

Ökologische Lebenszyklusanalyse (LCA) von Pkw-Antriebsarten: Ein systemischer Vergleich zwischen Bestandsnutzung und Ersatzbeschaffung

Die Frage, ob es aus ökologischer Sicht sinnvoller ist, ein bestehendes, funktionstüchtiges Fahrzeug mit Verbrennungsmotor bis an das Ende seiner technischen Lebensdauer weiterzunutzen oder es vorzeitig durch ein effizienteres Neufahrzeug zu ersetzen, stellt eines der zentralen Dilemmata der individuellen Mobilitätswende dar. Oftmals dominiert die intuitive und psychologisch nachvollziehbare Annahme, dass die Vermeidung einer industriellen Neuproduktion in jedem Fall die umweltfreundlichste Entscheidung sei. Schließlich sind die im Altfahrzeug gebundene „graue Energie“ sowie der historische CO₂-Rucksack der Rohstoffgewinnung und Fertigung bereits in der Vergangenheit emittiert worden. Eine fundierte, wissenschaftlich haltbare Beantwortung dieser Fragestellung erfordert jedoch eine Abkehr von solchen heuristischen Daumenregeln hin zu einer evidenzbasierten, quantitativen Systemanalyse, die sämtliche Phasen des Produktlebenszyklus rigoros berücksichtigt. Die vorliegende Untersuchung widmet sich detailliert dieser systemischen Gegenüberstellung. Auf Basis neutraler, wissenschaftlicher Primärdaten und aktueller Erhebungen unabhängiger Institutionen wie dem Umweltbundesamt (UBA), den Fraunhofer-Instituten, dem ifeu-Institut sowie dem ADAC wird ein spezifisches, alltagsnahes Fallbeispiel analysiert. Ausgangspunkt der Betrachtung ist ein zehn Jahre altes Benzinfahrzeug mit einem realen Kraftstoffverbrauch von 7,5 Litern pro 100 Kilometer, einer bisherigen Laufleistung von 100.000 Kilometern und einer technologisch zu erwartenden Restlebensdauer von weiteren 100.000 Kilometern. Diesem Bestandsszenario werden zwei Handlungsalternativen für eine hypothetische Ersatzbeschaffung gegenübergestellt: Einerseits der Kauf eines neuen, verbrennungsmotorischen Fahrzeugs, das durch technologischen Fortschritt lediglich 5,0 Liter pro 100 Kilometer verbraucht. Andererseits der Wechsel auf ein modernes, batterieelektrisches Fahrzeug (BEV).

Ein besonderer analytischer Schwerpunkt liegt hierbei auf der oftmals geäußerten Hypothese bezüglich des Fahrzeuggewichts. Es wird im gesellschaftlichen Diskurs häufig postuliert, dass die prinzipiell doppelt oder dreifach so hohe thermodynamische Effizienz des Elektromotors durch das erhebliche Mehrgewicht der Antriebsbatterie im realen Fahrbetrieb wieder aufgezehrt werde. Diese Untersuchung wird die physikalischen Gesetzmäßigkeiten der Fahrdynamik und Thermodynamik aufschlüsseln, um zu klären, in welchem Maß das zusätzliche Gewicht den Energieverbrauch tatsächlich beeinflusst und ob dies die Gesamteffizienz des elektrischen Antriebsstrangs kompromittiert. Ziel ist es, auf Basis der Methodik der

ökologischen Lebenszyklusanalyse (Life Cycle Assessment) zu quantifizieren, an welchem Punkt – wenn überhaupt – der Rucksack der Neuproduktion durch Einsparungen in der Betriebsphase amortisiert wird und welche der drei Handlungsoptionen den geringsten kumulierten Treibhausgasfußabdruck hinterlässt.

Methodische Grundlagen der Ökobilanzierung (LCA) nach ISO-Standards

Um die Umweltauswirkungen verschiedener Antriebstechnologien und komplexer Nutzungsstrategien objektiv, transparent und reproduzierbar vergleichen zu können, bedient sich die moderne Umweltwissenschaft der standardisierten Methode des Life Cycle Assessment (LCA). Diese Methodik ist in den internationalen Normen ISO 14040 und ISO 14044 verbindlich kodifiziert und stellt sicher, dass sämtliche relevanten Stoff- und Energieströme erfasst werden, die während der Rohstoffextraktion, der Bauteilproduktion, der Montage, der eigentlichen Nutzungsphase sowie der finalen Verwertung und Entsorgung (End-of-Life) eines Produkts anfallen.¹

