



INSTITUT FÜR ENERGIE-
UND UMWELTFORSCHUNG
HEIDELBERG

Senatsverwaltung
für Mobilität, Verkehr,
Klimaschutz und Umwelt

BERLIN



LAND
BRANDENBURG
Ministerium für Landwirtschaft,
Umwelt und Klimaschutz

geErdelcarth
DBUQ
Deutsche
Bundesstiftung Umwelt
www.dbu.de

Dokumentation des Lebenszykluskosten-Rechners für Pkw und leichte Nutzfahrzeuge (LNF)

Julia Pelzeter, Udo Lambrecht, Bernhard Bruch

Heidelberg, 23.10.2024

Erstellt im Rahmen des Projektes

*Entwicklung von Instrumenten für die umweltverträgliche Beschaffung
von Pkw durch öffentliche Stellen*

Gefördert durch:

Deutsche Bundesstiftung Umwelt;

Senatsverwaltung für Mobilität, Verkehr, Klimaschutz und Umwelt
des Landes Berlin;

Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt und Klimaschutz des Landes
Brandenburg

**Der hier dokumentierte Lebenszykluskosten-Rechner ist
noch nicht Bestandteil von Landesvorschriften.**



Inhaltsverzeichnis

1 Übersicht	3
2 Datenangaben: Vergabestelle und Bieter	4
3 Beschreibung der Rechenschritte	7
A) Anschaffungskosten/Fahrzeugpreis bzw. Wertminderung	7
B) Energiekosten	8
C) Externe Umweltkosten Betrieb des Fahrzeuges	8
D) Externe Umweltkosten Vorkette der Energiebereitstellung	9
E) Externe Umweltkosten der Antriebsbatterieherstellung	10
F) Optional: Weitere jährliche Kosten	10
Quellenverzeichnis	11
Anhang	12
A1 Schematische Darstellung der Lebenszykluskosten-Berechnung	12
A2 Tabellen	13
A3 Berechnung des Energieverbrauchs bei Plug-in-Hybrid-Fahrzeugen (PHEV)	16

1 Übersicht

Öffentliche Auftraggeber können gemäß § 59 Abs. 1 VgV ökologische Kriterien über die Preiswertung berücksichtigen, indem sie das Zuschlagskriterium „Kosten“ auf Grundlage der Lebenszykluskosten beurteilen. Bei der Beschaffung von Straßenfahrzeugen können damit bei der Angebotswertung neben den Anschaffungskosten die über die Haltedauer eines Fahrzeuges durch dessen Betrieb verursachten Energiekosten und die externen Umweltkosten berücksichtigt und finanziell bewertet werden.

Für die **Lebenszykluskostenberechnung** werden in dem vorliegenden Excel-Rechner folgende Kosten berücksichtigt:

Tabellenblatt

Ergebnisse_LZK

- A) **Anschaffungskosten/Fahrzeugpreis bzw. Wertminderung**
- B) **Energiekosten**
- C) **Externe Umweltkosten Betrieb des Fahrzeuges**
- D) **Externe Umweltkosten Vorkette der Energiebereitstellung**
- E) **Externe Umweltkosten der Antriebsbatterieherstellung**
- F) **Optional: Weitere jährliche Kosten**

Tabellenblatt



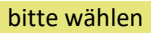

Die **Umweltkosten** werden zudem separat ausgewiesen und setzen sich zusammen aus:

Ergebnisse_Umweltkosten

- C) **Externe Umweltkosten Betrieb des Fahrzeuges**
- D) **Externe Umweltkosten Vorkette der Energiebereitstellung**
- E) **Externe Umweltkosten der Antriebsbatterieherstellung**

Die Fahrzeugpreise und die Energiekosten werden in EUR brutto (nach Steuern) angegeben.

Zur besseren Bedienbarkeit sind die editierbaren Felder ihrer Funktion nach mit verschiedenen Farben gekennzeichnet:

	Eingabefelder: Hier sind die Werte aus den Angeboten einzugeben.
	Hier liegen Default-Werte vor, die für die Berechnungen verwendet werden. Es können auch eigene Daten eingegeben werden.
	Auswahlfelder: Durch Anklicken erscheint ein Dropdown-Menü.
	Kommentarfelder mit Hilfestellungen zur Dateneingabe, Quellenangaben etc. Die Kommentarfelder befinden sich am linken Rand.

Der Excel-Rechner ist ohne Passwort geschützt. Der Blattschutz kann unter "Überprüfen → Blattschutz aufheben" aufgehoben werden. Das Tool kann grundsätzlich nach eigenen Bedürfnissen über die vorgesehenen Anpassungsmöglichkeiten hinaus angepasst werden. Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass dadurch Berechnungsfehler entstehen können.

Der Lebenszykluskosten-Rechner wird in zwei separaten Versionen für Pkw und leichte Nutzfahrzeuge (LNF) als Excel-Datei unter www.nachhaltige-oeffentliche-pkw-beschaffung.de/?tab=Downloads bereitgestellt.

