Rainer Kling
Physikalischer Verein
Solarmobil Rhein-Main e.V.

Quelle http://img1.auto-motor-und-sport.de/Aaglander-Elektrokutsche-Malte-Juergens-Impression-articleTitle-9b192dbb-830870.jpg

Die Bedeutung der Elektromobilität im Kampf gegen den Klimawandel

Rainer Kling
Physikalischer Verein
Solarmobil Rhein-Main e.V.

Die Bedeutung der Elektromobilität im Kampf gegen den Klimawandel

- Welche Auswirkungen hat die Entscheidung für eine Antriebstechnik in der Zukunft.
- Welche physikalischen Gesetze entscheiden über die Wirtschaftlichkeit von E-Fahrzeugen.
- Wie sich die „Physik des Autofahrens" beim E-Fahrzeug auf die Betriebskosten auswirkt.
- Welche Ladeinfrastruktur benötigen wir.

Antriebstechniken und daraus folgende ökonomischen und gesellschaftspolitischen Konsequenzen

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. in der Helmholtz-Gemeinschaft | ifeu | ludwig bölkow systemtechnik | DBFZ

Erneuerbare Energien im Verkehr

Potenziale und Entwicklungsperspektiven verschiedener erneuerbarer Energieträger und Energieverbrauch der Verkehrsträger

Studie im Rahmen der

Wissenschaftlichen Begleitung, Unterstützung und Beratung des BMVI in den Bereichen Verkehr und Mobilität mit besonderem Fokus auf Kraftstoffen und Antriebstechnologien sowie Energie und Klima

des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI)
AZ Z14/SeV/288.3/1179/UI40

Hauptauftragnehmer:
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR)
Institut für Verkehrsforschung
Rutherfordstraße 2, 12489 Berlin
Tel.: 030 67055-7936, Fax: -283

Im Unterauftrag:
Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH (IFEU)
Wilckensstraße 3, 69120 Heidelberg
Tel.: 06221 4767-35

Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH (LBST)
Daimlerstraße 15, 85521 München/Ottobrunn
Tel.: 089 608110-36

Deutsches Biomasseforschungszentrum GmbH (DBFZ)
Torgauer Straße 116, 04347 Leipzig
Tel.: 0341 2434-423

Erstellt von

D. Kreyenberg, A. Lischke (DLR),
F. Bergk, F. Duennebeil, C. Heidt, W. Knörr, (IFEU),
T. Raksha, P. Schmidt, W. Weindorf (LBST),
K. Naumann, S. Majer, F. Müller-Langer (DBFZ)

Berlin, 10. März 2015

https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/G/MKS/mks-kurzstudie-ee-im-verkehr.pdf?__blob=publicationFile

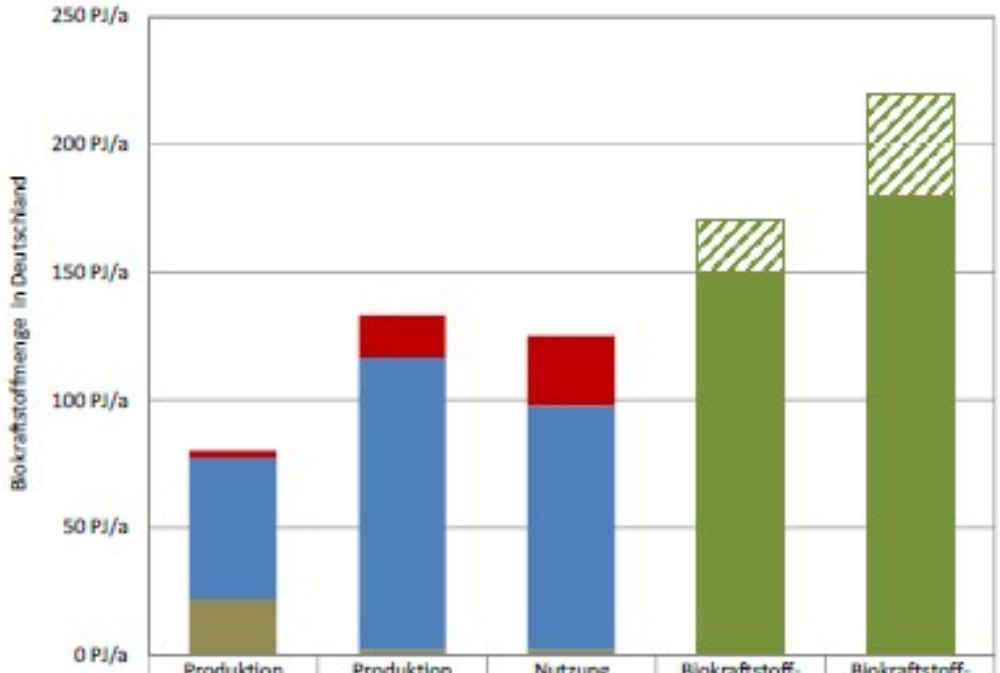
Rainer Kling
Physikalischer Verein
Solarmobil Rhein-Main e.V.

Welche Erneuerbaren Energiequellen können wir einsetzen?

