

# UMWELTAUSWIRKUNGEN VON PERSONENWAGEN – HEUTE UND MORGEN

Dieses Faktenblatt und der zugehörige Hintergrundbericht geben einen Überblick über Umweltbelastungen, die von heutigen und zukünftigen Personenwagen verursacht werden. Und zwar auf der Basis von Ökobilanzen. Das heisst, dass 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>) sowie der gesamten Infrastruktur. 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. Sowohl eine Batterie, die aus dem Stromnetz geladen werden kann, als auch einen Verbrennungsmotor haben so genannte «Plug-in»-Hybridautos an Bord. Sie können also mit Strom und Benzin betrieben werden. 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.

Der Inhalt dieses Faktenblatts basiert auf der Dissertation von Brian Cox und den Ökobilanz-Aktivitäten des Paul Scherrer Instituts (<https://www.psi.ch/ta/>) im Rahmen des SCCER Mobility (<https://www.sccer-mobility.ch/>).  
Direkter Ansprechpartner: Christian Bauer ([christian.bauer@psi.ch](mailto:christian.bauer@psi.ch)).

## 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 (Abbildung 1, Treibhausgasemissionen, sowie Abbildung 4).
- Das bedeutet, dass parallel zur Einführung der Elektromobilität ein Ausbau der erneuerbaren Stromproduktion erfolgen sollte. Gleichzeitig sollte Strom in anderen Sektoren effizienter genutzt werden.
- Elektrofahrzeuge verursachen keine direkten Schadstoffemissionen und helfen so, die Luftqualität in verkehrsbelasteten Ballungsräumen zu verbessern.
- Die Produktion von Batterie- und Brennstoffzellenfahrzeugen ist aufwendiger als jene von Autos mit Verbrennungsmotoren und mit höheren Umweltbelastungen verbunden. Die höheren Treibhausgasemissionen aus der Produktion können – sauberen Strom und Wasserstoff vorausgesetzt – dank der geringeren Emissionen im Betrieb nach rund 50'000 Kilometern kompensiert werden (Abbildung 3).
- Für die CO<sub>2</sub>-Bilanz von Batteriefahrzeugen ist der CO<sub>2</sub>-Gehalt des Stroms entscheidend (Abbildung 4). Dies gilt auch für Brennstoffzellenautos sowie Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren, die Wasserstoff bzw. synthetisches Erdgas aus «Power-to-Gas»-Verfahren nutzen.
- Batteriefahrzeuge weisen die höchste Energieeffizienz auf. Brennstoffzellen- und Gasfahrzeuge, die mit synthetischem Gas betrieben werden, sind weniger effizient, da bei der Herstellung der Treibstoffe deutlich höhere Energieverluste auftreten.
- Demnach sind batteriefahrzeuge die beste Option unter den emissionsarmen Fahrzeugen, um erneuerbaren Strom möglichst effizient zu nutzen.

# UMWELTAUSWIRKUNGEN VON PERSONENWAGEN – HEUTE UND MORGEN

Die Ergebnisse der Ökobilanzen in Abbildungen 1 bis 4 repräsentieren durchschnittliche Mittelklasseautos. Die Basisparameter der Fahrzeuge 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	%	
2017	ICEV	Benzin	180'000	1357	7,6	7,6 Liter	524	21	EURO 6
		Diesel		1380	6,9	6,3 Liter	656	23	EURO 6
		Gas		1434	8,5	5,8 kg	512	19	EURO 6
	Batteriefahrzeug	1595		2,2	19,5 kWh	173	64		
	Brennstoffzellenauto	1570		4,0	1,1 kg	468	34		
2040	ICEV	Benzin	180'000	1319	5,0	5,0 Liter	669	27	EURO 6 –50%
		Diesel		1340	4,9	4,5 Liter	775	28	EURO 6 –50%
		Gas		1383	5,4	3,7 kg	641	26	EURO 6 –50%
	Batteriefahrzeug	1554		1,9	16,6 kWh	439	78		
	Brennstoffzellenauto	1462		3,1	0,8 kg	601	46		

Tabelle 1: Basiswerte für die Fahrzeugparameter in dieser Ökobilanz.

