

Bild: www.fotolia.com 169081568 ©Firstsignal

Die Zukunft des Verbrennungsmotors

Die Zukunft des Verbrennungsmotors wird sich an dessen CO₂-Ausstoß und Stickoxidemission (NO_x) entscheiden. Heutige fossile Kraftstoffe werden im mobilen Bereich immer mehr durch CO₂-neutrale Kraftstoffe ersetzt werden. In Kombination mit Hybrid- und reinen Elektroantrieben wird der Verbrennungsmotor auch in Zukunft der dominante Antrieb bleiben. Flüssige Kraftstoffe gewährleisten aufgrund ihrer sehr hohen Energiedichte eine große Reichweite und werden daher im mobilen Bereich dominant bleiben.

AUTOR



**Dr.-Ing.
Amin Velji**

ist Leiter Forschungsgruppe Emission
am KIT Campustransfer GmbH
in Karlsruhe

Ob der Verbrennungsmotor auch in Zukunft insbesondere im mobilen Bereich eine tragende Rolle spielen wird, hängt von zwei wesentlichen Faktoren ab. Zum einen geht es um den CO₂-Ausstoß (Wirkungsgrad) und zum anderen um Schadstoffemissionen und hier speziell um die Stickoxidemission (NO_x). Hinzu kommt die Tatsache, dass im mobilen Bereich die Energiedichte der eingesetzten Kraftstoffe eine bedeutende Rolle spielt. Die Energiedichte ist unmittelbar proportional zur Reichweite. 1 kg Dieselloskraftstoff hat einen Energieinhalt von 12 kWh, während eine moderne Li-Ionen-Batterie einen Energieinhalt von zirka 0,25 kWh/kg aufweist, dies entspricht einem Faktor von 48:1. Daraus ergibt sich ein Verhältnis der Reichweite von einem Mittelklasse-Diesel-Pkw zu einem reinen Elektroauto mit angemessener Batteriegröße von 4:1 (800 km : 200 km).

QUELLEN DER CO₂-EMISSION

Die energiebedingten CO₂-Emissionen in Deutschland im Jahre 2016 betragen 745 Mio. Tonnen (Bild 1). Davon entfielen 21 Prozent auf den Verkehr. Der Pkw-Verkehr hat daran einen Anteil von 61 Prozent. Dies entspricht 12 Prozent der gesamten energiebedingten CO₂-Emissionen.

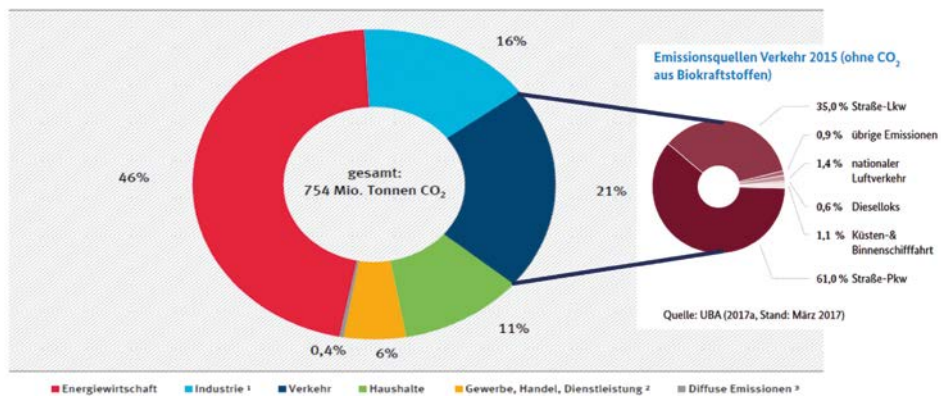


Bild 1: Anteil der Quellengruppen an den energiebedingten CO₂-Emissionen im Jahre 2016 [1]

Quelle: Umweltbundesamt

SCHADSTOFFEMISSIONEN

Obwohl die Schadstoffemissionen aus Verbrennungsmotoren stetig gesunken sind, liegen die Immissionen von Stickstoffdioxid (NO₂) in vielen Städten in Deutschland oberhalb des gesetzlich vorgeschriebenen Grenzwerts von 40 µg/m³ (Bild 2).

