



Dokumentation

Energieeffizienz im Fahrzeugsektor

Energieeffizienz im Fahrzeugsektor

Aktenzeichen: WD 8 - 3000 - 143/19
Abschluss der Arbeit: 27. November 2019
Fachbereich: WD 8: Umwelt, Naturschutz, Reaktorsicherheit, Bildung und
Forschung

Die Wissenschaftlichen Dienste des Deutschen Bundestages unterstützen die Mitglieder des Deutschen Bundestages bei ihrer mandatsbezogenen Tätigkeit. Ihre Arbeiten geben nicht die Auffassung des Deutschen Bundestages, eines seiner Organe oder der Bundestagsverwaltung wieder. Vielmehr liegen sie in der fachlichen Verantwortung der Verfasserinnen und Verfasser sowie der Fachbereichsleitung. Arbeiten der Wissenschaftlichen Dienste geben nur den zum Zeitpunkt der Erstellung des Textes aktuellen Stand wieder und stellen eine individuelle Auftragsarbeit für einen Abgeordneten des Bundestages dar. Die Arbeiten können der Geheimschutzordnung des Bundestages unterliegende, geschützte oder andere nicht zur Veröffentlichung geeignete Informationen enthalten. Eine beabsichtigte Weitergabe oder Veröffentlichung ist vorab dem jeweiligen Fachbereich anzuzeigen und nur mit Angabe der Quelle zulässig. Der Fachbereich berät über die dabei zu berücksichtigenden Fragen.

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung	4
2.	Ökobilanzierung im Fahrzeugsektor	4

1. Einleitung

Bei den Kraftfahrzeugen wird im Wesentlichen unterschieden zwischen konventionellen (Diesel- und Ottomotor), Hybrid-, Elektro- und Brennstoffzellenfahrzeugen. Bei „Plug-In-Hybridfahrzeugen“ (HEV) handelt es sich um Fahrzeuge mit einer Möglichkeit zum elektrischen Laden, [...] welche ihre Energie auch zu einem überwiegenden Teil über diesen Weg beziehen. Unter Elektrofahrzeugen sind batterieelektrische Fahrzeuge zu verstehen.¹

Ökobilanzierungen² von Fahrzeugmotoren unterscheiden - in Abhängigkeit von den für den Antrieb verwendeten Energieträgern - zwischen erdölbasierten, erdgasbasierten, strombasierten, wasserstoffbasierten oder biomassebasierten Kraftstoffen. Für die Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Verkehrssektor sind neben der Effizienzentwicklung die eingesetzten Kraftstoffe und Energieträger relevant.

Bei der Lebenszyklusanalyse betrachten die Fachleute einzelne Komponenten des „Well-to-Wheel-Prozesses“ (WtW) und bestimmen den WtW-Energieverbrauch für die gesamte Wertschöpfungskette.

Die vorliegende Arbeit stellt Literaturquellen zur Ökobilanzierung im Fahrzeugsektor für unterschiedliche Antriebssysteme zusammen.

2. Ökobilanzierung im Fahrzeugsektor

Bei der Ökobilanzierung der Antriebstechnologien sollte für eine vollständige Analyse die Gewinnung und Bereitstellung eines Treibstoffs bzw. Energieträgers bis zur Umwandlung in Bewegungsenergie, die sogenannte Well-to-Wheel-Analyse, durchgeführt werden. Die Analyse umfasst zudem die Ermittlung aller direkten und indirekten Emissionen über den kompletten Pfad der Bereitstellung eines Energieträgers. Relevante Emissionen sind dabei Kohlendioxid (CO₂), Methan (CH₄) und Stickoxide (NO_x).