55TWh

42TWh

28TWh



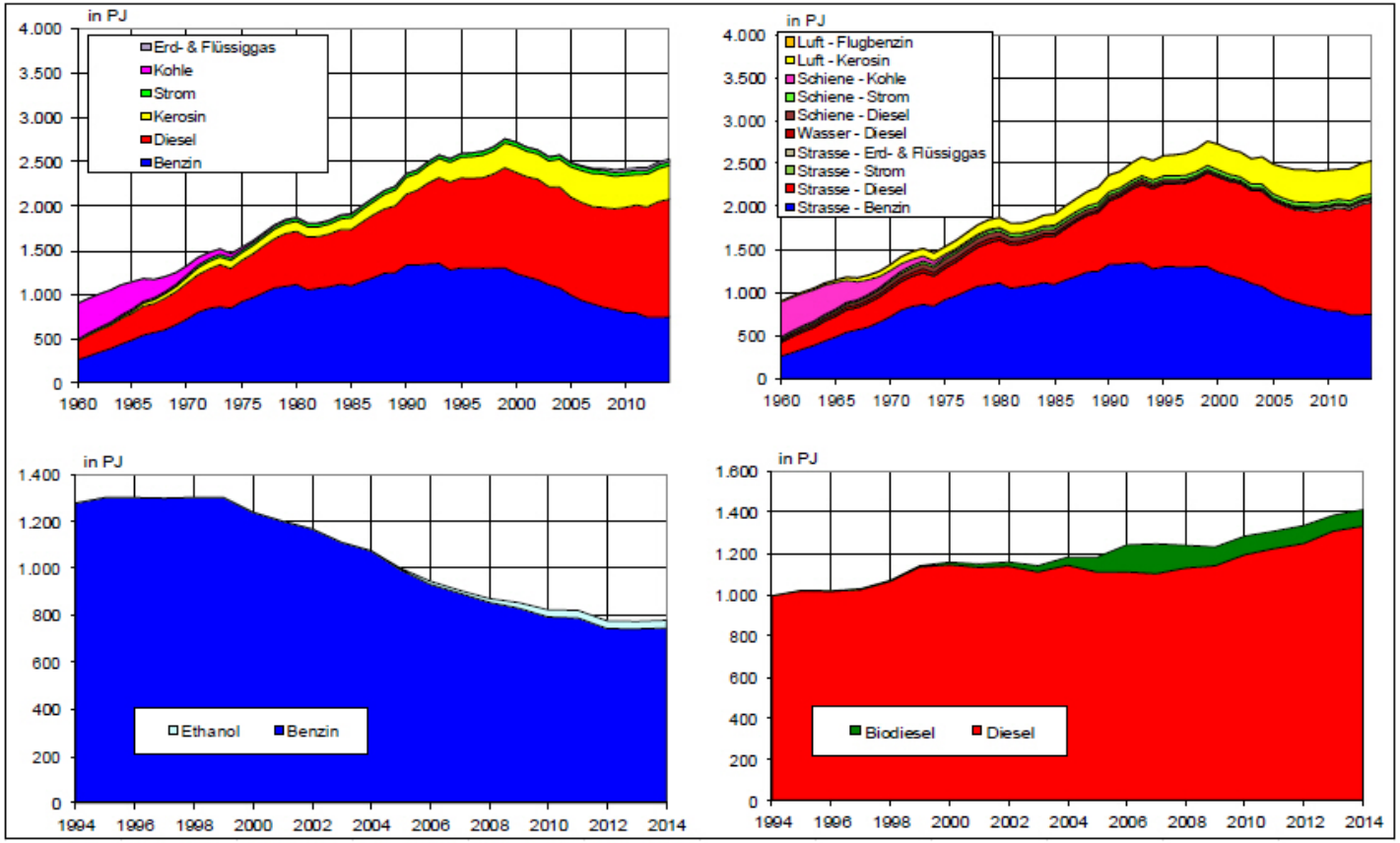
	Produktion 2005	Produktion 2010	Nutzung 2010	Biokraftstoff-potenzial 2020	Biokraftstoff-potenzial 2030
Bandbreite Biokraftstoffpotenzial max				170	220
Bandbreite Biokraftstoffpotenzial min				150	180
Bioethanol/ EtOH	3	17	28		
Biodiesel/ FAME	55	114	95		
Pflanzenöl	22	2	2		

Abbildung 1: Aktuelle Produktion und Nutzung sowie technisches Biokraftstoffpotenzial auf der Basis von inländischer Biomasse

Quelle 1, S. 13

Welche Erneuerbaren Energiequellen können wir einsetzen?

Abbildung 5: Energieverbrauch (Absatz) des Verkehrs in Deutschland 1960-2014 nach Energiebilanz