Systemgrenzen und die Allokation historischer Emissionen

Der kritischste und gleichzeitig am häufigsten missverstandene Aspekt beim Vergleich eines Bestandsfahrzeugs mit einer potenziellen Ersatzbeschaffung ist die korrekte zeitliche und bilanzielle Allokation der Produktions- und Entsorgungsemissionen. Für das bestehende, zehn Jahre alte Fahrzeug stellen jene Treibhausgasemissionen, die bei der Förderung der Eisenerze, der Verhüttung von Stahl, der Aluminiumelektrolyse sowie der finalen Montage in der Automobilfabrik entstanden sind, aus umweltökonomischer und bilanzieller Sicht sogenannte „Sunk Costs“ (versunkene Kosten) dar. Sie wurden in der Vergangenheit unweigerlich in die Erdatmosphäre emittiert und können durch gegenwärtige oder zukünftige Konsumententscheidungen unter keinen Umständen mehr rückgängig gemacht oder vermieden werden.

Für eine zukunftsorientierte, rationale Entscheidungsfindung, die ausschließlich die Frage „Weiterbetrieb oder Ersatz?“ beantworten soll, wird das Altfahrzeug daher methodisch korrekt mit einem Produktionsrucksack von exakt null Kilogramm CO₂-Äquivalenten in die ab dem heutigen Tag laufende Vergleichsrechnung überführt. Seine ökologische Last für die noch verbleibenden 100.000 Kilometer bis zum Ende seiner technischen Lebensdauer beschränkt sich folglich ausschließlich auf die direkten und indirekten Emissionen der zukünftigen Betriebsphase sowie die unausweichlichen Emissionen, die bei der zukünftigen Verschrottung und Verwertung anfallen werden.

Im diametralen Gegensatz dazu muss bei der Evaluierung der beiden Neuwagenoptionen (dem effizienteren Verbrenner sowie dem batterieelektrischen Fahrzeug) der gesamte, massive CO₂-Aufwand der Fahrzeugneuproduktion der künftigen Nutzung zugerechnet werden. Jeder eingesparte Liter fossiler Kraftstoff oder jede im Elektromotor genutzte Kilowattstunde erneuerbaren Stroms muss zunächst diesen gewaltigen, initialen Emissionsaufbau kompensieren. Erst wenn die kummulierten Einsparungen im laufenden Betrieb die

Produktionsschuld der Neuanschaffung übersteigen, entsteht ein realer ökologischer Netto-Vorteil gegenüber dem sturen Weiterbetrieb des Altfahrzeugs. Dieser Schnittpunkt definiert den sogenannten ökologischen Amortisationspunkt oder Break-Even-Point.

Die unabdingbare Notwendigkeit der Well-to-Wheel (WTW)

Systematik

Ein weiterer essenzieller Pfeiler der korrekten Ökobilanzierung ist die strikte Abkehr von reinen Auspuffemissionen, in der Fachsprache als Tank-to-Wheel (TTW) bezeichnet. Die isolierte Betrachtung der Vorgänge am Auspuffrohr benachteiligt den Verbrennungsmotor zwar auf den ersten Blick nicht zwangsläufig, unterschlägt jedoch auf eklatante Weise die massiven, global verteilten Emissionen, die entstehen, bevor der Kraftstoff überhaupt in den Tank des Fahrzeugs gelangt. Diese vorgelagerte Kette (Well-to-Tank, WTT) umfasst die Förderung von Rohöl – zunehmend unter extremen und energieintensiven Bedingungen wie Fracking, Tiefseebohrungen oder aus kanadischen Ölsanden –, den globalen maritimen Transport über Ozeane hinweg, den extrem energie- und hitzeintensiven Raffinerieprozess (einschließlich Cracken und Entschwefeln) sowie die finale Distribution per Schwerlastkraftwagen an die lokalen Tankstellennetze.

Führende wissenschaftliche Institute, das Greenhouse Gas Protocol sowie das deutsche Umweltbundesamt weisen unmissverständlich darauf hin, dass für eine korrekte und vollständige Berechnung der Klimawirkung von Mobilitätssystemen zwingend der holistische Well-to-Wheel (WTW) Ansatz gewählt werden muss.³ Analog verhält es sich selbstverständlich bei der Betrachtung des Elektroautos. Da am Elektrofahrzeug selbst lokal keinerlei Verbrennung stattfindet und keine direkten Emissionen entstehen, verlagert sich die gesamte Klimawirkung der automobilen Nutzungsphase vollständig in die Vorkette der industriellen Stromerzeugung (Well-to-Tank). Die ökologische Bewertung eines Elektrofahrzeugs ist daher untrennbar und vollumfänglich mit der Kohlenstoffintensität des jeweils genutzten lokalen oder nationalen Stromnetzes verbunden.³

Die Fahrphysik des Gewichts und die thermodynamische Effizienz

Ein zentrales Argument in Diskussionen um Elektrofahrzeuge ist deren signifikant höheres Leergewicht. Es gilt zu prüfen, in welchem Maß die Effizienzgewinne des Elektromotors durch den erhöhten Energieaufwand, der zur physischen Beschleunigung und Bewegung der schweren Batterie-Pakete notwendig ist, beeinflusst werden.