Grund für die Diskrepanz zwischen Emission und Immission sind die zum Teil sehr großen Abweichungen zwischen dem im Testzyklus ermittelten Wert und dem tatsächlichen Wert im realen Straßenverkehr. Schon in den 1990er-Jahren gab es erste Aufzeichnungen, dass die NO_x-Realemissionen erhöht sind. Aus diesem Grund gilt seit September 2017 der neue WLTP-Zyklus (Worldwide harmonized Light-duty Test Procedure), der den bis dahin geltenden Neuen Europäischen Fahrzyklus (NEFZ) ablöst. Der WLTP-Zyklus umfasst Betriebszustände, die viel näher am realen Straßenverkehr liegen, als dies im NEFZ der Fall war (Bild 3).

Zusätzlich müssen die Fahrzeuge im realen Straßenverkehr bestimmte Grenzwerte RDE (Real World Driving Emission) einhalten. Hier gilt seit September 2017 ein Conformity Factor (CF) von 2,1, ab 2021 1,5. Der CF gibt an, dass der RDE-Wert um diesen Faktor vom Zyklusgrenzwert nach oben abweichen darf.

Den Hauptanteil an der NO₂-Immission bildet der Kfz-Verkehr mit 64 Prozent [4]. Hier sind hauptsächlich Dieselfahrzeuge für die NO_x-Emission und die NO₂-Immission verantwortlich. Daher ist es sinnvoll, die NO_x-Emission aus Dieselfahrzeugen drastisch zu reduzieren. Neuste Dieselfahrzeuge entsprechen der Euro-Norm 6 und weisen sowohl im Testzyklus als auch im Realbetrieb sehr niedrige NO_x-Emissionen auf.

Die Auswertung der NO₂-Immissionen in Baden-Württemberg zeigen beispielsweise, dass diese kontinuierlich abnehmen. Grenzwerte werden jedoch weiterhin überschritten. Eine Zunahme der Euro6-Dieselfahrzeuge, der Ausbau umweltfreundlicher Verkehrsmittel (ÖPNV, Elektromobile, Rad) und die Einrichtung von Umweltzonen (blaue Plakette) sowie Geschwindigkeitsbegrenzungen werden dazu führen, dass die Luftqualitätsziele in Städten bis 2020 erreicht werden [5].

Zwischenfazit 1: Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass es aus Emissions-sicht keinen Grund gibt, den Verbrennungsmotor zu verbieten!

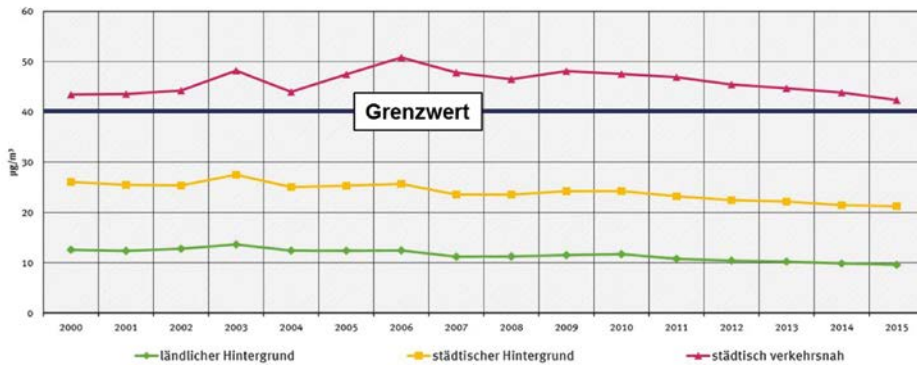


Bild 2: Entwicklung der NO₂-Jahresmittelwerte im Mittel über ausgewählte Messstationen im jeweiligen Belastungsregime, Zeitraum 2002-2015 [2] Quelle: Umweltbundesamt

