_{\text{énergie grise foss}} + \text{CO}_{\text{consommation foss}} \cdot \text{km} = \text{CO}_{\text{énergie grise élec}} + \text{CO}_{\text{consommation élec}} \cdot \text{km} \quad (1)$$

$$\text{km} = \frac{\text{CO}_{\text{énergie grise élec}} - \text{CO}_{\text{énergie grise foss}}}{\text{CO}_{\text{consommation foss}} - \text{CO}_{\text{consommation élec}}} \quad (2)$$

Dans le cadre de cette analyse, les émissions de CO₂ liées à la fabrication et au recyclage sont additionnées afin de déterminer la valeur de l'énergie grise.

Pour les autres catégories de véhicules, on a déterminé les émissions de CO₂ en calculant la consommation de CO₂ avec le mix d'électricité disponible à Bâle-Ville:

Kommunalfahrzeuge mit elektrischem Antrieb	Herstellung	Wiederverwertung		Total	Verbrauch
	kg CO ₂	Recycling kg CO ₂	Rückgewinn kg CO ₂	Graue Energie kg CO ₂	kg CO ₂ /100 km
Personenwagen (PW)	9 640	1 510	-4 013	7 137	0,146
Transporter/Lieferwagen	18 200	3 050	-7 504	13 746	0,405
Geräteträger	23 712	3 120	-9 721	17 111	1,946
Multifunktionsfahrzeug Schwemmen/Winterdienst	64 200	11 550	-26 184	49 566	1,459
Kehrmaschine kompakt 2 m ³	18 310	3 603	-7 356	14 556	1,459
Kehrmaschine mittel 4 m ³	30 760	5 590	-12 525	23 825	1,621
Kehrlichfahrzeug 3-Achser 22 m ³	89 880	16 170	-36 657	69 393	1,621
Kehrlichfahrzeug 2-Achser 6 m ³	60 800	12 200	-24 341	48 659	1,216
Glassammelfahrzeug 4-Achser 30 m ³	117 050	23 638	-46 806	93 882	1,621

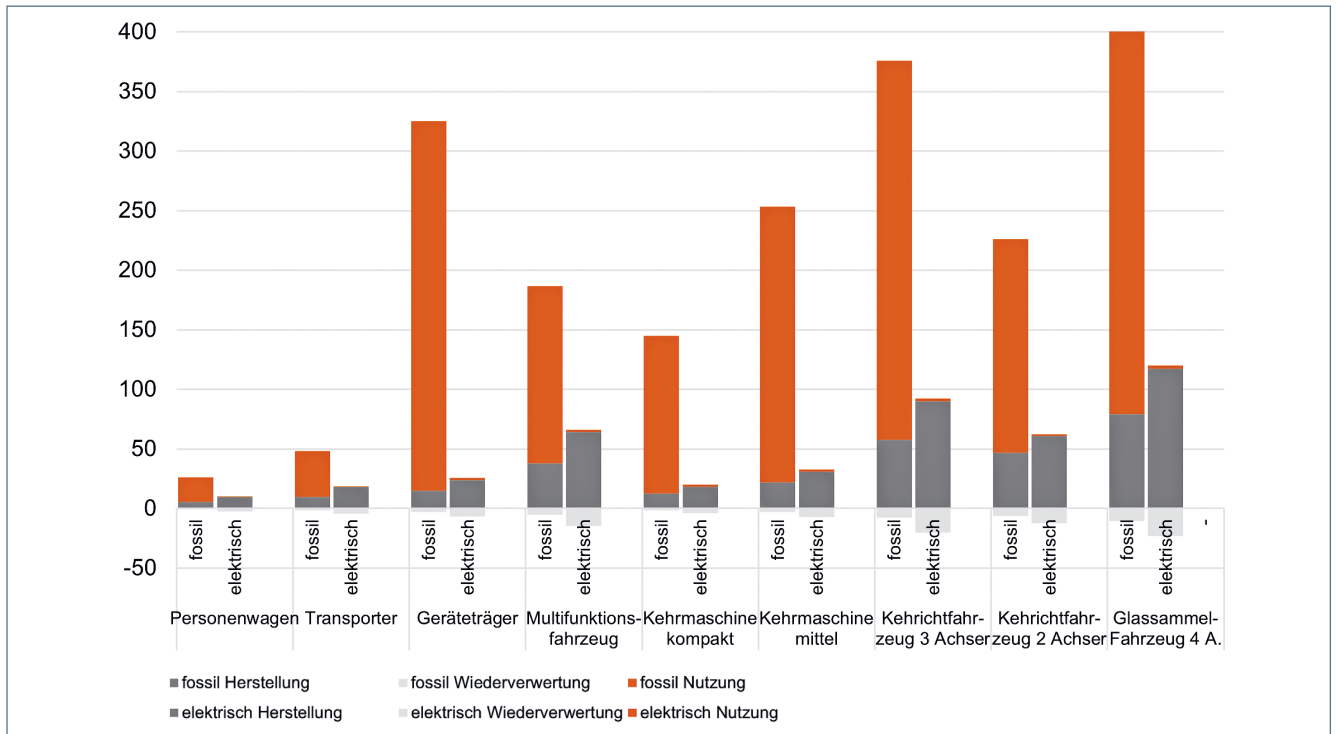
Tabelle 2: CO₂-Werte der Kommunalfahrzeuge mit elektrischem Antrieb.
Tableau 2: émissions de CO₂ des véhicules communaux électriques.

