

Elektromobilität in Europa

Einleitung

Unter dem Sammelbegriff Elektromobilität versteht man ganz grundsätzlich jede Mobilität, bei der elektrische Energie zum Antrieb genutzt wird¹. Dies sind beispielsweise elektrisch betriebene Eisenbahn-Zugfahrzeuge, oder andere für den Straßenverkehr nur eingeschränkt zugelassene Fahrzeuge wie Golfkarts, elektrische Gabelstapler oder elektrisch angetriebene Fahrräder. Im allgemeinen Sprachgebrauch werden unter dem Begriff Elektromobilität allerdings zumeist elektrisch angetriebene Personenkraftwagen (PKW) verstanden. Darauf möchte ich mich auch in meinem Vortrag konzentrieren.

Arten der Elektromobilität

Für elektrisch angetriebene PKW haben sich in der Vergangenheit mehrere unterschiedliche technische Architekturen etabliert. Dies sind Hybridfahrzeuge, bei denen eine herkömmliche Verbrennungskraftmaschine mit einem Elektromotor kombiniert wird, sowie rein elektrisch betriebene Fahrzeuge, die ohne eine Verbrennungskraftmaschine auskommen.

1) Hybridfahrzeuge²

- a. Mikro-Hybrid: Bei Mikro-Hybrid-Fahrzeugen wird eine Verbrennungskraftmaschine mit einer Start-Stopp-Automatik und einem Bremsenergieerückgewinnungssystem kombiniert. Der dafür verbaute Elektromotor wird allerdings hier üblicherweise nicht zum Antrieb des Fahrzeugs benutzt, sondern nur als Generator zur Umwandlung von mechanischer Energie in elektrische Energie, sowie zum Starten der Verbrennungskraftmaschine.
- b. Mild-Hybrid: Mild-Hybridfahrzeuge weisen ein ähnliches Layout des Antriebsstrangs auf, wie Mikro-Hybrid-Fahrzeuge. Im Unterschied zu diesen wird der Elektromotor hier allerdings nicht nur zum Starten der Verbrennungskraftmaschine verwendet, sondern kann bei Beschleunigungsvorgängen auch für einen zusätzlichen „Boost“ eingesetzt werden. Ein rein elektrisches Fahren ist allerdings nicht möglich.
- c. Full-Hybrid: Full-Hybrid-Fahrzeuge können im Unterschied zu den beiden zuvor genannten Fahrzeugkategorien auch rein elektrisch fahren. Die Aufladung erfolgt allerdings nur durch Rekuperation, d.h. Umwandlung von Bremsenergie in elektrische Energie und Speicherung. Eine Aufladung per Kabel ist nicht möglich.
- d. Plug-In-Hybrid (PHEVs): Plug-In-Hybrid-Fahrzeuge sind mit einer so großen Batterie ausgestattet, dass sie eine gewisse Distanz rein elektrisch angetrieben zurücklegen können. Moderne Fahrzeuge dieses Typs sind oftmals sogar in der Lage, für innerstädtische Fahrten den Elektroantrieb zu benutzen, bevor für außerstädtische Langstrecken die interne Verbrennungskraftmaschine gestartet wird. Die Aufladung der Batterie erfolgt dabei über Rekuperation und

¹ Vgl. Jochem, 2022

² Vgl. Pischinger und Seiffert (Hg.), 2021; Kampker et al. (Hg.), 2018

eine Ladeschnittstelle, mit der von außen elektrische Energie zugeführt werden kann.