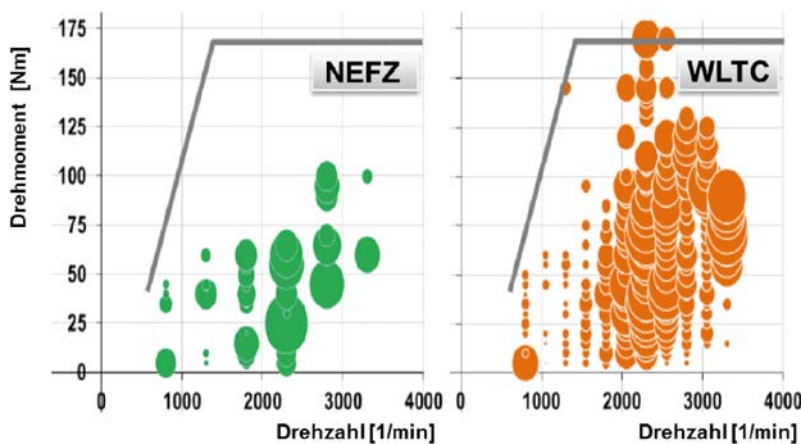


Bild 3: Motorkennfeld in verschiedenen Testzyklen [3] Quelle: M. Wirth, Seminar für Verbrennungsmotoren am KIT, 3.12.2015

WIRKUNGSGRAD [CO₂]

Ein weiterer Grund, der die Zukunft des Verbrennungsmotors beeinflusst, ist die Effizienz beziehungsweise der Wirkungsgrad. Verbrennt man ausschließlich Kohlenwasserstoffe in Verbrennungsmotoren, so ist der CO₂-Ausstoß direkt proportional zum Wirkungsgrad.

Angenommen, dass in Zukunft weiter flüssige Kohlenwasserstoffe in Verbrennungsmotoren zum Einsatz kommen, ergibt sich bezüglich des Wirkungsgrads und CO₂-Ausstoßes folgendes Szenario (Bild 4):

Aus der Prognose geht hervor, dass in Zukunft Benzin-Pkw 130 g CO₂/km und Diesel-Pkw 93 g CO₂/km ausstoßen werden. Demnach sind die Ziele der Europäischen Union, das heißt 95 g CO₂/km ab 2020 (beschlossen) und 70 g CO₂/km ab 2025 (in Diskussion), mit rein verbrennungsmotorischen Antrieben und fossilen Kraftstoffen nicht zu erreichen. Ersetzt man fossile Kraftstoffe durch nahezu kohlenstofffreie Kraftstoffe, ist ein nahezu CO₂-freier Pkw-Verkehr möglich. Nach einer Studie des Umweltbundesamts „Postfossile Energieversorgungsoptionen für einen treibhausgasneutralen Verkehr im Jahre 2050“ ist die Herstellung von flüssigen und gasförmigen Kraftstoffen durch CO₂ aus der Atmosphäre unter Einsatz von Strom aus 100 Prozent regenerativen Energiequellen möglich [5]. Man spricht von Elektrokraftstoffen, auch PtL (Power to Liquid) oder PtG (Power to Gas) genannt. Reine Elektroautos (Battery Electric Vehicle – BEV) stoßen theoretisch kein CO₂ aus. Dabei handelt es sich jedoch nur um die Bewertung des Antriebs (Tank-to-Wheel – TtW). Viel aussagekräftiger ist jedoch eine Gesamtbewertung, die auch die Kraftstoff- beziehungsweise Stromerzeugung, Herstellung, Unterhalt und Entsorgung des Pkws mit einschließt. Man spricht hier von einer Well-to-Wheel (WtW)-Betrachtung.

GESAMTENERGIEBILANZ (WELL-TO-WHEEL – WTW) UNTERSCHIEDLICHER ANTRIEBE

Die Auswertungen der spezifischen klimarelevanten Emissionen pro Fahrzeug-Kilometer (berechnet als CO₂-Äquivalent) zeigen, dass im Jahr 2050 Treibhausgas-minderungen von 65 bis 75 Prozent möglich sind (bezogen auf einen Mittelklasse-Pkw der Golf-Klasse) [6].

Bild 5 zeigt, dass die höchste Minderung dabei der Einsatz von rein batterieelektrischen Fahrzeugen (BEV) bringt. Allerdings fällt ihr Emissionsvorteil gegen-