Reale Gewichtsverhältnisse

Ein genauer Blick auf die realen technischen Spezifikationen moderner Pkw zeigt den Massenunterschied deutlich auf. Zieht man die europäische Kompaktklasse heran, ergibt sich beim direkten Vergleich eines verbrennungsmotorischen Volkswagen Golf 8 mit einem batterieelektrischen Volkswagen ID.3 ein klares Bild. Der VW Golf weist ein Leergewicht von annähernd 1.260 Kilogramm auf, während der VW ID.3 mit seiner Basisausstattung bei etwa

1.772 Kilogramm liegt.⁶

Technische Spezifikation	Volkswagen Golf 8 (ICEV)	Volkswagen ID.3 (BEV)	Relative Differenz
Antriebsart	Benzin (Verbrennungsmotor)	Elektrisch (Batterie)	-
Leergewicht (kg)	1.260 kg	1.772 kg	+ 512 kg (+ 41 %)
Fahrzeuglänge (cm)	428,4 cm	426,2 cm	- 2,2 cm
Fahrzeughöhe (cm)	149,1 cm	155,2 cm	+ 6,1 cm

Das batterieelektrische Fahrzeug ist in dieser vergleichbaren Klasse somit um rund 41 Prozent schwerer. Diese messbare Massendifferenz resultiert primär aus der nach wie vor physikalisch begrenzten gravimetrischen Energiedichte von aktuellen Lithium-Ionen-Batteriesystemen im direkten Vergleich zu flüssigen Kohlenwasserstoffen wie Benzin.⁸ Das Eigengewicht des Akkumulators kann durch den vorteilhaften Entfall des schweren Verbrennungsmotors, des Getriebes und der Abgasanlage lediglich teilweise kompensiert werden.⁸ Bei Fahrzeugen, die für sehr hohe Reichweiten konzipiert sind, können Batterien allein zwischen 600 und 800 Kilogramm wiegen, was das Fahrzeuggewicht oftmals deutlich über zwei Tonnen treibt.

Die Thermodynamik der Antriebsstränge

Die physikalische mechanische Fahrenergie setzt sich additiv aus der Überwindung des aerodynamischen Luftwiderstands, des Rollwiderstands sowie der Trägheit bei der Beschleunigung zusammen. Das Eigengewicht eines Fahrzeugs beeinflusst den Rollwiderstand linear und ist der maßgebliche Faktor für die aufzuwendende Beschleunigungsenergie. Der Luftwiderstand hingegen, der bei Geschwindigkeiten ab etwa 60 bis 70 km/h rasch zur dominierenden Gegenkraft wird, ist von der Masse des Fahrzeugs vollkommen unabhängig. Der systemische Unterschied liegt jedoch im thermodynamischen Wirkungsgrad. Ein Verbrennungsmotor unterliegt den physikalischen Grenzen des Carnot-Kreisprozesses. Im realen Straßenverkehr sinkt der systemische Gesamtwirkungsgrad (Tank-to-Wheel) drastisch auf Werte zwischen 20 und 25 Prozent. Physisch bedeutet dies, dass 75 bis 80 Prozent der chemischen Energie nutzlos als Abwärme an die Umgebung abgegeben werden. Ein Elektromotor wandelt elektrische Energie hingegen über elektromagnetische Felder in mechanische Rotationsenergie um. Dabei werden unter Last Wirkungsgrade von über 90 Prozent erreicht.¹⁰ Berücksichtigt man die Lade- und Wandlungsverluste, verbleibt im Gesamtsystem eine Netz-zu-Rad-Effizienz (Plug-to-Wheel) von realistischen 70 bis 75 Prozent.¹⁰ Der elektrische Antriebsstrang geht somit prinzipiell um den Faktor drei bis vier effizienter mit Energie um als die Verbrennungstechnologie.

