



INSTITUT FÜR ENERGIE-
UND UMWELTFORSCHUNG
HEIDELBERG

Senatsverwaltung
für Mobilität, Verkehr,
Klimaschutz und Umwelt

BERLIN



LAND
BRANDENBURG
Ministerium für Landwirtschaft,
Umwelt und Klimaschutz



Dokumentation des Pkw-Lebenszykluskosten-Rechners

Bernhard Bruch, Udo Lambrecht, Julia Pelzeter

Heidelberg, 23.08.2023 – Version 1.1

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



Die hier vorliegenden Berechnungsschritte und Datengrundlagen sind noch nicht Bestandteil der Landesvorschriften und bedürfen noch einer juristischen Prüfung.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	2
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	8
D) Externe Umweltkosten Vorkette der Energiebereitstellung	9
E) Externe Umweltkosten der Antriebsbatterieherstellung	10
Quellenverzeichnis	11
Anhang	12
A1 Schematische Darstellung der Lebenszykluskosten-Berechnung	12
A2 Tabellen	13
A3 Berechnung des Energieverbrauchs bei Plug-in-Hybrid-Pkw (PHEV)	16

1 Übersicht

Öffentliche Auftraggeber müssen bei der Beschaffung von Straßenfahrzeugen neben dem Fahrzeugpreis auch den Energieverbrauch und die Umweltauswirkungen berücksichtigen (Baron und Gröger 2019). Mit dem Ansatz der Lebenszykluskosten-Berechnung können bei der Angebotsbewertung 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:

Excel-Reiter

Ergebnisse_LZK

- A) Anschaffungskosten/Fahrzeugpreis bzw. Wertminderung
- B) Energiekosten
- C) Externe Umweltkosten Betrieb
- D) Externe Umweltkosten Energiebereitstellung
- E) Externe Umweltkosten der Antriebsbatterieherstellung

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

Excel-Reiter

Ergebnisse_Umweltkosten

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

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

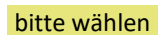
Zur besseren Bedienbarkeit sind die editierbaren Felder ihrer Funktion nach mit verschiedenen Farben gekennzeichnet:



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.

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

Der Pkw-Lebenszykluskosten-Rechner wird als Excel-Datei auf der Website www.nachhaltige-oeffentliche-pkw-beschaffung.de unter „Downloads“ bereitgestellt.

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 Bietern mitzuteilen. Für einen Teil der Werte sind Default-Werte im Rechentool hinterlegt und können bei Bedarf im *Excel-Reiter „Grunddaten“* geändert werden.

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

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

Im Excel-Reiter „Input_Projekt“ kann ein Wert für die CO₂-Kosten ausgewählt werden. Mit der Einstellung „niedrig“ werden 200 €/t CO₂ zu Grunde gelegt. Die Einstellung „hoch“ bewirkt Kosten von 500 €/t CO₂. Die Ableitung der Werte ist in (Lambrecht et al. 2023) beschrieben.

Alternative CO₂-Kosten können Sie ggf. im Abschnitt "Energie- + Umweltkosten" im *Excel-Reiter „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 *Excel-Reiter „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 *Excel-Reiter „Grunddaten“* eingeben.
- **Anteil Strom aus eigener Ladestation** (Default-Wert: 50 %)
- **Kilometerlaufleistung pro Jahr**
- **Haltedauer**
- Berücksichtigung des vollen Fahrzeugpreises oder Berechnung der Wertminderung nach (Stewart und Dodson 2016)

➔ Im Excel-Tool zu finden im Excel-Reiter „Input_Projekt“ (siehe Abbildung 2)

Angaben zu den Energieträgern			
Energieträger	Energiepreis		
	Eigene Werte	nutzen	Einheit
Strom eigene Ladestation	46,3		ct/kWh
Strom externe Ladestation	55,2		ct/kWh
Diesel	1,659		EUR/l
Benzin	1,784		EUR/l
Erdgas (CNG)	1,20		EUR/kg