2) Rein elektrisch betriebene Fahrzeuge³

- a. Batterieelektrische Fahrzeuge (BEVs): Batterieelektrische Fahrzeuge besitzen nur einen rein elektrischen Antriebsstrang. Die Energiespeicherung erfolgt dabei in einer Batterie. Aufgrund der relativ hohen gravimetrischen Energiedichte und des geringen Selbstentladeverhaltens kommen dabei heutzutage zumeist Batterien auf Lithium-Ionen-Basis zur Anwendung. Die Wiederaufladung dieser Fahrzeuge erfolgt zumeist per Ladeschnittstelle und Ladekabel. Weitere, bisher kommerziell kaum erfolgreiche, Auflademöglichkeiten sind der automatische Batteriewechsel an speziellen Wechselstationen sowie der Austausch des Elektrolyts.
- b. Brennstoffzellen-Fahrzeuge (FCEVs): Brennstoffzellen-Fahrzeuge besitzen im Unterschied zu batterieelektrischen Fahrzeugen keine Sekundärzelle, bei der der Prozess der Umwandlung von chemischer in elektrische Energie umkehrbar und damit eine Wiederaufladung durch Zufuhr elektrischer Energie möglich ist. Stattdessen wird eine Brennstoffzelle verwendet, die chemische Energie in elektrische Energie umwandelt. Die Wiederaufladung erfolgt daher durch Betankung mit einem Brennstoff, zumeist ist das Wasserstoff.

Technische Probleme der verschiedenen Konzepte

Alle genannten Konzepte sind durch technische Probleme gekennzeichnet, die ihre kommerzielle Herstellung bzw. die Technologieadoption durch Endkunden noch mitunter stark beeinträchtigen. In der folgenden Tabelle sind die technischen Probleme jeder Technologie kurz zusammengefasst.

Technologie	Technologische Probleme ⁴
Hybridfahrzeuge	<ul style="list-style-type: none"> • Hohes Gewicht durch zwei Antriebsstränge • Keine/geringe elektrische Reichweite • Hohe Kosten durch aufwendige Technologie
Batterieelektrische Fahrzeuge	<ul style="list-style-type: none"> • (Relativ) geringe Reichweite • Hohes Gewicht durch Batterie • Hohe Kosten der Batterie • Eingeschränkte Lebensdauer der Batterie • (Relativ) lange Ladedauer • Ausbaufähige öffentliche Ladeinfrastruktur • Für Betrieb im Alltag meist private Ladesäule nötig
Brennstoffzellen-Fahrzeuge	<ul style="list-style-type: none"> • Hohe Kosten durch geringe Stückzahlen • Fehlende Ladeinfrastruktur • Komplexe Tanktechnologie

³ Vgl. Pischinger und Seiffert (Hg.), 2021; Kampker et al. (Hg.), 2018

⁴ Vgl. Pischinger und Seiffert (Hg.), 2021; Kampker et al. (Hg.), 2018

Regulatorien für Fahrzeuge

Trotz der nach wie vor bestehenden technischen Probleme wird die Verbreitung lokal emissionsfreier Antriebstechnologien als wesentlicher Schritt gesehen, um die Einhaltung der Klimaziele gewährleisten zu können. Aus diesem Grund ist die Entwicklung dieser Fahrzeuge sehr stark getrieben von der entsprechenden Gesetzgebung.

Bereits 1998 hat sich der Verband europäischer Automobilhersteller verpflichtet, die durchschnittlichen CO₂-Emissionen für verkaufte Neuwagen bis 2008 auf 140 g/km zu senken. Da die Nichterfüllung dieser Ziele keine wesentlichen Konsequenzen hatte, wurden diese Ziele von einem Großteil der etablierten Fahrzeughersteller nicht erreicht. Als Konsequenz erließen das Europäische Parlament und der Rat der Europäischen Union die Verordnung Nr. 443/2009, die besagt, dass:

- Ab 2012 die durchschnittlichen CO₂-Emissionen der verkauften Fahrzeuge eines Herstellers nicht mehr als 130 g/km betragen dürfen.
- Ab 2012 zur Berechnung 65% der gesamten Flotte der neu verkauften PKW herangezogen werden, 2013 75%, 2014 80% und 2015 100%.
- Jeder neue PKW mit CO₂-Emissionen unter 50 g/km 2012 und 2013 als 3,5 Fahrzeuge gezählt wird, als 2,5 Fahrzeuge 2014, 1,5 Fahrzeuge 2015 und 1 Fahrzeug 2016.
- Bei Überschreiten Strafen bis zu €95 pro g/km CO₂ pro Fahrzeug drohen!