Die Rolle der Rekuperation und der Heizbedarf im Winter

Das Elektrofahrzeug kann einen erheblichen Teil der Beschleunigungsenergie durch Rekuperation zurückgewinnen. Bremsst ein Verbrenner, wird die Bewegungsenergie irreversibel in Bremswärme umgewandelt. Beim Elektroauto wird der Elektromotor umgepolt und fungiert

als Generator, der die rollende Masse nutzt, um Strom in die Batterie zurückzuspeisen. Durch diesen physikalischen Prozess wird der Mehrverbrauch durch das höhere Gewicht im Stadt- und Überlandverkehr zu großen Teilen wieder kompensiert.

Ein entscheidender Aspekt für das Gesamtsystem ist jedoch das thermische Management, insbesondere im Winter. Während der Verbrennungsmotor durch seinen schlechten Wirkungsgrad enorme Mengen an Abwärme produziert, die im Winter schlichtweg als kostenlose Heizenergie für den Fahrgastraum genutzt wird, produziert der hocheffiziente Elektromotor kaum nutzbare Abwärme. Ein Elektroauto muss den Innenraum und die Batterie daher zwingend unter direktem Verbrauch von Batteriestrom (meist mittels PTC-Heizelementen oder Wärmepumpen) aktiv heizen.

Umfangreiche Tests des ADAC unter Realbedingungen zeigen, dass der Stromverbrauch von Elektroautos bei winterlichen Temperaturen von -7°C im Vergleich zu sommerlichen 23°C drastisch ansteigt – bei vielen Modellen um 50 bis über 70 Prozent. Dies erhöht den Energiebedarf im Jahresdurchschnitt merklich und reduziert die reale Reichweite an kalten Tagen erheblich.

Detaillierte Quantifizierung der Well-to-Wheel (WTW) Emissionsfaktoren

Um einen Vergleich durchzuführen, müssen die spezifischen Treibhausgas-Emissionsfaktoren der genutzten Energieträger quantifiziert werden.

Die Verbrennung von Ottokraftstoff

Ein Liter Benzin generiert bei der reinen Verbrennung im Zylinder (Tank-to-Wheel) etwa 2,37 Kilogramm CO_2 . Hinzu kommen die Emissionen der fossilen Vorkette (Förderung, Raffinerie, Transport), die vom Umweltbundesamt auf etwa 0,43 bis 0,50 Kilogramm CO_2 -Äquivalente pro Liter beziffert werden.¹¹ Addiert ergibt sich ein Emissionsfaktor (Well-to-Wheel) von durchschnittlich rund 2,8 Kilogramm CO_2 -Äquivalenten für jeden verbrannten Liter Benzin.¹¹

Der deutsche Strommix

Die Umweltbilanz des Elektroautos ist maßgeblich mit der Herkunft des geladenen Stroms verbunden. Die spezifischen Emissionen der deutschen Stromerzeugung sinken kontinuierlich. Während der Wert 2022 noch bei ca. 503 g/kWh lag, schätzt das UBA den Wert inklusive Vorketten für 2024 auf 427 g CO_2 -Äq/kWh.¹³ Unter der Annahme eines sich weiter defossilisierenden Netzes kann für den Strombezug der Jahre 2024 bis 2034 ein gemittelter WTW-Emissionsfaktor von ca. 350 Gramm CO_2 -Äq pro Kilowattstunde (0,35 kg/kWh) als realistische Baseline angesetzt werden.⁵

Die Quantifizierung des CO_2 -Rucksacks der Fahrzeugproduktion

Die Herstellung von Kraftfahrzeugen erfordert große Mengen an Energie und Rohstoffen.

Der vollständige Bau eines konventionellen Fahrzeugs mit Verbrennungsmotor der Kompakt- bis Mittelklasse verursacht einen initialen Emissionsrucksack von etwa 6 bis 8 Tonnen CO₂-Äquivalenten (hier angesetzt mit 7,0 t CO₂).¹⁴ Für das in der Fragestellung benannte, zehn Jahre alte Altfahrzeug sind diese Emissionen bereits in der Vergangenheit angefallen ("Sunk Costs") und werden bei der Entscheidung für den Weiterbetrieb konsequent mit Null bewertet. Die Herstellung eines Elektroautos ist aufgrund der Lithium-Ionen-Batterie spürbar CO₂-intensiver. Das ifeu-Institut beziffert den Produktionsaufwand für aktuelle Lithium-Ionen-Zellen auf rund 77 bis 100 Kilogramm CO₂ pro Kilowattstunde (kWh) Speicherkapazität.¹⁷

Quantitative Szenario-Modellierung auf Basis gleicher Reichweitenanforderungen

Basierend auf den Vorgaben und physikalischen Realitäten lässt sich die Systemmodellierung für die anstehenden 100.000 Kilometer durchführen.