Bei der Bilanzierung werden die einzelnen Prozesskomponenten auch in Teilbereiche aufgeteilt. Das Well-to-Tank-System (WtT) betrachtet beispielsweise die Treibstoffprozesskette und das Tank-to-Wheel System (TtW) umfasst den Betrieb des jeweiligen Fahrzeuges. Die Umwandlung des Treibstoffs in Bewegungsenergie ist abhängig von der Fahrzeugtechnologie (z.B. Ottomotor, Elektrofahrzeug, oder Brennstoffzelle). Die Wirkungsgrade sind teilweise sehr unterschiedlich.³

Für das Umweltbundesamt (UBA) ist „die Energieeffizienz der Nutzung von Kraftfahrzeugen das Produkt aus der Effizienz der Vorkette (von der Primärenergie bis zur Bereitstellung der Endenergie, „Well-to-tank“) und der Effizienz des eigentlichen Fahrzeuges („Tank-to-Wheel“).

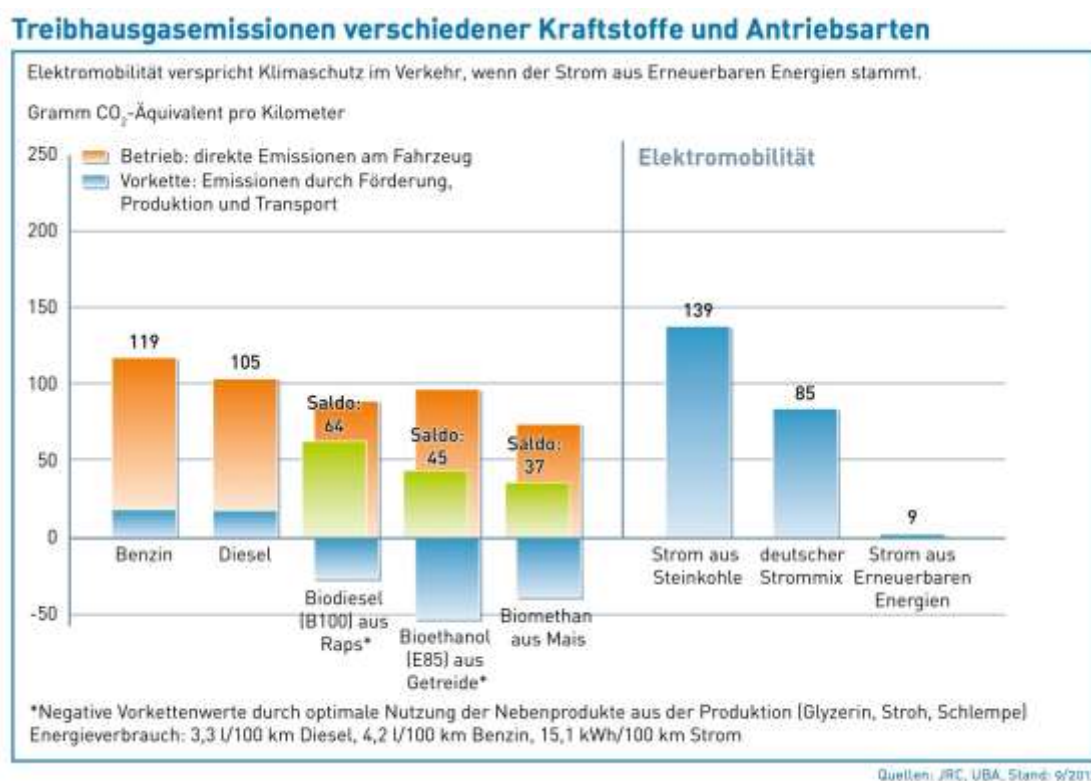
1 Öko-Institut e.V. (2013). „Treibhausgasneutraler Verkehr 2050: Ein Szenario zur zunehmenden Elektrifizierung und dem Einsatz stromerzeugter Kraftstoffe im Verkehr“, <https://www.oeko.de/oekodoc/1829/2013-499-de.pdf>

2 Weitere Bezeichnungen: Lebenszyklusanalyse (Life Cycle Analysis, LCA), Ökologischer Fußabdruck

3 Forschungs-Informationssystem (FIZ) (2010). „Well-to-Wheel Betrachtung der Antriebstechnologien“, <https://www.forschungsinformationssystem.de/servlet/is/332825/> aktualisierte Fassung vom 21.01.2019

