

# UMWELTAUSWIRKUNGEN VON PERSONENWAGEN – HEUTE UND MORGEN

Dieses Faktenblatt fasst Resultate einer Studie des Paul Scherrer Instituts zusammen und gibt einen Überblick über Umweltbelastungen, die heute und in Zukunft von Personenvagen mit unterschiedlichen Antriebstechnologien verursacht werden. Die Analyse erfolgt auf der Basis von Ökobilanzen, bei denen der gesamte Lebenszyklus der Autos betrachtet wird: Produktion, Betrieb und Entsorgung inklusive Bereitstellung der Treibstoffe Benzin, Diesel und Gas, Strom und Wasserstoff (H<sub>2</sub>). Diese Ökobilanzperspektive ist wichtig, weil bei Batterie- und Brennstoffzellenautos zwar keine Schadstoffe aus dem Auspuff kommen, die Umweltbelastungen bei der Herstellung der Fahrzeuge und bei der Produktion von Strom und Wasserstoff aber beträchtlich sein können.

## Fahrzeugtechnologien und Treibstoffe

Konventionelle Autos mit Verbrennungsmotoren (ICEV) werden heute mit Benzin, Diesel oder Gas betrieben. Alternativen sind Batterie- und Brennstoffzellenfahrzeuge (BEV bzw. FCEV), bei denen ein Elektromotor die Räder antreibt. Als «Treibstoff» dient bei diesen Autos Strom, der in einer Batterie gespeichert wird, oder Wasserstoff, der von einer Brennstoffzelle in Strom umgewandelt wird. In Zukunft könnte Strom auch indirekt genutzt werden, indem mittels Elektrolyse Wasserstoff erzeugt und dieser mit CO<sub>2</sub> in «synthetisches Erdgas» (SNG) umgewandelt wird (mit so genannten «Power-to-Gas»-Verfahren).

## DAS WICHTIGSTE IN KÜRZE:

- Falls Batterie- und Brennstoffzellenautos mit Strom und Wasserstoff aus CO<sub>2</sub>-armen Quellen betrieben werden, verursachen sie deutlich weniger Treibhausgasemissionen als Benzin-, Diesel- und Gasfahrzeuge. Mit dem Schweizer Strommix spart ein Batterieauto heute gegenüber einem Benziner insgesamt rund 30 Tonnen CO<sub>2</sub> bezogen auf eine Lebensdauer von 200'000 Kilometern.
- Das bedeutet, dass parallel zur Einführung der Elektromobilität ein Ausbau der erneuerbaren Stromproduktion

erfolgen sollte. Gleichzeitig muss Strom in anderen Sektoren effizienter genutzt werden.

- Elektrofahrzeuge verursachen kaum direkte Schadstoffemissionen und helfen so, die Luftqualität in verkehrsbelasteten Ballungsräumen zu verbessern.
- Die Produktion von Elektroautos ist mit höheren Umweltbelastungen verbunden als jene von Verbrennern. Die höheren Treibhausgasemissionen aus der Produktion von Batterieautos können dank der geringeren Emissionen im Betrieb in der Schweiz nach ca. 30'000 Kilometern kompensiert werden.
- Für die CO<sub>2</sub>-Bilanz von Batteriefahrzeugen ist der CO<sub>2</sub>-Gehalt des Stroms entscheidend. Dies gilt – bei H<sub>2</sub>-Produktion mittels Elektrolyse – auch für Brennstoffzellenautos sowie Fahrzeuge mit synthetischem Erdgas.
- Batteriefahrzeuge weisen die höchste Energieeffizienz auf. Die «indirekte Elektrifizierung», also die Umwandlung von Strom in Wasserstoff oder synthetisches Erdgas ist weniger effizient.

