

Vergleichende Ökobilanz individuelle Mobilität: Elektromobilität versus konventionelle Mobilität mit Bio- und fossilen Treibstoffen

Hans-Jörg Althaus, Marcel Gauch

Technologie & Gesellschaft

Empa

Überlandstr. 129, CH-8600 Dübendorf

hans-joerg.althaus@empa.ch

marcel.gauch@empa.ch

www.empa.ch/lca

- Ziel der Studie
- Untersuchungsrahmen
- Sachbilanzen
 - Betrieb, Treibstoffbedarf
 - Betrieb, Emissionen
 - Fahrzeug
 - Batterie
 - Entsorgung
 - Sensitivitätsanalysen
- Resultate / Diskussion
- Schlussfolgerung / Ausblick

- Ist die zunehmende Hoffnung auf e-Mobility zur Lösung von Umweltprobleme berechtigt?
- Werden Elektrofahrzeuge in naher Zukunft (2015) umweltfreundlicher sein als konventionelle oder biotreibstoffbetriebene Fahrzeuge?
- Unter welchen Bedingungen können Elektrofahrzeuge zu einer umweltfreundlicheren Mobilität beitragen?

- Vergleichende LCA zur externen Kommunikation
 - Vergleich von „umweltfreundlichen“ neuen Fahrzeugen, nicht von Flotte!
- ISO 14'040 / 14'044 kompatibel

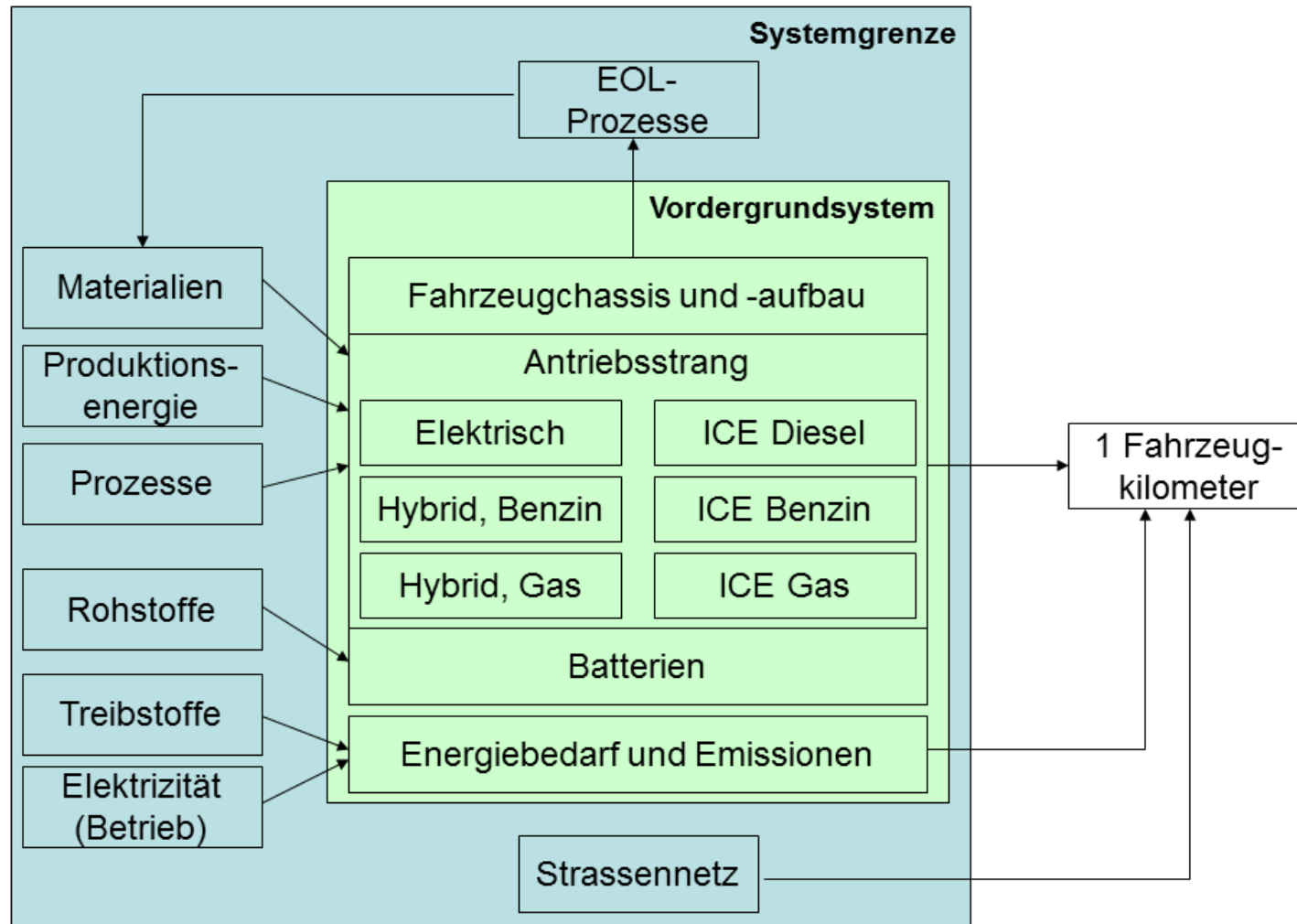
- Produktion, Betrieb für 150'000 km und Entsorgung eines Fahrzeuges
- Modellhaftes Fahrzeug der Golf-Klasse
- Li-Ionen-Batterien für Elektro- (400kg) und Hybrid- (100 kg) Fahrzeuge
- Schweizer Strassennetz

Energieträger / Antriebssystem	Strom ¹	Diesel	Benzin	Erdgas	Palmmethyl-ester PME (Maleysia)	E85 aus Zuckerrohr ² (Brasilien)	Biogas (Schweizer Kompogas)
Elektrisch	20 kWh/100km 0.72 MJ/km	-	-	-	-	-	-
Plug-in-Hybrid	Mix CH (80%) 16 kWh/100km 0.58 MJ/km	-	Hybrid (20%) 0.98 l/100km 0.31 MJ/km	-	-	-	-
Hybrid	-	-	Euro 5 4.9 l/100km 1.56 MJ/km	-	-	-	-
ICE	-	Euro 5 4.9 l/100km 1.76 MJ/km	Euro 5 6.8 l/100km 2.17 MJ/km	Euro 5 6.3 m3/100km 2.17 MJ/km	Euro 5 5.44 l/100km 1.76 MJ/km	Euro 5 8.07 l/100km 2.17 MJ/km	Euro 5 6.3 m3/100km 2.17 MJ/km

1: 6 Varianten (Mix CH, Mix UCTE, KKW CH, Gas-Kombi UCTE, Kohle UCTE, PV CH)

2: Alternativ E85 aus Europäischen Holzabfällen

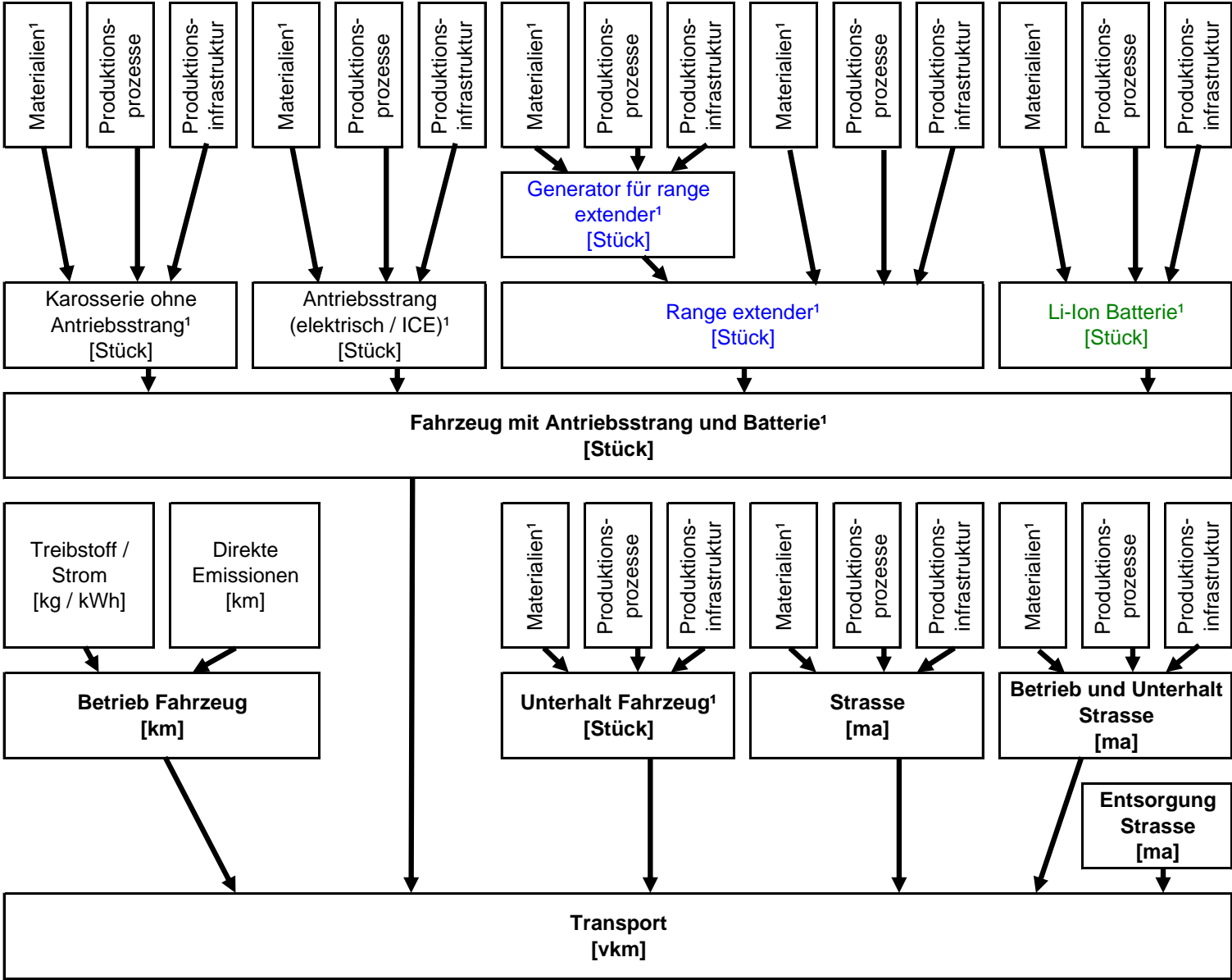
■ Funktionelle Einheit: 1 Fahrzeug-kilometer (vkm)



- Energiebereitstellung in naher Zukunft: wie 2005
- Materialisierung / Masse künftiger Fahrzeuge: wie 1999 / 2009
- Nutzungsdauer / Lebenszeit: 12-13 Jahre, 150'000 km
- Betriebsenergiebedarf für Fahrzeuge in naher Zukunft: wie Klassenbeste heute
- Plug-in-Hybrid: 80% elektrisch, 20% Benzin
- Emissionsprofile von ICE Fahrzeugen: Euro5
- Zusammensetzung der zukünftigen Batterie
 - Lithium-Manganoxid; kein Cobalt und Nickel

- Unterschiedliche Entwicklungsstände der verglichenen Fahrzeuge
→ Unterschiedliches Verbesserungspotential durch „learning“.
- Beschränkte Reichweite der Elektrofahrzeuge
 - In Realität ist zu erwarten, dass solche Elektrofahrzeuge eher als Zweitfahrzeuge eingesetzt werden.
- Unterschiedliche Beschleunigung / Höchstgeschwindigkeit
 - Elektrofahrzeuge beschleunigen schneller, haben meist limitierte Höchstgeschwindigkeit
- Unterschiedliche Kosten
 - Elektrofahrzeuge teurer in Anschaffung, dafür 3 mal günstiger im Betrieb.

- Ecoindicator 99 (H/A)
 - Human Health, Ecosystem quality, Resource quality
- Treibhauseffekt (GWP 100a)
- CML 2001
 - Humantoxizität, Sommersmog (POCP), Landnutzung, Überdüngung
- Kummulierter Energieaufwand (CED)
 - Nuklear, Fossil
- Kummulierter Exergieaufwand (CExD)
 - Metalle, Mineralien
- Verluste (dissipative) von kritischen mineralischen Ressourcen
 - Cobalt, Gold, Kupfer, Lithium, Nickel, PGM
- Radioative Abfälle (Volumen)



Nur Hybrid und Plug-in-Hybrid

Nur Elektro, Hybrid und Plug-in-Hybrid

¹ Materialien inklusive End-of-Life und Substitution

- Benzin: NEFZ-Wert VW Golf IV 1.2 TSI BlueMotion + Praxiszuschlag
- Diesel: NEFZ-Wert VW Golf IV 1.6 TDI BlueMotion + Praxiszuschlag
- Erdgas / Biogas: Gleicher Energiebedarf wie Benzin
- Ethanol (E85): Gleicher Energiebedarf wie Benzin
- Palmmethylester (PME): Gleicher Energiebedarf wie Diesel
- Hybrid: NEFZ-Wert berechnet aus Fahrzeugdaten von hypothetischem Golf und Wirkungsgrad von Toyota Prius III Energie + Praxiszuschlag
- Elektrisch: NEFZ-Wert berechnet aus Fahrzeugdaten von hypothetischem Golf und Wirkungsgrad von Komponenten (Laden / Entladen, Controller, Motor, Transmission) inkl. Rekuperieren + Praxiszuschlag
- Plug-in-Hybrid: Mischung aus 80% elektrisch + 20% Hybrid

- Basis: Benzin- / Dieselfahrzeuge Euro5 aus ecoinvent v2.01
- CO₂-Emission angepasst an Treibstoffverbrauch und quelle (biogen / fossil)
- Treibstoffspezifische Emissionen angepasst:

Emission in Luft	Unit	# Operation, passenger car, komogas, 2015, EURO5/CH U	# Operation, passenger car, natural gas, 2015, EURO5/CH U	# Operation, passenger car, E85 xx, 2015, EURO5/CH U ¹	# Operation, passenger car, petrol, 2015, EURO5/CH U	Operation, passenger car, petrol, EURO5, CH, [km] (#6561)	# Operation, passenger car, 100% Palm Methyl Ester MY, 2015, EURO5/CH U	# Operation, passenger car, diesel, 2015, EURO5/CH U	Operation, passenger car, diesel, EURO5, CH, [km] (#6557)
Benzene	kg	7.616E-07	7.616E-07	2.743E-06	-	8.892E-06	-	-	1.332E-06
Carbon monoxide, biogenic	kg	4.465E-04	0.000E+00	7.918E-04	-	0.000E+00	5.086E-04	-	0.000E+00
Carbon monoxide, fossil	kg	0.000E+00	4.465E-04	1.397E-04	-	7.554E-04	0.000E+00	-	5.086E-04
Methane, biogenic	kg	4.509E-05	0.000E+00	1.228E-06	-	0.000E+00	2.732E-06	-	0.000E+00
Methane, fossil	kg	0.000E+00	4.509E-05	2.166E-07	-	5.502E-06	-	-	2.732E-06
Toluene	kg	5.250E-06	5.250E-06	5.561E-06	-	7.681E-06	-	-	3.642E-07
NMVOG	kg	1.053E-05	1.053E-05	5.182E-05	-	9.329E-05	-	-	1.085E-04
Quelle: Ecoinvent v2.01		operation, passenger car, methane, 96 vol-%, from biogas, CH, [km] (#6201)	operation, passenger car, natural gas, CH, [km] (#6202)	operation, passenger car, methanol, CH, [km] (#6115)	Operation, passenger car, petrol, EURO5, CH, [km] (#6561)	Operation, passenger car, petrol, EURO5, CH, [km] (#6561)	operation, passenger car, rape seed methyl ester 5%, CH, [km] (#6205)	Operation, passenger car, diesel, EURO5, CH, [km] (#6557)	Operation, passenger car, diesel, EURO5, CH, [km] (#6557)

¹ xx = sugar cane BR, or wood waste CH

- Abgasemissionen (Hybride):
 - Basis: Benzin- / Dieselfahrzeuge Euro5 aus ecoinvent v2.01
 - CO₂-Emission angepasst an Treibstoffverbrauch

- Abriebemissionen
 - Basis: Benzin- / Dieselfahrzeuge Euro5 aus ecoinvent v2.01
 - Bremsabrieb wegen Rekuperieren um 90% reduziert

ICE Vehicle

Glider

Body and Frame,
Axle, Brakes, Wheels,
Bumpers, Cockpit,
A/C System,
Seats, Doors, Lights
Entertainment etc.