Sie hängt sowohl von der Effizienz des Antriebs als auch von Fahrzeuggröße, -form, -masse und weiteren Fahrzeugparametern ab. Bezugsgrößen sind dabei der physikalische Energieinhalt der getankten Energieträger auf der Inputseite und der gefahrene Kilometer auf der Outputseite. In seinem Gutachten fokussiert sich das UBA auf Möglichkeiten der fahrzeugbezogenen Effizienzregulierung und untersucht das Handlungsfeld „Tank-to-Wheel-Effizienz“.⁴

Die nachfolgende Grafik zeigt eine Darstellung von Treibhausgasemissionen verschiedener Kraftstoffe und Antriebsarten aus dem Jahr 2013:⁵



Weitere Informationen zu Well-to-Wheel-Analysen finden sich auf den Seiten des Forschungs-Informations-Systems des Bundesministeriums für Wirtschaft, Verkehr und Digitale Infrastruktur.⁶

4 Umweltbundesamt (UBA) (2013). „Konzept zur zukünftigen Beurteilung der Effizienz von Kraftfahrzeugen“, https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte_95_2013_konzept_zur_zukunfftigen_beurteilung_der_effizienz_von_kraftfahrzeugen.pdf, Die Studie betrachtet nur den Teilbereich TtW (Link kann nicht direkt angesteuert werden.)

5 Agentur für erneuerbare Energien (2018). „Bundesländer mit neuer Energie- Statusreport Föderal Erneuerbar 2018“, https://www.foederal-erneuerbar.de/tl_files/ae/FE-Report_2018/AEE_FE-Report_2018_Einleitung.pdf

6 Forschungs-Informations-System (FIZ) (2010). „Well-to-Wheel Betrachtung der Antriebstechnologien“, <https://www.forschungsinformationssystem.de/servlet/is/332825/> aktualisierte Fassung vom 21.01.2019

Das österreichische Umweltbundesamt hat einen Online-Rechner zur Berechnung von Treibhausgas (THG)-Emissionen verschiedener Energieträger und Kraftstoffe veröffentlicht.⁷

Einen Überblick der verschiedenen Antriebstechnologien und -systeme und deren CO₂-Minderungspotential liefert das Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB).⁸

Die folgenden Quellenhinweise auf Studien und Metastudien betrachten die Effizienz im Fahrzeugsektor im Rahmen von Lebenszyklusanalysen.

Ökobilanzuntersuchungen verschiedener Antriebssysteme im Vergleich

In der Studie des Umweltbundesamtes „Weiterentwicklung und vertiefte Analyse der Umweltbilanz von Elektrofahrzeugen“ wird „stellvertretend für die Vielfalt der am Markt vertretenen Fahrzeugmodelle ein Pkw der Kompaktklasse mit verschiedenen elektrischen Antriebskonzepten betrachtet.“ Eine Tabelle zeigt die Treibhausgasemissionen von Verbrennungs- und Elektrofahrzeugen (für heute und 2030).⁹

Das Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (ISI) untersucht in seiner Studie „Klimabilanz, Kosten und Potenziale verschiedener Kraftstoffarten und Antriebssysteme für Pkw und Lkw“ Elektrofahrzeuge sowie Gasfahrzeuge mit Verbrennungsmotoren, die mit Erdgas, aus Strom hergestelltem synthetischen Methan oder Methan aus verschiedenen biogenen Quellen betrieben werden, im Vergleich zu konventionellen Fahrzeugen mit Diesel-Verbrennungsmotoren. Die Autoren stellen u.a. Fahrzeuge und Energiepfade für die verschiedenen Kraftstoffarten und Antriebssysteme vor und vergleichen diese hinsichtlich ihrer Klimabilanz anhand eines Life-Cycle-Assessments (LCA) bzw. einer Ökobilanz. In dieser Studie werden folgende Fahrzeuge betrachtet: Dieselfahrzeug (modern, effizient als Hybrid, wobei eine stetig steigende Zumischung von Biokraftstoffen erfolgt), Erdgasfahrzeug (effizient, mit Erdgas betrieben ohne Beimischung von Biomethan oder synthetischen Methan), Batteriefahrzeug (E-Pkw), Brennstoffzellenfahrzeug (BZ-Pkw; nur bezüglich der Klimabilanz betrachtet). Die Werte