Für die korrekte Ausführung des Rechners wird mindestens die Excel-Version 2016 (oder aktueller) benötigt.

2 Datenangaben: Vergabestelle und Bieter

Vorgaben durch die Vergabestelle

In der Ausschreibung sind zur Herstellung der Transparenz folgende Angaben zur Berechnung der Lebenszykluskosten **durch die Vergabestelle** vorzugeben und den Bietenden mitzuteilen. Für einen Teil der Werte sind Default-Werte im Rechentool hinterlegt und können bei Bedarf im Tabellenblatt „Grunddaten“ geändert werden.

- **Kosten der Energieträger** (Default-Werte sind hinterlegt, siehe Tabelle 7)

Alternative Energiekosten können Sie ggf. im Abschnitt "Energie- + Umweltkosten" im Tabellenblatt „Grunddaten“ eingeben (siehe Abbildung 1).
- **Spezifische externe Umweltkosten der CO₂-Emissionen** (Default-Werte sind hinterlegt, siehe Tabelle 5)

Im Tabellenblatt „Input_Beschaffung“ kann ein Wert für die CO₂-Kosten ausgewählt werden. Mit der Einstellung „niedrig“ werden 250 €/t CO₂eq zugrunde gelegt. Die Einstellung „hoch“ bewirkt Kosten von 860 €/t CO₂eq. Die Werte basieren auf einem Vorschlag des UBA¹ (UBA 2024b).

Alternative CO₂-Kosten können Sie ggf. im Abschnitt "Energie- + Umweltkosten" im Tabellenblatt „Grunddaten“ eingeben (siehe Abbildung 1).
- **Spezifische externe Umweltkosten der Luftschadstoff-Emissionen** (Default-Werte sind hinterlegt, siehe Tabelle 5)

Alternative Umweltkosten können Sie ggf. im Abschnitt "Energie- + Umweltkosten" im Tabellenblatt „Grunddaten“ eingeben (siehe Abbildung 1).
- **Treibhausgas(THG)-Emissionen der Batterieherstellung pro kWh** (Default-Wert ist hinterlegt, siehe Tabelle 6)

Alternative THG-Emissionen pro kWh können Sie ggf. im Abschnitt "Energie- + Umweltkosten" im Tabellenblatt „Grunddaten“ eingeben.
- **Anteil Strom aus eigener Ladestation** (Default-Wert: 50 %)
- **Fahrleistung pro Jahr**
- **Haltedauer**
- Berücksichtigung des vollen Fahrzeugpreises oder Berechnung der Wertminderung nach (Stewart und Dodson 2016)

Im Excel-Tool zu finden im Tabellenblatt „Input_Beschaffung“ (siehe Abbildung 2)

¹ Das UBA unterscheidet zwischen zwei verschiedenen Vorgehensweisen zur Ermittlung der Klimafolgekosten: Im Szenario "hoch" werden Schäden durch Treibhausgas-Emissionen für die heutige und künftige Generationen gleichgewichtet. Im Szenario „niedrig“ werden „Schäden, die der nächsten Generation (in 30 Jahren) entstehen, nur zu 74%, die der übernächsten Generation (in 60 Jahren) entstehenden Schäden nur zu 55% berücksichtigt. [Diese Gewichtung] lässt sich als Proxy für praktische Politikrelevanz verwenden.“ (Matthey und Bünger 2020)

- Bei leichten Nutzfahrzeugen (**LNF**): Geforderte **Laderaummaße und Zuladung** (entsprechend der technischen Leistungsbeschreibung)

Die Angaben haben keinen Einfluss auf die Berechnung der Lebenszykluskosten, sondern wirken sich nur auf die bei der Eingabe maximal zulässigen Treibhausgasemissionen (bei Verbrennern) bzw. Energieverbräuche (bei BEV) laut Mindestanforderungen¹ aus.

Angaben zu den Energiekosten			
Energieträger	Energiepreis		Einheit
		Eigene Werte nutzen	
Strom eigene Ladestation	41,4		ct/kWh
Strom externe Ladestation	59,0		ct/kWh
Diesel	1,672		EUR/l
Benzin	1,788		EUR/l
Erdgas (CNG)	1,30		EUR/kg

Externe Umweltkosten - Annahmen			
Welche externen Umweltkosten sollen in der LZK-Berechnung berücksichtigt werden?			
	Eigene Werte nutzen		Einheit
Externe Umweltkosten Treibhausgasemissionen	860		EUR/t CO ₂ eq
Externe Umweltkosten NOx (Stickoxide)	0,02		EUR/g
Externe Umweltkosten Partikel (PM2.5)	0,15		EUR/g

Abbildung 1: Tabelle im LZK-Rechner mit Default-Werten und Möglichkeit zur Eingabe eigener Energie- und Umweltkosten im Tabellenblatt „Grunddaten“