Zehn Jahre später wurden diese verpflichtenden Grenzwerte in der Verordnung 2019/631 des Europäischen Parlaments und des Rates der Europäischen Union weiter verschärft:

- Ab 2020 dürfen die durchschnittlichen CO₂-Emissionen der verkauften Fahrzeuge eines Herstellers nicht mehr als 95 g/km betragen.
- Ab 2020 95% der gesamten Flotte der neu verkauften PKW herangezogen, 2021 100%.
- Jeder neue PKW mit CO₂-Emissionen unter 50 g/km zählt als 2 Fahrzeuge 2020, 1,67 Fahrzeuge 2021, 1,33 Fahrzeuge 2022 und 1 Fahrzeug 2023.
- Bei Überschreiten drohen Strafen von €95 pro g/km CO₂ pro Fahrzeug!

Regulatorien für Infrastruktur

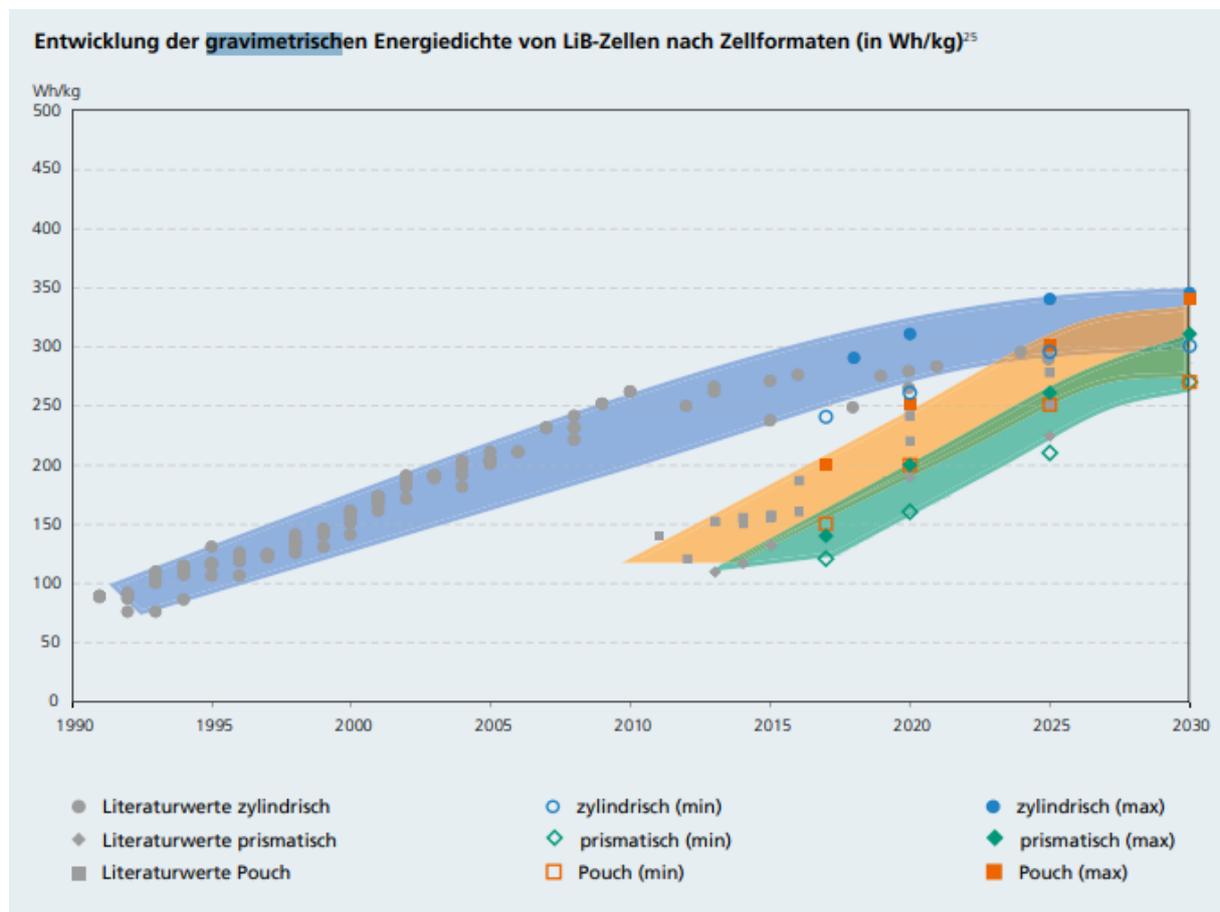
Parallel zu den Verordnungen zum Verkauf alternativ angetriebener Fahrzeuge wurde auch eine Richtlinie zur Einführung öffentlicher Ladeinfrastruktur erarbeitet. Diese trat 2014 in Kraft und enthielt die folgenden Regelungen:

- Jeder EU-Mitgliedsstaat muss einen nationalen Strategierahmen für die Marktentwicklung bei alternativen Kraftstoffen im Verkehrsbereich und entsprechende Infrastruktur vorlegen.
- Es muss sichergestellt werden, dass bis spätestens 31.12.2020 eine angemessene Anzahl öffentlich zugänglicher Ladepunkte errichtet wird, so dass Elektrofahrzeuge zumindest in dicht besiedelten Gebieten und entlang wichtiger internationaler Hauptverkehrsadern geladen werden können.
 - Die Anzahl der Ladepunkte ist abhängig von den geschätzten bis 2020 zugelassenen Elektrofahrzeugen

- Regelung der technischen Spezifikationen von Normalladepunkten, die nach dem 18.11.2017 errichtet werden
- Sofern technisch möglich sollen intelligente Verbrauchserfassungssysteme zur Anwendung kommen.
- Laden muss auch ohne Vertrag zu angemessenen, transparenten und nichtdiskriminierenden Preisen möglich sein.
- Länder, die in ihrer Strategie auch Wasserstofftankstellen berücksichtigen, müssen sicherstellen, dass bis 31.12.2025 eine angemessene Anzahl von Wasserstofftankstellen zur Verfügung steht.

Entwicklungen im Bereich batterieelektrischer Fahrzeuge

Da diese Technologie zum aktuellen Zeitpunkt den größten Verbreitungsgrad unter den lokal emissionsfreien Antriebstechnologien aufweist, möchte ich im Weiteren noch kurz auf die neuesten Entwicklungen im Bereich batterieelektrischer Fahrzeuge eingehen. Das wesentliche technische Problem auf Fahrzeugseite ist hier die Batterie, insbesondere deren gravimetrische Energiedichte. Wie untenstehende Grafik zeigt, hat sich dieses Problem allerdings in den letzten Jahren etwas reduziert. Für alle Bauformen von Lithium-Ionen (LiB)-Batterien haben sich stark erhöhte gravimetrische Energiedichten ergeben.