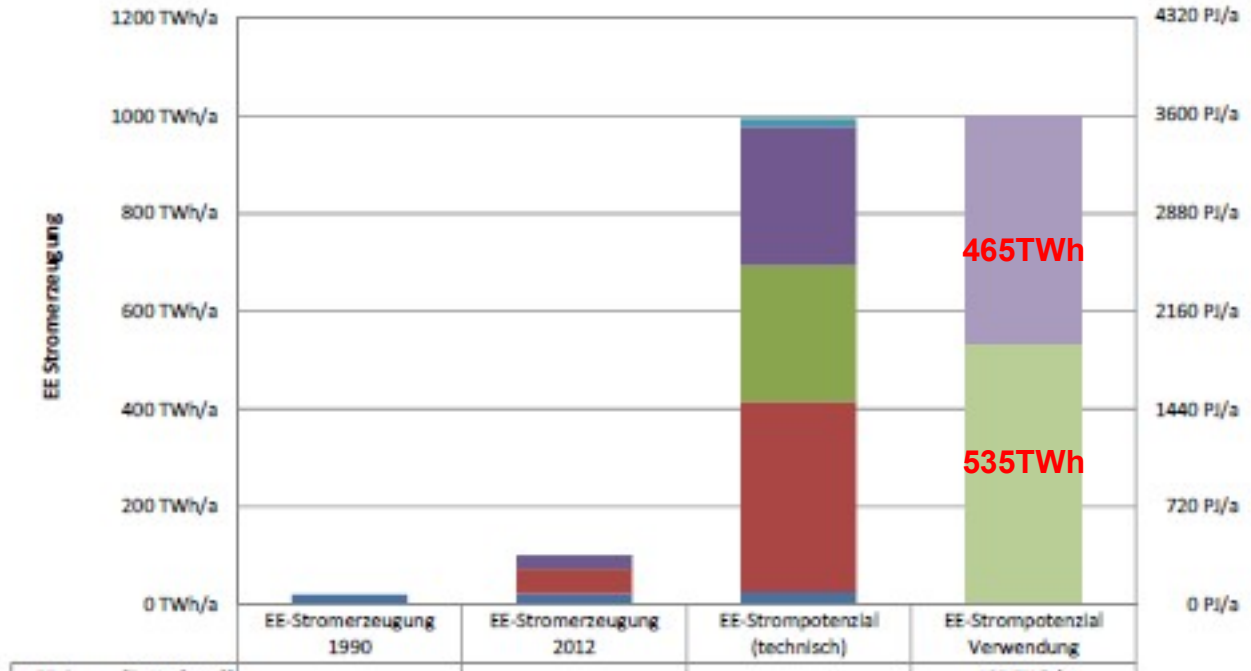


Quelle: AG Energiebilanzen, BAFA

Quelle 7, S. 29

Rainer Kling
Physikalischer Verein
Solarmobil Rhein-Main e.V.

Welche Erneuerbaren Energiequellen können wir einsetzen?



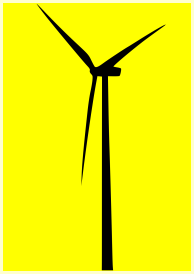
	EE-Stromerzeugung 1990	EE-Stromerzeugung 2012	EE-Strompotenzial (technisch)	EE-Strompotenzial Verwendung
EE-Strom für Kraftstoff				465 TWh/a
Stromnachfrage 2012				535 TWh/a
Geothermie	0 TWh/a	<1 TWh/a	15 TWh/a	
Photovoltaik	0 TWh/a	26 TWh/a	284 TWh/a	
Wind Offshore	0 TWh/a	<1 TWh/a	280 TWh/a	
Wind Onshore	0 TWh/a	51 TWh/a	390 TWh/a	
Wasserkraft	20 TWh/a	22 TWh/a	25 TWh/a	
	≈ 20 TWh/a	≈ 100 TWh/a	≈ 1.000 TWh/a	

Abbildung 2: Erneuerbare Stromproduktion und technische Strompotenziale

Quelle 1, S. 14

Rainer Kling
Physikalischer Verein
Solarmobil Rhein-Main e.V.

Welche Erneuerbaren Energien können wir Im PKW einsetzten?



			PKW Golfklasse	Verbrauch ab Stromerzeuger	Faktor bezogen auf das E-Fahrzeug bei der Erzeugung
100%	Strom 89%	0,89kWh	13kWh/100km	14,6kWh/100km	1X
100%	Wasserstoff 58%	0,58kWh	18kWh/100km	31kWh/100km	2,1X
100%	Erdgas 41%	0,41kWh	38kWh/100km	92,6kWh/100km	6,3X
100%	Benzin 35%	0,35kWh	37kWh/100km 4,1l/100km	105,7kWh/100km	7,2X
100%	Diesel 35%	0,35kWh	35kWh/100km 3,6l/100km	100kWh/100km	6,8X

Werte aus Quelle 1

Rainer Kling
Physikalischer Verein
Solarmobil Rhein-Main e.V.

Welche Erneuerbaren Energiequellen können wir einsetzen?

Tabelle 1: Beispielrechnung zur Illustration des angenommenen heimischen Potenzials von EE-Strom für den Verkehrssektor unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Wirkungsgrade der verschiedenen Fahrzeugkonzepte

Kraftstoffpotenzial 'ceteris paribus'				Anzahl Pkw 'ceteris paribus'		
Kraftstoff/ Energieträger	Wirkungs-grad	EE-Kraftstoff [a]		Antrieb	Verbrauch [b]	Anzahl Pkw [c]
EE-Strom	89%	415 TWh/a	→	BEV	0,13 kWh/km	216 Mio.
Wasserstoff	58%	268 TWh/a	→	FCEV	0,18 kWh/km	99 Mio.
EE-Methan[d]	41%	191 TWh/a	→	ICE-CNG	0,38 kWh/km	34 Mio.
EE-Benzin[d]	35%	163 TWh/a	→	ICE-G	0,37 kWh/km	29 Mio.
EE-Diesel[d]	35%	163 TWh/a	→	ICE-D	0,35 kWh/km	31 Mio.

[a] Auf Basis des technisch-nachhaltig vorhandenen Stromerzeugungspotenzials von 1.000 TWh/a abzüglich der Stromnachfrage im Jahr 2012 von 535 TWh/a => 465 TWh/a EE-Strom für Kraftstoffproduktion verfügbar.
[b] [JEC 2013] "2020+" mit Realverbrauchsfaktor entsprechend [MKS-PtG 2014]
[c] Pkw Laufleistung: 15.000 km/a
[d] CO_2 aus Luft (konservative Annahme)

Quelle 1, S. 14

Rainer Kling
Physikalischer Verein
Solarmobil Rhein-Main e.V.

Welche Erneuerbaren Energiequellen können wir einsetzen und was kostet das?