Jahresfahrleistung pro Fahrzeug	20.000 km/Jahr
Art der Beschaffung	Kauf
Anschaffungsjahr	2024
Haltdauer	7 Jahre
Berücksichtigung des Fahrzeugpreises in der Lebenszykluskosten-Berechnung	Wertminderung
CO ₂ -Kosten	(Hoch) 860 EUR/t CO ₂ eq

Ladeverhalten Elektroauto		
Ergänzende Angaben für Elektrofahrzeuge:		
	Eigene Werte nutzen	
Anteil Strom aus eigener Ladestation	50	%
Anteil Strom an öffentlichen Säulen geladen	50	

Abbildung 2: Tabelle im LZK-Rechner zur Eingabe der Projekt-spezifischen Parameter im Tabellenblatt „Input_Beschaffung“

¹ Sofern in der Ausschreibung entsprechende Mindestanforderungen gestellt werden. Im ifeu-Projekt wurde ein Vorschlag entwickelt, der für THG-Emissionen von Verbrennern und für Energieverbräuche von BEV eine Unterteilung nach Laderaummaßen bzw. geforderter minimaler Zuladung vorsieht (siehe [Umweltanforderungen](#)).

Angaben von den Bietenden

Folgende Werte sind **von den Bietenden** im Angebot für das Fahrzeug anzugeben (zum Kopieren in die Ausschreibung, alternativ können Bietende direkt Spalte E im Tabellenblatt „Eingabe_Angabswerte“ ausfüllen; siehe Abbildung 3):

- Kaufpreis/Leasingrate/Mietkosten
- Antriebsart
- Art des Energieträgers
- Kraftstoff-/Stromverbrauch (l/100 km bzw. kWh/100 km) nach WLTP
- CO₂-Emissionen (g/km) nach WLTP
- NO_x-Emissionen (mg/km) nach WLTP
- Partikelemissionen (mg/km) nach WLTP
- Bei Plug-in-Hybriden (PHEV): Rein elektrische Reichweite (km) nach WLTP
- Bei rein elektrischen Fahrzeugen (BEV) und PHEV: Batteriegröße brutto (kWh)
- Bei leichten Nutzfahrzeugen (LNF): Fahrzeugklasse - abhängig von zulässigem Gesamtgewicht (zGG)
 - N1-I (zGG < 1.305 kg)
 - N1-II (zGG 1.305 - 1.760 kg)
 - N1-III (zGG > 1.760 kg)

Zudem können optional weitere Angaben zu jährlichen Kosten gefordert werden. Im LZK-Rechner sind hierfür drei Freitextfelder verfügbar.

Daten zur Lebenszykluskosten-Berechnung						
Angebotsnummer		1	2	3	4	5
Antriebsart						
Energieträger						
Anbieter						
Fahrzeughersteller						
Modell						
Zusatzinfos (Ausstattungsline o.ä.)						
Fahrzeuggesamtprice (brutto)		EUR				
WLTP -Typprüfwerte	Energieverbrauch	l/100km				
	CO ₂	kWh/100km				
	NO _x (Stickoxide)	g/km				
	Partikel	mg/km				
	Rein elektrische Reichweite	mg/km				
	Batteriegröße brutto	km				
Weitere jährliche Kosten						
①		EUR/Jahr				
		EUR/Jahr				
		EUR/Jahr				

Abbildung 3: Angaben von Bietenden im Tabellenblatt „Eingabe_Angabswerte“

3 Beschreibung der Rechenschritte

In diesem Kapitel wird dargestellt, wie die einzelnen Kostenbestandteile für die Lebenszykluskosten berechnet werden (Ergebnisdarstellung siehe Abbildung 4).

Lebenszykluskosten						
Angebotsnummer		1	2	3	4	5
		Opel Astra 1.5 Diesel Verbrenner Diesel	VW Golf 2.0 TDI Verbrenner Diesel	VW ID.3 Vollelektrisch (BEV) Strom	BYD Dolphin Vollelektrisch (BEV) Strom	Kia Niro 1.6 GDI Plug-in-Hybrid (PHEV) Benzin
Kaufpreis	EUR	33.460	36.030	39.425	34.990	38.690
Wertminderung	EUR	24.164	26.020	28.472	25.269	27.941
Energiekosten	EUR	11.704	10.065	10.893	11.175	9.676
Externe Umweltkosten (Betrieb)	EUR	16.042	13.823	0	0	5.118
Externe Umweltkosten THG (Vorkette)	EUR	5.007	4.306	5.431	5.571	4.202
Externe Umweltkosten Herstellung (Batterie)	EUR	0	0	2.850	2.777	552
Kfz-Steuer	EUR	1.533	1.596	0	0	224
Total	EUR	58.451	55.810	47.646	44.791	47.713
Rangfolge nach Lebenszykluskosten		5	4	2	1	3

Abbildung 4: Ausgabe der Kostenbestandteile (beispielhaft) im LZK-Rechner

A) Anschaffungskosten/Fahrzeugpreis bzw. Wertminderung

Diese Einstellungen werden im Tabellenblatt „Input_Beschaffung“ vorgenommen.