## Was ist neu?

Die erste Version dieses Faktenblatts wurde 2018 veröffentlicht. Diese Aktualisierung beinhaltet u.a. aktuellere Daten zur Herstellung der Batterien von Elektroautos und deren Lebensdauer – damit wird den Fortschritten dieser Technologie Rechnung getragen. Auch die Modellierung wurde überarbeitet und bildet nun heutige Autos besser ab. Für Batterieautos wurden zudem Sensitivitätsrechnungen mit unterschiedlicher Batteriegrösse vorgenommen. Die Bilanz für 2040 berücksichtigt nun auch Unsicherheiten, dargestellt mit «Fehlerbalken». Diese zeigen, wie sich unterschiedliche Szenarien im globalen und im Schweizer Stromsektor auswirken: Die farbigen Balken repräsentieren ein «business-as-usual»-Szenario mit wenig ambitioniertem Klimaschutz; die Schwankungsbereiche ergeben sich aus einem Klimaschutzszenario, in dem Strom fast CO<sub>2</sub>-frei erzeugt wird, und aus einem «worst case»-Szenario mit einem Stillstand beim Umbau der globalen Energieversorgung.

Der Inhalt dieses Faktenblatts fasst Resultate der Studie «Life cycle environmental and cost comparison of current and future passenger cars under different energy scenarios» des Paul Scherrer Instituts zusammen, die im Rahmen des SCCER Mobility arbeitet wurde. Zudem wurde die spezifische Schweizer Situation mit differenzierten Daten erarbeitet: [Link Zusatzblatt](#). Direkter Ansprechpartner: [Christian Bauer](#).



# UMWELTAUSWIRKUNGEN VON PERSONENWAGEN – HEUTE UND MORGEN

Die Ergebnisse der Ökobilanzen in Abbildungen 1 bis 4 repräsentieren durchschnittliche Mittelklasseautos. Deren Basisparameter sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

			Lebensdauer	Fahrzeugmasse	Treibstoffverbrauch (Realbetrieb)		Reichweite	Wirkungsgrad «tank-to-wheel»	Emissionsstandard für Schadstoffe
			km	kg	l Benzin-Äq. pro 100 km	pro 100 km	km	%	
2018	ICEV	Benzin	200'000	1318	7,6	7,6 Liter	492	21	EURO 6
		Diesel		1342	6,9	6,3 Liter	615	23	EURO 6
		Gas		1391	8,1	5,5 kg	494	20	EURO 6
	Batteriefahrzeug <sup>1</sup>	1509		2,2	19,3 kWh	186	64		
	Brennstoffzellenauto	1470		4,0	1,05 kg	476	34		
2040	ICEV	Benzin	200'000	1231	4,8	4,8 Liter	550	27	EURO 6 –50%
		Diesel		1252	4,6	4,3 Liter	637	28	EURO 6 –50%
		Gas		1290	4,9	3,3 kg	578	27	EURO 6 –50%
	Batteriefahrzeug <sup>1</sup>	1334		1,7	15,4 kWh	354	68		
	Brennstoffzellenauto	1294		3,0	0,8 kg	509	38		

Tabelle 1: Basiswerte für die Fahrzeugparameter in dieser Ökobilanz.

<sup>1</sup> Angenommene Batteriekapazitäten: 36 kWh heute, 55 kWh im Jahr 2040.

Die in den Abbildungen 1 bis 4 sichtbaren Reduktionen der Emissionen und des Energieverbrauchs bis 2040 sind vor allem eine Folge technologischer Fortschritte bei den Fahrzeugen: Die Wirkungsgrade der Antriebe steigen, es wird vermehrt auf Leichtbau gesetzt und Emissionsstandards werden verschärft.