Um eine objektive Vergleichbarkeit zu gewährleisten, wird hier dem Wunsch nach "gleicher Reichweite" entsprochen. Ein typischer Verbrenner mit einem 50-Liter-Tank und 7,5 Litern Verbrauch hat eine reale Reichweite von rund 660 Kilometern. Um diese Flexibilität und Unabhängigkeit (insbesondere für berufliche Vielfahrer oder bei langen Winterfahrten mit Heizbedarf) auch im Elektroauto sicherzustellen, bedarf es keines Kleinwagens, sondern eines langstreckentauglichen Fahrzeugs der oberen Mittelklasse mit einer großen Batterie von 100 kWh Kapazität (wie z. B. einem Nio ET7, VW ID.7 Pro S oder Mercedes EQS).

Zusammenfassung der verbindlichen Randbedingungen des Modells:

- **Betrachtungsdistanz:** 100.000 km
- **Emissionsfaktor Benzin (WTW):** 2,8 kg CO₂ pro Liter.
- **Emissionsfaktor Stromnetz (WTW, Prognose 2024-2034):** 0,35 kg CO₂ pro kWh.

Szenario A: Der reine Weiterbetrieb des Altfahrzeugs

Das zehn Jahre alte Bestandsfahrzeug hat seinen Produktionsrucksack abgeschrieben.

- **Zugeordnete Produktionsemissionen:** 0 t CO₂ (Sunk Costs)
- **Gesamter Kraftstoffverbrauch für 100.000 km:** 7.500 Liter
- **Nutzungsemissionen (WTW Systemgrenze):** 7.500 Liter × 2,8 kg CO₂/L = 21.000 kg CO₂
- **Gesamtemissionen Szenario A:** 21,0 Tonnen CO₂

Szenario B: Neuanschaffung eines hochgradig effizienten Benziners

Es wird der Kauf eines sparsameren Verbrenners evaluiert, der den Verbrauch auf 5,0 Liter pro 100 Kilometer senkt.

- **Initialer Produktionsrucksack (Karosserie + Antrieb):** ca. 7,0 t CO₂
- **Gesamter Kraftstoffverbrauch für 100.000 km:** 5.000 Liter
- **Nutzungsemissionen (WTW Systemgrenze):** 5.000 Liter × 2,8 kg CO₂/L = 14.000 kg CO₂

- **Gesamtemissionen Szenario B:** 7,0 t (Bau) + 14,0 t (Betrieb) = **21,0 Tonnen CO₂**

Erkenntnis zu Szenario B: Der ökologische Rucksack der Herstellung (7 Tonnen CO₂) frisst die Einsparungen an der Zapfsäule exakt auf. Aus ökologischer Sicht ist der Ersatz eines alten Verbrenners durch einen neuen Verbrenner über diese Distanz ein Nullsummenspiel.

Szenario C: Neuanschaffung eines Langstrecken-Elektroautos (100 kWh Batterie)

Das Elektrofahrzeug muss eine vergleichbare Reichweite wie der alte Verbrenner garantieren. Dafür ist ein großes, schwereres Fahrzeug mit einer 100-kWh-Batterie notwendig. Durch das höhere Fahrzeuggewicht, den Luftwiderstand einer größeren Karosserie sowie den enormen, physikalisch bedingten Energiebedarf für die Innenraumheizung im Winter liegt der jahresdurchschnittliche Realverbrauch eines solchen Fahrzeugs bei rund 20,0 kWh pro 100 Kilometer. Die Batterieproduktion treibt den CO₂-Rucksack massiv in die Höhe.

- **Initialer Produktionsrucksack (Karosserie + 100-kWh-Batterie):** ca. 15,0 t CO₂ ¹⁷
- **Gesamter Stromverbrauch für 100.000 km:** 20.000 kWh
- **Nutzungsemissionen (WTW deutscher Strommix):** 20.000 kWh × 0,35 kg CO₂/kWh = 7.000 kg CO₂
- **Gesamtemissionen Szenario C:** 15,0 t (Bau) + 7,0 t (Betrieb) = **22,0 Tonnen CO₂**

Vergleichende Gegenüberstellung und exakte Berechnung

Lebenszyklus-Parameter	Szenario A (Alter Benziner)	Szenario B (Neuer Benziner)	Szenario C (Neues BEV, 100 kWh)
Bisherige Laufleistung	100.000 km	0 km	0 km
Spezifischer Realverbrauch (pro 100 km)	7,5 Liter	5,0 Liter	20,0 kWh
Treibhausgas-Rucksack der Produktion	0,0 t CO ₂ (abgeschrieben)	7,0 t CO ₂	15,0 t CO ₂
WTW-Emissionen im Betrieb (für 100.000 km)	21,0 t CO ₂	14,0 t CO ₂	7,0 t CO ₂
Kumulierte Gesamtemissionen (für 100.000 km)	21,0 t CO₂	21,0 t CO₂	22,0 t CO₂

Das Berechnungsergebnis ist hochgradig aufschlussreich und beantwortet die Ausgangsfrage eindeutig: Wenn das Elektroauto zwingend denselben Langstreckenkomfort und dieselbe Reichweite bieten muss wie ein klassischer Verbrenner, kippt die kurzfristige Umweltbilanz zugunsten des Altfahrzeugs.