A1) Beschaffungsart **Leasing**:

$$\text{Fahrzeugpreis} = \text{Leasingrate} \times \text{Haltedauer} \times 12 + \text{Leasingsonderzahlung} \quad (1)$$

Leasingrate in EUR/Monat; Haltedauer in Jahren

A2) Beschaffungsart **Miete**:

$$\text{Fahrzeugpreis} = \text{Miete} \times \text{Haltedauer} \times 12 \quad (2)$$

Miete in EUR/Monat; Haltedauer in Jahren

A3) Beschaffungsart **Kauf**:

A3.1) Berücksichtigung des Fahrzeugpreises als **Kaufpreis**

A3.2) Berücksichtigung der **Wertminderung**:

$$\text{Wertminderung} = \text{Kaufpreis} - \text{Restwert} \quad (3)$$

mit:

$$\text{Restwert} = \text{Kaufpreis} \times (-0,2 \times \ln(\text{Haltedauer}) + 0,667) \quad (4)$$

nach (Stewart und Dodson 2016); Haltedauer in Jahren

B) Energiekosten

$$\begin{aligned} \text{Energiekosten (Haltezeit)} & \quad (5) \\ & = \text{Kosten je Energieträger} \times \text{Energieverbrauch (WLTP)} \\ & \quad \times \text{Gesamtkilometerleistung} \end{aligned}$$

Dabei ist:

$$\text{Gesamtkilometerleistung} = \text{Haltedauer} \times \text{Jahresfahrleistung} \quad (6)$$

Haltedauer in *Jahren*; Jahresfahrleistung in *km*

B1) Für den Energieträger „Strom“ sind sowohl die *Kosten für Strom an einer eigenen Ladestation* als auch für *Strom an einer öffentlichen Ladestation* festzusetzen (Tabellenblatt „Grunddaten“ N1-III (zGG

> 1.760 kg) Default-Werte liegen vor). Gemäß dem festzusetzenden *Anteil des Ladens an eigener Ladestation* (Tabellenblatt „Input_Beschaffung“) wird aus den beiden Kostenangaben ein gewichteter effektiver Wert für die Stromkosten berechnet.

B2) Bei Plug-in-Hybriden (PHEV) stellen die WLTP-Emissions- und Verbrauchsangaben einen Mischwert zwischen Fahren im rein elektrischen und im reinen Verbrenner-Betrieb dar. Verschiedene Studien haben gezeigt, dass die Herstellerangaben (WLTP-Werte) in der Praxis schwer zu erreichen sind (Jöhrens et al. 2020; Plötz et al. 2022). Der den WLTP-Werten zugrunde liegende Utility-Factor (Anteil elektrischen Fahrens) kann nach einer Formel aus (Plötz und Jöhrens 2021) und der rein elektrischen Reichweite berechnet werden. Über den so errechneten Utility-Factor können der Verbrauch im rein elektrischen und im reinen Verbrenner-Betrieb berechnet werden. Über einen realitätsnahen, empirisch ermittelten Utility-Factor aus (Plötz und Jöhrens 2021) wird aus den WLTP-Werten für den rein elektrischen und den reinen Verbrenner-Betrieb ein realitätsnaher *Energieverbrauch* für den kombinierten Fahrbetrieb ermittelt. Bei Antriebsart „PHEV“ werden diese Kraftstoff- bzw. Stromverbrauchswerte für die weiteren Berechnungen verwendet.

Die detaillierten Berechnungsschritte finden Sie im Anhang A3.

C) Externe Umweltkosten Betrieb des Fahrzeuges

Da der Kraftstoffverbrauch in verschiedenen Ausgangseinheiten angegeben ist, wird er nach den Umrechnungsfaktoren in Tabelle 1 in MJ/km umgerechnet. Zur Berechnung der Treibhausgas(THG)-Emissionen je Ausgangseinheit werden die THG-Emissionen je MJ (Tabelle 2) mit den Werten aus Tabelle 1 multipliziert, sodass sich die THG-Emissionen je Ausgangseinheit in Tabelle 3 ergeben.

Die *externen Umweltkosten Betrieb* (Auspuff-/Tailpipe-Emissionen - Tank-to-Wheel (TTW)) sind die Summe aus:

NO_x-, Partikel- und CO₂-Emissionen (jeweils in g/km) laut Typgenehmigung nach WLTP multipliziert mit den jeweiligen *Umweltkosten* (€/g bzw. €/t) gemäß Tabelle 5 multipliziert mit der *Gesamtkilometerleistung* nach Formel (6):

Externe Umweltkosten Betrieb

$$\begin{aligned}
 &= (NO_x\text{Emissionen (WLTP)} \times NO_x\text{Kosten} \\
 &+ \text{Partikelemissionen (WLTP)} \times \text{Partikelkosten} \\
 &+ CO_2\text{Emissionen (WLTP)} \times CO_2\text{Kosten}) \\
 &\times \text{Gesamtkilometerleistung}
 \end{aligned} \tag{7}$$