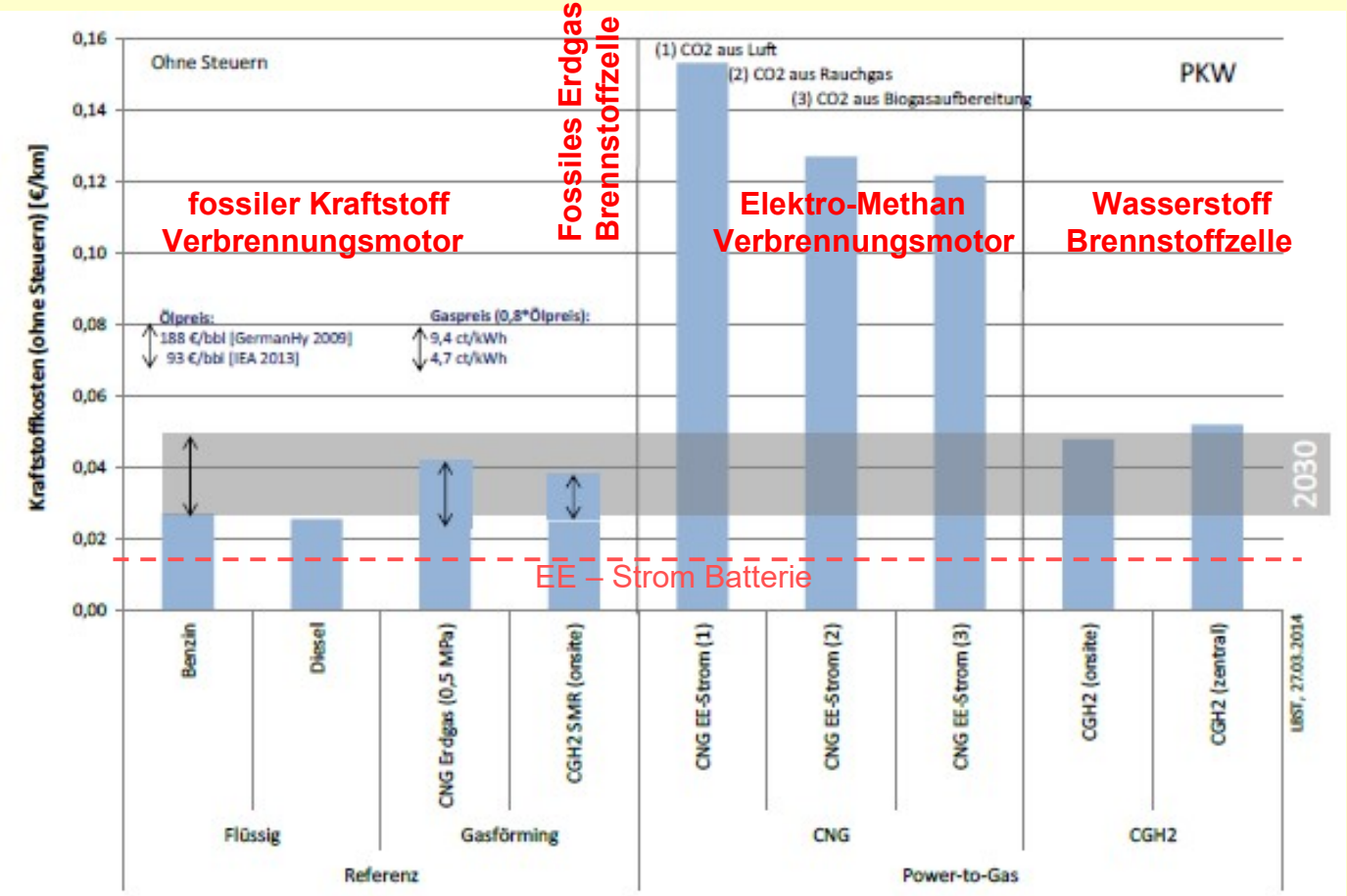
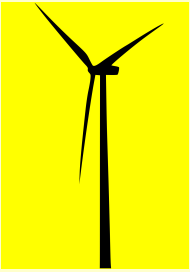


Abbildung 12: Kraftstoffgestehungskosten „Well-to-Wheel" PKW, 2030

Quelle 2, S. 47

Rainer Kling
Physikalischer Verein
Solarmobil Rhein-Main e.V.



Welche Erneuerbaren Energien können wir Im PKW einsetzten und was kostet das?

		PKW Golfklasse	Verbrauch ab Stromerzeuger	Faktor bezogen auf das E-Fahrzeug bei der Erzeugung / Kosten		
100% 8ct	Strom 89% 0,89kWh	13kWh/100km	14,6kWh/100km	1X	1X	1,17€
100%	Wasserstoff 58% 0,58kWh	18kWh/100km	31kWh/100km	2,1X	3-4x	3,5 – 4,7€
100%	Erdgas 41% 0,41kWh	38kWh/100km	92,6kWh/100km	6,3X	8-10x	9,4 – 11,7€
100%	Benzin 35% 0,35kWh	37kWh/100km 4,1l/100km	105,7kWh/100km	7,2X	>10x	>12€
100%	Diesel 35% 0,35kWh	35kWh/100km 3,6l/100km	100kWh/100km	6,8X	>10x	>12€

Werte aus Quelle 1

Rainer Kling
Physikalischer Verein
Solarmobil Rhein-Main e.V.

Was folgt daraus?