Drivetrain

Engine, Gearbox,
Cooling System,
Fuel System,
Starting System,
Exhaust System, Lubrication
etc.

Plug-in Hybrid Vehicle

Glider

Body and Frame,
Axle, Brakes, Wheels,
Bumpers, Cockpit,
A/C System,
Seats, Doors, Lights
Entertainment etc.

Drivetrain

ICE Range extender,
El. Motor, Gearbox,
Controller, Charger, Cables,
Cooling System etc.

Battery

Li-Ion battery 100 kg

Battery Vehicle

Glider

Body and Frame,
Axle, Brakes, Wheels,
Bumpers, Cockpit,
A/C System,
Seats, Doors, Lights
Entertainment etc.

Drivetrain

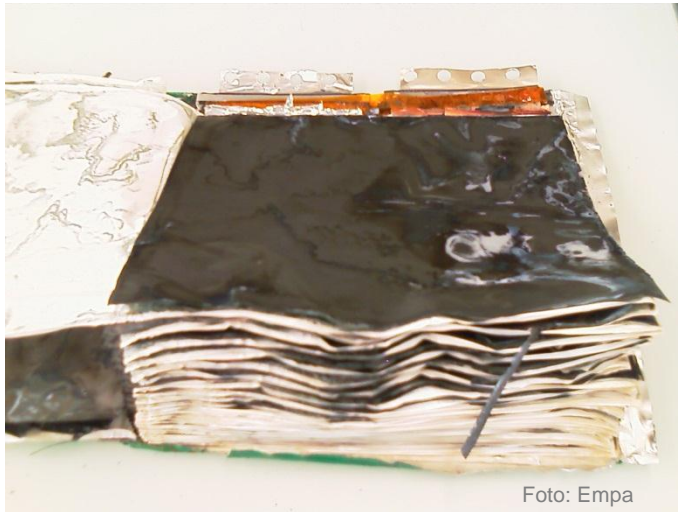
El. Motor, Gearbox,
Controller, Charger, Cables,
Cooling System etc.

Battery

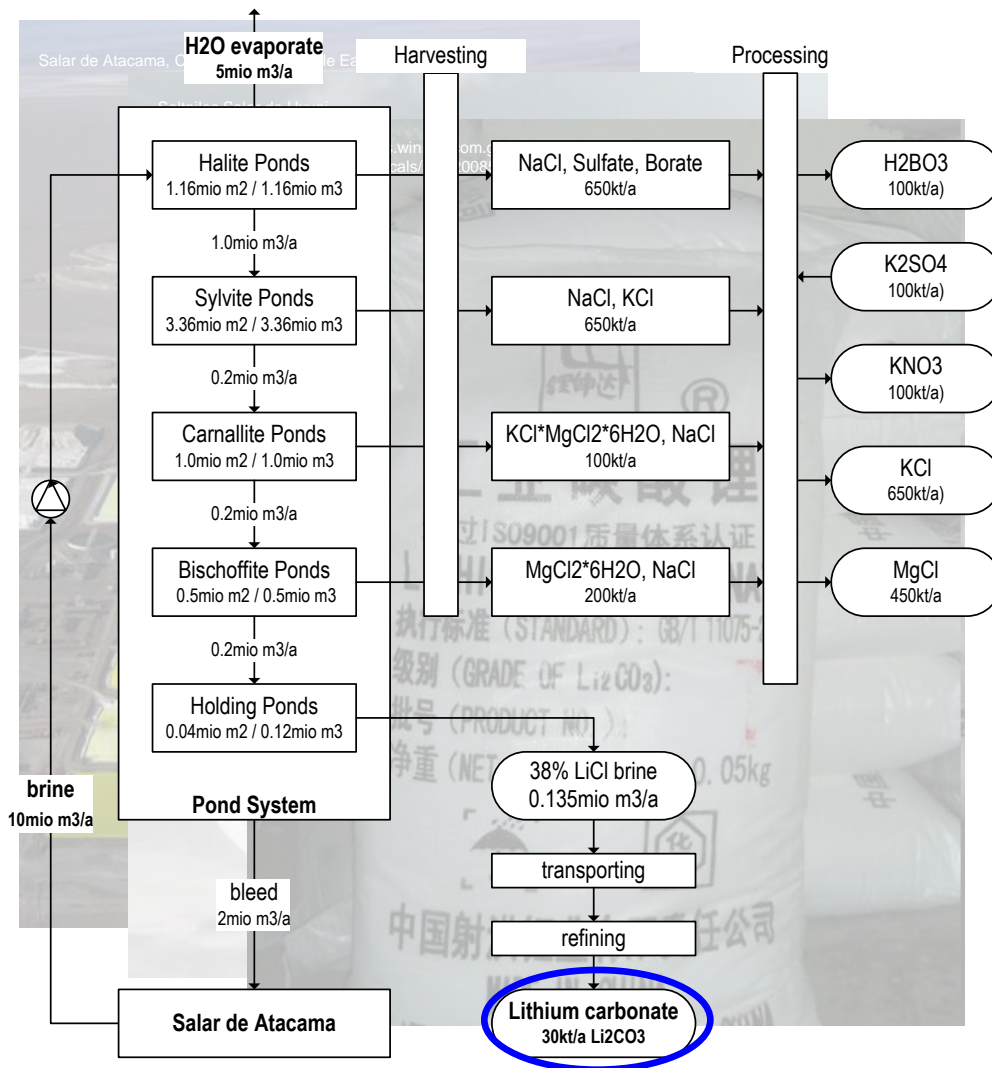
Li-Ion battery 400 kg

- Fahrzeug Karosserie alle: Detaillierte LCA von VW Golf IV, skaliert auf aktuelle Masse
- Fahrzeug Antrieb ICE: Detaillierte LCA von VW Golf IV, skaliert auf aktuelle Masse
- Fahrzeug Antrieb elektrisch / hybrid: Publikationen von Herstellern zu Prototypen, Publikationen zu Komponenten, theoretische Überlegungen
- Batterie
 - Basis: Empa Studie
 - 400kg à 114 Wh/kg → ca. 200 km Reichweite
 - Lebensdauer > 800 Zyklen → theoretisch > 180'000 km
 - Aber: Lebensdauer < 12 Jahre
 - → 1.5 Batterien à 400 kg pro Fahrzeug

Was steckt drin:

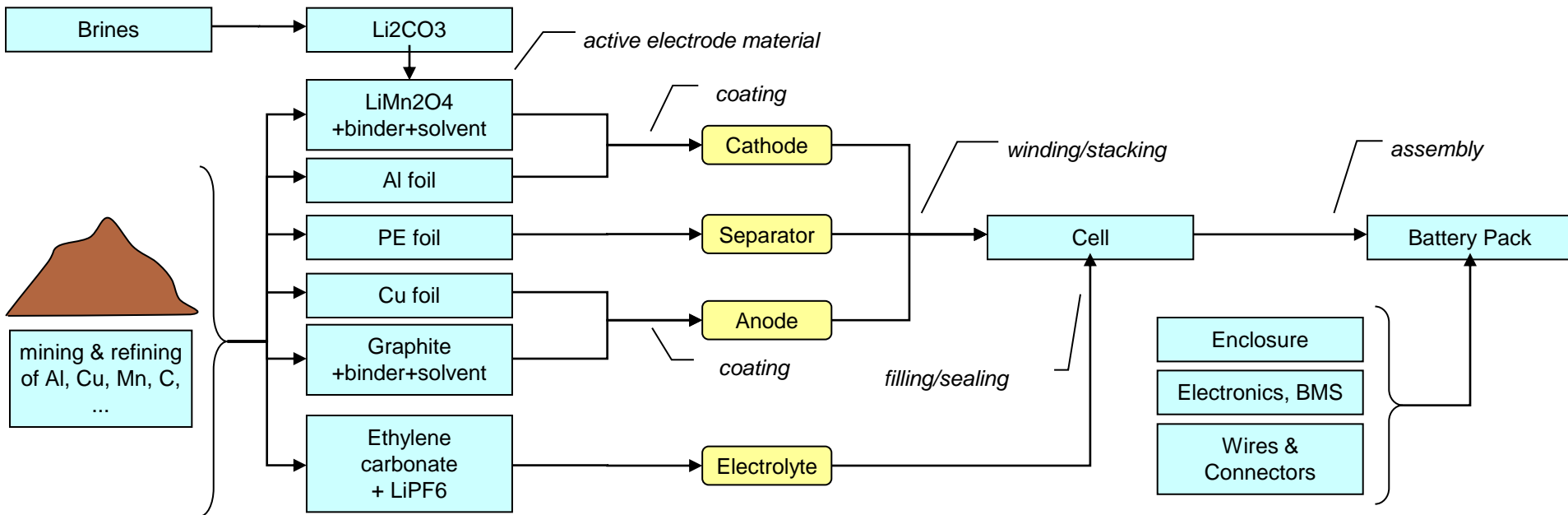


- nur ca. 1% einer Li-Ion Batterie ist Li (resp. 5% Li₂CO₃) d.h. 0.08 kg Li für 1kWh
- ca. 40% einer Zelle sind Al (~23%) und Cu (~13%) (Stromleiter, Elektrodenträger)
- ca. 40% bilden das aktive Elektrodenmaterial (Kathode LiMn₂O₄ ~24%, Anode Graphit ~16%)
- ca. 20% macht der Electrolyt aus (lithium hexafluorophosphate LiPF₆ 1M in Lösungsmittel Ethylencarbonat)
- Die Metalle Cu, Mn, Co, Ni, Fe werden rezykliert
- Graphit, die Elektrolytlösung und Li werden normalerweise aus Kostengründen nicht rezykliert



- Das meiste Lithium für Batterien kommt aus Salzseen in den Anden (Chile, Bolivien) oder in China (Tibet).
- Es wird in Salinen gewonnen und als Lithiumcarbonat Li₂CO₃ verkauft.
- Der grösste Energieanteil der Produktion von Li₂CO₃ ist Sonnenenergie
- Viele der gewonnen Nebenprodukte gehen in die Düngerproduktion.

Extraction of lithium carbonate from Atacama (CL), one of the most important worldwide Li₂CO₃ producers
 Compilation of numbers and graphics: Empa



- 2 dünne Folien und ein für Ionen durchlässiger Separator werden gefaltet, um eine grosse Fläche in ein kleines Volumen zu packen
- Dieser Stapel wird in eine Tasche gesteckt, welche mit Li-Salz Lösung gefüllt und verschlossen wird -> Zelle.
- Viele solcher Zellen werden zusammenschaltet und mit einem Batterie Management System (BMS) und der Verdrahtung in ein Gehäuse montiert -> Batterie.

graphics: Empa

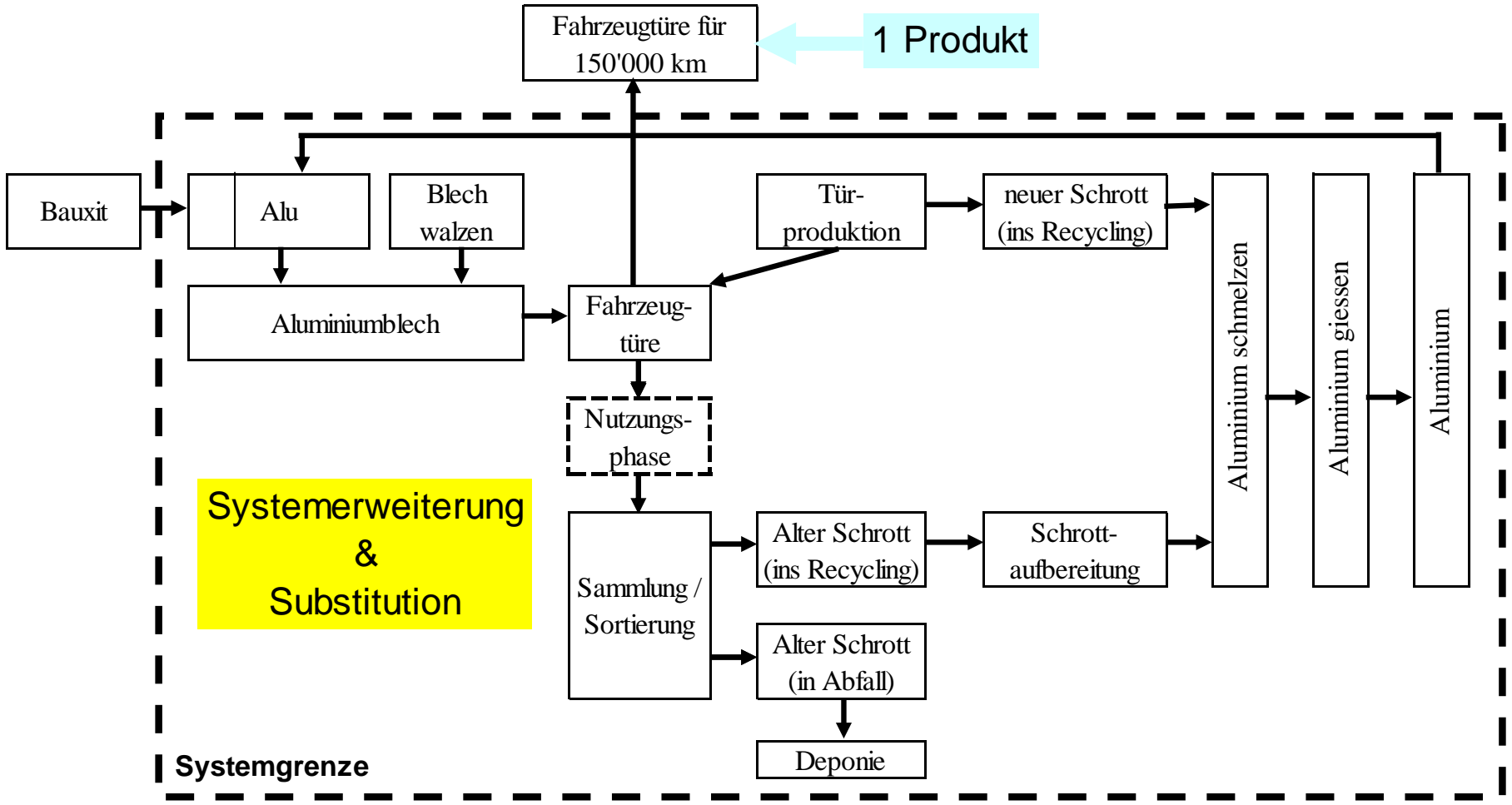
- Alle Fahrzeuge und Batterien werden am Lebensende dem Recycling zugeführt
- Alle End-of-Life (EOL) Prozesse sind in der Bilanz enthalten
- Sekundärmaterial ersetzt Primärmaterial bei der Fahrzeugproduktion
- Nutzbare Energieoutputs aus EOL-Prozessen ersetzen alternative Bereitstellung der entsprechenden Energiemenge
- Ausbeuten Recycling:

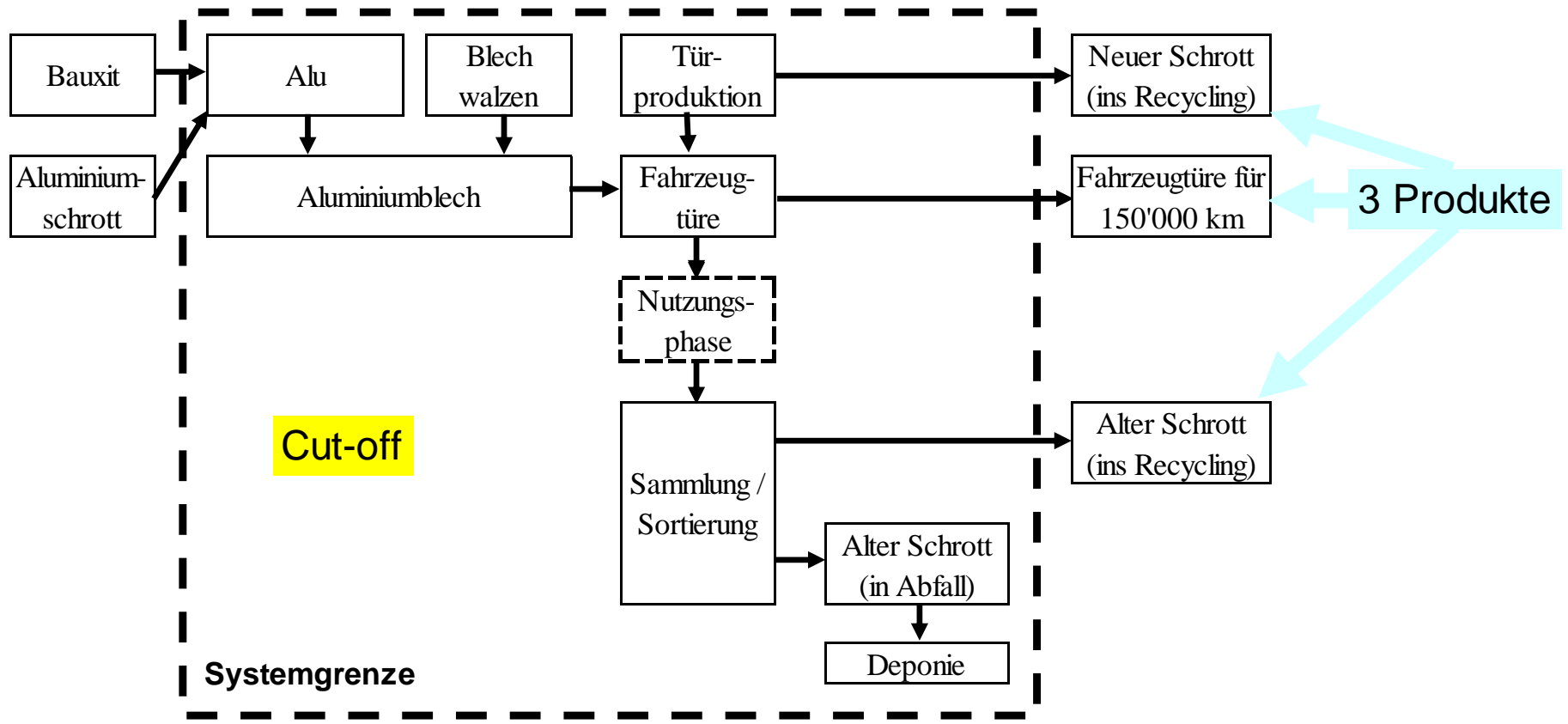
	Substitution		Substitution
Element	Ausbeute Recycling	Element	Ausbeute Recycling
Ag	99.5%	Mo	99.0%
Al ¹	95.0%	Ni	99.0%
Au	99.5%	Pb	95.0%
Co	99.0%	Pd	99.5%
Cr	99.0%	Pt	99.5%
Cu	99.0%	Sn	95.0%
Fe	95.0%	Zn	95.0%
Mn	99.0%		

¹: Im Substitutionsmodell nur wenn rein rezykliert. Wenn Aluminium für's Recycling nicht von anderen Metallen getrennt werden kann, 0%.

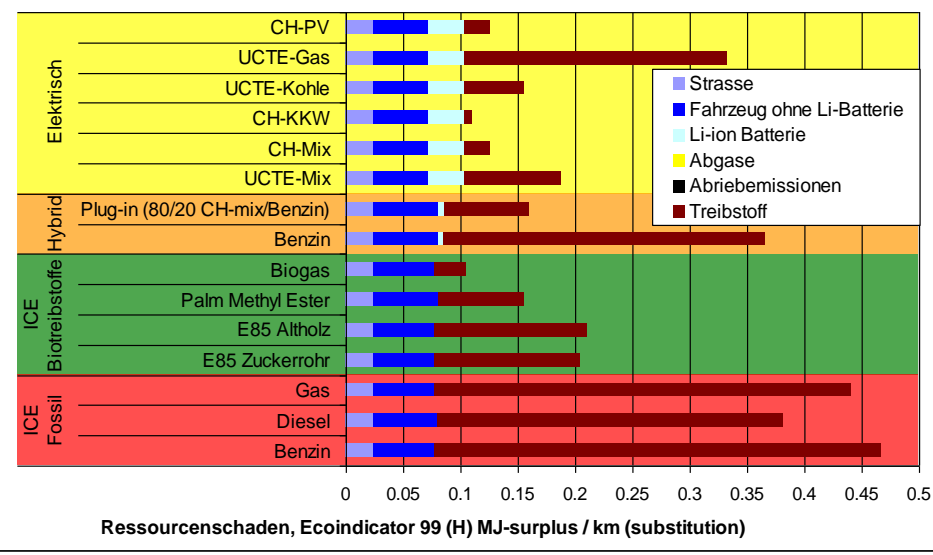
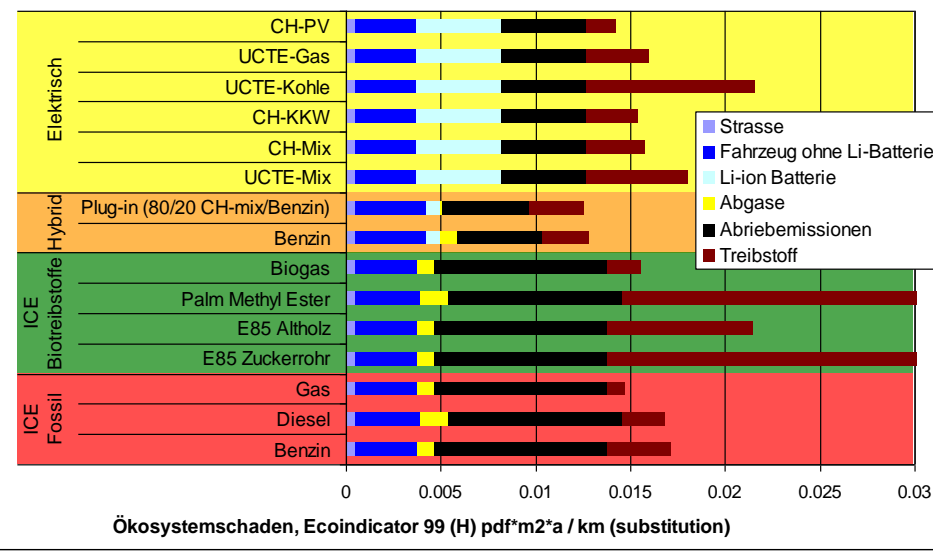
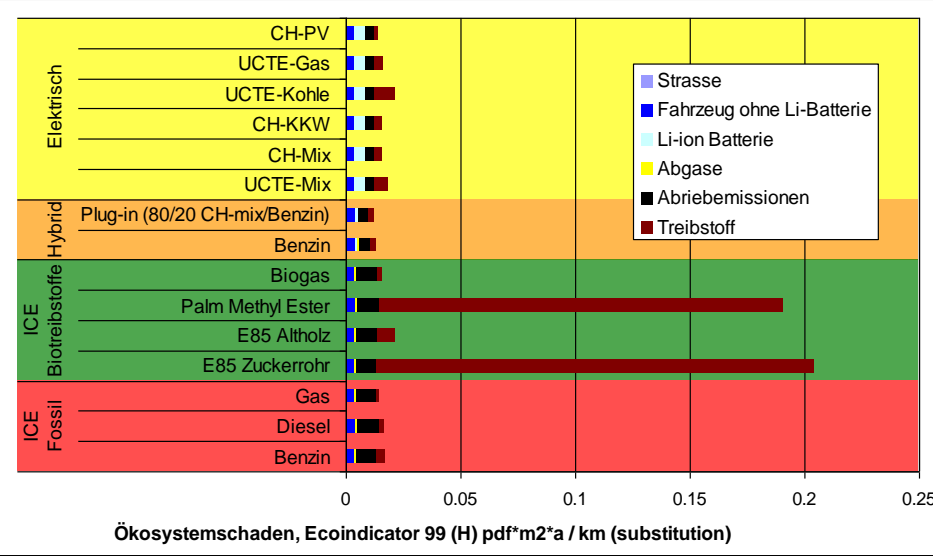
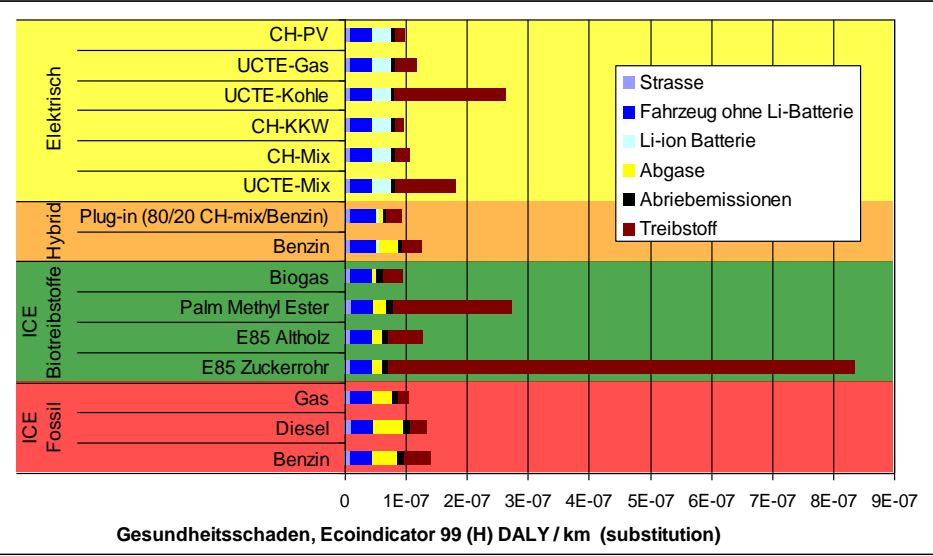
Energie- / Treibstoffbedarf	Basisvariante 100%	best case 75%	worst case 150%	Einheit
Elektrofahrzeug	20	15	30	kWh/100km
Dieselfahrzeuge	4.9	3.675	7.35	l/100km
Benzinfahrzeuge	6.8	5.1	10.2	l/100km
Gasfahrzeuge	6.3	4.725	9.45	m ³ /100km
Biodieselfahrzeuge (PME)	5.44	4.08	8.16	l/100km
E85-Fahrzeuge	8.07	6.0525	12.105	l/100km
Hybridfahrzeuge	4.9	3.675	7.35	l/100km
Plug-in-Hybridfahrzeuge (80/20)	16 / 0.98	12 / 0.735	24 / 1.47	kWh/100km / l/100km
Anteil Strom ab Netz bei Plug-in-Hybridfahrzeugen	80%	95%	50%	%

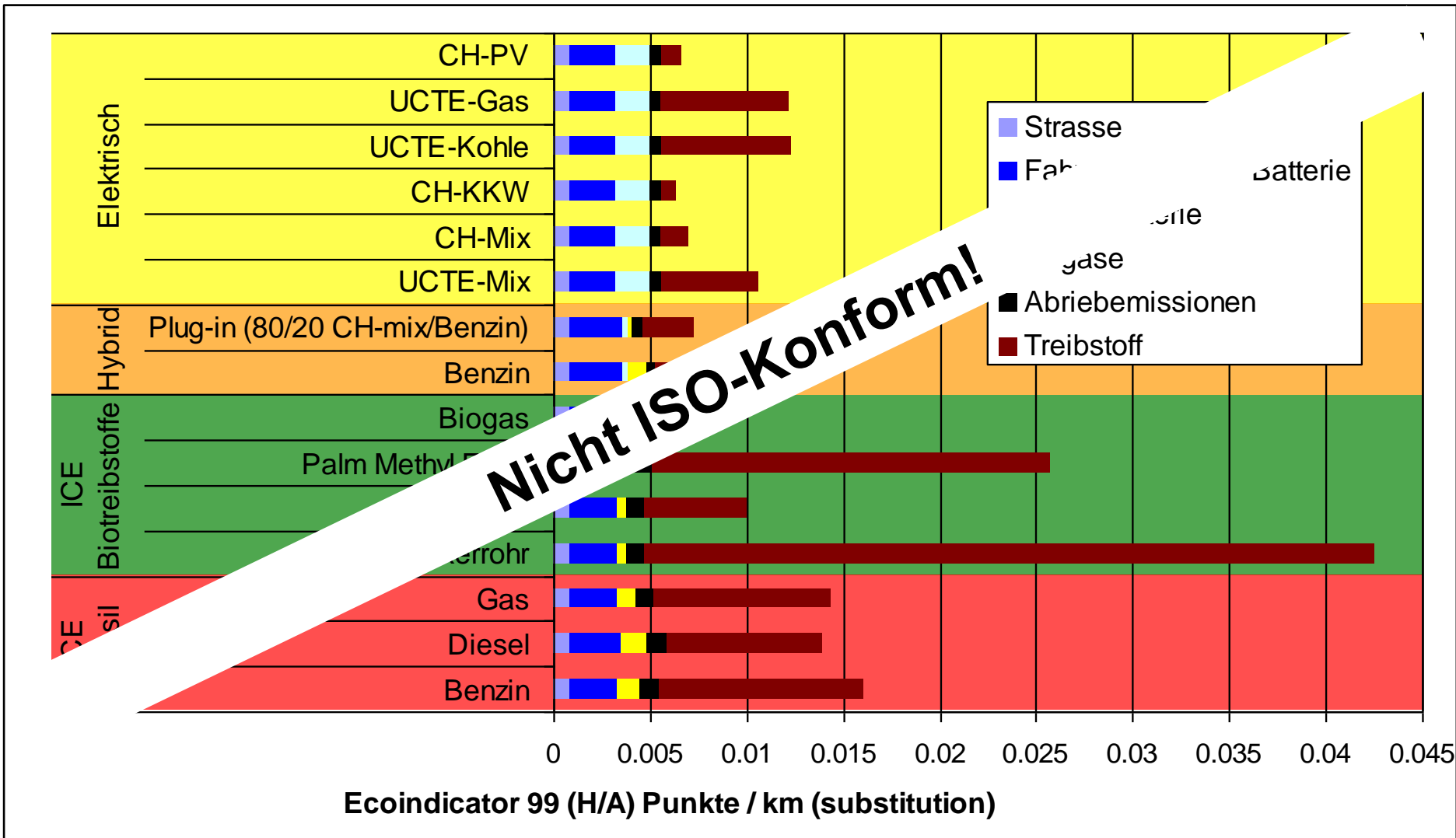
	Basisvariante	best case	worst case	Einheit
Reduktion Bremsmissionen	90%	95%	50%	%
Anzahl Li-Batteriesätze während Lebensdauer	1.5	1	2	Stück
EOL-Modellierung: Recycling von Materialien	Substitution	Substitution	Cut-off	-