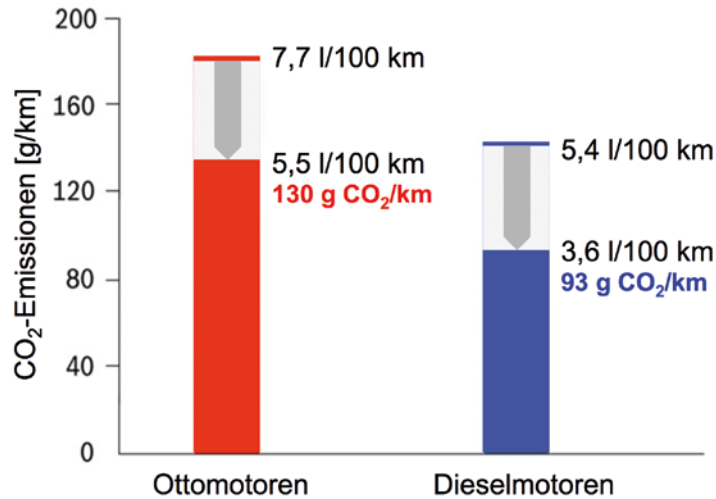


Bild 4: Prognose: Kraftstoffverbrauch und CO₂-Emission rein verbrennungsmotorischer Antriebe [4]

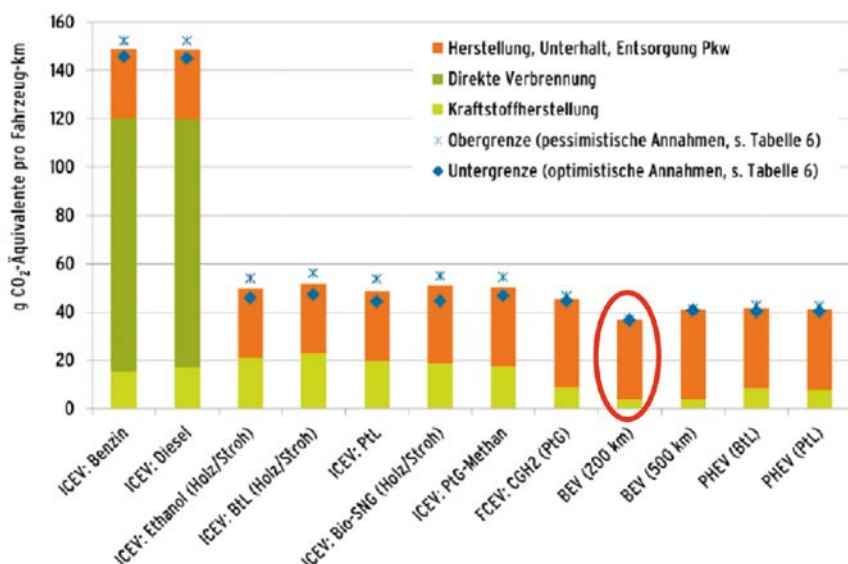


Bild 5: Spezifische CO₂-Äquivalent-Emissionen der postfossilen Energieversorgung eines Mittelklasse-Pkws im Jahr 2050 [6]

Quelle: Umweltbundesamt 2015: Postfossile Energieversorgungsoptionen für einen treibhausgasneutralen Verkehr im Jahr 2050