6 Schlussfolgerungen und Handlungsbedarfe

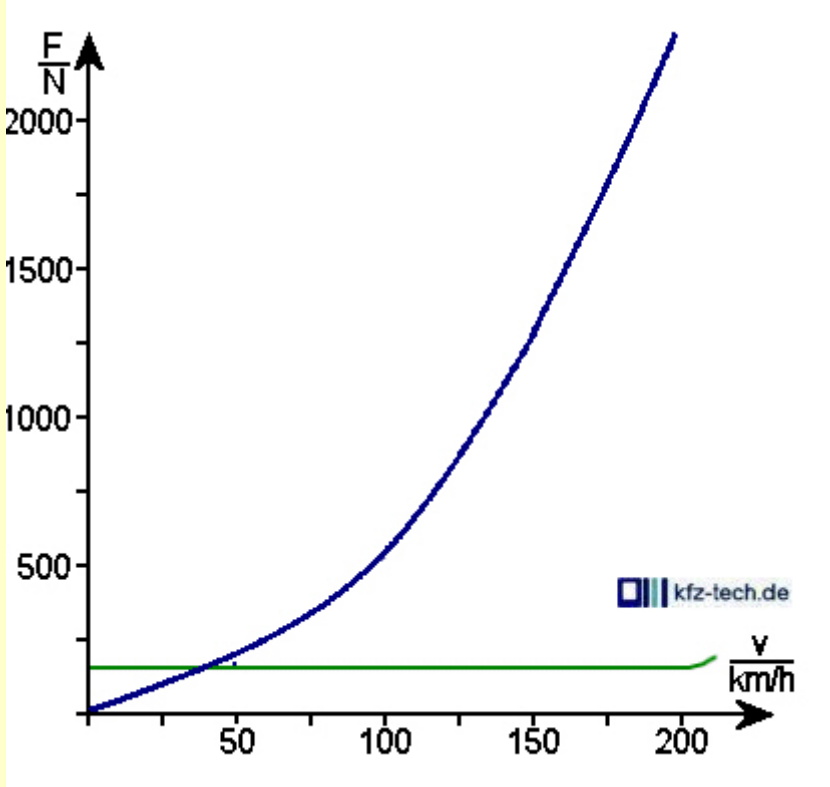
Der Verkehrssektor kann prinzipiell eine Vielzahl von Energieträgern (Kraftstoffe sowie Strom) nutzen, die direkt aus erneuerbaren Quellen stammen. Der Kraftstoffproduktion aus erneuerbaren Energien fällt durch Systemdienstleistungen die Rolle als integrativer Bestandteil, ja sogar des „Ermöglichers" (enabler) des Gesamtprojektes Energiewende zu. Die Kraftstoffproduktion aus erneuerbaren Energien – sprich die Energiewende im Verkehr – ist hierfür der zentrale Hebel.

Zwingende Voraussetzung ist die weitere Elektrifizierung der Fahrzeugflotte und die Bereitstellung ausreichender Mengen an erneuerbaren Kraftstoffen. Aus Gründen der Effizienz ist die direkte Nutzung von Strom als Energieträger im Verkehrssektor in batterieelektrischen Antrieben und die Nutzung von Wasserstoff aus der Elektrolyse in Brennstoffzellenfahrzeugen der Umwandlung von Strom in CNG oder flüssige Kraftstoffe für verbrennungsmotorisch angetriebene Pkw vorzuziehen. Beim Lkw sind Elektrifizierungsoptionen vor allem bei der Kraftstoffherstellung (Power-to-Gas, Power-to-Liquid), aber auch beim Antriebssystem (Verbrennungsmotor-Hybrid, Brennstoffzellenhybrid) auf ihre Potenziale und die spezifischen Hürden in unterschiedlichen Nutzfahrzeugsegmenten zu prüfen. Kurz- bis mittelfristig sind mit Kerosin vergleichbare, erneuerbare Kraftstoffe der gangbare Weg im Luftverkehr.

Quelle 1, S. 137

Rainer Kling
Physikalischer Verein
Solarmobil Rhein-Main e.V.

Verbrauch in Abhängigkeit der Geschwindigkeit



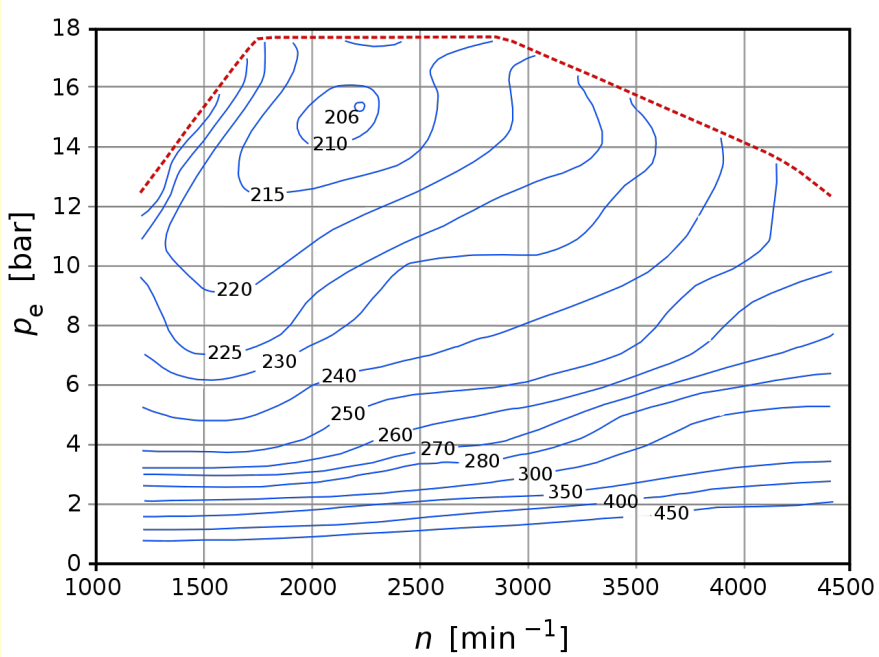
$$F_L = \frac{A \cdot \rho \cdot v^2 \cdot c_W}{2}$$

Quelle kfz-tech.de

Rainer Kling
Physikalischer Verein
Solarmobil Rhein-Main e.V.