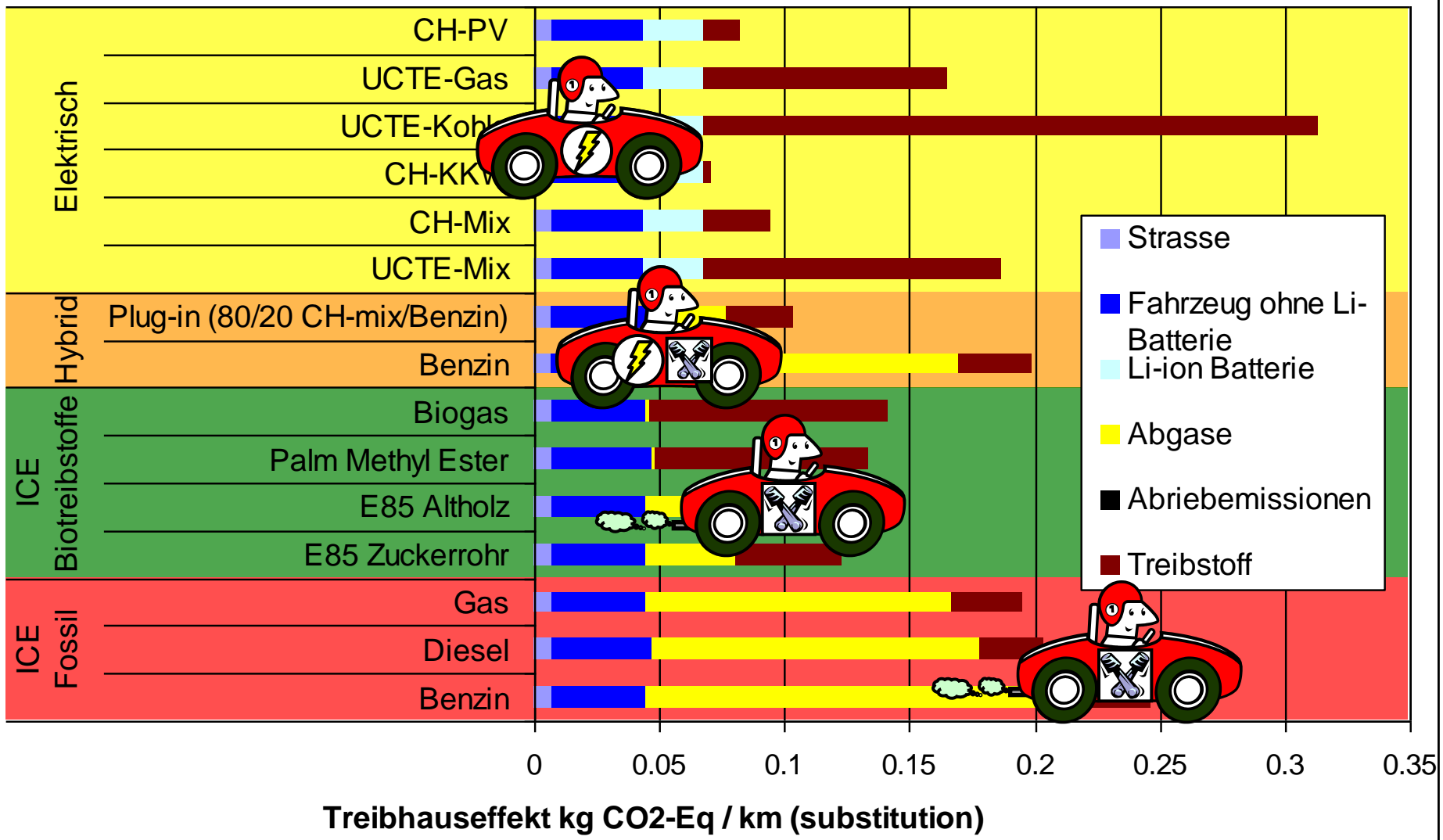




Resultate: Ecoindicator 99 (H)

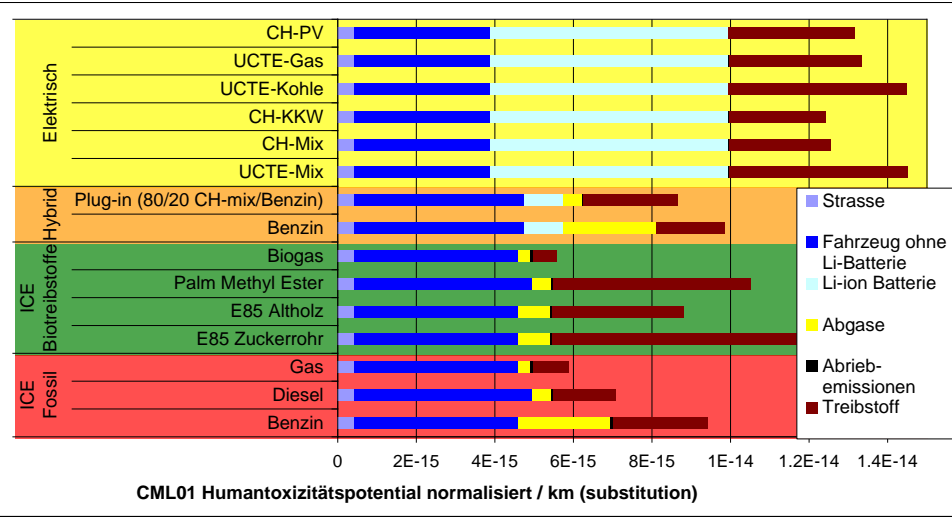
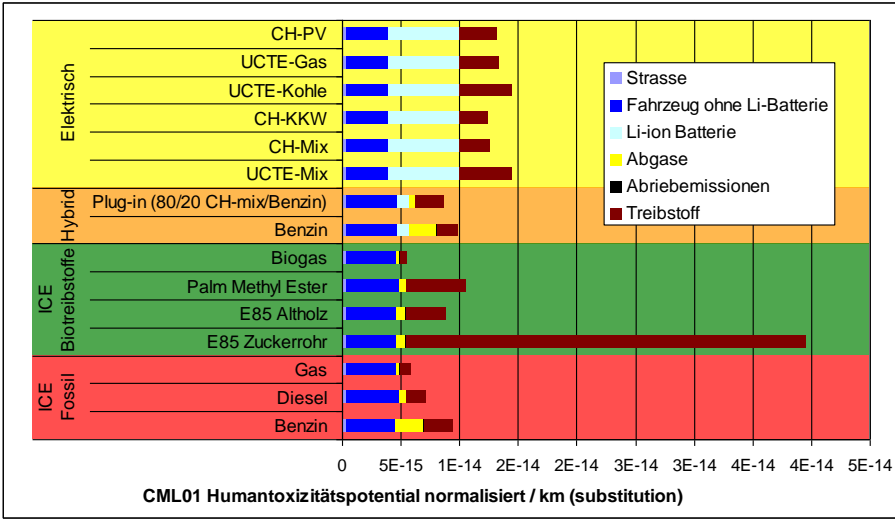




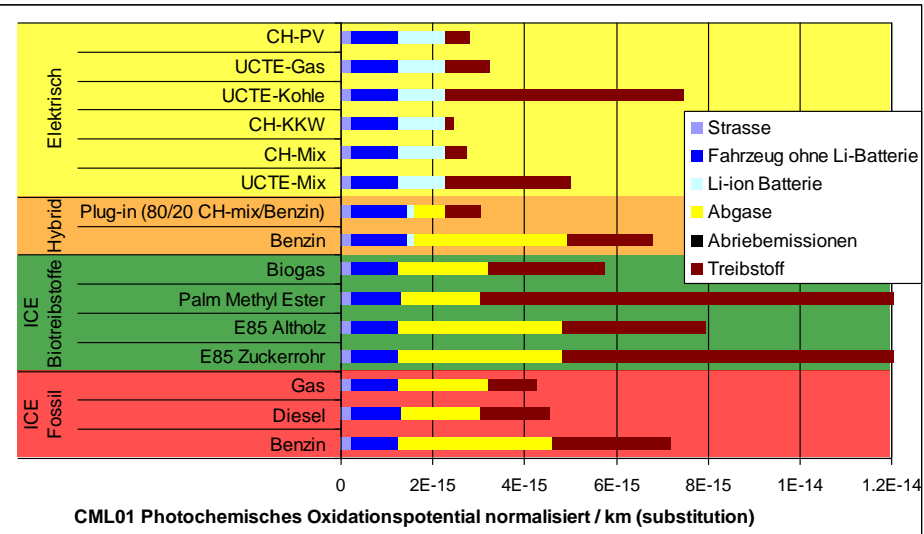
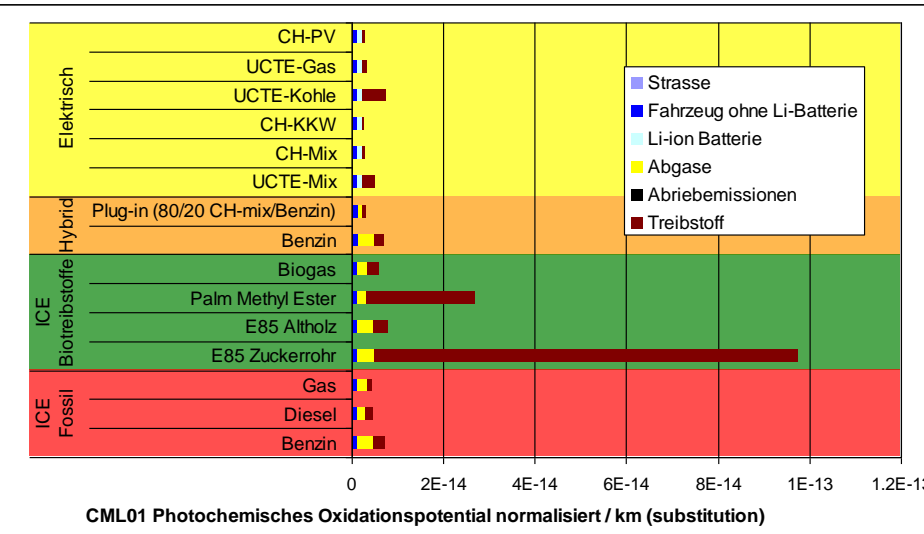


Resultate: CML 2001

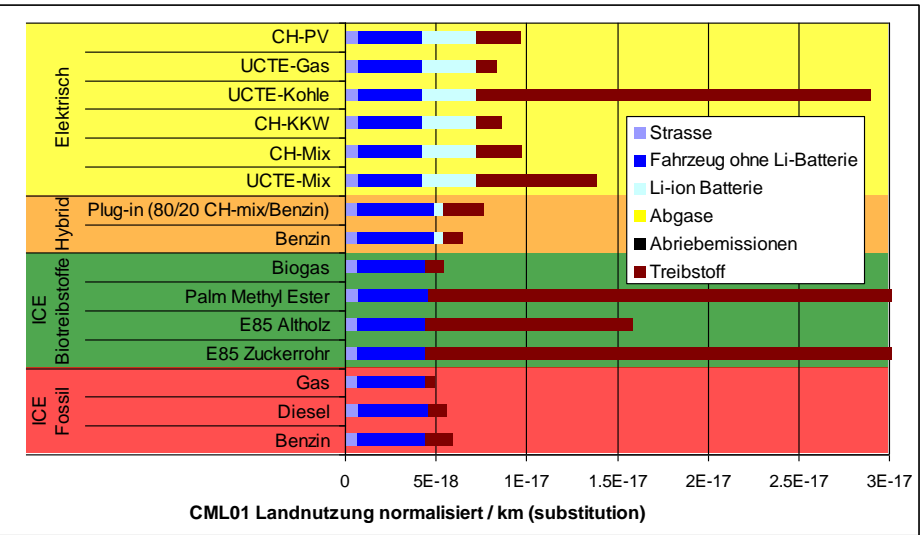
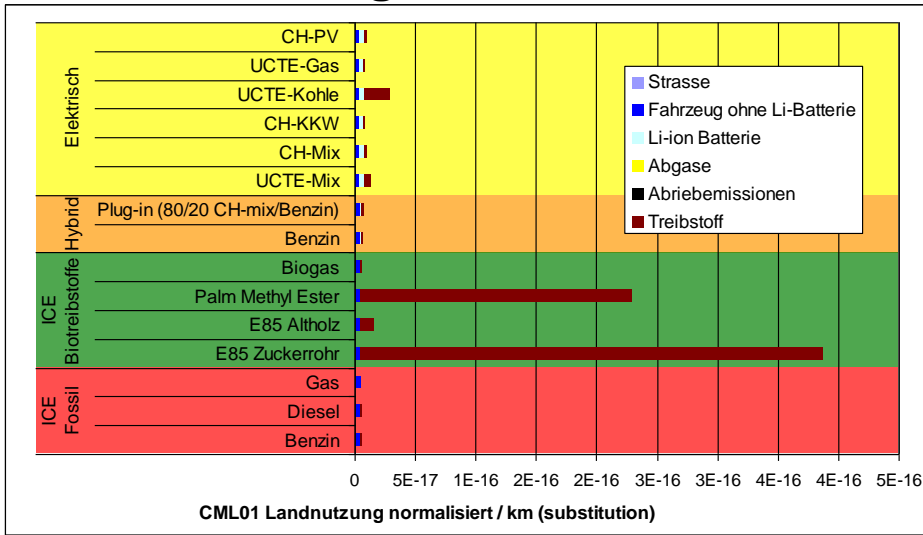
Humantox