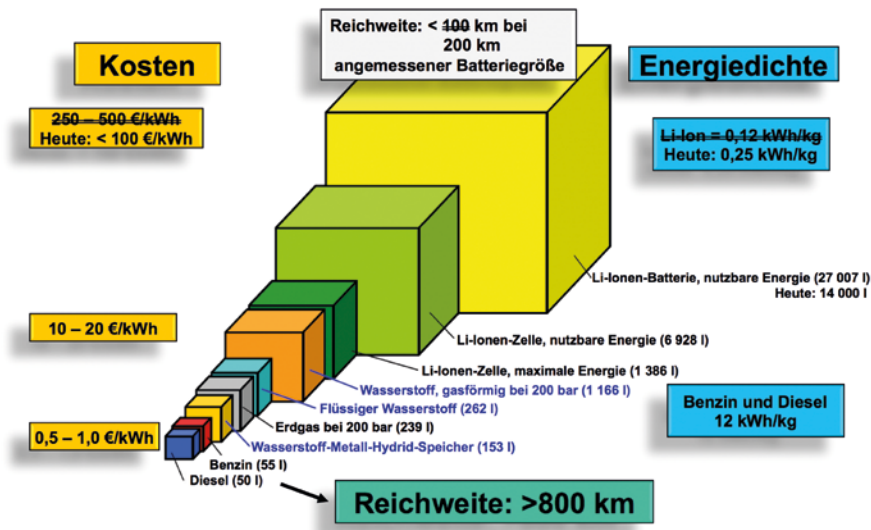


Bild 6: Volumen, Energiedichte und Kosten unterschiedlicher Kraftstoffe

Bild: Autor

über anderen Optionen geringer aus als gemeinhin erwartet. Ein wesentlicher Grund hierfür ist, dass die niedrigen Emissionen auf der Kraftstoffseite nahezu vollständig durch die Emissionen aus der Fahrzeugherstellung kompensiert werden. Die Gegenüberstellung der Optionen zeigt weiterhin, dass Plug-In-Hybride (PHEV) – unabhängig davon, ob sie mit BtL oder PtL betrieben werden – bei den Treibhausgasemissionen dem reinen Elektroauto kaum nachstehen. Hier werden die höheren Emissionen aus der Kraftstoffgewinnung durch die geringeren Emissionen der Fahrzeugherstellung ausgeglichen. Plug-In-Hybride sind daher eine echte Alternative zum reinen Elektroauto für alle Nutzer, die nicht mit einer Reichweite von 200 km auskommen [6].

REICHWEITE UND ENERGIEDICHTE

Die Energiedichte im mobilen Bereich ist von entscheidender Bedeutung. Sie ist direkt proportional zur Reichweite. Bild 6 zeigt das Volumen, die Energiedichte und Kosten unterschiedlicher Kraftstoffe. Die durchgestrichenen Zahlen für die Batterie geben die Werte zu Beginn der Batterieentwicklung an, während die Werte darunter dem heutigen Stand der Technik entsprechen.

Nimmt man als Basis den Energieinhalt von 50 Liter Dieseldieselkraftstoff, beträgt das Volumen einer modernen Li-Ionen-Batterie gleichen Energieinhalts 14.000 Liter. Die Kosten für Diesel betragen zwischen 0,5 und 1 €/kWh, während für die Batterien die Kosten bei 100 €/kWh liegen. Wählt man für die Batterie eine an-

gemessene Größe bezüglich Volumen und Masse, ergibt sich hier eine Reichweite von 200 km. Im Vergleich dazu liegt die Reichweite eines Mittelklasse-Diesel-Pkw bei 800 km. Infrastruktur der Ladestationen, Ladedauer und Verfügbarkeit der Rohstoffe für Batterien sind hier nicht berücksichtigt.

Zwischenfazit 2: Mit Bio- und Elektrokraftstoffen sowie reinen Elektroautos und mit Strom aus 100 Prozent „regenerierbaren“ Energien sind die CO₂-Ziele 2050 im Verkehr erreichbar, sodass es keinen Grund gibt, den Verbrennungsmotor aus CO₂-Sicht zu verbieten.

Allerdings ergibt sich hier die Frage nach der Verfügbarkeit der Bio- und Elektrokraftstoffe. Nach einer SHELL-Studie wird der Energiebedarf im Jahr 2040 im Pkw-Bereich in Deutschland 800 PJ betragen [7]. Wollte man diesen Bedarf allein mit Biokraftstoffen mit einer Energiedichte von 35 MJ/Liter (vergleichbar mit der Energiedichte von Diesel) decken, würden pro Jahr 23 Mrd. Liter Biokraftstoffe benötigt. Dieser Bedarf lässt sich weder aus heimischen noch aus heimischen plus importierten Biokraftstoffen decken. Ähnlich gestaltet es sich bei Elektrokraftstoffen. Auch hier wird die verfügbare Menge an Elektrokraftstoffen nicht ausreichen, um den gesamten Energiebedarf des Pkw-Verkehrs in Deutschland ausschließlich mit Elektrokraftstoffen zu decken. Nach Leonhard wird der Energiebedarf des Pkw-Verkehrs im Jahre 2060 durch Effizienzsteigerung auf 170 TWh sinken, ausgehend von einem Energiebedarf von 420 TWh im Jahre 2010 [8]. Im Jahre 2060 wird daher ein Kraftstoffmix aus 1/3 fossilen Kraft-