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.

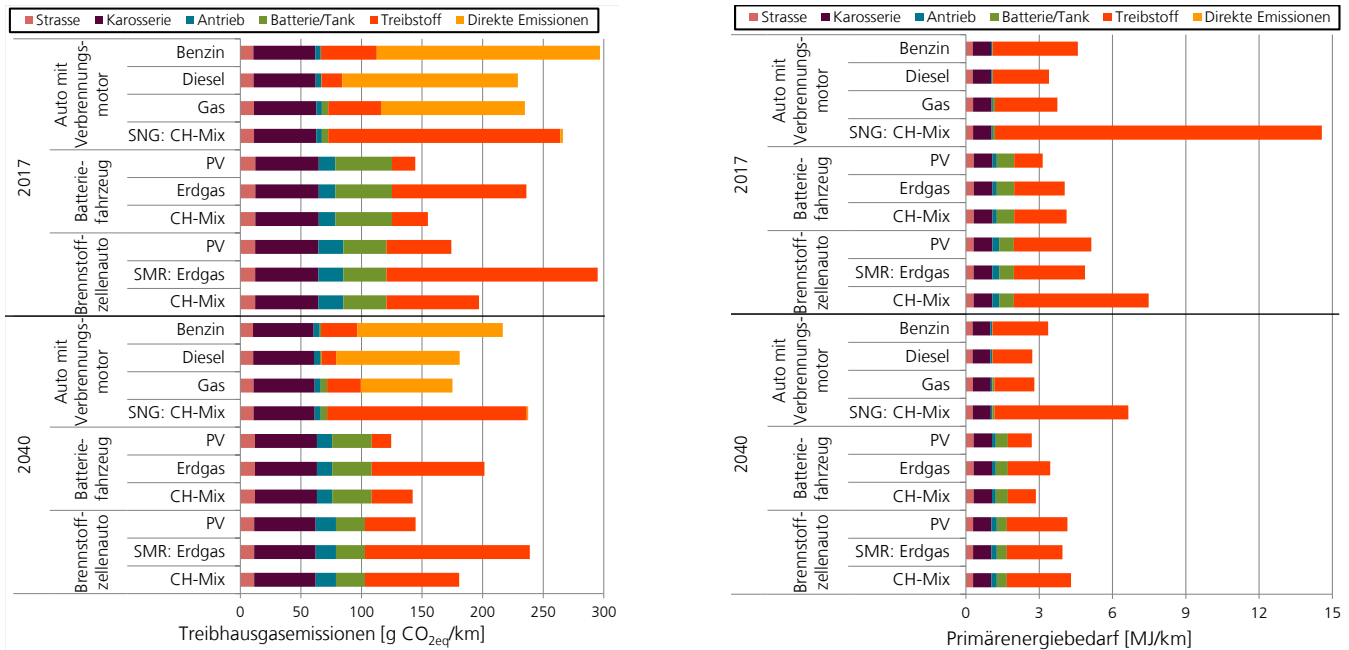


Abbildung 1: Treibhausgasemissionen (links) und Primärenergiebedarf (rechts) von Personenwagen 2017 und 2040 pro Fahrzeugkilometer. «PV»: Fotovoltaik; «SNG»: Synthetisches Erdgas, hier erzeugt durch Elektrolyse mit dem CH-Strommix und CO<sub>2</sub> aus der Luft; Wasserstoff für das Brennstoffzellenauto wird entweder per Erdgas-Reformierung («SMR») oder Elektrolyse (CH-Strommix oder PV-Strom) erzeugt; «Gas» ist eine Mischung aus 90 Prozent Erd- und 10 Prozent Biogas. Die unterschiedlichen Farben in den Balken zeigen den Ursprung der Emissionen: Herstellung, Wartung, Entsorgung einzelner Fahrzeugkomponenten und der Strassen, die Treibstoffbereitstellung und direkte Emissionen der Autos.