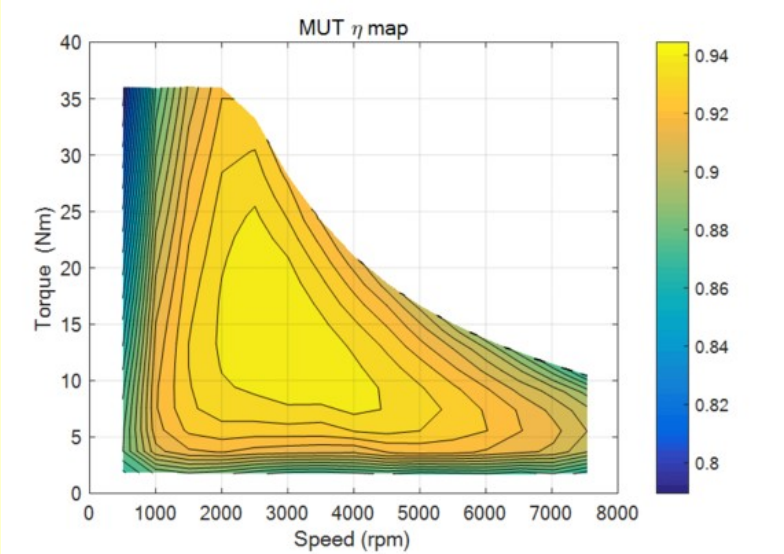
Verbrauch E-Motor – Dieselmotor im Vergleich

Diesel-Motor



https://de.wikipedia.org/wiki/Verbrauchskennfeld#/media/Datei:Brake_specific_fuel_consumption.svg

E-Motor



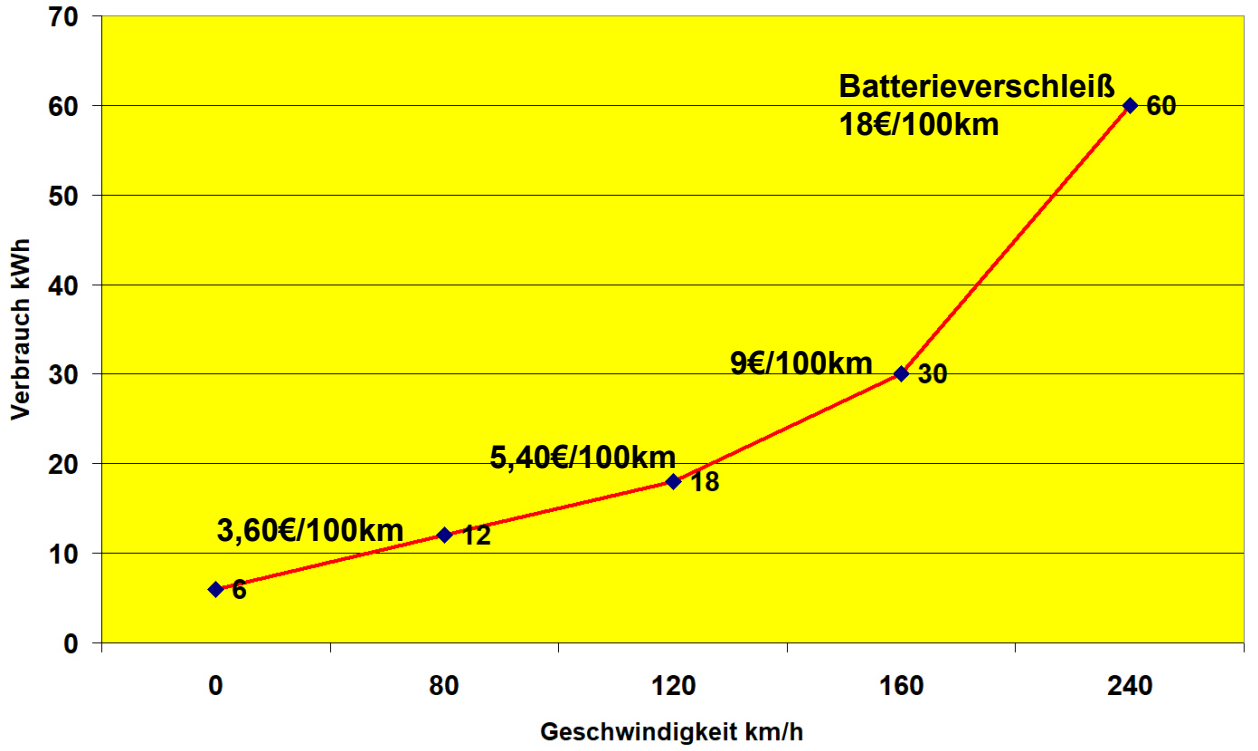
https://www.hbm.com/de/6207/erstellung-von-wirkungsgrad-und-verlustkennfeldern-fr-wechselstrommotoren-mit-dem-datenrekorder-gen3i/

Verbrauchskennfeld des smart forfour und Mitsubishi Colt DI-D Dreizylinder-Dieselmotors mit 1,5 l Hubraum; Parameter: Spezifischer Kraftstoffverbrauch in g/kWh. Der **Bestpunkt** (206 g/kwh) liegt etwa bei 2200/min und 15,3 bar, bei der höchsten Leistung verbraucht der Motor etwa 250 g/kwh.