Externe Umweltkosten - Annahmen			
Welche externen Umweltkosten sollen in der LZK-Berechnung berücksichtigt werden?			
	Eigene Werte		
	nutzen		Einheit
Externe Umweltkosten Treibhausgasemissionen	500		EUR/t CO ₂ eq
Externe Umweltkosten NOx (Stickoxide)	0,02		EUR/g
Externe Umweltkosten Partikel	0,15		EUR/g

Abbildung 1: Tabelle im LZK-Rechner mit Default-Werten und Möglichkeit zur Eingabe eigener Kosten der Energieträger und Umweltkosten im Excel-Reiter „Grunddaten“

Jahresfahrleistung pro Pkw	20.000	km/Jahr
Art der Beschaffung	Kauf	
Haltedauer	7	Jahre
Berücksichtigung des Fahrzeugpreises in der Lebenszykluskosten-Berechnung	Wertminderung	
CO ₂ -Kosten	(Hoch) 500	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 Excel-Reiter „Input_Projekt“

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 *Excel-Reiter* „Eingabe_Angebotswerte“ ausfüllen; siehe Abbildung 3):

- Kaufpreis/Leasingrate/Mietkosten
- Antriebsart
- Art des Energieträgers
- Kraftstoff-/Stromverbrauch nach WLTP
- CO₂-Emissionen (g/km) nach WLTP
- NO_x-Emissionen (g/km) nach WLTP
- Partikelemissionen (g/km) nach WLTP
- Bei Plug-in-Hybrid-Pkw (PHEV): Rein elektrische Reichweite nach WLTP
- Bei rein elektrischen Pkw (BEV) und PHEV: Batteriegröße brutto (kWh)

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

Abbildung 3: Angaben von Bietenden im Excel-Reiter „Eingabe Angebotswerte“

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
		VW ID.3 Vollelektrisch (BEV) Strom	VW Golf 2.0 TDI Verbrenner	Opel Astra 1.5 Diesel Verbrenner	Kia Niro 1.6 GDI Plug-In- Hybrid (PHEV) Benzin	Renault Mégane E- TECH Plug-In- Hybrid (PHEV) Benzin
Kaufpreis	EUR	38.060	31.300	31.850	36.690	38.000
Wertminderung	EUR	27.486	22.604	23.001	26.497	27.443
Energiekosten	EUR	10.863	10.792	10.312	11.185	10.901
Externe Umweltkosten (Betrieb)	EUR	0	8.299	8.065	4.878	4.169
Externe Umweltkosten THG (Vorkette)	EUR	3.751	1.785	1.706	2.349	2.467
Externe Umweltkosten Herstellung (Batterie)	EUR	1.775	0	0	344	281
Total	EUR	43.877	43.481	43.085	45.254	45.261
Rangfolge nach Lebenszykluskosten		3	2	1	4	5

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

A) Anschaffungskosten/Fahrzeugpreis bzw. Wertminderung

Diese Einstellungen werden im *Excel-Reiter* „Input_Projekt“ 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 (*Excel-Reiter „Grunddaten“; Default-Werte liegen vor*). Gemäß dem festzusetzenden *Anteil des Ladens an eigener Ladestation (Excel-Reiter „Input_Projekt“)* wird aus den beiden Kostenangaben ein gewichteter effektiver Wert für die Stromkosten berechnet.
- B2) Bei Plug-in-Hybrid-Pkw (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 zu Grunde 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

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 in Tabelle 3 die THG-Emissionen je Ausgangseinheit 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-Hybrid-Pkw (PHEV) erfolgt die Berechnung der THG-Emissionen analog zu den *externen Umweltkosten Vorkette* nach D) auf Basis des realitätsnahen *Energieverbrauchs* nach Formel (17), 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 Pkw 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) Zur Berechnung der THG-Emissionen der Stromerzeugung wird, abhängig von der Haltedauer, der jeweilige retrospektive mittlere Strommix nach Tabelle 4 herangezogen.