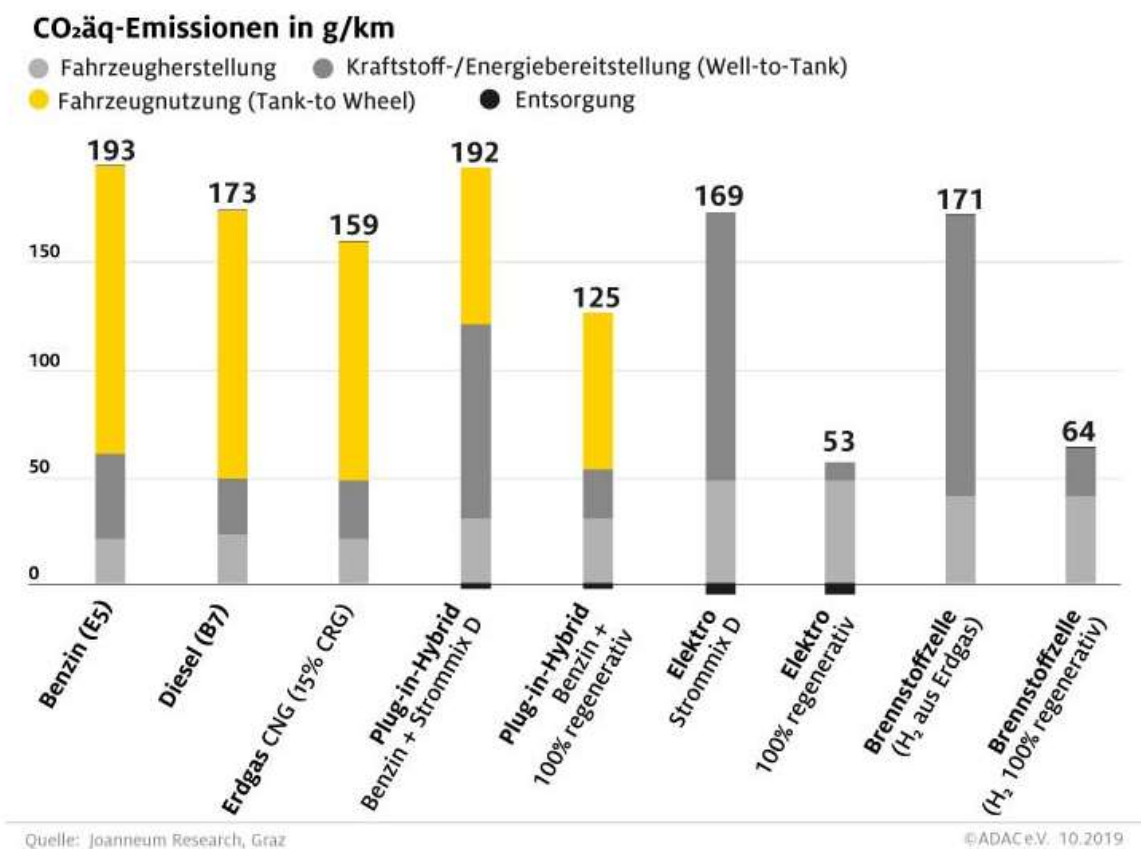
7 Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (Umweltbundesamt) (2017). „Berechnung von Treibhausgas (THG)-Emissionen verschiedener Energieträger“
<http://www5.umweltbundesamt.at/emas/co2mon/co2mon.html>

8 Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB) (2006). „Perspektiven eines CO₂- und emissionsarmen Verkehrs – Kraftstoffe und Antriebe im Überblick“, Vorstudie zum TA-Projekt
<https://www.tab-beim-bundestag.de/de/pdf/publikationen/berichte/TAB-Arbeitsbericht-ab111.pdf> (Link kann nicht direkt angesteuert werden.)
Zusammenfassung <https://www.tab-beim-bundestag.de/de/pdf/publikationen/zusammenfassungen/TAB-Arbeitsbericht-ab111Z.pdf> (Link kann nicht direkt angesteuert werden.)