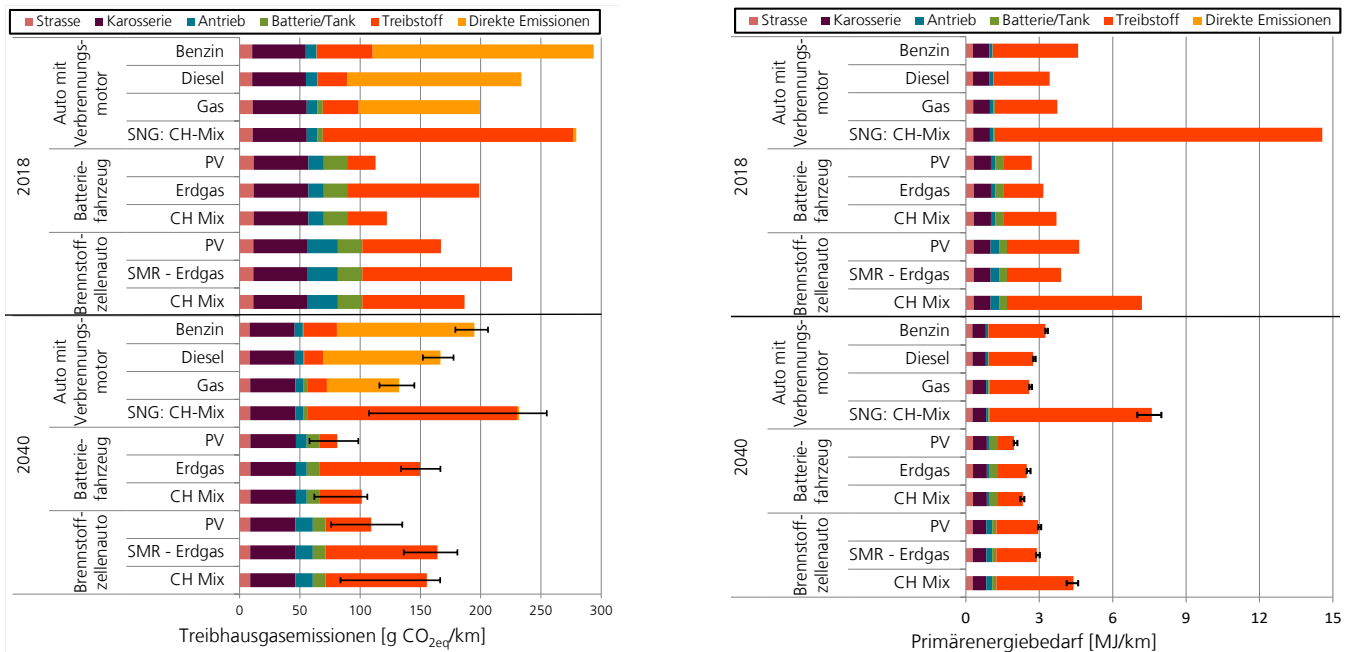


Abbildung 1: Treibhausgasemissionen (links) und Primärenergiebedarf (rechts) von Personenwagen heute und 2040 pro Kilometer. «PV»: Fotovoltaik; «SNG»: Synthetisches Erdgas, hier erzeugt durch Elektrolyse mit dem Schweizer Strommix und CO<sub>2</sub> aus der Luft; Wasserstoff für das Brennstoffzellenauto wird entweder per Erdgas-Reformierung («SMR») oder Elektrolyse (CH-Strommix oder PV-Strom) erzeugt; «Gas» ist eine Mischung aus 80% Erdgas und 20% Biomethan. Die unterschiedlichen Farben in den Balken zeigen den Ursprung der Emissionen. Schwankungsbereiche 2040: siehe Kasten «Was ist neu?».

# UMWELTAUSWIRKUNGEN VON PERSONENWAGEN – HEUTE UND MORGEN

Abbildung 2 zeigt, dass ein beträchtlicher Teil der Schadstoffemissionen von Elektrofahrzeugen durch die Herstellung der Batterien verursacht wird. Diese Schadstoffe werden allerdings teilweise dort emittiert, wo kaum Menschen betroffen sind. Beispielsweise in Minen, wo Metalle gefördert werden. Die resultierenden Gesundheitsschäden sind dort im Vergleich zu Emissionen in verkehrsbelasteten Ballungsgebieten als viel geringer einzuschätzen. Ein Teil der Emissionen wird aber in Asiens Industriegebiete verlagert, wo die Batterien produziert werden und auch viele Menschen betroffen sind.