- C1) Bei Plug-in-Hybriden (PHEV) erfolgt die Berechnung der THG-Emissionen analog zu den *externen Umweltkosten Vorkette* nach D) auf Basis des realitätsnahen *Energieverbrauchs* nach Formel (19), jedoch mit den Emissionen in g/km gemäß Tabelle 3, Spalte „TTW“:

Externe CO₂ Kosten Betrieb

$$\begin{aligned}
 &= \text{Kombinierter Kraftstoffverbrauch}_{real} \\
 &\times CO_2\text{Emissionen (TTW)} \times CO_2\text{Kosten} \\
 &\times \text{Gesamtkilometerleistung}
 \end{aligned} \tag{8}$$

Die Berechnung der Umweltkosten der Luftschadstoff-Emissionen der PHEV erfolgt analog zu den reinen Verbrennerfahrzeugen, also laut Typgenehmigung nach WLTP (siehe Formel (7), ohne den Term für die CO₂-Emissionen).

D) Externe Umweltkosten Vorkette der Energiebereitstellung

Zur Berechnung der THG-Emissionen, die bei der Erzeugung und Bereitstellung der fossilen Kraftstoffe (Vorkette, Well-to-Tank (WTT)) für den Betrieb eines Fahrzeuges über dessen Haltedauer anfallen, werden der *Energieverbrauch* wie in B), die CO₂-Emissionen in Gramm je Ausgangseinheit gemäß Tabelle 3, die CO₂-Umweltkosten je Tonne (€/t) gemäß Tabelle 5 und die *Gesamtkilometerleistung* gemäß Formel (6) miteinander multipliziert:

Externe Umweltkosten Vorkette

$$\begin{aligned}
 &= \text{Energieverbrauch} \times CO_2\text{Emissionen (WTT)} \times CO_2\text{Kosten} \\
 &\times \text{Gesamtkilometerleistung}
 \end{aligned} \tag{9}$$

- D1) Die THG-Emissionen der Stromerzeugung werden als mittlerer Strommix über die Haltedauer mithilfe der jährlichen Emissionsfaktoren in Tabelle 4 wie folgt berechnet:

Mittlerer Strommix =

$$\frac{\text{Summe der jährlichen Emissionsfaktoren (Anschaffungsjahr bis Ende Haltedauer)}}{\text{Haltedauer}} \tag{10}$$

Beispiel: Anschaffungsjahr 2024, Haltedauer 7 Jahre

→ Mittelwert für die Haltedauer 2024-2030:

Mittlerer Strommix = (408 + 371 + 331 + 291 + 252 + 212 + 172)/7 = 291 g CO₂eq/kWh

Dieser Wert ist in Formel (9) für *CO₂Emissionen (WTT)* einzusetzen.

E) Externe Umweltkosten der Antriebsbatterieherstellung

- E1) Die externen Umweltkosten für die Herstellung der Antriebsbatterie (bei BEV und PHEV) berechnen sich aus der Brutto-Kapazität der Batterie in kWh multipliziert mit den festgesetzten THG-Emissionen in kg/kWh Batteriekapazität gemäß Tabelle 6 und den CO₂-Umweltkosten je Tonne (€/t) gemäß Tabelle 5:

$$\begin{aligned} & \textit{Externe Umweltkosten Antriebsbatterie gesamt} \\ & = \textit{Batteriekapazität (netto)} \times \textit{THG Emissionen Herstellung} \\ & \times \textit{CO}_2\textit{Kosten} \end{aligned} \quad (11)$$

- E2) Der gemäß Formel (11) berechnete Wert wird durch eine angenommene Lebensdauer der Batterie von 220.000 km (nach (Biemann et al. 2024)) dividiert und mit der *Gesamtfahrleistung* (nach Formel (6)) multipliziert und somit nur auf die Haltedauer abgeschrieben:

$$\begin{aligned} & \textit{Externe Umweltkosten Antriebsbatterie Haltedauer} \\ & = \frac{\textit{Externe Umweltkosten Antriebsbatterie gesamt}}{220.000 \textit{ km}} \\ & \times \textit{Gesamtfahrleistung} \end{aligned} \quad (12)$$

Wenn die *Jahresfahrleistung* unter 13.750 km liegt und somit nach 16 Jahren keine 220.000 km Lebensfahrleistung erreicht werden, wird der gemäß Formel (11) berechnete Wert durch den entsprechend niedrigeren Wert (*Jahresfahrleistung* multipliziert mit 16 Jahren) dividiert.