9 Umweltbundesamt (UBA) (2016). „Weiterentwicklung und vertiefte Analyse der Umweltbilanz von Elektrofahrzeugen“
https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte_27_2016_umweltbilanz_von_elektrofahrzeugen.pdf, Seite 19

für die Treibhausgasemissionen und eine Übersicht über betrachtete Energiepfade und Antriebssysteme mit Gesamtwirkungsgraden sind in Tabellen zusammengefasst.¹⁰

Die nachfolgende Grafik des Zentrums für Klima, Energie und Gesellschaft zur Klimabilanz der aktuellen Antriebssysteme zeigt exemplarisch für das Beispiel „Golf“ die CO₂-Äquivalente für die Fahrzeugherstellung, Kraftstoff- und Energiebereitstellung (WtT), Fahrzeugnutzung (TtW und Entsorgung). Detaillierte Informationen zum Aufbau des LCA-Tools und Hintergrundinformationen finden sich im entsprechenden Bericht.¹¹

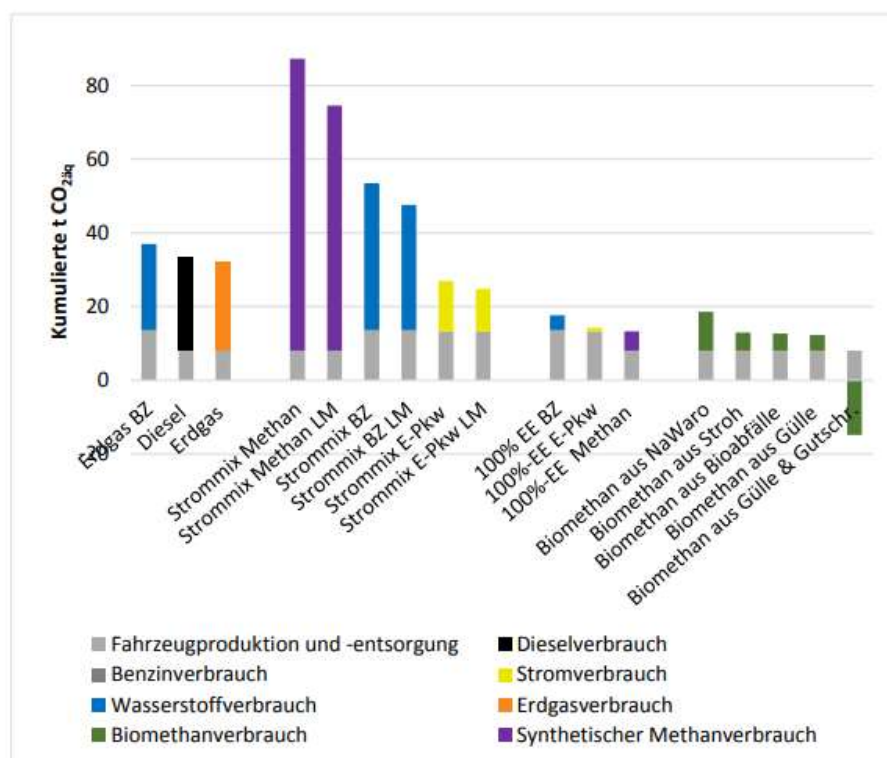


10 Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (ISI) (2019). Endbericht „Klimabilanz, Kosten und Potenziale verschiedener Kraftstoffarten und Antriebssysteme für Pkw und Lkw“, <https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/cce/2019/klimabilanz-kosten-potenziale-antriebe-pkw-lkw.pdf>, Tabellen Seite 17, 20 und 21

11 Allgemeiner Deutscher Automobil Club (ADAC) (2019). „Elektroautos brauchen die Energiewende: Die Klimabilanz“, <https://www.adac.de/verkehr/tanken-kraftstoff-antrieb/alternative-antriebe/klimabilanz/>