Kommunalfahrzeuge mit fossilem Antrieb	Herstellung	Wiederverwertung		Total	Verbrauch
	kg CO ₂	Recycling kg CO ₂	Rückgewinn kg CO ₂	Graue Energie kg CO ₂	kg CO ₂ /100 km
Personenwagen (PW)	5 600	1 400	-2 142	4 858	20,67
Transporter/Lieferwagen	9 600	2 400	-3 672	8 328	48,23
Geräteträger	15 120	2 700	-5 783	12 037	275,60
Multifunktionsfahrzeug Schwemmen/Winterdienst	38 000	9 500	-14 535	32 965	155,03
Kehrmaschine kompakt 2 m ³	12 800	3 200	-4 896	11 104	137,80
Kehrmaschine mittel 4 m ³	22 000	5 500	-8 415	19 085	241,15
Kehrlichfahrzeug 3-Achser 22 m ³	57 480	14 370	-21 986	49 864	241,15
Kehrlichfahrzeug 2-Achser 6 m ³	46 800	11 700	-17 901	40 599	223,93
Glassammelfahrzeug 4-Achser 30 m ³	79 200	19 800	-30 294	68 706	206,70

Tabelle 3: CO₂-Werte der Kommunalfahrzeuge mit fossilem Antrieb.
Tableau 3: émissions de CO₂ des véhicules communaux thermiques.

Die in Tabelle 2 und 3 dargestellten Parameter reflektieren die Gegebenheiten der Stadt Basel und stellen Richtwerte dar. Bei der Anwendung der hier vorgestellten Methode obliegt es deshalb jedem Gemeinwesen, die Parameter seiner Fahrzeuge zu erheben und darauf basierend die Berechnungen durchzuführen. Insbesondere der CO₂-Bedarf zur Herstellung der eingesetzten elektrischen Energie übt einen relativ hohen Einfluss auf die Resultate aus. Dieser Wert ist beim Energielieferanten erhältlich und muss in Abhängigkeit vom bestellten Stromprodukt eingesetzt werden. Der Energieverbrauch der Fahrzeuge gemäss Tabelle 2 und 3 unterliegt einer Beeinflussung durch die jeweilige Topografie, die zurückzulegenden Distanzen sowie das Verhältnis zwischen Fortbewegungs- und Arbeitsenergie (z.B. Pressen bei Kehrlichfahrzeugen). Auch die Fahrweise des Personals, die mittels geeigneter Schulungs- und Sensibilisierungsmassnahmen im ökologischen Sinn positiv

Les paramètres présentés dans les tableaux 2 et 3 reflètent les conditions propres à la ville de Bâle et représentent des valeurs indicatives. Lors de l'utilisation de la méthode présentée ici, il incombe donc à chaque collectivité de saisir les paramètres de ses véhicules et d'effectuer les calculs sur cette base. Les émissions de CO₂ liées à la production de l'énergie électrique utilisée ont une influence relativement élevée sur les résultats. Cette valeur peut être obtenue auprès du fournisseur d'énergie et doit être utilisée en fonction du produit électrique commandé. La consommation énergétique des véhicules selon les tableaux 2 et 3 est influencée par la topographie, les distances parcourues et par le rapport entre l'énergie cinétique et l'énergie de travail (p. ex. compacteurs sur les véhicules de ramassage des ordures ménagères). Le style de conduite, qui peut être influencé positivement sur le plan écologique grâce à des mesures de formation et de sensibilisation du person-