Beispiel: Beschaffungsjahr 2023, Haltedauer 5 Jahre → Referenzjahr: 2028
 → Retrospektiver Mittelwert laut Tabelle 4 für das Jahr 2028: 369 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:

$$\begin{aligned}
 & \textit{Externe Umweltkosten Antriebsbatterie gesamt} \\
 & = \textit{Batteriekapazität (netto)} \times \textit{THG Emissionen Herstellung} \\
 & \times \textit{CO}_2\textit{Kosten}
 \end{aligned}
 \tag{10}$$

- E2) Der gemäß Formel (10) berechnete Wert wird durch eine angenommene Lebensdauer der Batterie von 220.000 km (nach (Biemann et al. 2023)) dividiert und mit der *Gesamtfahrleistung* (nach Formel (6)) multipliziert und somit nur auf die Haltedauer abgeschrieben:

$$\begin{aligned}
 & \textit{Externe Umweltkosten Antriebsbatterie Haltedauer} \\
 & = \frac{\textit{Externe Umweltkosten Antriebsbatterie gesamt}}{220.000 \textit{ km}} \\
 & \times \textit{Gesamtfahrleistung}
 \end{aligned}
 \tag{11}$$

Wenn die *Jahresfahrleistung* unter 13.750 km liegt und somit nach 16 Jahren keine 220.000 km Lebensfahrleistung erreicht werden, wird der gemäß Formel (10) berechnete Wert durch den entsprechend niedrigeren Wert (*Jahresfahrleistung* multipliziert mit 16 Jahren) dividiert.

Beispiel: Angenommene Jahresfahrleistung = 10.000 km:

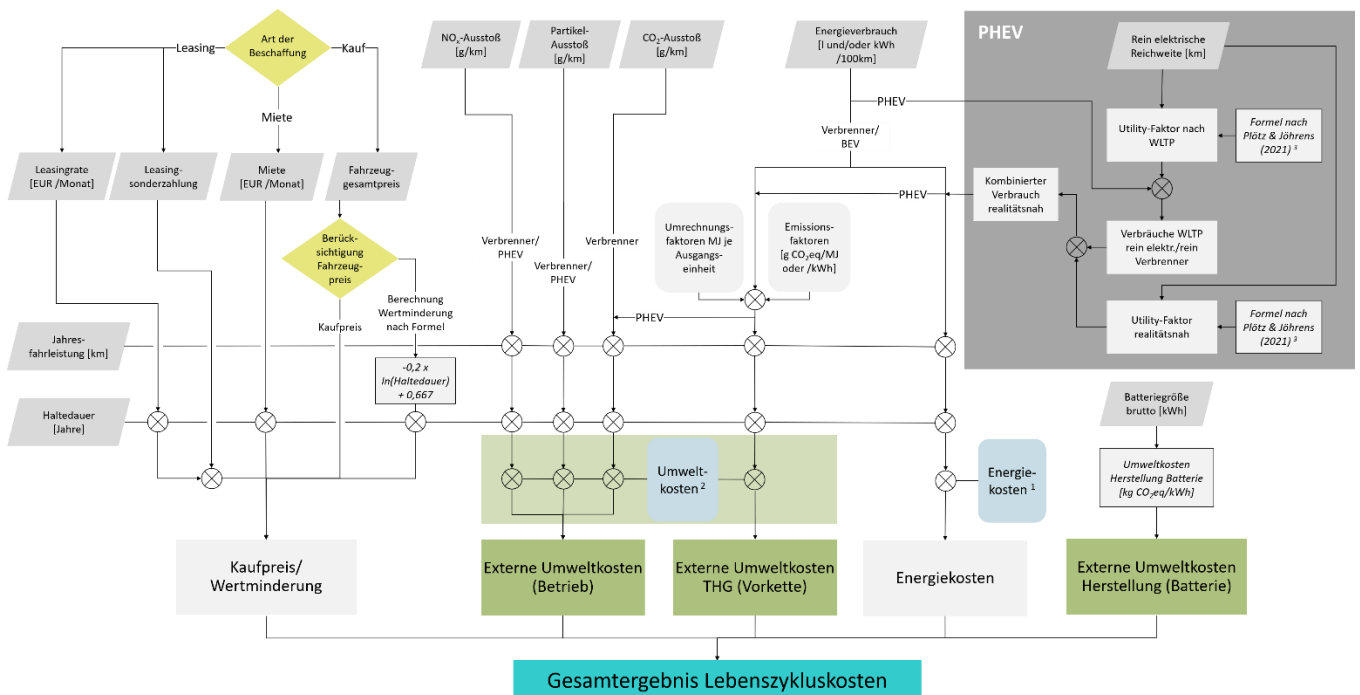
$$\begin{aligned}
 & \textit{Externe Umweltkosten Antriebsbatterie Haltedauer} \\
 & = \frac{\textit{Externe Umweltkosten Antriebsbatterie gesamt}}{10.000 \textit{ km} \times 16 \textit{ Jahre}} \\
 & \times \textit{Gesamtfahrleistung}
 \end{aligned}
 \tag{12}$$