Beispiel: Angenommene Jahresfahrleistung = 10.000 km:

$$\begin{aligned} & \textit{Externe Umweltkosten Antriebsbatterie Haltedauer} \\ & = \frac{\textit{Externe Umweltkosten Antriebsbatterie gesamt}}{10.000 \textit{ km} \times 16 \textit{ Jahre}} \\ & \times \textit{Gesamtfahrleistung} \end{aligned} \quad (13)$$

F) Optional: Weitere jährliche Kosten

Im Tabellenblatt „Eingabe_Angebotswerte“ können unter „Weitere jährliche Kosten“ von der Vergabestelle definierte Kostenbestandteile in der LZK-Berechnung berücksichtigt werden. Hierzu müssen die Angaben in der Einheit *EUR/Jahr* eingetragen werden. Die Kostenbestandteile werden wie folgt für die LZK-Ergebnisse verrechnet:

$$\textit{Kostenbestandteil}_x = \textit{Jährliche Kosten}_x \times \textit{Haltedauer} \quad (14)$$

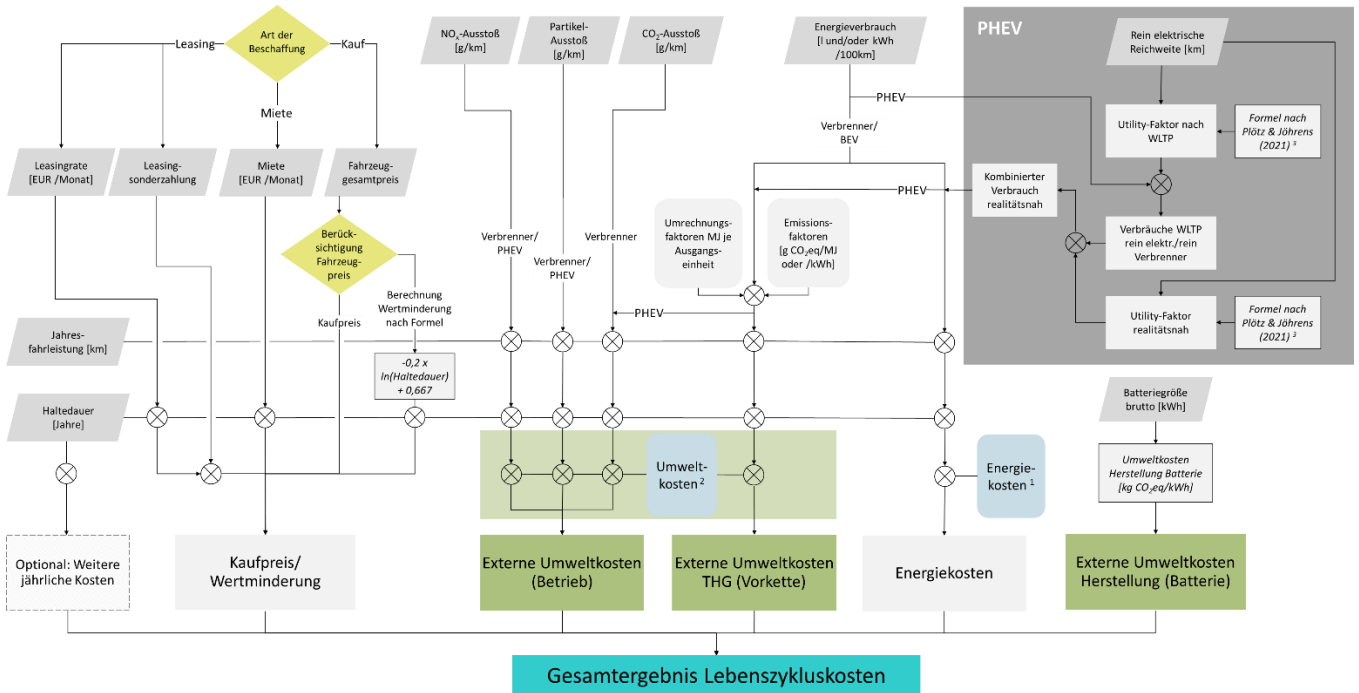
Beispiel: Kfz-Steuer für beispielhaften Diesel-Pkw 200 €/Jahr, Haltedauer 7 Jahre
Kfz-Steuer = 200 €/Jahr x 7 Jahre = 1.400 €