# UMWELTAUSWIRKUNGEN VON PERSONENWAGEN – HEUTE UND MORGEN

Abbildung 2 zeigt, dass ein grosser Teil der Schadstoffemissionen von Elektrofahrzeugen durch die Herstellung der Batterien verursacht wird. Diese Schadstoffe werden allerdings zum Teil 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.

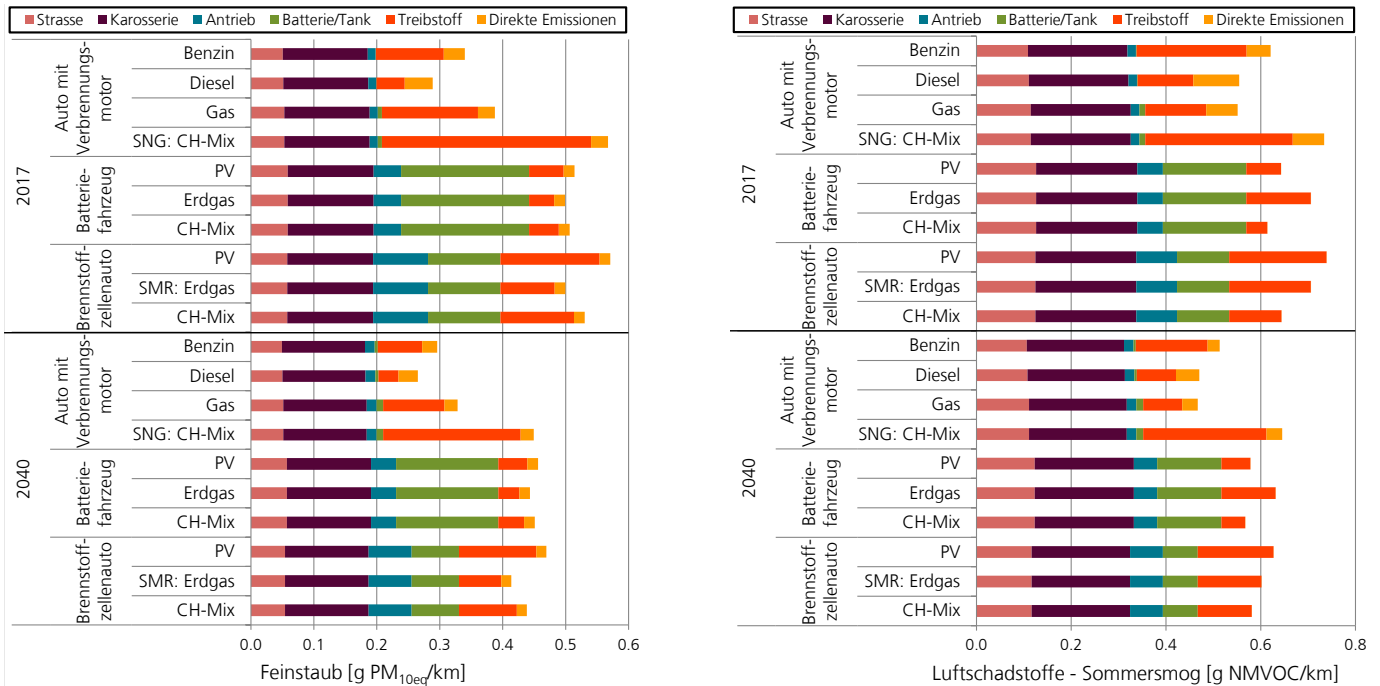


Abbildung 2: Feinstaubbelastung (links) und Emissionen von Luftschadstoffen, die Sommersmog verursachen (rechts) von Personenwagen 2017 und 2040 pro Fahrzeugkilometer. «PV»: Fotovoltaik; «SNG»: Synthetisches Erdgas, hier erzeugt durch Elektrolyse mit dem CH-Strommix und CO<sub>2</sub> aus der Luft; Wasserstoff für das Brennstoffzellenauto wird entweder per Erdgas-Reformierung («SMR») oder Elektrolyse (CH-Strommix oder PV-Strom) erzeugt; «Gas» ist eine Mischung aus 90 Prozent Erd- und 10 Prozent Biogas. Die unterschiedlichen Farben in den Balken zeigen den Ursprung der Emissionen: Herstellung, Wartung, Entsorgung einzelner Fahrzeugkomponenten und der Strassen, die Treibstoffbereitstellung und direkte Emissionen der Autos.