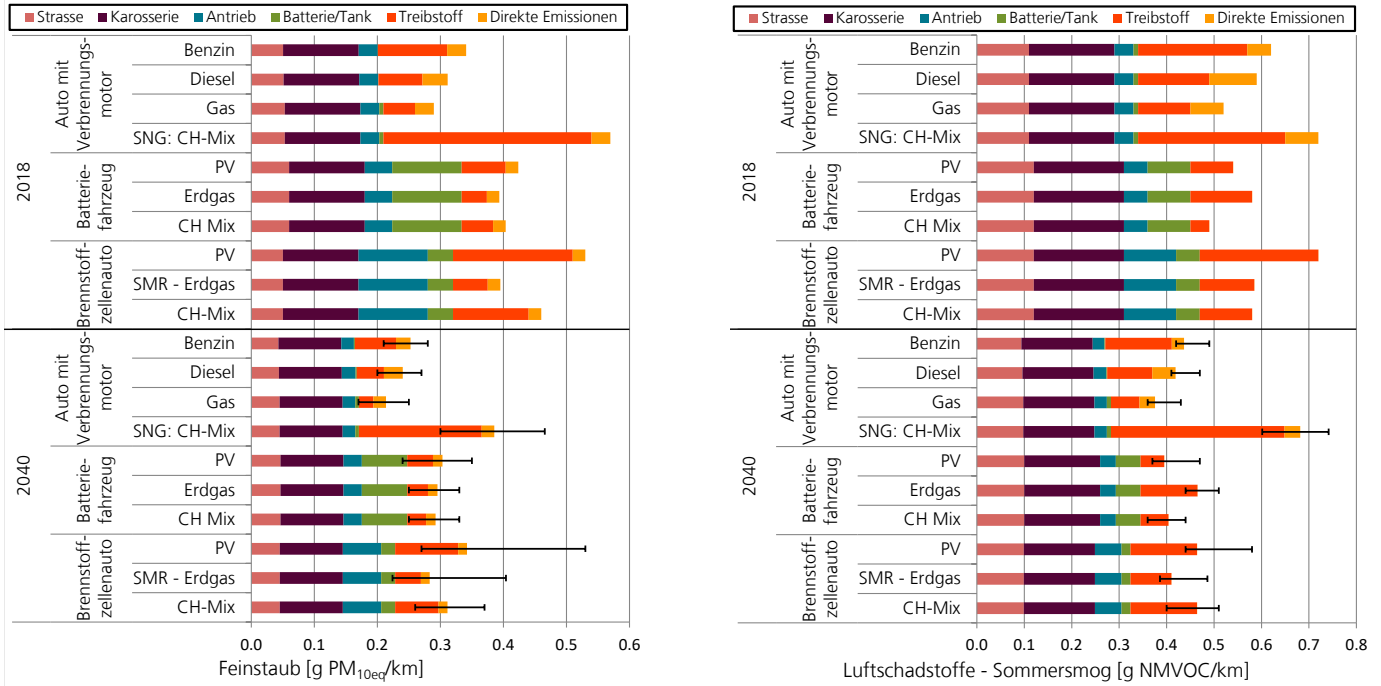


Abbildung 2: Feinstaubbelastung (links) und Emissionen von Luftschadstoffen, die Sommersmog verursachen (rechts) von Personenwagen heute und 2040 pro Kilometer. «PV»: Fotovoltaik; «SNG»: Synthetisches Erdgas, hier erzeugt durch Elektrolyse mit dem CH-Strommix und CO<sub>2</sub> aus der Luft; Wasserstoff für das Brennstoffzellenauto wird entweder per Erdgas-Reformierung («SMR») oder Elektrolyse (CH-Strommix oder PV-Strom) erzeugt; «Gas» ist eine Mischung aus 80% Erdgas und 20% Biomethan. Die unterschiedlichen Farben in den Balken zeigen den Ursprung der Emissionen. Schwankungsbereiche 2040: siehe Kästen «Was ist neu?».