Berechnen wir den genauen Break-Even-Point:

Der alte Benziner emittiert täglich 210 Gramm CO₂ pro Kilometer.

Das Langstrecken-Elektroauto emittiert nur 70 Gramm CO₂ pro Kilometer.

Das E-Auto spart im Betrieb demnach 140 Gramm CO₂ pro Kilometer ein. Teilt man den immensen Produktionsrucksack des E-Autos (15.000 kg CO₂) durch diese tägliche Ersparnis (0,140 kg/km), so ergibt sich der mathematische Schnittpunkt bei **exakt 107.142 Kilometern**. Da die garantierte Restnutzung laut Vorgabe bei genau 100.000 Kilometern liegt, wird dieser Amortisationspunkt in dem vorgegebenen Zeitfenster **nicht erreicht**. Der ökologische Rucksack der massiven Batterieproduktion ist in diesem konkreten Fall schlichtweg zu groß.

Komplexe Sensitivitätsanalysen: Stellschrauben mit kritischem Einfluss

1. Reichweitenbedarf und Winterbetrieb bedingen sich gegenseitig

Die Sorge um die Reichweite ist aus technischer Sicht fundiert, da sich die physikalischen Schwächen der Batteriespeicherstruktur bei extremen Wetterlagen potenzieren. Da das Elektroauto keine massive, ungenutzte Abwärme wie ein Verbrenner produziert, verringert der Einsatz der elektrischen Heizung bei Minusgraden die Reichweite drastisch. Wer beruflich darauf angewiesen ist, auch im strengsten Winter 400 Kilometer am Stück ohne Zeitverlust zu absolvieren, muss auf eine Batteriekapazität von mindestens 90 bis 100 kWh zurückgreifen. Genau dieser berechnete Bedarf nach Autarkie generiert jedoch den enormen CO₂-Rucksack bei der Herstellung (15 Tonnen CO₂), der die Umweltbilanz für die betrachtete Restlebensdauer im Vergleich zum Alt-Verbrenner ins Negative zieht.

2. Der extreme Hebel der Ladeinfrastruktur (Der Photovoltaik-Effekt)

Die Bilanz des Langstrecken-BEV (22,0 Tonnen) basiert auf der Annahme, dass das Fahrzeug den Durchschnittsstrom aus dem öffentlichen Netz lädt. Verfügt der Halter jedoch über eine eigene Photovoltaikanlage und lädt primär mit lokal erzeugtem Solarstrom (Lebenszyklus-Emissionen bei ca. 40 bis 50 Gramm CO₂/kWh), sinken die Nutzungsemissionen drastisch ab. Die Betriebsemissionen des E-Autos würden für die 100.000 km auf etwa 1,0 Tonne CO₂ fallen. Die Gesamtemissionen lägen dann bei rund 16,0 Tonnen CO₂, wodurch sich das Fahrzeug trotz der riesigen Batterie bereits nach knapp 75.000 Kilometern gegenüber dem Altwagen amortisieren würde.

Erweiterte ökologische Faktoren jenseits der starren Klimabilanz

Neben den reinen CO₂-Emissionen müssen auch andere Umweltmetriken betrachtet werden:

- **Luftreinhaltung:** Verbrennungsmotoren stoßen Stickoxide (NO_x), Kohlenmonoxid (CO) und Feinstaub aus dem Auspuff aus. Das Elektroauto fährt vor Ort lokal völlig emissionsfrei und schont die städtische Atemluft. Der Feinstaub aus Reifenabrieb ist aufgrund des höheren Gewichts beim E-Auto tendenziell höher, was jedoch durch den

deutlich geringeren Bremsabrieb dank starker Rekuperation teilweise kompensiert wird.¹⁵