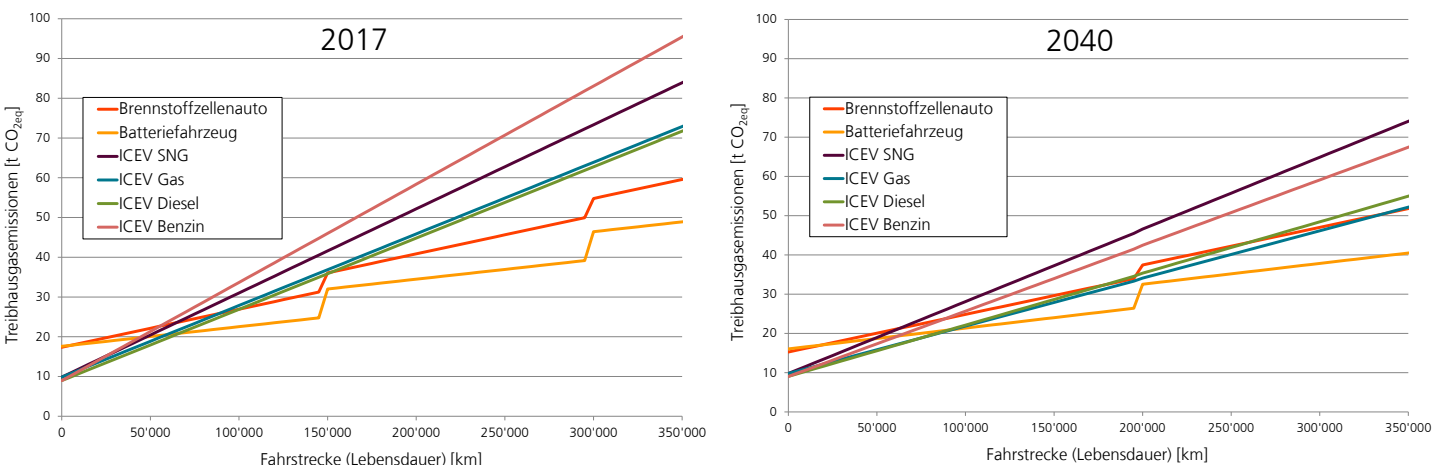


Abbildung 3: Treibhausgasemissionen während der gesamten Lebensdauer verschiedener Fahrzeuge, 2017 (links) und 2040 (rechts). «ICEV»: Auto mit Verbrennungsmotor; «SNG»: Synthetisches Erdgas, hier erzeugt via Elektrolyse aus dem Schweizer Strommix und CO<sub>2</sub> aus der Luft. Der Schweizer Strommix 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 90 Prozent Erdgas und 10 Prozent Biogas. Jeweils nach 150'000 km (2017) bzw. 200'000 km (zukünftig) werden Batterien und Brennstoffzellen ersetzt.