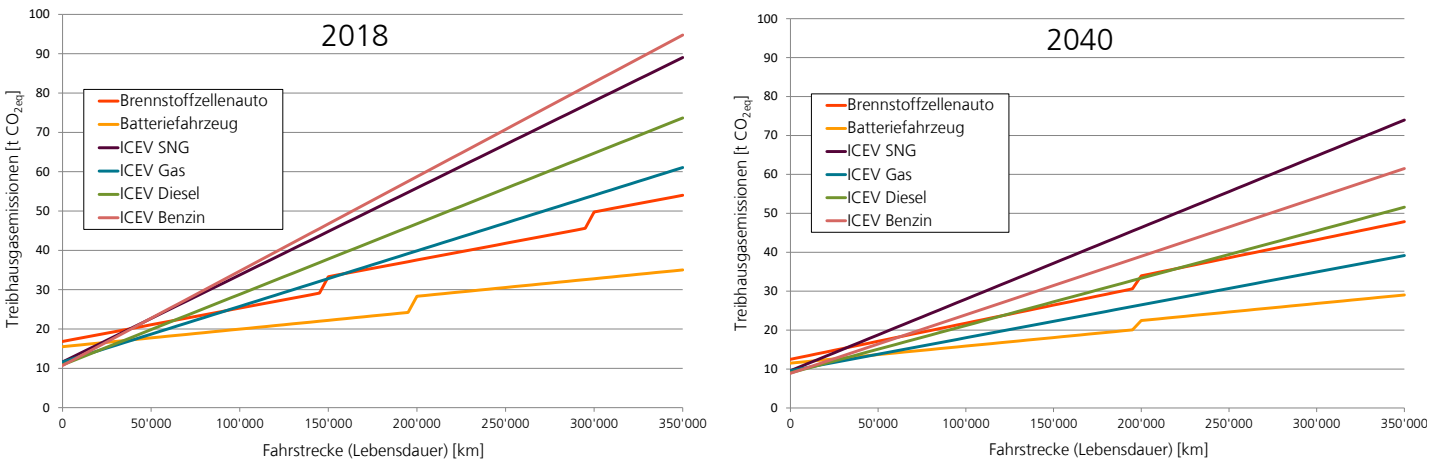


Abbildung 3: Treibhausgasemissionen während der gesamten Lebensdauer verschiedener Fahrzeuge, heute (links) und 2040 (rechts). «ICEV»: Auto mit Verbrennungsmotor; «SNG»: Synthetisches Erdgas, hier erzeugt via Elektrolyse aus dem Schweizer Strommix und CO<sub>2</sub> aus der Luft. Der Schweizer Strommix wird hier auch für das Laden der Batterie des Batteriefahrzeugs und für die Erzeugung des Wasserstoffs für das Brennstoffzellenauto genutzt. «Gas» ist eine Mischung aus 80% Erdgas und 20% Biomethan. Nach 150'000 km bzw. 200'000 km werden Brennstoffzellen bzw. Batterien ersetzt.