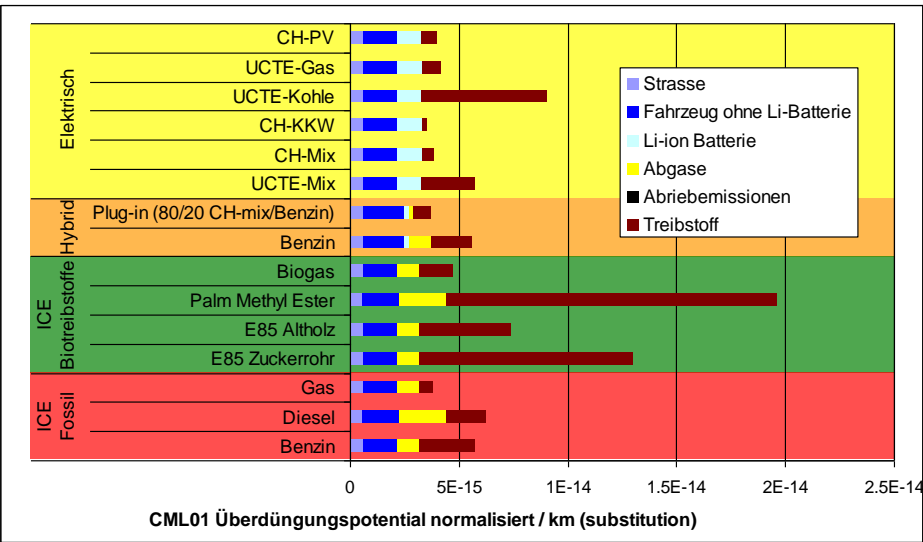
Sommersmog



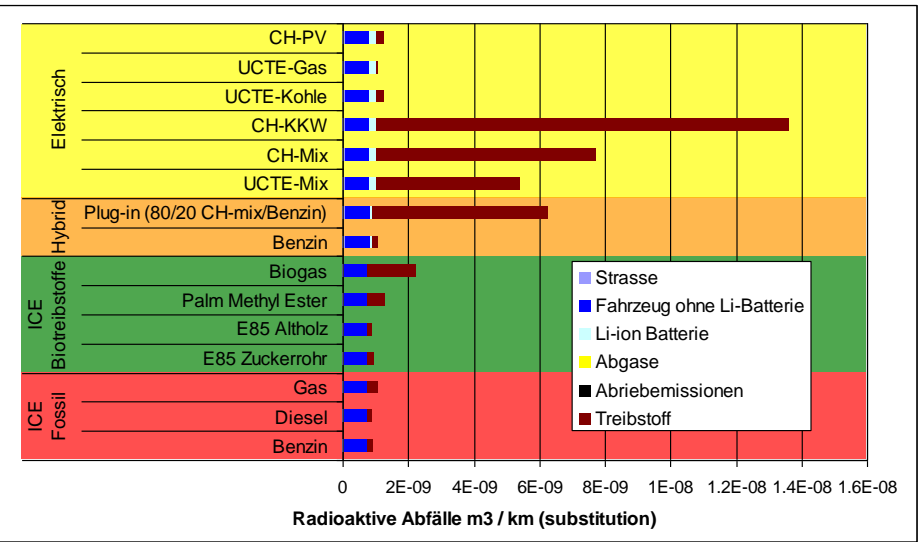
Landnutzung



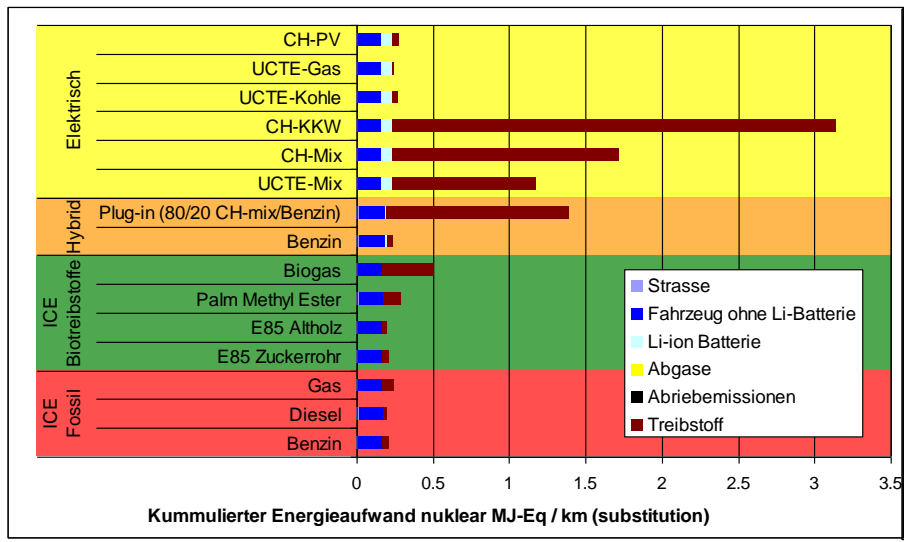
Überdüngung



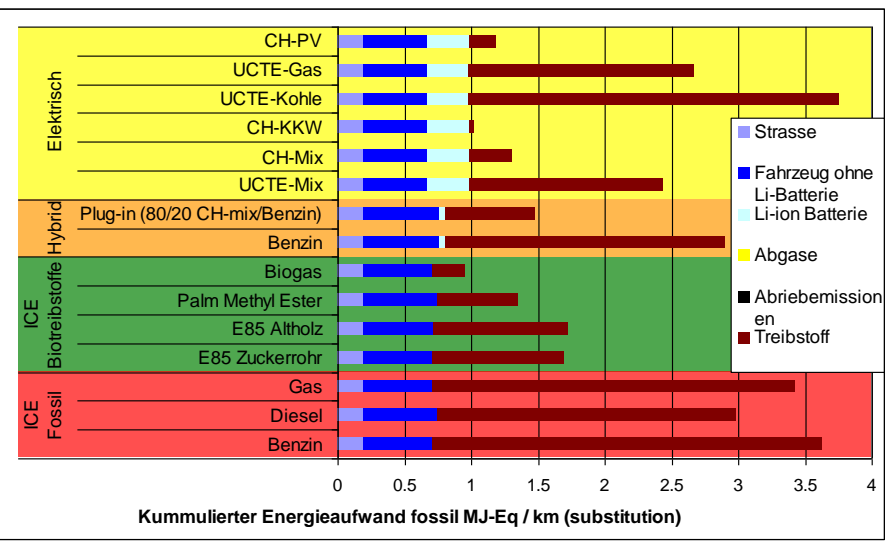
Radioaktive Abfälle



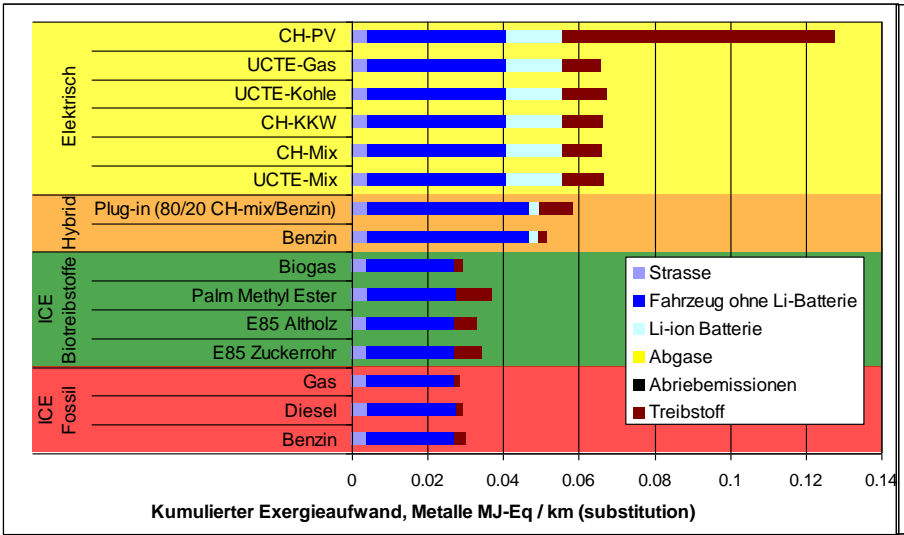
Energieaufwand nuklear



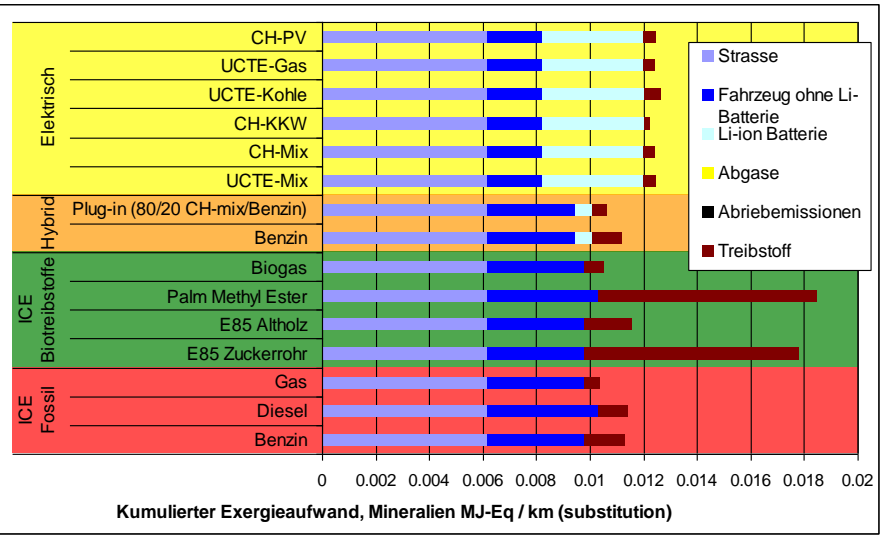
Energieaufwand fossil

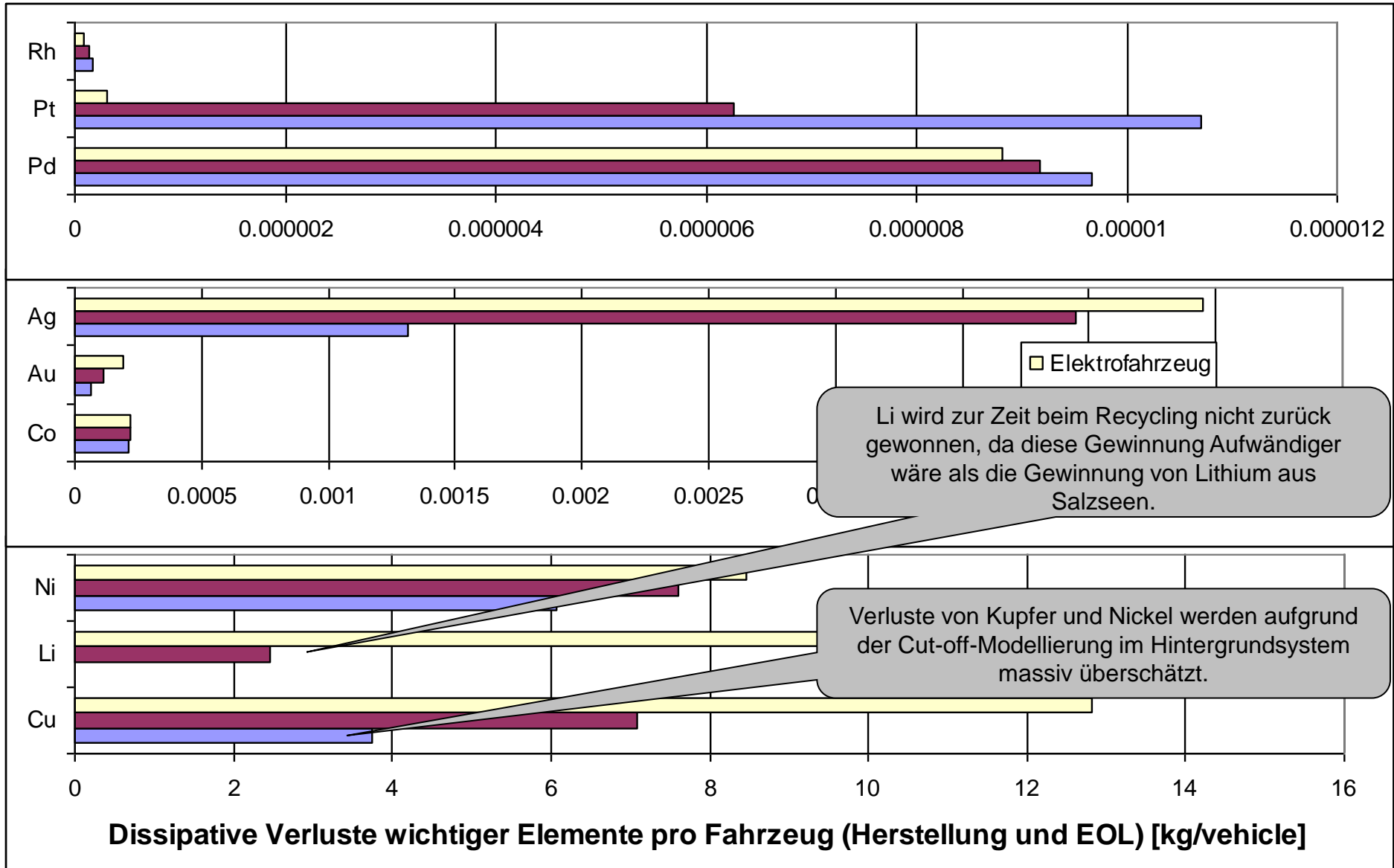


Exergieaufwand, Metalle



Exergieaufwand, Mineralien





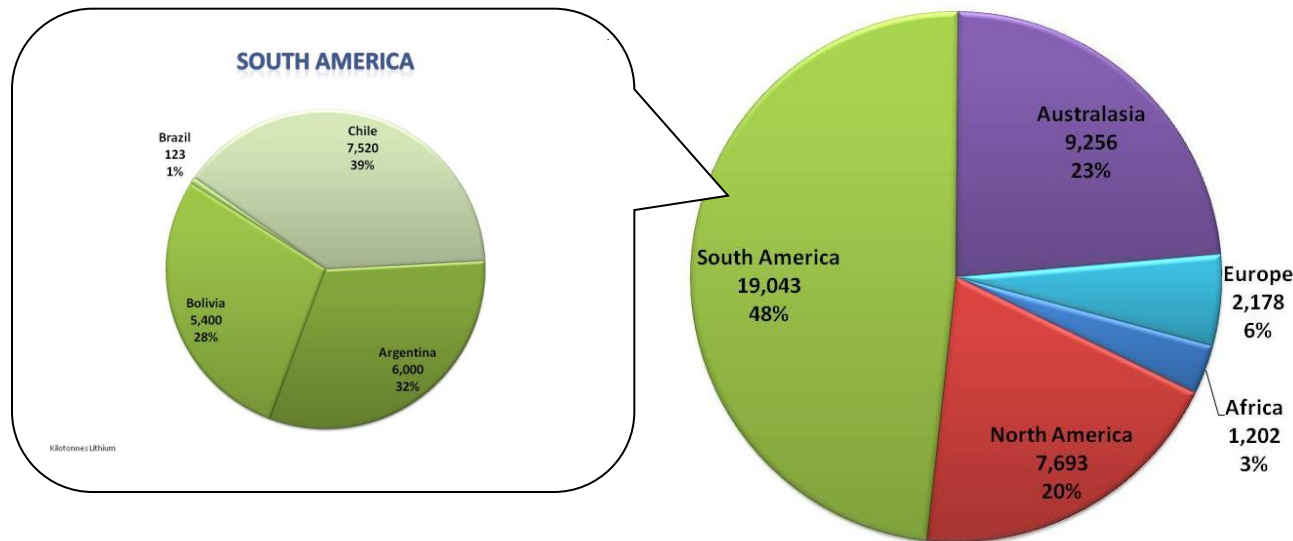
Gibt es genug Li?

Jedes Fahrzeug: 1.5 Batterie à 400 kg -> **14.8 kg Li** (Nissan Leaf: 24kWh battery -> 4 kg Li)

Heute:	900 mio Fahrzeuge x 14.8 kg	13 mio t Li
Ferne Zukunft:	4 mia. Fahrzeuge x 14.8 kg	60 mio t Li

Li Production 2008:	27'000 t/a (source: USGS)	(reicht für 1.8mio Fahrzeuge/a)
Reserve base:	11 mio. t (source: USGS)	39.37 mio. t (Int. Lithium Alliance)