Joanneum Research, Zentrum für Klima, Energie und Gesellschaft (2019). Bericht „Geschätzte Treibhausgasemissionen und Primärenergieverbrauch in der Lebenszyklusanalyse von Pkw-basierten Verkehrssystemen“, <https://www.adac.de/-/media/pdf/tet/lca-tool--joanneum-research.pdf?la=de-de&hash=F06DD4E9DF0845BC95BA22BCA76C4206>

Die folgende Abbildung zeigt beispielhaft die Treibhausgasemissionen eines Mittelklassefahrzeugs mit unterschiedlichen Antriebstechnologien, über den Lebensweg von 182.000 km und von 2019 bis 2031 bilanziert (BZ: Brennstoffzelle, E-Pkw: Batteriefahrzeug, LM: Mit Lastmanagement, EE: Erneuerbarer Strom).¹²



Im europäischen Kontext hat das Joint Research Centre (JRC) der Europäischen Kommission eine ausführliche WtW- und WtT-Analyse zukünftiger Kraftstoffe und Antriebssysteme für die Automobilindustrie erstellt. Dabei wurde eine Bewertung des Energieverbrauchs und der Treibhausgasemissionen für eine Vielzahl von potenziellen zukünftigen Kraftstoff- und Antriebssystemen durchgeführt.¹³

12 Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (ISI) (2019). Endbericht „Klimabilanz, Kosten und Potenziale verschiedener Kraftstoffarten und Antriebssysteme für Pkw und Lkw“
<https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/cce/2019/klimabilanz-kosten-potenziale-antriebe-pkw-lkw.pdf>, Abbildung Seite 23

13 Europäische Kommission, Joint Research Centre (JRC) (2014). „Well-to-Wheels Report version 4.a : JEC Well-to-Wheels Analysis“
<https://ec.europa.eu/jrc/en/publication/eur-scientific-and-technical-research-reports/well-wheels-report-version-4a-jec-well-wheels-analysis>

Europäische Kommission, Joint Research Centre (JRC) (2014). „Well-to-Wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the European context Well-to-Tank (WTT) Report Version 4a, January 2014“
https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC85326/wtt_report_v4a_april2014_pubsy.pdf

Eine Literaturübersicht der Kosten und CO₂-Emissionen verschiedener Antriebssysteme der Elektromobilität beschreibt auch die erwarteten Veränderungen der WtW-Treibhausgasemissionen und des Energiebedarfs verschiedener Antriebssysteme.¹⁴

Das österreichische Umweltbundesamt vergleicht in einer Studie die Ökobilanz alternativer Antriebe für Elektrofahrzeuge. Die Studie „untersucht Treibhausgas- und Luftschadstoffbilanzen von Elektrofahrzeugen und anderen alternativen Antriebsformen, um deren Potenzial im Vergleich zu konventionellen Antrieben und auch im Vergleich zu Biokraftstoffen bewerten zu können.“ Eine weitere Studie untersucht die „Ökobilanzen ausgewählter Biotreibstoffe“ für die österreichische Prozesskette.¹⁵

Elektrofahrzeuge

Eine weitere Studie des ISI beschäftigt sich insbesondere mit den aktuellen Treibhausgasemissionsbilanzen von Elektrofahrzeugen in Deutschland.¹⁶

Die Arbeit „Ökobilanzierung von Energiespeichern für Elektrofahrzeuge“ beinhalten Informationen und Literaturangaben zu Aspekten der Ökobilanzierung von Elektrofahrzeugen und den möglichen Umweltschäden der Batteriespeicher.¹⁷

Die WtW-Treibhausgasemissionen verschiedener Antriebssysteme von Elektrofahrzeugen hat das TAB ebenfalls in einer Studie zusammengefasst.¹⁸

14 Wolfram, P. et al. (2016). „Electric vehicles: Literature review of technology costs and carbon emissions“, https://theicct.org/sites/default/files/publications/ICCT_LitRvw_EV-tech-costs_201607.pdf, Seite 15