6 | CO₂-Anfall in Tonnen für verschiedene Kommunalfahrzeuge über den gesamten Lebenszyklus.
 6 | Émissions de CO₂ en tonnes pour différents véhicules communaux sur l'ensemble du cycle de vie.

beeinflusst werden kann, hat einen Einfluss. Weitere Parameter wurden aufgrund einer intensiven Internetrecherche ermittelt und so eingesetzt, dass sie einer durchschnittlichen Einschätzung aus Fachkreisen entsprechen. Zur Veranschaulichung werden in Abbildung 6 die CO₂-Werte der entsprechenden Kommunalfahrzeuge nebeneinander dargestellt.

Die Ermittlung des Schnittpunktes (CO₂-Äquivalenzpunkt) erfolgt durch Einsetzen der Werte aus den Tabellen 2 und 3 in die Formeln (1) und (2). Die Ergebnisse sind in Tabelle 4 dargestellt. Aus diesen lässt sich ableiten, ab welcher erwarteten Laufleistung sich die Anschaffung eines Elektrofahrzeugs zur CO₂-Reduktion lohnt.

nel, a aussi une influence. D'autres paramètres ont été déterminés après des recherches approfondies sur Internet et utilisés de sorte qu'ils correspondent à une estimation moyenne des experts. Pour une meilleure compréhension, les émissions de CO₂ des véhicules communaux sont représentées côte à côte dans la figure 6.

Pour déterminer le point d'intersection (point d'équivalence CO₂), on utilise les valeurs des tableaux 2 et 3 dans les formules (1) et (2). Les résultats sont présentés dans le tableau 4. Ils permettent de déduire à partir de quel kilométrage l'acquisition d'un véhicule électrique est pertinente pour réduire les émissions de CO₂.

Tabelle 4: Laufleistung, ab welcher ein Elektrofahrzeug einen geringeren CO₂-Ausstoß als ein fossil angetriebenes Fahrzeug hat.
 Tableau 4: kilométrage à partir duquel un véhicule électrique émet moins de CO₂ qu'un véhicule thermique.

CO ₂ -Äquivalenzpunkt	km
Personenwagen (PW)	11 105
Transporter/Lieferwagen	11 329
Geräteträger	1 854
Multifunktionsfahrzeug Schwimmen/Winterdienst	10 811
Kehrmaschine kompakt 2 m ³	2 532
Kehrmaschine mittel 4 m ³	1 979
Kehrrichtungsfahrzeug 3-Achser 22 m ³	7 271
Kehrrichtungsfahrzeug 2-Achser 6 m ³	3 619
Glassammelfahrzeug 4-Achser 30 m ³	11 310

Eine Analyse der Ergebnisse nach Fahrzeugkategorien zeigt, dass insbesondere Fahrzeuge, die im Einsatz einen hohen Energieverbrauch aufweisen, wie beispielsweise Fahrzeuge mit Nebenantrieben, Pressvorgängen, Wischen, Saugen, Schwemmen etc., eine deutlich tiefere Schwelle bezüglich der Entscheidung für ein Elektrofahrzeug aufweisen. Bei allen Fahrzeugkategorien kann davon ausgegangen werden, dass die erwartete Laufleistung während der technischen Lebensdauer deutlich höher liegt als diejenige beim CO₂-Äquivalenzpunkt und somit das Elektrofahrzeug in der Gesamtbetrachtung ökologischer ist.

Fall 3: Vorzeitiger Ersatz fossiler durch elektrische Fahrzeuge

Bei dieser Fragestellung ist zu entscheiden, ob ein vorhandenes, fossil angetriebenes Fahrzeug, das sein technisches Lebensende bzw. seinen ökonomisch optimalen Ersatzzeitpunkt (OPEZ) noch nicht erreicht hat, mit einem Vorteil hinsichtlich der CO₂-Emissionen durch ein elektrisch angetriebenes Fahrzeug ersetzt werden soll. Dabei kann vereinfacht davon ausgegangen werden, dass der im fossilen Fahrzeug vorhandene CO₂-Anteil durch das neue Elektrofahrzeug kompensiert werden muss. Diese Vereinfachung führt dazu, dass dem fossil betriebenen Fahrzeug eine etwas höhere Fahrleistung bis zum Ersatz zugestanden wird.