WORLD BROAD BASE LITHIUM RESERVES



graphics: www.lithiumalliance.org

Resultate: Übersicht

Worst case ohne Cut-off-Modellierung für EOL			Ecoindicator 99 (H) Schaden an menschlicher Gesundheit [DALY / km]	Ecoindicator 99 (H) Schaden an Ökosystemqualität [PDF*m2*a / km]	Ecoindicator 99 (H) Schaden an Ressourcenqualität [MJ surplus / km]	Treibhauseffekt [kg CO2-Eq / km]	Humantoxizitätspotential [1 / km]	Photochemisches Oxidationspotential [1 / km]	Landnutzung [1 / km]	Überdüngung [1 / km]	Radioaktive Abfälle [m3 / km]	Kumulierter Energieaufwand nuklear [MJ-Eq / km]	Kumulierter Energieaufwand fossil [MJ-Eq / km]	Kumulierter Exergieaufwand Metalle [MJ-Eq / km]	Kumulierter Exergieaufwand Mineralien [MJ-Eq / km]
			best case	baseline	worst case	best case	baseline	worst case	best case	baseline	worst case	best case	baseline	worst case	best case
ICE Fossil	Benzin	best case	1.20E-07	1.61E-02	3.69E-01	1.96E-01	8.23E-15	5.70E-15	5.58E-18	4.87E-15	8.89E-10	2.00E-01	2.90E+00	2.93E-02	1.09E-02
		baseline	1.41E-07	1.71E-02	4.66E-01	2.46E-01	9.42E-15	7.18E-15	5.96E-18	5.76E-15	9.42E-10	2.12E-01	3.62E+00	3.00E-02	1.13E-02
		worst case	1.83E-07	1.93E-02	6.61E-01	3.47E-01	1.18E-14	1.01E-14	6.73E-18	7.55E-15	1.05E-09	2.35E-01	5.07E+00	3.15E-02	1.21E-02
	Diesel	best case	1.15E-07	1.59E-02	3.06E-01	1.64E-01	6.56E-15	3.74E-15	5.38E-18	5.24E-15	8.64E-10	1.94E-01	2.43E+00	2.90E-02	1.11E-02
		baseline	1.34E-07	1.68E-02	3.81E-01	2.03E-01	7.08E-15	4.55E-15	5.63E-18	6.22E-15	8.98E-10	2.01E-01	2.99E+00	2.95E-02	1.14E-02
		worst case	1.72E-07	1.87E-02	5.31E-01	2.82E-01	8.12E-15	6.17E-15	6.13E-18	8.18E-15	9.66E-10	2.16E-01	4.10E+00	3.04E-02	1.20E-02
	Gas	best case	9.28E-08	1.43E-02	3.50E-01	1.57E-01	5.58E-15	3.51E-15	4.79E-18	3.44E-15	9.89E-10	2.22E-01	2.75E+00	2.82E-02	1.02E-02
		baseline	1.05E-07	1.48E-02	4.41E-01	1.95E-01	5.89E-15	4.26E-15	4.91E-18	3.86E-15	1.07E-09	2.41E-01	3.42E+00	2.86E-02	1.04E-02
		worst case	1.29E-07	1.57E-02	6.22E-01	2.70E-01	6.50E-15	5.76E-15	5.16E-18	4.70E-15	1.25E-09	2.79E-01	4.78E+00	2.94E-02	1.07E-02
ICE Biotreibstoffe	E85 Zuckerrohr	best case	6.41E-07	1.56E-01	1.73E-01	1.03E-01	3.08E-14	7.35E-14	2.92E-16	1.03E-14	9.00E-10	2.02E-01	1.45E+00	3.26E-02	1.58E-02
		baseline	8.36E-07	2.04E-01	2.04E-01	1.23E-01	3.95E-14	9.76E-14	3.87E-16	1.30E-14	9.57E-10	2.14E-01	1.69E+00	3.45E-02	1.78E-02
		worst case	1.23E-06	3.00E-01	2.68E-01	1.62E-01	5.69E-14	1.46E-13	5.79E-16	1.84E-14	1.07E-09	2.39E-01	2.18E+00	3.83E-02	2.18E-02
	E85 Altholz	best case	1.09E-07	1.93E-02	1.77E-01	1.01E-01	7.78E-15	6.29E-15	1.30E-17	6.09E-15	8.51E-10	1.91E-01	1.47E+00	3.14E-02	1.11E-02
		baseline	1.27E-07	2.15E-02	2.10E-01	1.20E-01	8.82E-15	7.96E-15	1.59E-17	7.40E-15	8.91E-10	2.00E-01	1.72E+00	3.28E-02	1.15E-02
		worst case	1.62E-07	2.58E-02	2.76E-01	1.58E-01	1.09E-14	1.13E-14	2.16E-17	1.00E-14	9.72E-10	2.18E-01	2.22E+00	3.57E-02	1.24E-02
	Palm Methyl Ester	best case	2.19E-07	1.46E-01	1.37E-01	1.12E-01	9.14E-15	2.05E-14	1.73E-16	1.53E-14	1.16E-09	2.60E-01	1.20E+00	3.47E-02	1.64E-02
		baseline	2.73E-07	1.90E-01	1.56E-01	1.33E-01	1.05E-14	2.68E-14	2.29E-16	1.96E-14	1.29E-09	2.90E-01	1.35E+00	3.71E-02	1.85E-02
		worst case	3.81E-07	2.79E-01	1.93E-01	1.77E-01	1.33E-14	3.96E-14	3.41E-16	2.83E-14	1.56E-09	3.49E-01	1.65E+00	4.18E-02	2.26E-02
	Biogas	best case	8.43E-08	1.49E-02	9.72E-02	1.17E-01	5.35E-15	4.64E-15	5.17E-18	4.12E-15	1.87E-09	4.18E-01	8.96E-01	2.86E-02	1.03E-02
		baseline	9.37E-08	1.56E-02	1.04E-01	1.41E-01	5.58E-15	5.77E-15	5.42E-18	4.77E-15	2.26E-09	5.03E-01	9.56E-01	2.91E-02	1.05E-02
		worst case	1.12E-07	1.69E-02	1.17E-01	1.90E-01	6.03E-15	8.02E-15	5.91E-18	6.06E-15	3.02E-09	6.72E-01	1.07E+00	3.01E-02	1.09E-02
Hybrid	Benzin	best case	1.10E-07	1.17E-02	2.96E-01	1.62E-01	8.83E-15	5.51E-15	6.25E-18	4.86E-15	1.01E-09	2.27E-01	2.38E+00	5.11E-02	1.09E-02
		baseline	1.26E-07	1.28E-02	3.66E-01	1.99E-01	9.85E-15	6.81E-15	6.53E-18	5.58E-15	1.05E-09	2.35E-01	2.90E+00	5.16E-02	1.12E-02
		worst case	1.59E-07	1.60E-02	5.06E-01	2.71E-01	1.19E-14	9.40E-15	7.08E-18	7.01E-15	1.13E-09	2.53E-01	3.95E+00	5.27E-02	1.17E-02

Resultate: Übersicht

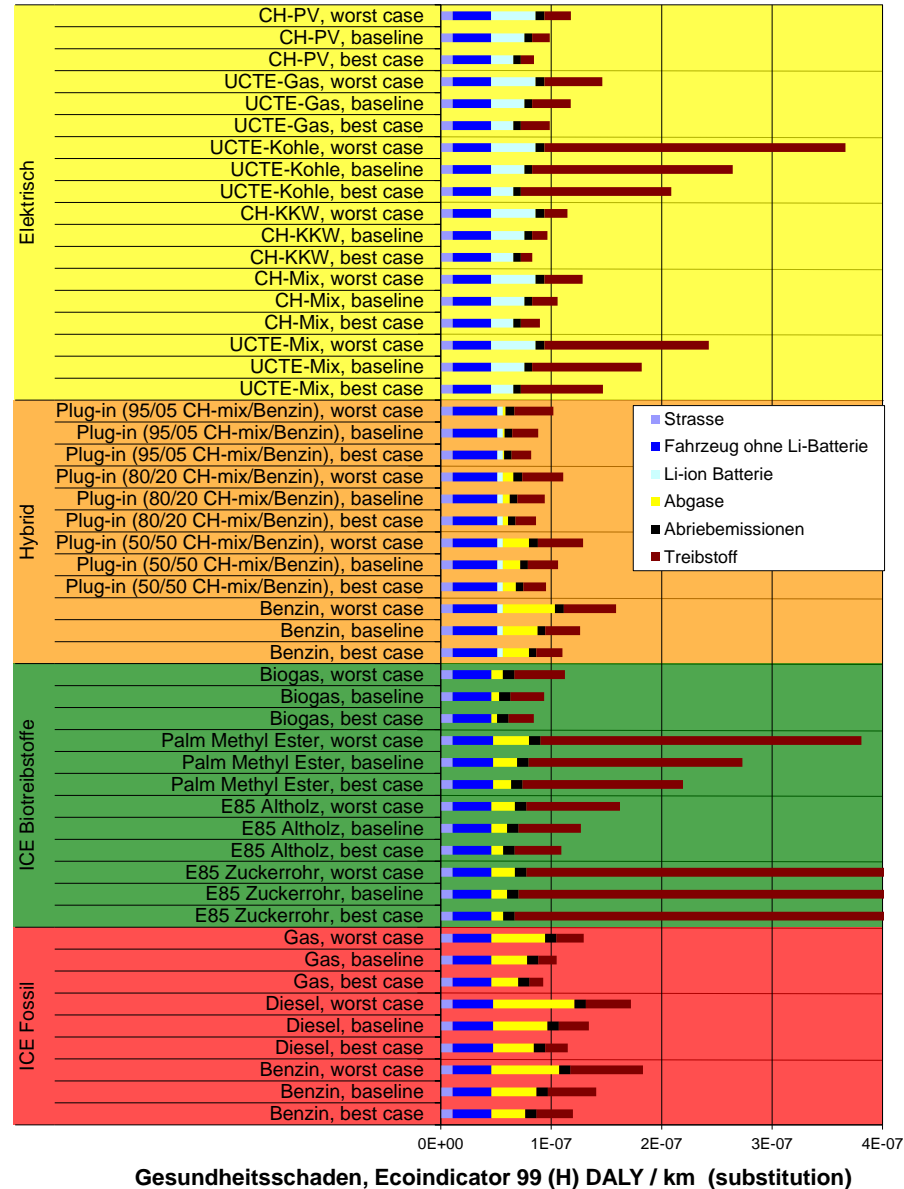
Worst case ohne Cut-off-Modellierung für EOL

			Ecoindicator 99 (H) Schaden an menschlicher Gesundheit [DALY / km]	Ecoindicator 99 (H) Schaden an Ökosystemqualität [PDF*m ² *a / km]	Ecoindicator 99 (H) Schaden an Ressourcenqualität [MJ surplus / km]	Treibhauseffekt [kg CO ₂ -Eq / km]	Humantoxizitätspotential [1 / km]	Photochemisches Oxidationspotential [1 / km]	Landnutzung [1 / km]	Überdüngung [1 / km]	Radioaktive Abfälle [m ³ / km]	Kumulierter Energieaufwand nuklear [MJ-Eq / km]	Kumulierter Energieaufwand fossil [MJ-Eq / km]	Kumulierter Exergieaufwand Metalle [MJ-Eq / km]	Kumulierter Exergieaufwand Mineralien [MJ-Eq / km]
Plug-in Hybrid	Plug-in (50/50 CH-mix/ Benzin)	best case	9.52E-08	1.16E-02	1.99E-01	1.18E-01	8.27E-15	3.74E-15	6.79E-18	3.99E-15	3.46E-09	7.70E-01	1.71E+00	5.43E-02	1.07E-02
		baseline	1.06E-07	1.27E-02	2.37E-01	1.39E-01	9.10E-15	4.45E-15	7.24E-18	4.41E-15	4.31E-09	9.59E-01	2.01E+00	5.59E-02	1.08E-02
		worst case	1.29E-07	1.58E-02	3.13E-01	1.82E-01	1.08E-14	5.87E-15	8.15E-18	5.26E-15	6.02E-09	1.34E+00	2.62E+00	5.91E-02	1.12E-02
	Plug-in (80/20 CH-mix/ Benzin)	best case	8.63E-08	1.15E-02	1.41E-01	9.11E-02	7.93E-15	2.68E-15	7.11E-18	3.47E-15	4.93E-09	1.10E+00	1.31E+00	5.62E-02	1.05E-02
		baseline	9.42E-08	1.26E-02	1.60E-01	1.04E-01	8.65E-15	3.04E-15	7.67E-18	3.72E-15	6.27E-09	1.39E+00	1.48E+00	5.85E-02	1.06E-02
		worst case	1.11E-07	1.57E-02	1.97E-01	1.29E-01	1.01E-14	3.75E-15	8.80E-18	4.22E-15	8.95E-09	1.99E+00	1.82E+00	6.30E-02	1.09E-02
	Plug-in (95/05 CH-mix/ Benzin)	best case	8.18E-08	1.15E-02	1.12E-01	7.77E-02	7.76E-15	2.15E-15	7.27E-18	3.20E-15	5.66E-09	1.26E+00	1.11E+00	5.72E-02	1.04E-02
		baseline	8.82E-08	1.25E-02	1.21E-01	8.59E-02	8.43E-15	2.33E-15	7.89E-18	3.37E-15	7.25E-09	1.61E+00	1.21E+00	5.97E-02	1.05E-02
		worst case	1.02E-07	1.56E-02	1.39E-01	1.02E-01	9.77E-15	2.69E-15	9.12E-18	3.70E-15	1.04E-08	2.31E+00	1.42E+00	6.49E-02	1.07E-02
Elektrisch	UCTE-Mix	best case	1.47E-07	1.49E-02	1.56E-01	1.49E-01	1.13E-14	4.00E-15	1.13E-17	4.76E-15	4.32E-09	9.21E-01	1.96E+00	5.89E-02	1.11E-02
		baseline	1.82E-07	1.80E-02	1.88E-01	1.86E-01	1.45E-14	5.03E-15	1.39E-17	5.75E-15	5.41E-09	1.18E+00	2.43E+00	6.66E-02	1.25E-02
		worst case	2.43E-07	2.37E-02	2.40E-01	2.54E-01	1.88E-14	6.74E-15	1.82E-17	7.35E-15	7.60E-09	1.68E+00	3.26E+00	7.71E-02	1.40E-02
	CH-Mix	best case	8.97E-08	1.32E-02	1.09E-01	7.96E-02	9.87E-15	2.29E-15	8.13E-18	3.34E-15	6.04E-09	1.32E+00	1.12E+00	5.86E-02	1.11E-02
		baseline	1.06E-07	1.58E-02	1.25E-01	9.42E-02	1.25E-14	2.75E-15	9.74E-18	3.85E-15	7.71E-09	1.72E+00	1.30E+00	6.62E-02	1.24E-02
	CH-KKW	worst case	1.28E-07	2.03E-02	1.47E-01	1.16E-01	1.59E-14	3.32E-15	1.20E-17	4.50E-15	1.10E-08	2.48E+00	1.56E+00	7.64E-02	1.39E-02
		best case	8.29E-08	1.30E-02	9.76E-02	6.20E-02	9.78E-15	2.07E-15	7.31E-18	3.08E-15	1.05E-08	2.39E+00	9.06E-01	5.86E-02	1.09E-02
		baseline	9.66E-08	1.54E-02	1.10E-01	7.08E-02	1.24E-14	2.46E-15	8.64E-18	3.51E-15	1.36E-08	3.14E+00	1.02E+00	6.62E-02	1.22E-02
	UCTE-Kohle	worst case	1.15E-07	1.98E-02	1.23E-01	8.04E-02	1.57E-14	2.89E-15	1.03E-17	3.98E-15	1.99E-08	4.62E+00	1.14E+00	7.65E-02	1.36E-02
		best case	2.09E-07	1.76E-02	1.32E-01	2.44E-01	1.13E-14	5.83E-15	2.26E-17	7.26E-15	1.18E-09	2.42E-01	2.96E+00	5.94E-02	1.12E-02
		baseline	2.64E-07	2.15E-02	1.55E-01	3.13E-01	1.45E-14	7.46E-15	2.90E-17	9.07E-15	1.23E-09	2.77E-01	3.76E+00	6.73E-02	1.26E-02
	UCTE-Gas	worst case	3.66E-07	2.90E-02	1.91E-01	4.43E-01	1.88E-14	1.04E-14	4.08E-17	1.23E-14	1.33E-09	3.22E-01	5.25E+00	7.81E-02	1.42E-02
		best case	9.87E-08	1.34E-02	2.64E-01	1.33E-01	1.05E-14	2.66E-15	7.13E-18	3.57E-15	1.06E-09	2.15E-01	2.14E+00	5.83E-02	1.11E-02
		baseline	1.18E-07	1.59E-02	3.32E-01	1.65E-01	1.33E-14	3.24E-15	8.40E-18	4.16E-15	1.06E-09	2.40E-01	2.67E+00	6.58E-02	1.24E-02
	CH-PV	worst case	1.46E-07	2.06E-02	4.57E-01	2.22E-01	1.71E-14	4.07E-15	9.98E-18	4.96E-15	1.07E-09	2.67E-01	3.62E+00	7.59E-02	1.39E-02
		best case	8.45E-08	1.21E-02	1.09E-01	7.06E-02	1.03E-14	2.34E-15	8.05E-18	3.45E-15	1.20E-09	2.47E-01	1.02E+00	1.05E-01	1.11E-02
		baseline	9.87E-08	1.42E-02	1.25E-01	8.22E-02	1.32E-14	2.82E-15	9.63E-18	4.00E-15	1.26E-09	2.83E-01	1.18E+00	1.28E-01	1.25E-02
			worst case	1.18E-07	1.81E-02	1.47E-01	9.76E-02	1.68E-14	3.43E-15	1.18E-17	4.72E-15	1.37E-09	3.32E-01	1.38E+00	1.69E-01