# UMWELTAUSWIRKUNGEN VON PERSONENWAGEN – HEUTE UND MORGEN

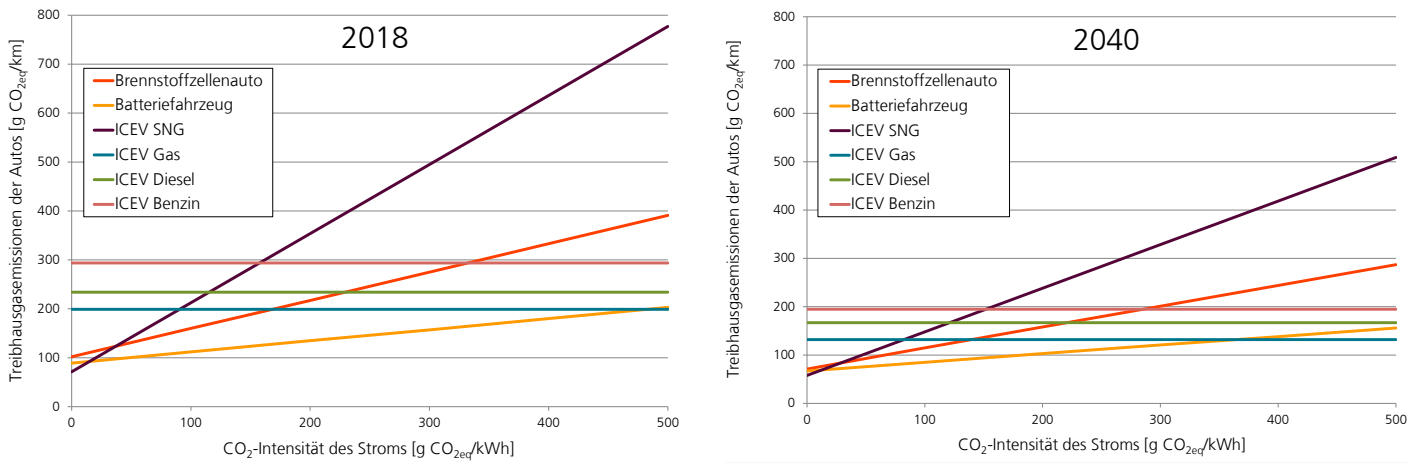


Abbildung 4: Treibhausgasemissionen der Autos in Abhängigkeit vom CO<sub>2</sub>-Gehalt des Stroms, der genutzt wird um Batteriefahrzeuge zu laden, zur Produktion von Wasserstoff oder zur Erzeugung von synthetischem Gas. «ICEV»: Auto mit Verbrennungsmotor; «SNG»: Synthetisches Erdgas, erzeugt via Elektrolyse und CO<sub>2</sub> aus der Luft. «Gas» ist eine Mischung aus 80% Erdgas und 20% Biomethan. Batteriefahrzeuge weisen am längsten einen Vorteil auf gegenüber fossilen Treibstoffen, da der Strom am effizientesten genutzt wird. Bei sehr geringem CO<sub>2</sub>-Gehalt des Stroms sind die Emissionen der SNG-Fahrzeuge am tiefsten. Die Linien für BEV, FCEV, und ICEV-SNG steigen 2040 weniger steil an als heute, da die Fahrzeuge effizienter werden und weniger Strom pro Kilometer benötigen. Zur Orientierung: Schweizer Wasser- und Windkraftwerke produzieren Strom mit einer CO<sub>2</sub>-Intensität von ca. 10–30g CO<sub>2eq</sub>/kWh, Fotovoltaikanlagen mit rund 70–100g CO<sub>2eq</sub>/kWh; Erdgaskraftwerke würden Werte von 400–500g CO<sub>2eq</sub>/kWh erreichen und der aktuelle Schweizer Stromversorgungsmix liegt bei etwa 130g CO<sub>2eq</sub>/kWh.

## BATTERIEN UND IHRE ÖKOBILANZ

In Batteriefahrzeugen sind Lithium-Ionen-Batterien Standard. Deren Herstellung verursacht heute erhebliche Umweltbelastungen. Grössere Batterien sind also ein negativer Faktor in der Ökobilanz der Batterieautos, sie ermöglichen aber eine höhere Reichweite. Die Batterieautos hier sind mit Speicherkapazitäten von 36 kWh heute und 55 kWh im Jahr 2040 ausgestattet. Die Lebensdauer der Batterien wird mit 200'000 km veranschlagt. Wichtige Faktoren hinsichtlich Umweltbelastungen der Batterieproduktion sind der Material- und Energieverbrauch bei der Herstellung der Batteriezellen: Es ist zentral, wie viel Material und Energie verbraucht werden und aus welchen Quellen diese stammen. Die Produktionszahlen von Batteriefahrzeugen sind in den letzten Jahren stark gestiegen – damit verbunden ist eine zunehmende Massenproduktion der Batterien, was sich in reduziertem Energieverbrauch und abnehmenden Umweltbelastungen zeigt. Für die Ökobilanz vorteilhaft wären effiziente Recyclingverfahren oder eine «Zweitnutzung» der Batterien, etwa für die Speicherung von Strom aus Fotovoltaikanlagen in Gebäuden. Eine solche Weiterverwendung ist hier noch nicht berücksichtigt.

## ÖKOBILANZEN UND DEREN AUSSAGEKRAFT

Einige Annahmen und Schlüsselparameter prägen die Resultate dieser Ökobilanzen entscheidend. Dazu gehören der Treibstoffverbrauch, die Schadstoffemissionen von Verbrennungsmotoren, die Lebensdauer der Fahrzeuge und von Komponenten wie etwa Batterien. Die Ergebnisse in diesem Faktenblatt gelten für die Parameterwerte in Tabelle 1. Eine wissenschaftliche Publikation, die sich derzeit im Begutachtungsprozess befindet, gibt Einblick in realistische Schwankungsbereiche dieser Kennzahlen und deren Einfluss auf die Ergebnisse: Was bedeutet es beispielsweise, wenn Dieselautos die Emissionsgrenzwerte nicht erfüllen und markant mehr Stickoxide ausstossen? Und wie wirkt sich eine rein erneuerbare Energieversorgung der Batterieproduktion auf die Ökobilanz aus? Die Publikation enthält auch sämtliche Parameterwerte und alle Datenquellen. Ebenfalls dargestellt sind zusätzliche Ökobilanz-Ergebnisse, beispielsweise für Plug-in Hybridfahrzeuge.