Energiegehalt 1kg Diesel: 11,8 kWh

Rainer Kling
Physikalischer Verein
Solarmobil Rhein-Main e.V.

Verbrauch eines E-Autos in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit



Fahrzeug mit 60kWh Batterie
Normverbrauch nach NEFZ: 12 kWh
Normreichweite nach NEFZ 500 km

	Reichweite	Ladestopps	Batterieverschleißkosten
bei 80 km/h:	500 km	0	3,60 €/100km
bei 120 km/h:	333km	1	5,40 € /100km
Bei 160 km/h:	200 km	2	9,00 € /100km
bei 240 km/h:	100 km	5	18,00 € /100km

Bei 300€ Batteriekosten je kWh und 1.000 Ladezyklen: Batterieverschleiß von 0,30€ je kWh

Rainer Kling
Physikalischer Verein
Solarmobil Rhein-Main e.V.

Die Batteriegarantie ist abhängig von der Leistung des Fahrzeuges

Fahrzeug	Batterie-kapazität kWh	Höchstgeschwindigkeit km/h	Garantiezeit in Jahren	Garantie-kilometer	WLTP Reichweite in km	Errechnete Anzahl von Ladezyclen	Bemer-kungen
Porsche Tycan	96	260	8	160.000	354	452	Nur bei Nutzung gem. Handbuch
			3	60.0000			Bei Nicht-einhalten
SUV Audi e-tron	95	200	8	160.000	369	433	
VW ID3	62	160	8	160.000	bis 420	mehr als 380	Hersteller-angaben unpräzise
Renault Twingo	22	135	8	160.000	190	842	
Lexus UX 300e	54	160	10	1.000.000	315	3.175	Bei Einhal-tung der Wartungs-intervalle

Angaben ohne Gewähr, die Veröffentlichungen der Hersteller im Internet sind nicht immer eindeutig

Rainer Kling
Physikalischer Verein
Solarmobil Rhein-Main e.V.

Die Batteriegarantie ist abhängig von der Leistung des Fahrzeuges

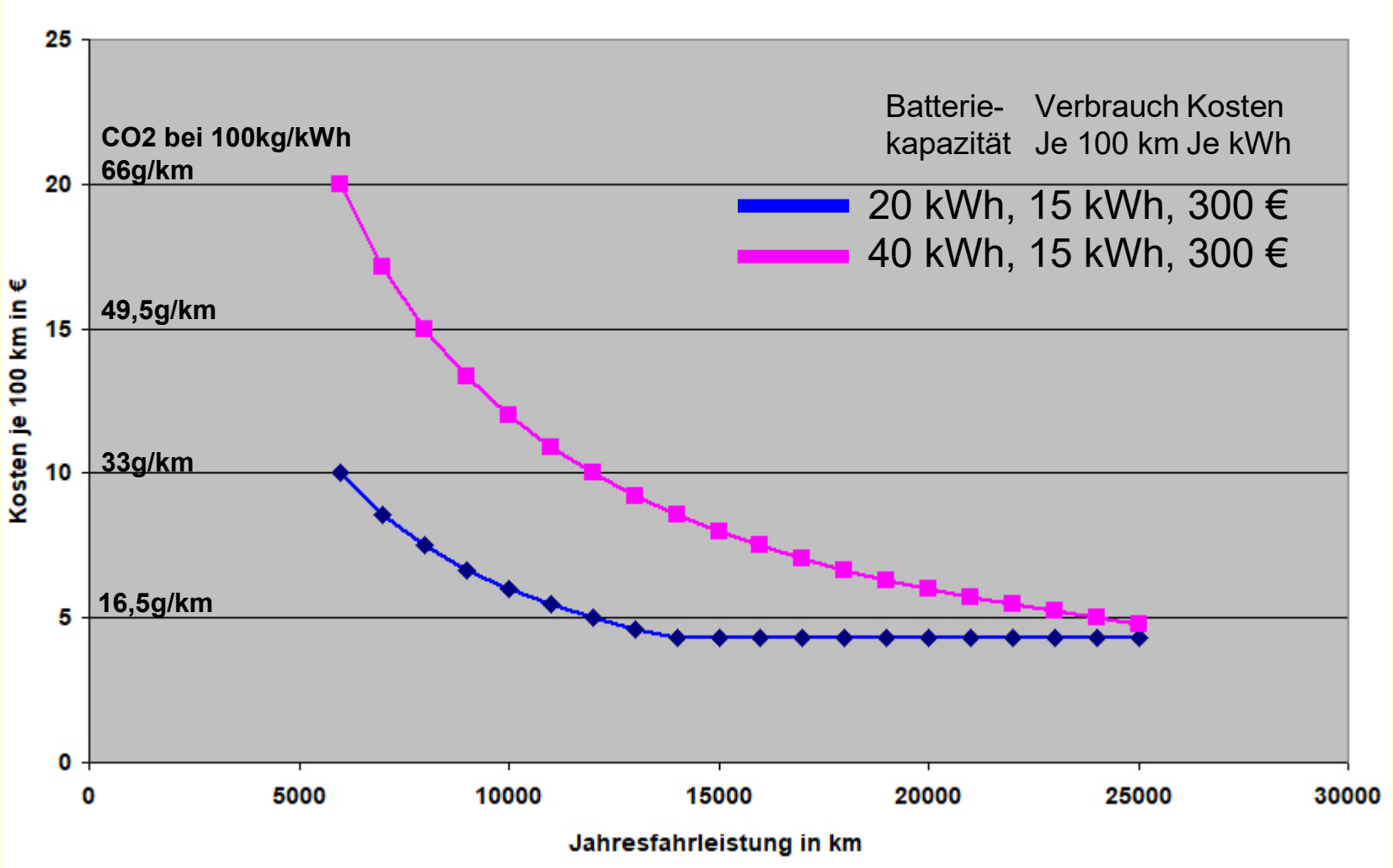
Der elektrische Mercedes EQXX soll 1000 Kilometer mit einer Batterieladung fahren können • © Mercedes