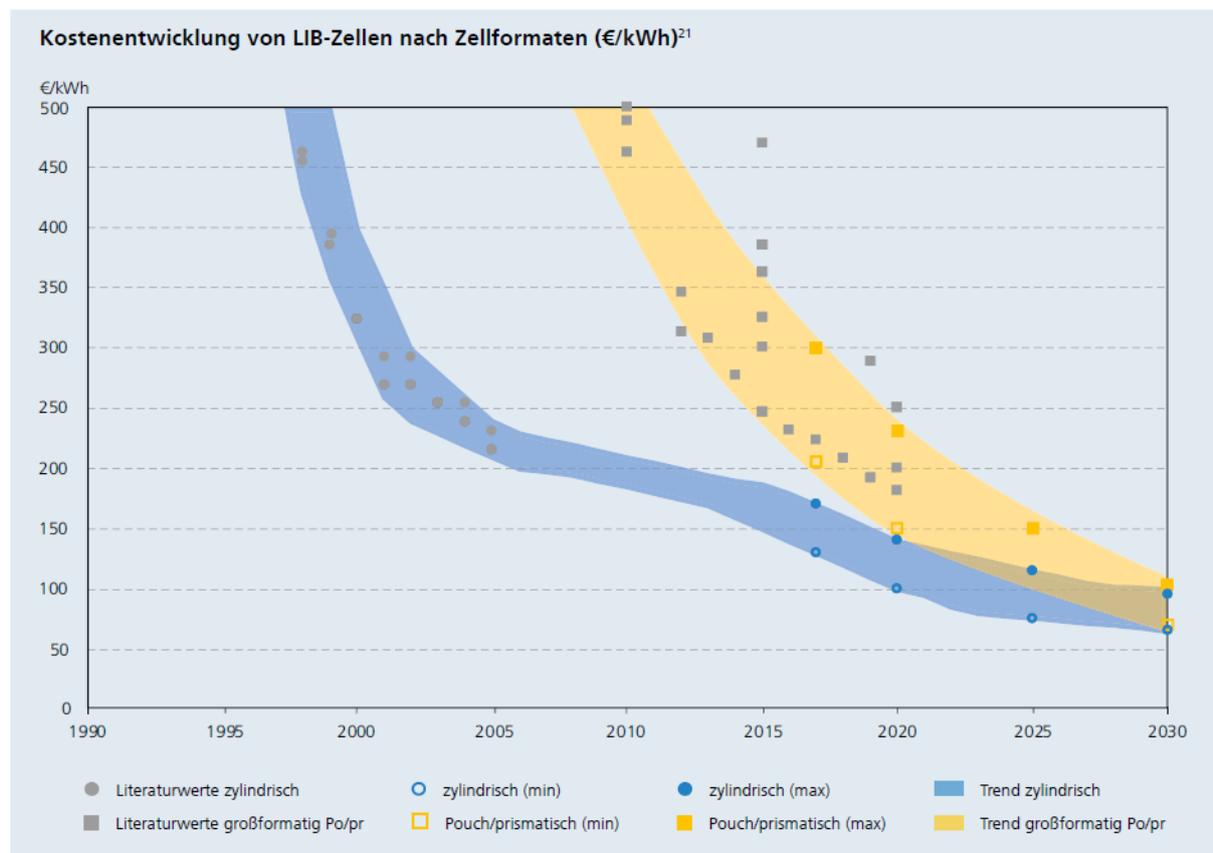


Quelle: Thielmann et al., 2017

Welche Auswirkungen das auf die Fahrzeuge in der Praxis tatsächlich hat, zeigt ein Rechenbeispiel:

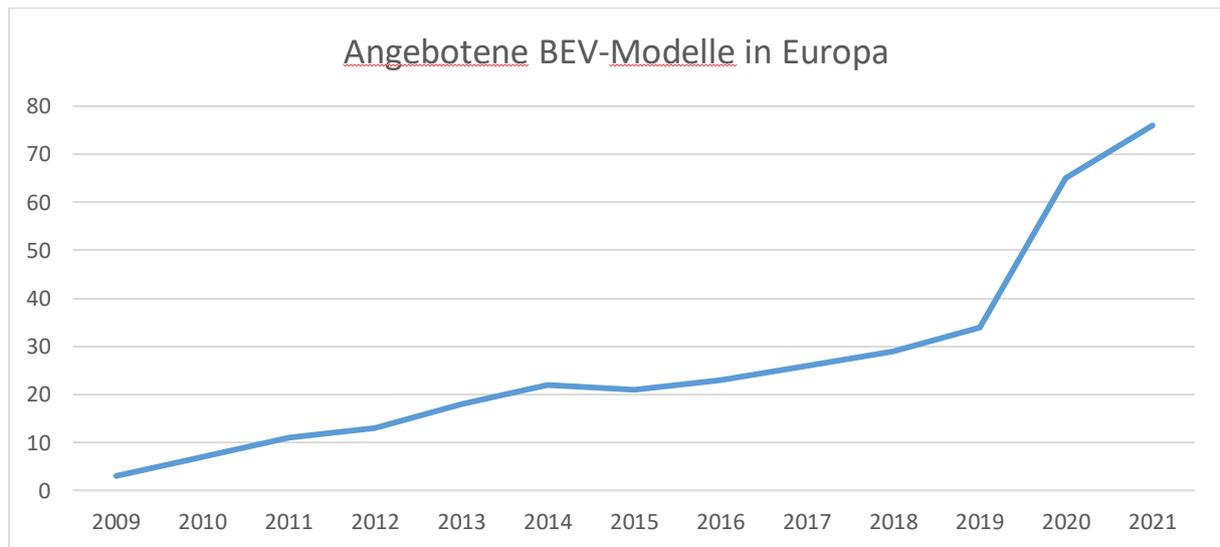
Der Antrieb des elektrischen Kleinwagens BMW i3 verbraucht ca. 15 kWh pro 100 gefahrenen Kilometern. Die verbaute Batterie ist prismatisch. Bei der Markteinführung im Jahr 2013 lag die gravimetrische Energiedichte dieser Technologie bei ca. 100 Wh/kg, 2020 bereits bei ca. 180 Wh/kg. Das Fahrzeug war bei der Markteinführung mit einer Batterie mit 22 kWh ausgestattet, die rechnerisch eine Reichweite von 125 km ergab und ein Gewicht von 220 Kilogramm aufwies. Sieben Jahre später war im gleichen Fahrzeug bereits eine Batterie verbaut, die eine gesamte Speicherkapazität von 42,2 kWh aufwies. Damit ergibt sich rechnerisch eine mehr als doppelt so große Reichweite von 253 km bei einem leicht erhöhten Gewicht von 234 Kilogramm. (Quelle für Beispiel: BMW AG, 2013, 2018)