15 Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (Umweltbundesamt) (2014) „Ökobilanz alternativer Antriebe – Elektrofahrzeuge im Vergleich“, <https://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/publikationen/REP0440.pdf>, Pressemitteilung https://www.umweltbundesamt.at/aktuell/presse/lastnews/news2016/news_160623/

Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (Umweltbundesamt) (2012) „Ökobilanzen ausgewählter Biotreibstoffe“, <https://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/publikationen/REP0360.pdf>

16 Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (ISI) (2019). „Die aktuelle Treibhausgasemissionsbilanz von Elektrofahrzeugen in Deutschland“, https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/sustainability-innovation/2019/WP02-2019_Treibhausgasemissionsbilanz_von_Fahrzeugen.pdf

17 Wissenschaftliche Dienste (2019). Sachstand „Ökobilanzierung von Energiespeichern für Elektrofahrzeuge“, WD 8-099-19

18 Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB) (2011). „Konzepte der Elektromobilität“, <https://www.tab-beim-bundestag.de/de/pdf/publikationen/buecher/peters-et-al-2013-153.pdf>, Seite 147

Verbrennungsmotor und Brennstoffzelle

Motoren mit Brennstoffzellenantrieb gelten als Zukunftstechnologie. Die Fachwelt vergleicht diese meist mit batteriebetriebenen Antrieben. Ein Vergleich der klassischen, fossilen Verbrennungsmotoren findet sich in einer Studie des Vereins Deutscher Ingenieure aus dem Jahr 2000. Die Studie betrachtet die Treibhausgasemissionen von Verbrennungsmotoren und Brennstoffzellen.¹⁹

Dieselmotoren und Elektrofahrzeuge

Eine Studie des ifo-Instituts zur Klimabilanz von Dieselmotoren und Elektroautos vergleicht offizielle Messdaten zweier Mittelklasseautos, Mercedes C 220 d und Tesla Model 3, „bezüglich ihres Verbrauchs an Diesel bzw. Strom. Dabei werden alternative marginale Energiequellen für den Strom sowie der tatsächliche Strommix Deutschlands aus dem Jahr 2018 zugrunde gelegt. Ferner wird eine Metastudie für den CO₂-Ausstoß bei der Batteriefertigung berücksichtigt.“²⁰ „Nach Erkenntnissen der Forscher belastet ein Elektroauto das Klima um 11 bis 28 Prozent mehr als ein Dieselauto, sobald der CO₂-Ausstoß bei der Herstellung der Batterien und der deutsche Strommix in der Rechnung berücksichtigt werden. Als klimafreundliche Alternative empfehlen die Studienautoren mit Methan oder Wasserstoff betriebene Verbrennungsmotoren.“²¹

Biokraftstoffe

Eine von der Shell-AG in Auftrag gegebene Studie vergleicht das Treibhausgaspotential verschiedener Biokraftstoffe.²²

Das Fraunhofer-Institut für Verkehrs- und Infrastruktursysteme (IVI) hat anhand einer Literaturstudie, Vor- und Nachteile des Einsatzes von Raps-Methylester mit herkömmlichen Dieselmotoren und dabei auch die ökologischen Aspekte des Einsatzes von Biodiesel kurz zusammengefasst.²³