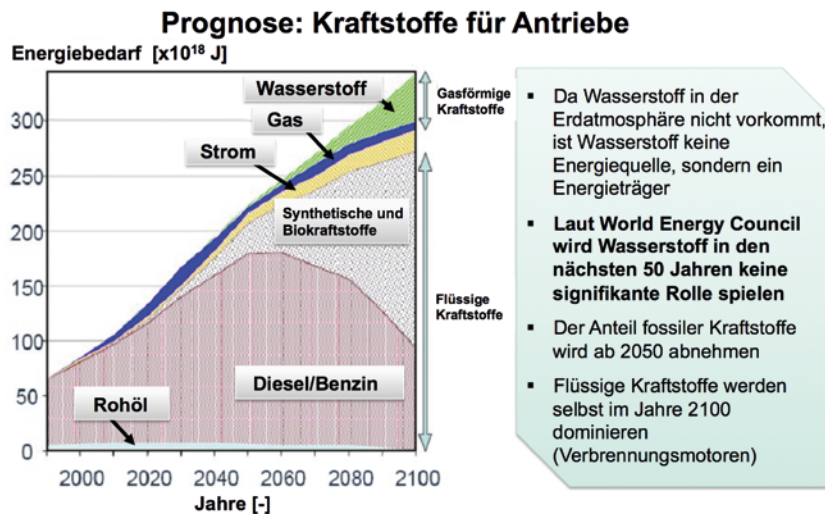


Bild 7: Prognose: Kraftstoffe für Antriebe [9]

Quelle: World Energy Council

stoffen, 1/3 Elektrokraftstoffen und 1/3 Strom herrschen, das heißt dass zwei Drittel der Pkws einen Verbrennungsmotor als Hauptantrieb an Bord haben werden.

SCHLUSSFOLGERUNGEN

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass es weder einen emissionsbedingten (Luftqualität) noch klimarelevanten Grund (CO₂) gibt, den Verbrennungsmotor zu verbieten. Ferner werden flüssige Kraftstoffe aufgrund ihrer sehr hohen Energiedichte im mobilen Bereich dominieren (Bild 7). Das World Energy Council (WEC) geht in seiner Prognose davon aus, dass selbst im Jahre 2100 flüssige Kraftstoffe in Verbrennungsmotoren dominieren werden. Der Rückgang von fossilen Kraftstoffen wird ab 2050 stattfinden [9]. Eine weitere sehr interessante Feststellung des WEC ist, dass der Wasserstoff in den nächsten 50 Jahren keine signifikante

Rolle spielen wird [9]. Auch dies ist der Tatsache geschuldet, dass flüssige Kraftstoffe gegenüber gasförmigen Kraftstoffen eine wesentlich höhere Energiedichte haben.

Zum Schluss sei eine ganz persönliche Bemerkung erlaubt. Unmittelbar nach dem Urknall vor 13,7 Mrd. Jahren existierte als einziges Element der Wasserstoff. Heute findet man in der Erdatmosphäre kaum Wasserstoff. Er ist natürlich nach wie vor vorhanden, aber nicht als gasförmiger Wasserstoff. Man findet ihn gebunden an Kohlenstoff als Erdöl wieder, das heißt es handelt sich hier um flüssige Kohlenwasserstoffe mit einer sehr hohen Energiedichte. Daraus könnte man den Schluss ziehen, dass die Natur Energiedichte vor Energieumwandlungseffizienz stellt. Der Vergleich zwischen Photosynthese und Photovoltaik bietet sich an und liefert ein „natürliches“ Argument für den Verbrennungsmotor.



- [1] Umweltbundesamt: Nationale Trendtabellen für die deutsche Berichterstattung atmosphärischer Emissionen 1990 – 2016, Stand 01/2018
- [2] Umweltbundesamt 2016
- [3] Wirth, M.: Vortrag im Seminar für Verbrennungsmotoren am Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2015
- [4] Verursacherbezogene Quellenanalysen für NO₂ aus Plänen 2002 bis 2012, UBA-Texte 26/2014
- [5] Lahl, U.: Eine Emissions- und Immissionsbewertung aus Sicht der Politik, Haus der Technik, Tagung Motorische Stickoxidbildung NO_x, 2018
- [6] Umweltbundesamt 2015: Postfossile Energieversorgungsoptionen für einen treibhausgasneutralen Verkehr im Jahre 2050
- [7] Shell Pkw-Szenarien bis 2040: Fakten, Trends und Perspektiven für Auto-Mobilität
- [8] Leonhard, R.: Driving with fire – Ways to CO₂ free mobility, 15th Stuttgart International Symposium, 2015
- [9] World Energy Council