Quellenverzeichnis

- ADAC (2023a): Erdgas: CNG-Antrieb ohne Zukunft. <https://www.adac.de/verkehr/tanken-kraftstoff-antrieb/alternative-antriebe/erdgas/>. (15.08.2023).
- ADAC (2023b): Spritpreis-Entwicklung: Benzin- und Dieselpreise seit 1950. <https://www.adac.de/verkehr/tanken-kraftstoff-antrieb/deutschland/kraftstoff-preisentwicklung/#seit-2021>. (15.08.2023).
- AGEB (2023): Energieeinheitenumrechner - AG Energiebilanzen e.V. <https://ag-energiebilanzen.de/energieeinheitenumrechner/>. (17.05.2023).
- Baron, Y.; Gröger, J. (2019): Umweltfreundliche Beschaffung - Schulungsskript 2: Einführung in die Berechnung von Lebenszykluskosten und deren Nutzung im Beschaffungsprozess. Umweltbundesamt (UBA).
- BDEW (2023): BDEW-Strompreisanalyse Juli 2023. <https://www.bdew.de/service/daten-und-grafiken/bdew-strompreisanalyse/>. (15.08.2023).
- Biemann, K.; Helms, H.; Münter, D.; Liebich, A.; Pelzeter, J.; Kämper, C. (2023): Analyse der Umweltbilanz von Kraftfahrzeugen mit alternativen Antrieben oder Kraftstoffen auf dem Weg zu einem treibhausgasneutralen Verkehr - ifeu-Projekt (laufend) für das UBA. Umweltbundesamt (UBA), ifeu - Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg.
- 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.
- 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.
- nextmove (2023): nextmove - Tarifvergleich für Fahrstromanbieter (13.01.2023). <https://nextmove.de/analyse-zum-deutschen-elektroauto-markt/>. (17.05.2023).
- 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.
- TREMODO (2020): Transport Emission Model, ifeu. <https://www.ifeu.de/methoden-tools/modelle/tremod/>.
- UBA (2021): Projektionsberichte (integrierte Energie- und THG-Projektionen). <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimaschutz-energiepolitik-in-deutschland/szenarien-fuer-die-klimaschutz-energiepolitik/integrierte-energie-treibhausgasprojektionen/>.

Anhang

A1 Schematische Darstellung der Lebenszykluskosten-Berechnung



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

² Die CO₂-Kosten lassen sich zusätzlich im Reiter *Input Projekt* 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

Energieträger	Ausgangseinheit	Umrechnung in MJ	Quelle
Diesel	1 l	35,87 MJ	(AGEB 2023)
Benzin	1 l	32,44 MJ	(AGEB 2023)
Erdgas (CNG)	1 kg	46,50 MJ	(TREMODO 2020)

Tabelle 2: Treibhausgas(THG)-Emissionen Tailpipe (Tank-to-Wheel, TTW) & Vorkette (Well-to-Tank, WTT); Quelle: (TREMODO 2020)

Energieträger	TTW	WTT	Einheit
Diesel	74,0	15,8	g CO ₂ eq/MJ
Benzin	75,2	14,2	g CO ₂ eq/MJ
Erdgas (CNG)	55,8	13,7	g CO ₂ eq/MJ