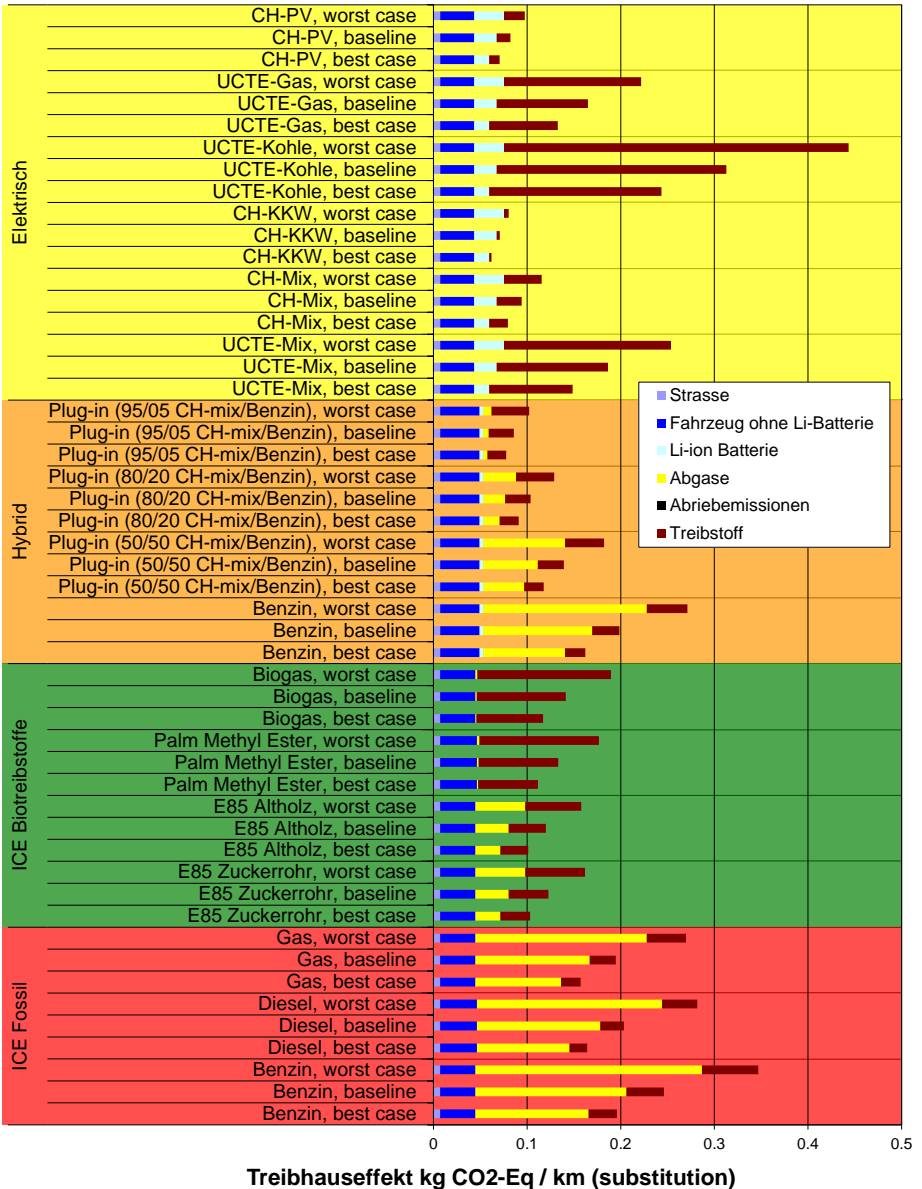
- Sensitiv auf **Treibstoffbedarf** sind:
 - Alle Impacts
- Sensitiv auf **Bremsemissionen** sind:
 - EI99, Ökosystemqualität
- Sensitiv auf **Anzahl Batteriesätze** sind:
 - EI99, Ökosystemqualität
 - Humantoxizität, Sommersmog, Landnutzung
 - Kumulierter Exergiebedarf Mineralien
 - Dissipative Metallverluste (Al, Cu, Au, Fe, Pb, Li, Mn, Ni, PGM, Ag, Sn)
- Sensitiv auf **EOL-Modellierung** sind:
 - EI99, Gesundheit
 - Humantoxizität, Sommersmog, Landnutzung
 - Kumulierter Exergiebedarf Metalle

Resultate: Sensitivität Treibstoffe

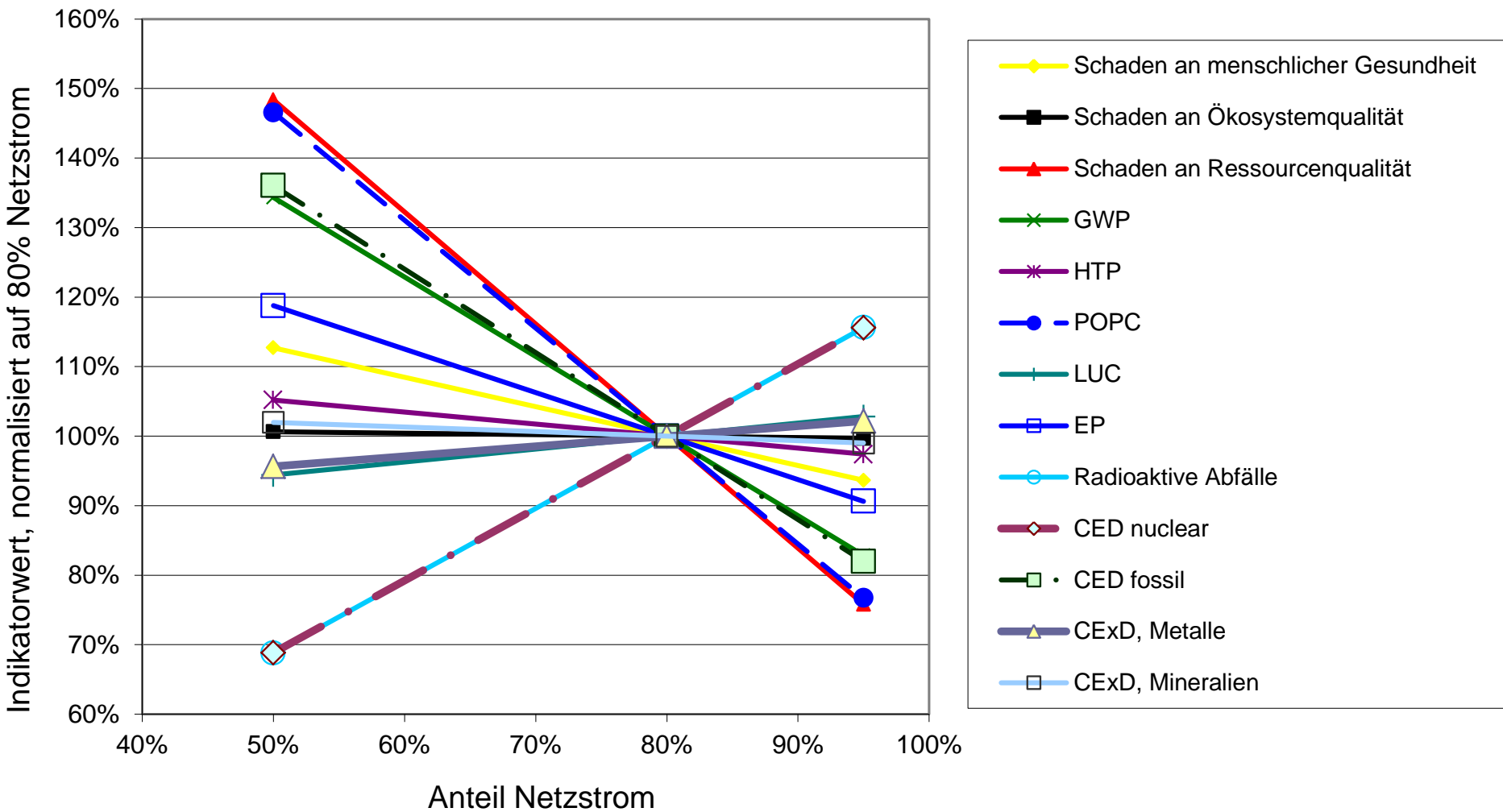
EI 99, Gesundheit



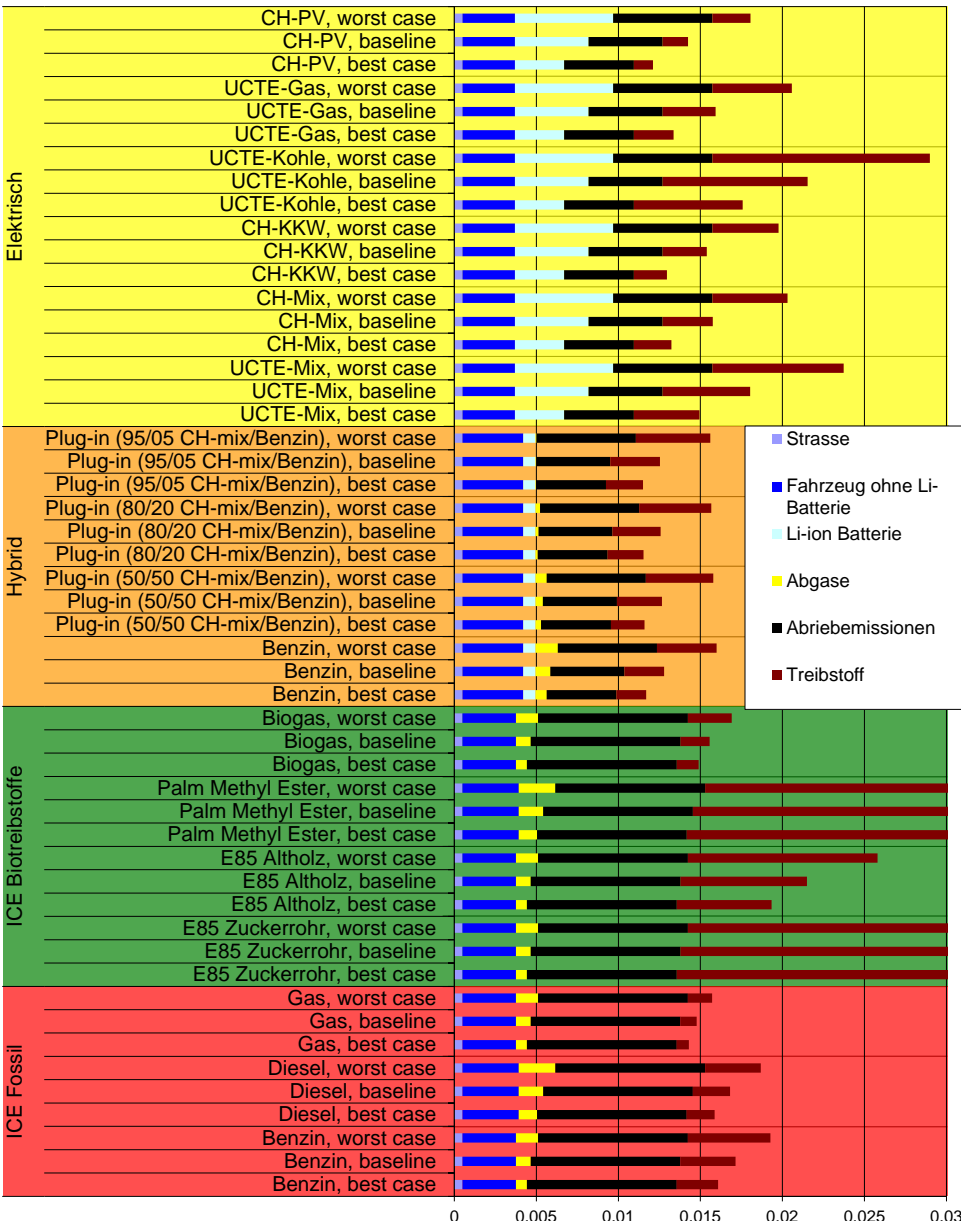
Treibhauseffekt



Resultate: Sensitivität Anteil elektrisch bei Plug-in-Hybriden



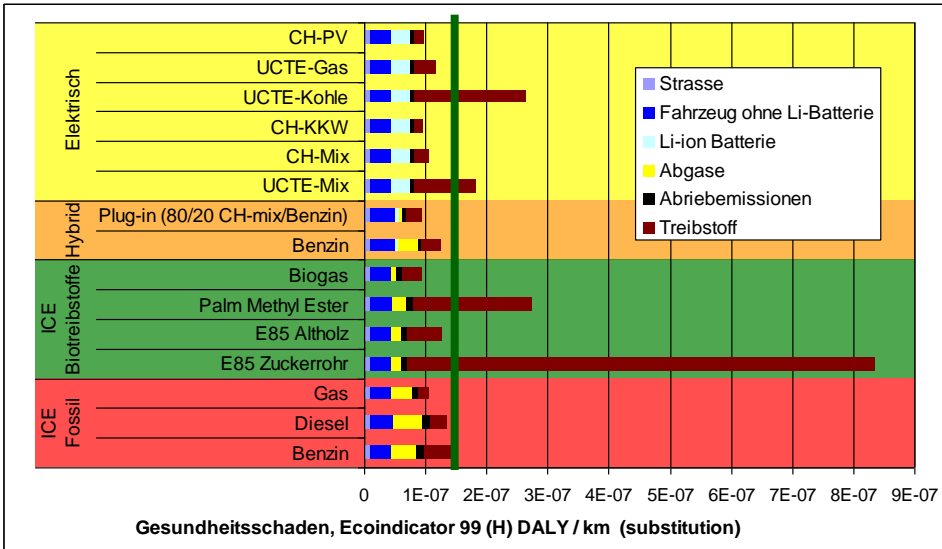
EI 99, Ökosystem



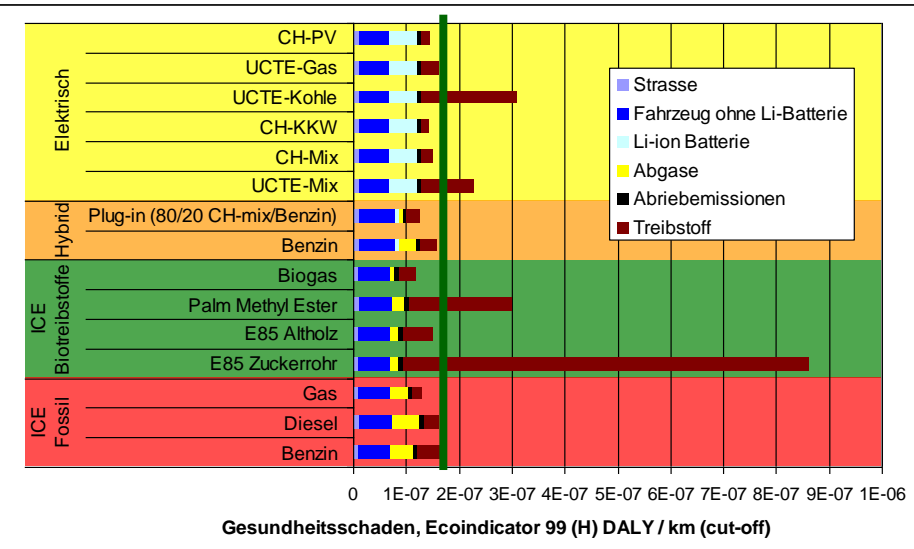
Ökosystemschaten, Ecoindicator 99 (H) pdf*m2*a / km (substitution)