https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/autokatalog/marken-modelle/mercedes-benz/mercedes-eqxx/

Reichweite 1.000km, Verbrauch 10kWh /100km, Motorleistung 150kW

Rainer Kling
Physikalischer Verein
Solarmobil Rhein-Main e.V.

Batterieverschleißkosten in Abhängigkeit der Fahrleistung



Eigene Berechnungen

Rainer Kling
Physikalischer Verein
Solarmobil Rhein-Main e.V.

Welche Ladeinfrastruktur benötigen wir für die Grundversorgung?

Ladesäulen in Oslo

Rainer Kling
Physikalischer Verein
Solarmobil Rhein-Main e.V.

„Die Bedeutung der Elektromobilität im Kampf gegen den Klimawandel“

- Der Elektroantrieb ist bei den Betriebskosten deutlich günstiger.
- Die Reichweite muß in einem ausgewogenen Verhältnis zur Jahresfahrleistung stehen.
- Die Batterieverschleißkosten sind proportional dem Stromverbrauch des Fahrzeuges.
- Damit die Elektromobilität funktioniert ist eine flächendeckende, hochverfügbare Ladeinfrastruktur erforderlich.

Rainer Kling
Physikalischer Verein
Solarmobil Rhein-Main e.V.

Quelle http://img1.auto-motor-und-sport.de/Aaglander-Elektrokutsche-Malte-Juergens-Impression-articleTitle-9b192dbb-830870.jpg

Vielen Dank!

Quellenverzeichnis

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. in der Helmholtz-Gemeinschaft | ifeu | ludwig bölkow systemtechnik | DBFZ

Erneuerbare Energien im Verkehr

Potenziale und Entwicklungsperspektiven verschiedener erneuerbarer Energieträger und Energieverbrauch der Verkehrsträger

Studie im Rahmen der

Wissenschaftlichen Begleitung, Unterstützung und Beratung des BMVI in den Bereichen Verkehr und Mobilität mit besonderem Fokus auf Kraftstoffen und Antriebstechnologien sowie Energie und Klima

des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI)
AZ Z14/SeV/288.3/1179/UI40

Hauptauftragnehmer:
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR)
Institut für Verkehrsforschung
Rutherfordstraße 2, 12489 Berlin
Tel.: 030 67055-7936, Fax: -283

Im Unterauftrag:
Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH (IFEU)
Wilckensstraße 3, 69120 Heidelberg
Tel.: 06221 4767-35

Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH (LBST)
Daimlerstraße 15, 85521 München/Ottobrunn
Tel.: 089 608110-36

Deutsches Biomasseforschungszentrum GmbH (DBFZ)
Torgauer Straße 116, 04347 Leipzig
Tel.: 0341 2434-423

Erstellt von

D. Kreyenberg, A. Lischke (DLR),
F. Bergk, F. Duennebeil, C. Heidt, W. Knörr, (IFEU),
T. Raksha, P. Schmidt, W. Weindorf (LBST),
K. Naumann, S. Majer, F. Müller-Langer (DBFZ)

Berlin, 10. März 2015

https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/G/MKS/mks-kurzstudie-ee-im-verkehr.pdf?__blob=publicationFile

Quelle 1

Quellenverzeichnis

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. in der Helmholtz-Gemeinschaft | ifeu | ludwig bölkow systemtechnik | DBFZ

Power-to-Gas (PtG) im Verkehr
Aktueller Stand und Entwicklungsperspektiven

Kurzstudie im Rahmen des Auftrags

Wissenschaftliche Begleitung, Unterstützung und Beratung des BMVBS in den Bereichen Verkehr und Mobilität mit besonderem Fokus auf Kraftstoffen und Antriebstechnologien sowie Energie und Klima

des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI)

AZ Z14/SeV/288.3/1179/UI40, Ausschreibung vom 19.12.2011

Hauptauftragnehmer:
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR)
Institut für Verkehrsforschung
Rutherfordstraße 2, 12489 Berlin
Tel.: 030 67055-221, Fax: -283

im Unterauftrag:
ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH
Wilckensstraße 3, 69120 Heidelberg
Tel.: 06221 4767-35

Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH (LBST)
Daimlerstraße 15, 85521 München/Ottobrunn
Tel.: 089 608110-0

Deutsches Biomasseforschungszentrum gGmbH (DBFZ)
Torgauer Straße 116, 04347 Leipzig
Tel.: 0341 2434-423

Erstellt von
Dr. U. Bünger, H. Landinger, E. Pschorr-Schoberer, P. Schmidt, W. Weindorf (LBST);
J. Jöhrens, U. Lambrecht (ifeu); K. Naumann (dbfz); A. Lischke (DLR)

München, Heidelberg, Leipzig, Berlin, 19. Mai 2014

Seite 1 von 142

Quelle 2