-
- 19 Verein Deutscher Ingenieure (VDI), Konferenz „Innovative Fahrzeugsysteme“ (2000). „Ökobilanzen und Markteintritt von Brennstoffzellen im mobilen Einsatz“, <https://www.dlr.de/tt/PortalData/41/Resources/dokumente/institut/system/publications/Oekobz.pdf>
 - 20 Buchal, Ch. et al. Ifo-Schnelldienst (2019). „Kohlemotoren, Windmotoren und Dieselmotoren: Was zeigt die CO₂-Bilanz?“, 8 / 2019, 72. Jahrgang, 25. April 2019, <https://www.ifo.de/DocDL/sd-2019-08-sinn-karl-buchal-motoren-2019-04-25.pdf>
 - 21 Deutscher Bundestag, Hotline W (2019). „Ifo-Studie zur Klimabilanz von Dieselmotoren und Elektroautos“, <https://www.bundestag.btg/Wissen/HotlineW/Aktuell/Meldung.php?ID=4540>, vom 17.04.2019
 - 22 Shell Deutschland Oil (2012). „Nach Super E10: Welche Rolle für Biokraftstoffe? Fakten, Trends und Perspektiven“, http://www.iinas.org/tl_files/iinas/downloads/bio/IINAS_IFEU_2012_Shell_Biokraftstoffstudie.pdf, Seite 19
 - 23 Fraunhofer-Institut für Verkehrs- und Infrastruktursysteme (IVI) (2019). „Ökologische und wirtschaftliche Aspekte des Einsatzes von Biodiesel“, <https://www.ivi.fraunhofer.de/de/forschungsfelder/intelligente-verkehrssysteme/verkehrsoekologie/oekologische-und-wirtschaftliche-aspekte-des-einsatzes-von-biodi.html>

In einer weiteren Studie beschäftigt sich das TAB mit der Nachhaltigkeit von Algenkraftstoffen.²⁴

Wasserstoff und Methan

Ein Literaturvergleich der Forschungsstelle für Energiewirtschaft beschreibt die CO₂-Emissionen für Wasserstoff und Methan. Die Autoren kommen zu dem Schluss: „Die ganzheitliche Bewertung von Lösungsansätzen zur Defossilisierung des Verkehrssektors ist unbedingt notwendig, um objektive Aussagen bezüglich deren Nachhaltigkeit treffen zu können. Eine LCA ist genau dafür ein geeignetes Werkzeug. Speziell zur Bewertung der Umweltwirkungen strombasierter synthetischer Kraftstoffe wird in den vergangenen Jahren vermehrt auf die LCA-Methodik zurückgegriffen. Das Interesse auf diesem Gebiet - gemessen an den Publikationszahlen - ist in den vergangenen Jahren kontinuierlich gestiegen. Trotz der Vielzahl an Veröffentlichungen und normierten LCA-Standards gestaltet sich der Vergleich von Ergebnissen zwischen unterschiedlichen Kraftstoffen über verschiedene Studien hinweg schwierig. Dies liegt an fehlenden Daten aus dem Realbetrieb, aber auch an den sehr vielfältig gewählten Rahmenbedingungen. Eine große Rolle spielt hierbei zum Beispiel die CO₂-Intensität des Bereitstellungssektors. Aber auch unterschiedlich gewählte Systemgrenzen und unterschiedliche funktionelle Einheiten verkomplizieren den Vergleich der Ergebnisse. Schließlich wird die Allokation von Umweltwirkungen - vor allem für das gebundene CO₂ - in der Fachliteratur unterschiedlich gehandhabt oder gar nicht thematisiert.“²⁵

* * *

-
- 24 Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB) (2019). „Das Potenzial algenbasierter Kraftstoffe für den Lkw-Verkehr“, Sachstandsbericht zum Monitoring „Nachhaltige Potenziale der Bioökonomie – Biokraftstoffe der 3. Generation“, <http://www.tab-beim-bundestag.de/de/pdf/publikationen/berichte/TAB-Arbeitsbericht-ab181.pdf>, Zusammenfassung http://www.tab-beim-bundestag.de/de/pdf/publikationen/zusammenfassungen/TAB-Arbeitsbericht-ab181_Z.pdf
- 25 Kigle, S., Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V., Magazin für Energiewirtschaft (ew) (2019). Metastudie „Ökobilanz strombasierter synthetischer Kraftstoffe: worauf es ankommt“, Online-Version mit ausführlicher Literaturliste, ew 7-8, 2019, [https://www.energie.de/fileadmin/dokumente/ew/News/ Beitrag/ew_0022 Synthetische Kraftstoffe/ew1907-08_22 FfE-Online.pdf](https://www.energie.de/fileadmin/dokumente/ew/News/Beitrag/ew_0022_Synthetische_Kraftstoffe/ew1907-08_22_FfE-Online.pdf)