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

Energieträger	TTW	WTT	Einheit
Diesel	2.655	567	g CO ₂ eq/l
Benzin	2.439	461	g CO ₂ eq/l
Erdgas (CNG)	2.567	630	g CO ₂ eq/kg

Tabelle 4: THG-Emissionen der Stromerzeugung in Deutschland

Jahr	Jahreswert [g CO ₂ eq/kWh]	Retrospektiver Mittelwert [g CO ₂ eq/kWh]	Datenherkunft
2022	420	420	(TREMOD 2020)
2023	403	411	interpoliert
2024	385	403	interpoliert
2025	368	394	(UBA 2021)
2026	352	385	interpoliert
2027	336	377	interpoliert
2028	320	369	interpoliert
2029	304	361	interpoliert
2030	288	353	(UBA 2021)
2031	265	344	interpoliert
2032	243	335	interpoliert
2033	221	325	interpoliert
2034	199	316	interpoliert
2035	177	306	(UBA 2021)
2036	159	296	interpoliert
2037	141	286	interpoliert
2038	123	277	interpoliert
2039	105	267	interpoliert
2040	87	258	(UBA 2021)
2041	69	248	interpoliert
2042	51	239	interpoliert
2043	33	229	interpoliert
2044	15	220	interpoliert

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

Umweltwirkungskategorie	Wert	Einheit
Treibhausgas (CO ₂ eq)	200 / 500	EUR/t CO ₂ eq
NO _x (Stickoxide)	0,02	EUR/g
Partikelförmige Abgasbestandteile	0,15	EUR/g

Tabelle 6: Umweltwirkung der Antriebsbatterie-Herstellung; Quelle: (Biemann et al. 2023); Referenz-Batteriechemie: NMC 622

Umweltwirkungskategorie	Wert	Einheit
Treibhausgas (CO ₂ eq)	84	kg CO ₂ eq/kWh

Tabelle 7: Kosten der Energieträger

Energieträger	Kosten	Einheit	Quelle
Strom eigene Ladestation	46,3	ct/kWh	(BDEW 2023)
Strom externe Ladestation	55,2	ct/kWh	(nextmove 2023)
Diesel	1,659	EUR/l	(ADAC 2023b)
Benzin	1,784	EUR/l	(ADAC 2023b)
Erdgas (CNG)	1,20	EUR/kg	(ADAC 2023a)

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

Der den WLTP-Werten zu Grunde 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:

$$UF_{WLTP} = 0,0057 \times \left(\frac{\text{Rein el. Reichweite}}{23}\right)^3 - 0,0838 \times \left(\frac{\text{Rein el. Reichweite}}{23}\right)^2 + 0,4261 \times \left(\frac{\text{Rein el. Reichweite}}{23}\right) + 0,1633 \quad (13)$$

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

$$\frac{\text{Verbrauch Verbrennermodus}_{WLTP}}{\text{Kombinierter Kraftstoffverbrauch}_{WLTP}} = \frac{1}{1 - 0,9 \times UF_{WLTP}} \quad (14)$$

$$\frac{\text{Verbrauch Elektromodus}_{WLTP}}{\text{Kombinierter Stromverbrauch}_{WLTP}} = \frac{1}{UF_{WLTP}} \quad (15)$$

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:

$$UF_{real} = 0,0021 \times \left(\frac{\text{Rein el. Reichweite}}{23}\right)^3 - 0,0358 \times \left(\frac{\text{Rein el. Reichweite}}{23}\right)^2 + 0,2607 \times \left(\frac{\text{Rein el. Reichweite}}{23}\right) + 0,0267 \quad (16)$$

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:

$$\frac{\text{Kombinierter Kraftstoffverbrauch}_{real}}{\text{Verbrauch Verbrennermodus}_{WLTP}} = \frac{1}{1 - 0,9 \times UF_{real}} \quad (17)$$

$$\frac{\text{Kombinierter Stromverbrauch}_{real}}{\text{Verbrauch Elektromodus}_{WLTP}} = \frac{1}{UF_{real}} \quad (18)$$

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