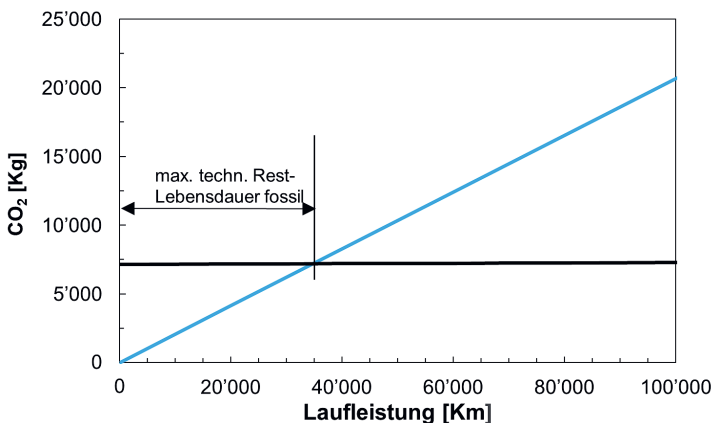
Bei einer genaueren Berechnung muss dem fossil betriebenen Fahrzeug der CO₂-Bedarf bei der Herstellung abgemindert im Verhältnis der Restfahrleistung zur Gesamtfahrleistung über die Lebensdauer angerechnet werden. Die Abbildung 7 veranschaulicht, wie lange die technische Lebensdauer eines fossilen Fahrzeugs maximal sein darf, damit es aus ökologischer Perspektive nicht ersetzt werden muss. Liegt die Restfahrleistung über dieser Grenze, sollte das Fahrzeug durch ein Elektrofahrzeug ersetzt werden.

Une analyse des résultats par catégorie de véhicule montre que le seuil conduisant à l'achat d'un véhicule électrique est nettement plus bas pour les véhicules présentant une consommation énergétique élevée lorsqu'ils sont en service, comme par exemple les véhicules avec prise de force ou utilisés pour des opérations de compactage, de balayage, d'aspiration, de lavage, etc. Pour toutes les autres catégories de véhicules, on peut partir du principe que le kilométrage attendu pendant la durée de vie technique est nettement supérieur à celui pour le point d'équivalence CO₂; le véhicule électrique est donc globalement plus écologique.

Cas n°3: remplacement anticipé des véhicules thermiques par des véhicules électriques

Dans ce cas précis, il convient de décider s'il est avantageux, en termes de réduction des émissions de CO₂, de remplacer par un véhicule électrique un véhicule thermique n'ayant pas encore atteint sa fin de vie technique et/ou sa date optimale de remplacement d'un point de vue économique. Pour simplifier, on peut partir du principe que la part des émissions de CO₂ inhérente au véhicule thermique doit être compensée par le véhicule électrique neuf. Du fait de cette simplification, le véhicule thermique doit avoir atteint un kilométrage un peu plus élevé avant d'être remplacé.

Pour obtenir un calcul plus précis, les émissions de CO₂ liées à la fabrication du véhicule thermique doivent être prises en compte et réduites proportionnellement selon le rapport entre le kilométrage résiduel et le kilométrage total sur l'ensemble du cycle de vie. La figure 7 indique quelle doit être la durée de vie technique maximale d'un véhicule thermique pour que son remplacement ne soit pas nécessaire d'un point de vue écologique. Si le kilométrage résiduel dépasse ce seuil, le véhicule doit être remplacé par un véhicule électrique.



7 | Maximale Restfahrleistung fossil (blaue Linie) angetriebenes Dienstfahrzeug (PW) ohne Ersatz mit elektrischem (schwarze Linie) Antrieb. Im Beispiel ca. 35 000 km.

7 | Kilométrage résiduel maximal du véhicule de service (voiture de tourisme) thermique (ligne bleue) sans remplacement par un véhicule électrique (ligne noire). Dans l'exemple, environ 35 000 km.

Die maximale Restfahrleistung, bei der die weitere Nutzung des vorhandenen fossil betriebenen Fahrzeugs ökologisch sinnvoll ist, lässt sich mittels der folgenden Gleichung (3) ermitteln:

$$km = \frac{CO_{\text{Elek. Graue Energie}}}{CO_{\text{Fos. Verbrauch}} - CO_{\text{Elek. Verbrauch}}} \quad (3)$$

Tabelle 5: Maximale technische Restlebensdauer des fossilen Fahrzeugs. Bei höherer möglicher Laufleistung sollte ein Ersatz durch ein Elektrofahrzeug erfolgen.