Auch die Kosten für die Batterie haben sich im gleichen Zeitraum stark verringert, wie die untenstehende Grafik zeigt. Laut der Darstellung lagen die Kosten für prismatische Zellen 2013 noch bei ca. 350€ pro kWh, 2020 schon nur noch bei ca. 200€ pro kWh. Für unser Rechenbeispiel BMW i3 ergibt das im Jahr 2013 Batteriekosten von ca. 7700€, für das Jahr 2020 sind es ca. 8440€. Damit sind zwar die Kosten für die gesamte Batterie des Fahrzeugs etwas gestiegen, gleichzeitig hat sich aber auch die Reichweite mehr als verdoppelt! (Quelle für Beispiel: BMW AG, 2013, 2018)



Quelle: Thielmann et al., 2017

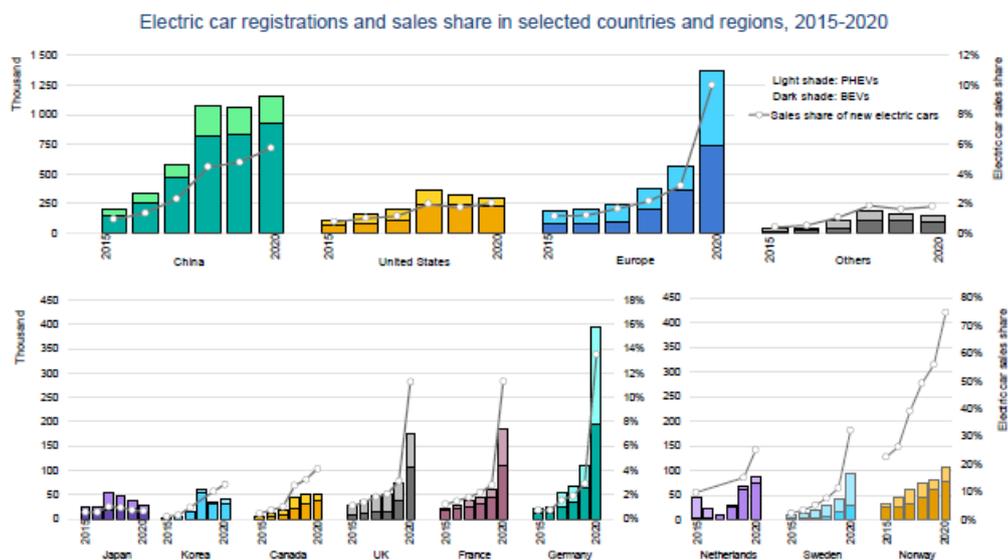
Wie die nachfolgende Grafik zeigt, hat sich die Anzahl der angebotenen Fahrzeugmodelle im Zeitraum von 2009 bis 2021 als Konsequenz der technologischen Verbesserungen und der immer schärferen CO₂-Gesetzgebung erhöht.



Quellen: International Energy Agency, 2022; European Alternative Fuels Observatory, 2022

Zusammen mit dem europaweiten Ausbau der öffentlichen Ladeinfrastruktur ergibt sich dadurch eine stark erhöhte Nachfrage nach allen Arten der Elektromobilität in den letzten Jahren. Die folgende Grafik illustriert diese gestiegene Nachfrage schön im Vergleich zum weltweiten Markt.