- **Rohstoffabbau:** Der massive Einsatz großer Batterien (wie im gewählten 100-kWh-Szenario) erfordert intensivsten Bergbau für Lithium, Graphit und teilweise Nickel und Kobalt, was lokale Ökosysteme in den Abbaubereichen stark belastet.¹⁵
- **End-of-Life:** Die verbrannten 7.500 Liter Benzin sind als dissipative Ressource für immer vernichtet und in die Atmosphäre verflüchtigt. Eine 100-kWh-Batterie verliert nach ihrem Einsatz im Auto hingegen nicht ihren stofflichen Wert. Sie kann stationär weitergenutzt ("Second-Life") und danach zu 90 bis 95 Prozent stofflich recycelt werden (Closed Loop), wodurch Rohstoffe für neue Generationen erhalten bleiben.¹⁶

Synthese und finales Fazit

Die granulare Evaluierung führt unter der vom Nutzer geforderten Prämisse einer **gleichwertigen, echten Langstreckenreichweite (ca. 600 bis 800 km)** zu einem klaren, physikalisch fundierten Ergebnis, das von den landläufigen Pauschalaussagen zur Elektromobilität stark abweicht.

Der systemische Vergleich des reinen Weiterbetriebs eines zehn Jahre alten Benziners (7,5 l/100 km) mit der Neuanschaffung eines neuen, sparsameren Verbrenners (5,0 l/100 km) oder einem langstreckentauglichen Elektrofahrzeug (100 kWh Batterie, 20 kWh/100 km) für die ausstehende Lebensdistanz von exakt 100.000 Kilometern führt zu folgenden wissenschaftlichen Erkenntnissen:

1. **Der Weiterbetrieb des alten Benziners ist ökologisch am sinnvollsten:** Wenn das Fahrprofil den Einsatz einer sehr großen, schweren Traktionsbatterie (ca. 100 kWh) zwingend erfordert, um Reichweitenängsten und winterlichen Heizverlusten verlässlich entgegenzuwirken, ist der schlichte Weiterbetrieb des vorhandenen, abgeschriebenen Fahrzeugs die klimaschonendste Wahl. Mit kumulierten 21,0 Tonnen CO₂ für die verbleibenden 100.000 Kilometer schlägt es das neu gebaute Langstrecken-E-Auto (22,0 Tonnen CO₂), da der immense CO₂-Aufwand der Batterieproduktion in diesem begrenzten Zeitfenster nicht mehr vollständig durch den saubereren Fahrbetrieb ausgeglichen werden kann.
2. **Die Illusion des "Spar-Verbrenners":** Der Ersatz des alten, durstigen Wagens durch einen neuen, vermeintlich sparsameren Verbrenner bleibt ein absolutes Nullsummenspiel (beide 21,0 t CO₂). Die aufwendige Neuproduktion (7 Tonnen CO₂) vernichtet die Gewinne an der Zapfsäule exakt und restlos.
3. **Die Wahrheit über das Gewicht und den Winter:** Das physikalische Mehrgewicht einer riesigen Batterie verpufft bei E-Autos durch die extrem hohe thermodynamische Effizienz und die Rekuperation im Stadtverkehr. Auf langen Autobahnetappen dominiert ohnehin der Luftwiderstand. Ein wesentlicher Effizienztreiber ist hingegen die Temperatur: Weil der Elektromotor fast keine Abwärme generiert, muss die Innenraumheizung im Winter aktiv aus der Batterie betrieben werden, was den Energiebedarf in der kalten Jahreszeit zum Teil gravierend ansteigen lässt und die Notwendigkeit riesiger Akkus für Vielfahrer unterstreicht.

Endgültige Konklusion: Liegt die verbleibende Nutzungsdauer strikt bei 100.000 Kilometern

und muss das Fahrzeug zwingend das Profil eines beruflichen Vielfahrers (hohe Reichweite auch im Winter) erfüllen, rät die reine CO₂-Bilanzierung zum **Behalten des alten Autos**. Erst wenn das neue Elektroauto die Grenze von ca. 107.000 Kilometern überschreitet – oder signifikant mit Ökostrom von der heimischen Solaranlage geladen wird – dreht sich die Mathematik zugunsten der Elektromobilität.