Resultate: Sensitivität EOL-Modell

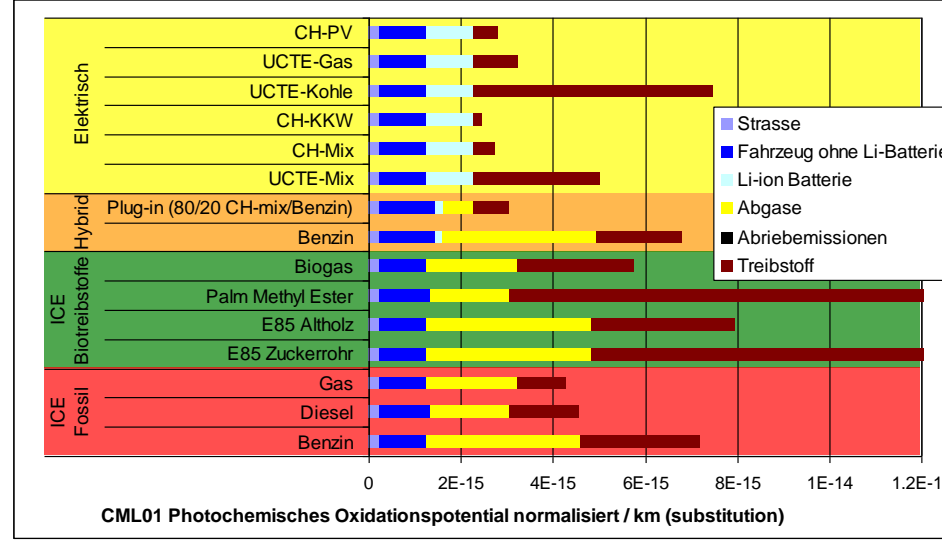
EI 99, Gesundheit, Substitution



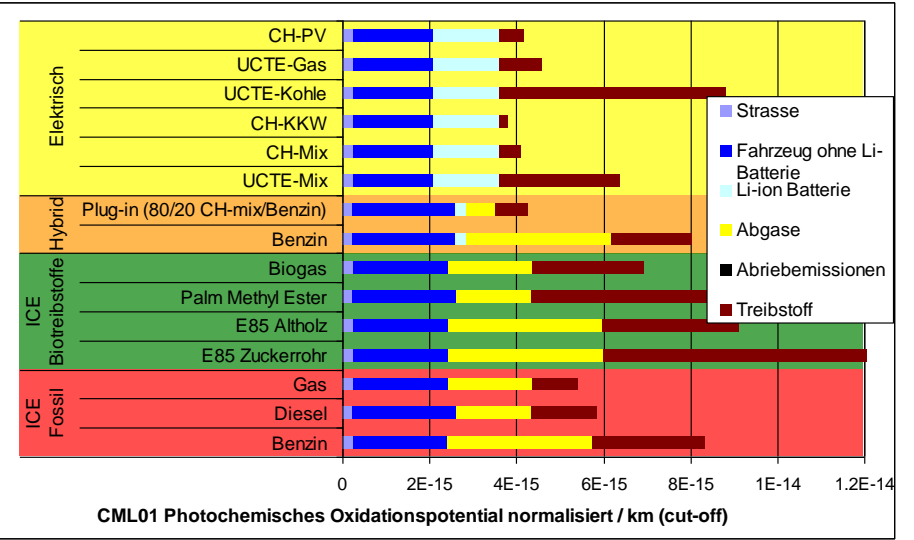
EI 99, Gesundheit, Cut-off



Sommersmog, Substitution



Sommersmog, Cut-off



Substitution

Cut-off

Worst case ohne Cut-off-Modellierung für EOL										Worst case mit Cut-off-Modellierung für EOL																					
		Ecoindicator 99 (H) Schaden an menschlicher Gesundheit (DALY / km)		Ecoindicator 99 (H) Schaden an Ökosystemqualität (PDF m ² a / km)		Ecoindicator 99 (H) Schaden an Ressourcenqualität (MU surplus / km)		Treibhauseffekt (kg CO2-Eq / km)		Humantoxizitätspotential (1 / km)		Photochemisches Oxidationspotential (1 / km)		Landnutzung (1 / km)		Überdüngung (1 / km)		Radioaktive Abfälle (m3 / km)		Kumulierter Energieaufwand nuklear (MJ-Eq / km)		Kumulierter Energieaufwand fossil (MJ-Eq / km)		Kumulierter Energieaufwand Metalle (MJ-Eq / km)		Kumulierter Energieaufwand Mineralien (MJ-Eq / km)					
ICE Fossil	Benzin	best case	1.20E-07	1.61E-02	3.69E-01	1.96E-01	8.23E-14	5.70E-15	5.58E-18	4.87E-15	8.89E-10	2.00E-01	2.90E+00	2.93E-02	1.09E-02																
		baseline	1.41E-07	1.71E-02	3.69E-01	2.46E-01	9.42E-14	7.18E-15	5.96E-18	5.76E-15	9.42E-10	2.12E-01	3.62E+00	3.00E-02	1.13E-02																
		worst case	1.83E-07	1.93E-02	3.47E-01	3.47E-01	1.18E-14	7.01E-14	6.73E-18	7.65E-18	1.05E-09	2.35E-01	5.07E+00	3.15E-02	1.21E-02																
	Diesel	best case	1.15E-07	1.59E-02	3.08E-01	1.64E-01	6.96E-15	3.74E-15	5.38E-18	5.24E-15	6.64E-10	1.94E-01	2.43E+00	2.90E-02	1.11E-02																
		baseline	1.34E-07	1.68E-02	3.81E-01	2.03E-01	7.08E-15	4.55E-15	5.63E-18	6.22E-15	6.98E-10	2.01E-01	2.99E+00	2.95E-02	1.14E-02																
		worst case	1.72E-07	1.87E-02	3.31E-01	2.82E-01	8.12E-15	6.17E-15	6.19E-18	8.18E-18	9.66E-10	2.16E-01	4.10E+00	3.04E-02	1.20E-02																
	Gas	best case	9.28E-09	1.43E-02	3.50E-01	1.57E-01	5.58E-15	3.51E-15	4.79E-18	3.44E-15	6.88E-10	2.22E-01	2.75E+00	2.82E-02	1.02E-02																
		baseline	1.05E-07	1.49E-02	3.44E-01	1.85E-01	5.89E-15	4.23E-15	4.91E-18	3.90E-15	1.07E-09	2.41E-01	3.42E+00	2.85E-02	1.04E-02																
		worst case	1.29E-07	1.57E-02	3.62E-01	2.70E-01	6.49E-15	5.76E-15	5.16E-18	4.70E-18	1.25E-09	2.79E-01	4.78E+00	2.94E-02	1.07E-02																
	ICE Bioreaktive	E85 Zuckerrohr	best case	6.41E-09	1.90E-02	2.04E-01	1.23E-01	3.95E-14	3.78E-14	1.30E-14	3.57E-14	2.14E-01	1.69E+00	3.45E-02	7.0E-02																
			baseline	6.36E-09	2.00E-02	2.04E-01	1.23E-01	3.95E-14	3.78E-14	1.30E-14	3.57E-14	2.14E-01	1.69E+00	3.45E-02	7.0E-02																
			worst case	1.23E-08	2.04E-02	2.68E-01	1.62E-01	5.69E-14	4.45E-13	5.79E-18	1.84E-14	1.07E-09	2.39E-01	2.18E+00	3.83E-02	2.18E-02															
E85 Altholz		best case	1.09E-07	1.93E-02	1.77E-01	1.01E-01	7.78E-14	6.29E-15	1.30E-17	6.09E-15	3.11E-10	1.91E-01	1.47E+00	3.14E-02	1.11E-02																
		baseline	1.27E-07	2.15E-02	1.10E-01	1.20E-01	8.82E-15	5.98E-15	1.59E-17	7.40E-15	5.91E-10	2.00E-01	1.72E+00	3.29E-02	1.15E-02																
		worst case	1.62E-07	2.58E-02	2.78E-01	1.58E-01	1.09E-14	1.39E-14	2.16E-17	1.00E-14	7.25E-10	2.18E-01	2.22E+00	3.57E-02	1.24E-02																
Palm Methyl Ester		best case	2.19E-07	1.49E-02	1.37E-01	1.12E-01	9.14E-15	2.05E-14	1.73E-16	1.59E-14	1.16E-09	2.60E-01	1.70E+00	3.47E-02	1.64E-02																
		baseline	2.73E-07	1.90E-02	1.56E-01	1.33E-01	1.05E-14	2.68E-14	2.29E-16	1.98E-14	1.29E-09	2.90E-01	1.35E+00	3.71E-02	1.88E-02																
		worst case	3.81E-07	2.79E-02	1.93E-01	1.77E-01	1.33E-14	3.83E-14	3.41E-16	2.93E-14	1.56E-09	3.49E-01	1.65E+00	4.18E-02	2.26E-02																
Biogas		best case	8.43E-08	1.49E-02	1.72E-02	1.17E-01	5.95E-15	4.64E-15	5.17E-18	4.12E-15	1.87E-09	4.18E-01	8.96E-01	2.99E-02	1.03E-02																
		baseline	9.37E-08	1.56E-02	1.04E-01	1.41E-01	5.59E-15	5.77E-15	5.42E-18	4.77E-15	2.26E-09	5.03E-01	9.56E-01	2.91E-02	1.05E-02																
		worst case	1.12E-07	1.69E-02	1.17E-01	1.80E-01	6.03E-15	3.02E-15	5.91E-18	6.06E-15	3.02E-09	6.72E-01	1.07E+00	3.01E-02	1.09E-02																
Hybrid	Benzin	best case	1.10E-07	1.17E-02	2.98E-01	1.62E-01	8.83E-15	5.51E-15	6.25E-18	4.86E-15	1.01E-09	2.27E-01	2.38E+00	5.11E-02	1.09E-02																
		baseline	1.26E-07	1.28E-02	3.68E-01	1.89E-01	9.85E-15	6.81E-15	6.53E-18	5.58E-15	1.05E-09	2.35E-01	2.90E+00	5.16E-02	1.12E-02																
		worst case	1.69E-07	1.60E-02	3.06E-01	2.71E-01	1.19E-14	3.40E-14	6.18E-18	7.01E-18	1.13E-09	2.53E-01	3.95E+00	5.27E-02	1.17E-02																
	Plug-in (50/50 CH-mix/Benzin)	best case	9.52E-08	1.16E-02	1.99E-01	1.18E-01	8.27E-15	3.74E-15	6.79E-18	3.99E-14	3.46E-09	7.70E-01	1.71E+00	5.43E-02	1.07E-02																
		baseline	1.06E-07	1.27E-02	2.37E-01	1.39E-01	9.10E-15	4.45E-15	7.24E-18	4.41E-15	4.31E-09	9.59E-01	2.01E+00	5.59E-02	1.08E-02																
		worst case	1.29E-07	1.58E-02	3.19E-01	1.82E-01	1.08E-14	5.87E-15	8.15E-18	4.56E-15	6.02E-09	1.34E+00	2.62E+00	5.91E-02	1.12E-02																
	Plug-in (80/20 CH-mix/Benzin)	best case	8.63E-08	1.15E-02	1.41E-01	9.11E-02	7.93E-15	2.68E-15	7.11E-18	3.47E-15	4.99E-09	1.10E+00	1.91E-02	5.62E-02	1.05E-02																
		baseline	9.42E-08	1.29E-02	1.60E-01	1.04E-01	8.65E-15	3.05E-15	7.67E-18	3.72E-15	6.27E-09	1.39E+00	1.48E+00	5.85E-02	1.06E-02																
		worst case	1.11E-07	1.57E-02	1.97E-01	1.29E-01	1.01E-14	3.74E-15	8.80E-18	4.22E-15	6.95E-09	1.99E+00	1.82E+00	6.95E-02	1.09E-02																
	Plug-in (95/05 CH-mix/Benzin)	best case	8.18E-08	1.16E-02	1.12E-01	7.77E-02	7.70E-15	2.15E-15	7.27E-18	3.29E-15	5.68E-09	1.26E+00	1.11E-02	5.72E-02	1.04E-02																
		baseline	8.92E-08	1.25E-02	1.21E-01	1.07E-01	8.49E-15	2.32E-15	7.89E-18	3.97E-15	7.25E-09	1.61E+00	1.21E-02	5.97E-02	1.05E-02																
		worst case	1.02E-07	1.55E-02	3.09E-01	1.70E-01	9.77E-15	2.69E-15	9.12E-18	3.70E-15	1.04E-09	2.31E+00	1.42E+00	6.95E-02	1.07E-02																
Elektros	UCTE-Mix	best case	1.47E-07	1.49E-02	1.56E-01	1.49E-01	1.13E-14	4.00E-15	1.13E-17	4.76E-15	4.32E-09	9.21E-01	1.96E+00	5.89E-02	1.11E-02																
		baseline	1.32E-07	1.80E-02	1.88E-01	1.68E-01	1.48E-14	5.03E-15	1.33E-17	5.75E-15	6.41E-09	1.18E+00	2.43E+00	6.88E-02	1.25E-02																
		worst case	2.43E-07	2.97E-02	2.40E-01	2.58E-01	1.38E-14	6.74E-15	8.32E-17	7.34E-15	7.60E-09	1.68E+00	3.26E+00	7.71E-02	4.00E-02																
	CH-Mix	best case	9.97E-08	1.33E-02	1.09E-01	9.9E-02	9.87E-15	2.99E-15	8.13E-18	3.34E-15	6.04E-09	1.32E+00	1.12E+00	5.86E-02	1.11E-02																
		baseline	1.06E-07	1.58E-02	1.25E-01	9.42E-02	1.25E-14	2.75E-15	9.74E-18	3.85E-15	7.71E-09	1.72E+00	1.30E+00	6.62E-02	1.24E-02																
		worst case	1.28E-07	2.03E-02	1.49E-01	1.16E-01	1.59E-14	3.32E-15	1.20E-17	4.50E-15	1.00E-09	2.48E+00	1.56E+00	7.64E-02	1.39E-02																
	CH-KKW	best case	8.29E-08	1.30E-02	3.78E-02	6.20E-02	9.78E-15	2.07E-15	7.31E-18	3.09E-15	1.05E-09	2.39E+00	9.06E-01	5.86E-02	1.09E-02																
		baseline	9.66E-08	1.54E-02	1.00E-01	7.08E-02	1.24E-14	2.46E-15	8.64E-18	3.51E-15	1.36E-09	3.01E+00	1.02E+00	6.62E-02	1.22E-02																
		worst case	1.15E-07	1.98E-02	2.39E-01	8.04E-02	1.57E-14	2.89E-15	1.03E-17	3.96E-15	9.9E-09	4.62E+00	1.14E+00	7.65E-02	1.36E-02																
	UCTE-Kohle	best case	2.09E-07	1.76E-02	3.24E-01	1.41E-01	1.13E-14	5.83E-15	2.06E-17	7.39E-15	1.18E-09	2.42E-01	2.96E+00	5.94E-02	1.12E-02																
		baseline	2.64E-07	2.15E-02	1.55																										

- Ist die zunehmende Hoffnung auf e-Mobility zur Lösung von Umweltprobleme berechtigt?
- Werden Elektrofahrzeuge in naher Zukunft (2015) umweltfreundlicher sein als konventionelle oder biotreibstoffbetriebene Fahrzeuge?
- Unter welchen Bedingungen können Elektrofahrzeuge zu einer umweltfreundlicheren Mobilität beitragen?

- **Elektrofahrzeuge haben Potenzial**
- **Bei Verwendung v.a. auf kurzen Strecken sind Plug-in-Hybride den Elektrofahrzeugen überlegen**
- **Elektrofahrzeuge sind nur dann umweltfreundlicher als fossile ICE Fahrzeuge wenn der Strom entsprechend bereitgestellt wird**
- ➔ **Was sind die Konsequenzen von Mehrverbrauch auf die Strombereitstellung?**

Danke

hans-joerg.althaus@empa.ch
marcel.gauch@empa.ch

www.empa.ch/lca