Electric car registrations increased in major markets in 2020 despite the Covid pandemic



Notes: PHEV = plug-in hybrid electric vehicle; BEV = battery electric vehicle. The selected countries and regions are the largest EV markets and are ordered by size of the total car market in the upper half of the figure and by sales share of electric cars in the lower half. Regional EV registration data can be interactively explored via the [Global EV Data Explorer](#).
Sources: IEA analysis based on country submissions, complemented by [ACEA \(2021\)](#); [CAAM \(2020\)](#); [EAFO \(2021\)](#); [EV Volumes \(2021\)](#) and [Marklines \(2021\)](#).

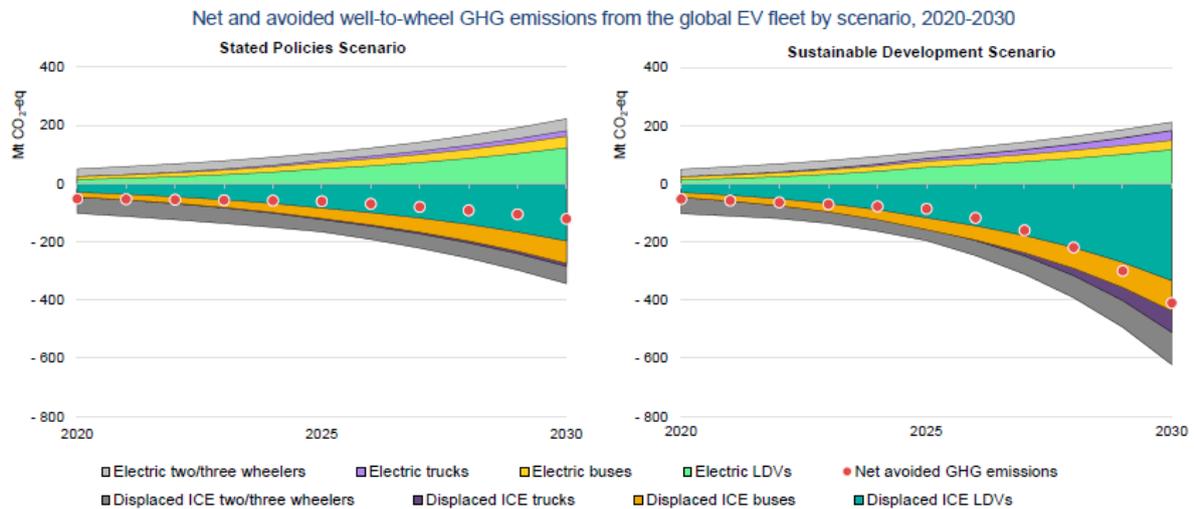
Quelle: International Energy Agency, 2022

Ausblick

Bei all diesen positiven Entwicklungen bleibt allerdings eine Frage unbeantwortet: welche tatsächlichen Auswirkungen ergeben sich durch die erhöhten Zulassungszahlen alternativ angetriebener Fahrzeuge für den globalen CO2-Ausstoß? Nicht zuletzt ist ja eine Reduktion

der global ausgestoßenen Treibhausgase das wesentliche Argument für die Einführung solcher Technologien.

Net reduction of GHG emissions from EVs increases over time



IEA. All rights reserved.

Notes: Mt CO₂-eq = million tonnes of carbon-dioxide equivalent; LDVs = light-duty vehicles; ICE = internal combustion engine. Well-to-wheel emissions include those from fuel production and vehicle use, but not vehicle manufacturing. Positive emissions are from the global EV fleet (BEVs and PHEVs). Negative emissions are those that would have been emitted by an equivalent ICE vehicle fleet. The red dots denote net GHG emissions savings from EVs in comparison with an equivalent ICE fleet. Regional well-to-wheel GHG emissions data can be interactively explored via the [Global EV Data Explorer](#).

Sources: IEA analysis developed with the [Mobility Model](#) using the carbon intensity values from [Energy Technology Perspectives 2020](#) for both scenarios.