Referenzen

1. Life cycle assessment of battery electric vehicles: Implications of future electricity mix and different battery end-of-life management - PMC, Zugriff am März 10, 2026, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9171403/>
2. (PDF) LCA-Studie zur Untersuchung der Umweltauswirkungen von Kfz-Leitungssätzen konventioneller und elektrischer Fahrzeuge - ResearchGate, Zugriff am März 10, 2026, https://www.researchgate.net/publication/392927844_LCA-Studie_zur_Untersuchung_der_Umweltauswirkungen_von_Kfz-Leitungssätzen_konventioneller_und_elektrischer_Fahrzeuge
3. Analyse der Umweltbilanz von Kraftfahrzeugen mit alternativen Antrieben oder Kraftstoffen auf dem Weg zu einem treibhausgasneutralen Verkehr - Umweltbundesamt, Zugriff am März 10, 2026, https://www.umweltbundesamt.de/system/files/medien/11850/publikationen/13_2024_texte_analyse_der_umweltbilanz_von_kraftfahrzeugen_0.pdf
4. Emission Factors from Cross-Sector Tools - GHG Protocol, Zugriff am März 10, 2026, https://ghgprotocol.org/sites/default/files/2024-05/Emission_Factors_for_Cross_Sector_Tools_V2.0_0.xlsx
5. Die aktuelle Treibhausgasemissionsbilanz von Elektrofahrzeugen in Deutschland - Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI, Zugriff am März 10, 2026, https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/sustainability-innovation/2019/WP02-2019_Treibhausgasemissionsbilanz_von_Fahrzeugen.pdf
6. Abmessungen: Volkswagen Golf 2019-2024 vs. Volkswagen ID.3 2019-heute - Car Sized, Zugriff am März 10, 2026, <https://www.carsized.com/de/autos/vergleich/volkswagen-golf-2019-5-door-hatchback-vs-volkswagen-id3-2019-5-door-hatchback/frontansicht/>
7. Abmessungen: Volkswagen ID.3 2019-heute vs. Volkswagen Golf 2019-2024, Zugriff am März 10, 2026, <https://www.carsized.com/de/autos/vergleich/volkswagen-id3-2019-5-door-hatchback-vs-volkswagen-golf-2019-5-door-hatchback/>
8. Comparison of Battery Electrical Vehicles and Internal Combustion Engine Vehicles–Greenhouse Gas Emission Life Cycle Assessment - MDPI, Zugriff am März 10, 2026, <https://www.mdpi.com/2076-3417/15/6/3122>
9. ADAC Pannenstatistik 2024: ELEKTROAUTOS bleiben häufiger liegen...oder doch NICHT?, Zugriff am März 10, 2026, <https://www.youtube.com/watch?v=JmDFaAA5B8Q>

10. Elektroauto vs. Verbrenner – wer gewinnt? - EKZ, Zugriff am März 10, 2026,
<https://www.ekz.ch/de/blue/wissen/2024/vergleich-e-auto-verbrenner.html>
11. Energieetikette für Personenwagen: Umweltkennwerte 2024 der Strom- und Treibstoffbereitstellung - Bundesamt für Energie BFE - admin.ch, Zugriff am März 10, 2026,
<https://www.bfe.admin.ch/bfe/de/home/effizienz/mobilitaet/die-energieetikette-fuer-personenwagen.exturl.html/aHR0cHM6Ly9wdWJkYi5iZmUuYWRTaW4uY2gvZGUvcHVibGJjYX/Rpb24vZG93bm9vYXQvMTE4MjI=.html>
12. Well-to-wheel emission factors for future cars in Germany with a focus on, Zugriff am März 10, 2026,
https://elib.dlr.de/134971/1/AESl%20Seum%20et%20al%20WtW%20EFA%20future%20cars%20DE_apx_NEW.pdf
13. Entwicklung der spezifischen Treibhausgas-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 - 2024 - Umweltbundesamt, Zugriff am März 10, 2026,
https://www.umweltbundesamt.de/system/files/medien/11850/publikationen/13_2_025_cc.pdf
14. Life Cycle Analysis Comparison - Transportation Energy Institute, Zugriff am März 10, 2026,
https://www.transportationenergy.org/wp-content/uploads/2022/10/FI_Report_Lifecycle_FINAL.pdf
15. Elektroauto vs. Verbrenner: Neue Studie zur Klimabilanz - ingenieur.de, Zugriff am März 10, 2026,
<https://www.ingenieur.de/technik/fachbereiche/verkehr/elektroauto-vs-verbrenner-neue-erkenntnisse-zur-klimabilanz/>
16. PRESSEINFORMATION - Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU, Zugriff am März 10, 2026,
<https://www.iwu.fraunhofer.de/content/dam/iwu/de/documents/Presse/2024-ZEvRA-reduziert-CO2-Fu%C3%9Fabdruck-elektrischer-Fahrzeuge-und-steigert-Anteil-recycler-Werkstoffe.pdf>
17. ADAC-Ecotest: Elektroautos dominieren klar - ecomento.de, Zugriff am März 10, 2026,
<https://ecomento.de/2024/01/12/adac-ecotest-elektroautos-dominieren-klar/>