Tableau 5: durée de vie résiduelle technique maximale du véhicule thermique. Si un kilométrage plus élevé est possible, il convient de remplacer ce véhicule par un véhicule électrique.

Technische Restlebensdauer fossiler Fahrzeuge	km
Personenwagen (PW)	34 775
Transporter/Lieferwagen	28 743
Geräteträger	6 253
Multifunktionsfahrzeug Schwemmen/Winterdienst	32 277
Kehrmaschine kompakt 2 m ³	10 676
Kehrmaschine mittel 4 m ³	9 947
Kehrlichthfahrzeug 3-Achser 22 m ³	28 971
Kehrlichthfahrzeug 2-Achser 6 m ³	21 849
Glassammelfahrzeug 4-Achser 30 m ³	45 778

Als Erläuterung der zutreffenden Entscheidung: Wenn ein Kehrlichthfahrzeug (3-Achser, 22 m³) noch eine technische Lebenserwartung von mehr als 28 088 km aufweist, dann sollte es vorzeitig durch ein Elektro-Kehrlichthfahrzeug ersetzt werden. Ist die technische Lebenserwartung tiefer, dann wird das Elektrofahrzeug nicht in der Lage sein, die im Dieselfahrzeug vorhandene graue Energie während der Restlebensdauer des fossilen Kehrlichthfahrzeugs zu kompensieren.

Schlussfolgerungen

Der Einsatz von Elektrofahrzeugen im Kommunalbereich stellt einen wesentlichen Beitrag zur CO₂-neutralen Verwaltung dar. Im Rahmen der zu erstellenden Absenkpfade ist die Massnahme des konsequenten Ersatzes fossiler Fahrzeuge durch entsprechende Elektrofahrzeuge zu prüfen und zu bewerten. Dabei soll die hier beschriebene Vorgehensweise dazu dienen, die Bewertung auf die Gegebenheiten des jeweiligen Gemeinwesens zu adaptieren. Bei allen untersuchten Fahrzeugkategorien lassen sich bei den Rahmenbedingungen von Basel-Stadt deutliche ökologische Vorteile zugunsten der Elektrofahrzeuge feststellen.

Literatur

- [1] Kostenoptimale Bewirtschaftung von Kommunal- und Nutzfahrzeugen, Roger Reinauer und Dominik Egli, Strasse & Verkehr Nr. 1-2/Januar-Februar 2010.
- [2] Lithium-Ion Vehicle Battery Production, Status 2019 on Energy Use, CO₂ Emissions, Use of Metals, Products Environmental Footprint, and Recycling, Erik Emilsson, Lisbeth Dahllöf, ivl Swedish Environmental Research Institute 2019.

Le kilométrage résiduel maximal avec lequel le maintien en service du véhicule thermique est judicieux sur le plan écologique peut être déterminé au moyen de l'équation (3) suivante:

$$km = \frac{CO_{\text{énergie grise élec}}}{CO_{\text{consommation foss}} - CO_{\text{consommation élec}}} \quad (3)$$

Exemple visant à expliquer la décision pertinente: si un camion-poubelle (véhicule à 3 essieux, 22 m³) présente encore une durée de vie technique de plus de 28 088 km, il doit alors être remplacé de manière anticipée par un modèle électrique. En revanche, si sa durée de vie technique est inférieure à ce seuil, le véhicule électrique ne pourra pas compenser l'énergie grise inhérente au véhicule diesel pendant la durée de vie résiduelle du camion-poubelle roulant au diesel.

Conclusions

L'utilisation de véhicules électriques dans le domaine communal contribue de manière notable à une gestion du parc neutre en CO₂. Dans le cadre des voies à explorer pour réduire les émissions de CO₂, la mesure consistant à remplacer systématiquement les véhicules thermiques par des véhicules électriques doit être étudiée et évaluée. La méthode décrite ici doit permettre d'adapter l'évaluation aux conditions applicables dans la collectivité concernée. Pour toutes les catégories de véhicules examinées, les conditions-cadres de Bâle-Ville font apparaître des avantages écologiques significatifs en faveur des véhicules électriques.