Quelle: International Energy Agency, 2022

Die International Energy Agency (IEA) liefert dafür in ihrem jährlichen „Global EV Outlook“ interessante Zahlen. Es werden dabei zwei unterschiedliche Szenarien angenommen: Dem ersten Szenario liegt die Annahme zugrunde, dass alle bisher angekündigten gesetzlichen Regelungen und Förderinstrumente für alternative Antriebstechnologien tatsächlich umgesetzt werden. Dem zweiten Szenario liegen zwei wesentliche Annahmen zugrunde, die durch das erste Szenario nicht gewährleistet sind: gleicher Zugang zu Energie für alle ab 2030 und das Erfüllen der Pariser Klimaziele. Wir sehen, dass die prognostizierte Verringerung des CO₂-Ausstoßes im ersten Szenario im Jahr 2030 ca. 160 Mt CO₂-Äquivalent beträgt. Im besseren zweiten Szenario sind es ca. 440 Mt CO₂-Äquivalent. Zum Vergleich: Österreich hat zwischen 1990 und 2020 jährlich ca. 75 Mt CO₂ ausgestoßen (Umweltbundesamt, 2022). Diese globale Verringerung durch die weitreichende Adoption nachhaltiger Antriebstechnologien in allen Bereichen der Mobilität würde damit im schlechteren (und vermutlich realistischeren) Szenario nur einer Reduktion von ca. dem doppelten österreichischen CO₂-Ausstoß entsprechen. Es bleibt also noch viel zu tun.

Quellen:

BMW AG, 2013: „Der BMW i3“, Online abgerufen am 02.07.2022 unter:

<https://www.press.bmwgroup.com/deutschland/article/detail/T0148284DE/der-bmw-i3>

BMW AG, 2018: „Mit neuen Hochvoltbatterien zu nochmals größerer Reichweite bei BMW typischer Sportlichkeit: Der BMW i3 (120 Ah) und der BMW i3s (120 Ah)“, Online abgerufen am 02.07.2022 unter:

<https://www.press.bmwgroup.com/deutschland/article/detail/T0284828DE/mit-neuen->

[hochvoltbatterien-zu-nochmals-groesserer-reichweite-bei-bmw-typischer-sportlichkeit:-der-bmw-i3-120-ah-und-der-bmw-i3s-120-ah](#)

Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union, 2009: „Verordnung 443/2009“, Online abgerufen am 02.07.2022 unter: <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:140:0001:0015:de:PDF>

Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union, 2014: „Richtlinie 2014/95/EU“, Online abgerufen am 02.07.2022 unter: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:02014L0094-20200524&from=BG#:~:text=Mit%20dieser%20Richtlinie%20wird%20ein,durch%20den%20Verkehr%20zu%20begrenzen.>

Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union, 2019: „Verordnung 2019/631“, Online abgerufen am 02.07.2022 unter: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/de/ALL/?uri=CELEX:32019R0631>

European Alternative Fuels Observatory, 2022: „Vehicles and fleet“, Online abgerufen am 02.07.2022 unter: <https://alternative-fuels-observatory.ec.europa.eu/transport-mode/road/european-union-eu27/vehicles-and-fleet>

International Energy Agency, 2020: „Global EV Outlook 2021“, Online abgerufen am 02.07.2022 unter: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2021>

Jochem, Patrick, 2022: „Elektromobilität“, Gabler Wirtschaftlexikon, Online abgerufen am 02.07.2022 unter: <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/elektromobilitaet-53700>

Kampker, Achim; Vallée, Dirk; Schnettler, Armin (Hg.), 2018: „Elektromobilität“, 2. Auflage, Springer Vieweg, Wiesbaden.

Pischinger, Stefan; Seiffert, Ulrich (Hg.), 2021: „Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik“, 9., erweiterte und ergänzte Auflage, Springer Vieweg, Wiesbaden.

Thielmann, Axel; Neef, Christoph; Hettesheimer, Tim; Döscher, Henning; Wietschel, Martin; Tübke, Jens, 2017: „Energiespeicher-Roadmap (Update 2017)“, Fraunhofer ISI, Online abgerufen am 02.07.2022 unter: <https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/cct/lib/Energiespeicher-Roadmap-Dezember-2017.pdf>

Umweltbundesamt, 2022: „Klimaschutzbericht 2021“, Online abgerufen am 02.07.2022 unter: <https://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/publikationen/rep0776.pdf>