Quellenverzeichnis

- ADAC (2024): Spritpreis-Entwicklung: Benzin- und Dieselpreise seit 1950. <https://www.adac.de/verkehr/tanken-kraftstoff-antrieb/deutschland/kraftstoff-preisentwicklung/#seit-2021>. (24.09.2024).
- Allekotte, M.; Biemann, K.; Colson, M.; Heidt, C.; Kräck, J.; Knörr, W. (2024): Aktualisierung TREMOD/TREMOD-MM und Ermittlung der Emissionsdaten des Verkehrs nach KSG im Jahr 2023. Umweltbundesamt.
- BDEW (2024): BDEW-Strompreisanalyse Juli 2024. <https://www.bdew.de/service/daten-und-grafiken/bdew-strompreisanalyse/>. (24.09.2024).
- Biemann, K.; Helms, H.; Münter, D.; Liebich, A.; Pelzeter, J.; Kämper, C. (2024): Analyse der Umweltbilanz von Kraftfahrzeugen mit alternativen Antrieben oder Kraftstoffen auf dem Weg zu einem treibhausgasneutralen Verkehr. Umweltbundesamt (UBA), ifeu - Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg.
- CNG-Club (2024): In Deutschland und Europa: Problemlos unterwegs mit CNG. https://www.cng-club.de/cng_tankstellen_deutschland_europa. (24.09.2024).
- Jöhrens, J.; Räder, D.; Kräck, J.; Mathieu, L.; Blanck, R.; Kasten, P. (2020): Plug-in hybrid electric cars: Market development, technical analysis and CO₂ emission scenarios for Germany. ifeu, T&E, Öko-Institut.
- Lambrecht, U.; Pelzeter, J.; Bruch, B.; Helms, H. (2023): Entwicklung von geeigneten Instrumenten für die umweltverträgliche Beschaffung von Pkw durch öffentliche Stellen. ifeu - Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg.
- LichtBlick (2024): Ladesäulencheck 2024: Laden unterwegs teurer als Tanken. <https://www.lichtblick.de/ladesaeulencheck/>. (24.09.2024).
- Matthey, A.; Bünger, B. (2020): Methodenkonvention 3.1 zur Ermittlung von Umweltkosten - Kostensätze Stand 12/2020. Umweltbundesamt (UBA).
- Plötz, P.; Jöhrens, J. (2021): Realistic Test Cycle Utility Factors for Plug-in Hybrid Electric Vehicles in Europe. Fraunhofer Institute for Systems and Innovation Research ISI.
- Plötz, P.; Link, S.; Ringelschwendner, H.; Keller, M.; Moll, C.; Bieker, G.; Dornoff, J.; Mock, P. (2022): Real-world usage of plug-in hybrid vehicles in Europe: A 2022 update on fuel consumption, electric driving, and CO₂ emissions. Fraunhofer ISI, ICCT.
- Stewart, A.; Dodson, T. (2016): Low carbon cars in the 2020s: Consumer impacts and EU policy implications - Final report. BEUC.
- UBA (2024a): Entwicklung der spezifischen Treibhausgas-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 - 2023. Umweltbundesamt.
- UBA (2024b): Gesellschaftliche Kosten von Umweltbelastungen - Klimakosten von Treibhausgas-Emissionen. Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/umwelt-wirtschaft/gesellschaftliche-kosten-von-umweltbelastungen#klimakosten-von-treibhausgas-emissionen>. (21.08.2024).

Anhang

A1 Schematische Darstellung der Lebenszykluskosten-Berechnung



¹ Die Stromkosten werden zusätzlich in Abhängigkeit des Anteils Laden eigene Säule/öffentlich (Reiter *Input_Beschaffung*) berechnet.

² Die CO₂-Kosten lassen sich zusätzlich im Reiter *Input_Beschaffung* einstellen.

³ Plötz, P. & Jöhrens, J. (2021): Realistic Test Cycle Utility Factors for Plug-in Hybrid Electric Vehicles in Europe. Karlsruhe: Fraunhofer Institute for Systems and Innovation Research ISI

Abbildung 5: Schematische Darstellung der Lebenszykluskosten-Berechnung

A2 Tabellen

Tabelle 1: Umrechnungsfaktoren Energieträger; Quelle: TREMOD (Allekotte et al. 2024)

Energieträger	Ausgangseinheit	Umrechnung in MJ
Diesel	1 l	35,5 MJ
Benzin	1 l	32,3 MJ
Erdgas (CNG)	1 kg	46,5 MJ

Tabelle 2: Treibhausgas(THG)-Emissionen Tailpipe (Tank-to-Wheel, TTW) & Vorkette (Well-to-Tank, WTT); Quelle: TREMOD (Allekotte et al. 2024)

Energieträger	TTW	WTT	Einheit
Diesel	74,0	23,4	g CO ₂ eq/MJ
Benzin	72,8	23,2	g CO ₂ eq/MJ
Erdgas (CNG)	56,2	20,3	g CO ₂ eq/MJ

Tabelle 3: THG-Emissionen Energieträger je Ausgangseinheit (berechnet aus Tabelle 1 und Tabelle 2)

Energieträger	TTW	WTT	Einheit
Diesel	2.631	832	g CO ₂ eq/l
Benzin	2.352	750	g CO ₂ eq/l
Erdgas (CNG)	2.614	944	g CO ₂ eq/kg

Tabelle 4: THG-Emissionen der Stromerzeugung in Deutschland – Emissionsfaktoren pro Jahr

Jahr	THG-Emissionen [g CO ₂ eq/kWh]	Quelle
2023	445	(UBA 2024a)
2024	408	interpoliert
2025	371	TREMODO: (Allekotte et al. 2024)
2026	331	interpoliert
2027	291	interpoliert
2028	252	interpoliert
2029	212	interpoliert
2030	172	TREMODO: (Allekotte et al. 2024)
2031	159	interpoliert
2032	146	interpoliert
2033	132	interpoliert
2034	119	interpoliert
2035	106	TREMODO: (Allekotte et al. 2024)
2036	100	interpoliert
2037	94	interpoliert
2038	88	interpoliert
2039	82	interpoliert
2040	76	TREMODO: (Allekotte et al. 2024)
2041	76,4	interpoliert
2042	76,8	interpoliert
2043	77,2	interpoliert
2044	77,6	interpoliert
2045	78,0	interpoliert
2046	78,4	interpoliert
2047	78,8	interpoliert
2048	79,2	interpoliert
2049	79,6	interpoliert
2050	80	TREMODO: (Allekotte et al. 2024)