# UMWELTAUSWIRKUNGEN VON PERSONENWAGEN – HEUTE UND MORGEN

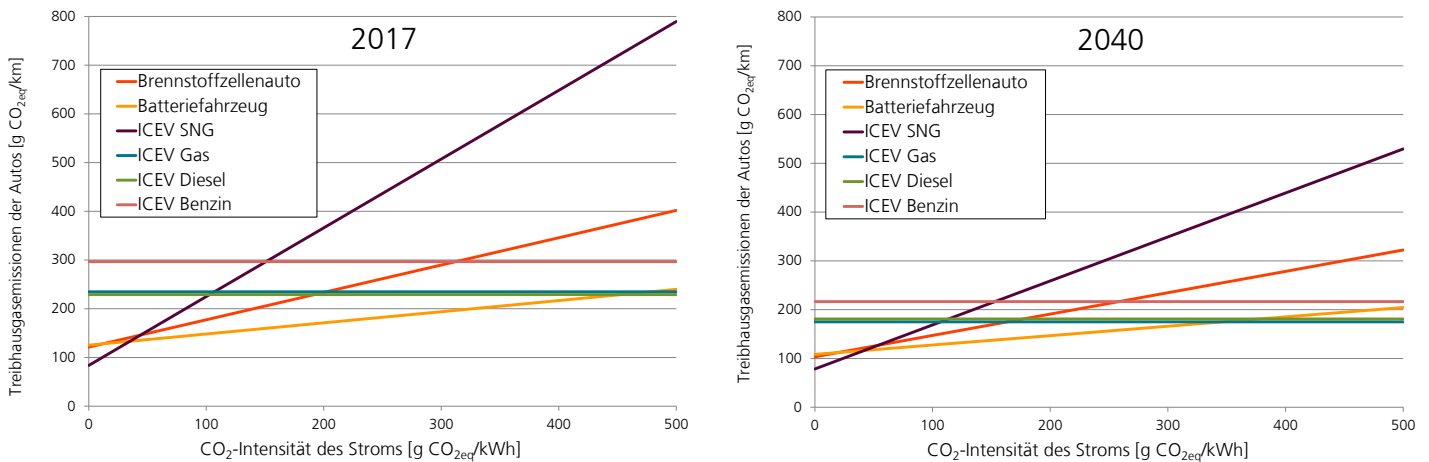


Abbildung 4: Treibhausgasemissionen der Autos in Abhängigkeit vom CO<sub>2</sub>-Gehalt des Stroms, der genutzt wird, um Batterien in Batteriefahrzeugen zu laden oder zur Produktion von Wasserstoff für Brennstoffzellenautos oder zur Erzeugung von synthetischem Gas. «ICEV»: Auto mit Verbrennungsmotor; «SNG»: synthetisches Erdgas, hier erzeugt via Elektrolyse und CO<sub>2</sub> aus der Luft. «Gas» ist eine Mischung aus 90 Prozent Erdgas und 10 Prozent Biogas. 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, da die Herstellung von Batterien und Brennstoffzellen entfällt. 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: Wasser- und Windkraftwerke in der Schweiz produzieren Strom mit einer CO<sub>2</sub>-Intensität von ca. 10–30 g CO<sub>2eq</sub>/kWh, Fotovoltaikanlagen mit rund 70–100 g CO<sub>2eq</sub>/kWh; Erdgaskraftwerke würden Werte von 400–500 g CO<sub>2eq</sub>/kWh erreichen und der heutige Schweizer Strommix liegt bei etwas über 100 g 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. Bei einer Batteriemasse von 350 kg ergibt sich ein Energiegehalt von ca. 40 kWh heute und dank steigender Energiedichte von rund 90 kWh im Jahr 2040. Die Lebensdauer der Batterien wird für heute mit 150'000 km veranschlagt, für 2040 mit 200'000 km. Der wichtigste Faktor für die Umweltbelastungen der Batterieproduktion ist der Energieverbrauch bei der Herstellung der Batteriezellen: Es ist zentral, wie viel Strom verbraucht wird und aus welchen Quellen dieser stammt. Für die Ökobilanz vorteilhaft wären eine «saubere» Produktion, 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 der Ökobilanzen von Personenwagen 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. Der Hintergrundbericht gibt einen Einblick in realistische Schwankungsbereiche dieser Kennzahlen und deren Einfluss auf die Ergebnisse: Was bedeutet es beispielsweise, wenn Dieselaautos die Emissionsgrenzwerte nicht erfüllen und markant mehr Stickoxide ausstossen? Und wie wirkt sich eine rein erneuerbare Energieversorgung der Batterieproduktion auf die Ökobilanz aus? Im Hintergrundbericht sind auch sämtliche Parameterwerte dokumentiert und alle Datenquellen angegeben. Ebenfalls dargestellt sind zusätzliche Ökobilanz-Ergebnisse, beispielsweise für Plug-in-Hybridfahrzeuge.