Tabelle 5: Externe Umweltkosten; Quellen: siehe (Lambrecht et al. 2023; UBA 2024b)

Emissionen	Kosten	Einheit
Treibhausgase (CO ₂ eq)	250 / 860	EUR/t CO ₂ eq
NO _x (Stickoxide)	0,02	EUR/g
Partikelförmige Abgasbestandteile	0,15	EUR/g

Tabelle 6: THG-Emissionen der Antriebsbatterie-Herstellung; Quelle: (Biemann et al. 2024); Referenz-Batteriechemie: NMC 622

Komponente	THG-Emissionen	Einheit
Antriebsbatterie-Herstellung	84	kg CO ₂ eq/kWh

Tabelle 7: Kosten der Energieträger

Energieträger	Kosten	Einheit	Quelle
Strom eigene Ladestation	41,4	ct/kWh	(BDEW 2024)
Strom externe Ladestation	59,0	ct/kWh	(LichtBlick 2024), Mittelwert aus Preisen für Normalladen (AC) und Schnellladen (DC)
Diesel	1,672	EUR/l	(ADAC 2024), Mittelwert März-August 2024
Benzin	1,788	EUR/l	(ADAC 2024), Mittelwert März-August 2024, Super E10
Erdgas (CNG)	1,30	EUR/kg	(CNG-Club 2024)

A3 Berechnung des Energieverbrauchs bei Plug-in-Hybrid-Fahrzeugen (PHEV)

Der den WLTP-Werten zugrunde liegende Utility-Factor UF_{WLTP} (Anteil elektrischen Fahrens an den gefahrenen Kilometern) kann nach (Plötz und Jöhrens 2021) aus der rein elektrischen Reichweite (Rein el. Reichweite) abgeschätzt werden. Folgende Formel zur Bestimmung von UF_{WLTP} wurde aus (Plötz und Jöhrens 2021) abgeleitet:

$$\begin{aligned}
 UF_{WLTP} = & 0,0057 \times \left(\frac{\text{Rein el. Reichweite}}{23} \right)^3 \\
 & - 0,0838 \times \left(\frac{\text{Rein el. Reichweite}}{23} \right)^2 \\
 & + 0,4261 \times \left(\frac{\text{Rein el. Reichweite}}{23} \right) + 0,1633
 \end{aligned} \quad (15)$$

Über den so errechneten Utility-Factor können der WLTP-Verbrauch im Elektro- und im Verbrenner-Modus berechnet werden:

$$\begin{aligned}
 & \text{Verbrauch Verbrennermodus}_{WLTP} \\
 = & \frac{\text{Kombinierter Kraftstoffverbrauch}_{WLTP}}{1 - 0,9 \times UF_{WLTP}}
 \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned}
 & \text{Verbrauch Elektromodus}_{WLTP} \\
 = & \frac{\text{Kombinierter Stromverbrauch}_{WLTP}}{UF_{WLTP}}
 \end{aligned} \quad (17)$$

Aus realitätsnahen, empirisch ermittelten Verbrauchsdaten haben (Plötz und Jöhrens 2021) eine neue Regressionskurve für einen realitätsnahen Utility-Factor (UF_{real}) gebildet. Die aus (Plötz und Jöhrens 2021) abgeleitete Formel lautet wie folgt:

$$\begin{aligned}
 UF_{real} = & 0,0021 \times \left(\frac{\text{Rein el. Reichweite}}{23} \right)^3 - 0,0358 \times \left(\frac{\text{Rein el. Reichweite}}{23} \right)^2 \\
 & + 0,2607 \times \left(\frac{\text{Rein el. Reichweite}}{23} \right) + 0,0267
 \end{aligned} \quad (18)$$

Aus den WLTP-Werten für die Verbräuche im Verbrenner- und im Elektromodus und dem realitätsnahen Utility-Factor (UF_{real}) wird ein realitätsnaher *Energieverbrauch* für den kombinierten Fahrbetrieb ermittelt:

$$\begin{aligned}
 & \text{Kombinierter Kraftstoffverbrauch}_{real} \\
 = & \frac{\text{Verbrauch Verbrennermodus}_{WLTP}}{1 - 0,9 \times UF_{real}}
 \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned}
 & \text{Kombinierter Stromverbrauch}_{real} \\
 = & \frac{\text{Verbrauch Elektromodus}_{WLTP}}{UF_{real}}
 \end{aligned} \quad (20)$$

Bei Antriebsart „PHEV“ werden diese Kraftstoff- bzw. Stromverbrauchswerte für die weiteren Berechnungen verwendet.