

Wirtschaftliche und ökologische Aspekte der Elektromobilität

A. Ajanovic , A. Glatt

Der Individualverkehr ist derzeit der problematischste Sektor in Bezug auf die Treibhausgasemissionen. Elektroautos gelten als alternative Antriebe, die zur Dekarbonisierung im Verkehr beitragen können. Das Ziel dieses Beitrags ist, die Marktchancen verschiedener Arten von Elektrofahrzeugen zu analysieren. In diesem Zusammenhang ist es vor allem wichtig, die Wirtschaftlichkeit und Umweltfreundlichkeit von Elektrofahrzeugen im Vergleich zu konventionellen Fahrzeugen zu untersuchen. Schließlich wurden auch die derzeitigen Politiken und unterstützenden Maßnahmen zur Erhöhung der Marktanteile von Elektrofahrzeugen in verschiedenen Ländern diskutiert.

Schlüsselwörter: Elektrofahrzeuge; Kosten; Wirtschaftlichkeit; Emissionen

Economic and ecological aspects of electric vehicles.

Individual car transport is currently the worst sector regarding greenhouse gas emissions. Electric vehicles are considered as an alternate solution to conventional cars that can contribute to a decarbonization of the transport sector. The aim of this paper is to analyze the prospects of different types of electric vehicles. In this context, it is particularly important to investigate their economics and environmental impact compared to conventional vehicles. Finally, current policies and supporting measures, used to increase the market share of electric vehicles in different countries, are discussed.

Keywords: transport; electric vehicles; costs; emissions

Eingegangen am 27. April 2020, angenommen am 4. Juni 2020, online publiziert am 16. Juni 2020
© The Author(s) 2020



1. Einleitung

Der Verkehrssektor stellt eines der größten Hindernisse auf dem Weg zu einem nachhaltigen Wirtschaftssystem dar. In der EU trägt dieser zu etwa 25 % der gesamten Treibhausgasemissionen (THG) bei, sowie zu kontinuierlich steigender Luftverschmutzung. Während die Emissionen in den meisten anderen Sektoren seit den Neunzigerjahren zurückgegangen sind, sind sie im Verkehr gestiegen, siehe Abb. 1, und liegen derzeit deutlich über dem Niveau von 1990.

Besonders im Stadtverkehr ist aufgrund der steigenden THG-Emissionen, Luftschadstoffe und Lärmbelastung das Ziel, die Zahl der konventionellen Fahrzeuge bis zum Jahr 2030 zu halbieren, und bis 2050 vollständig auf Benzin- und Dieselaautos zu verzichten.

Bereits ab 2021 soll die Neuwagenflotte in der EU im Schnitt nur noch höchstens 95 g CO₂ pro Kilometer verursachen und noch geringere Werte sind für die Jahre 2025 bzw. 2030 vorgesehen. Elektrofahrzeuge (EVs) sind eine Fahrzeugtechnologie, die zu diesen Zielen beitragen könnte. Da EVs das Potenzial haben, den Ausstoß von Treibhausgasen und anderen Schadstoffen zu reduzieren, ist das Interesse an der Elektrifizierung von Personenkraftwagen in den letzten zehn Jahren rapide gewachsen.

Derzeit ist die Zahl der Elektrofahrzeuge im Vergleich zum gesamten Fahrzeugbestand jedoch noch sehr gering. Die Haupthindernisse für eine breitere Marktdurchdringung von Elektrofahrzeugen sind (i) ihre immer noch sehr hohen Investitionskosten im Vergleich zu konventionellen Fahrzeugen, (ii) die begrenzte Reichweite von Elektrofahrzeugen und (iii) die begrenzte Verfügbarkeit der Ladeinfrastruktur.

Wenn man über Elektrofahrzeuge spricht, muss berücksichtigt werden, dass es mehrere Arten gibt und nicht alle davon lokal emissionsfreie Fahrzeuge sind. Die wettbewerbsfähigsten auf

dem Markt sind Hybrid-Elektrofahrzeuge (HEV). In diesem Beitrag werden neben den HEVs auch batterieelektrische Fahrzeuge (BEV), Plug-In-Hybrid-Elektrofahrzeuge (PHEV) und Range-Extender-Elektrofahrzeuge (REX) aus ökologischer und wirtschaftlicher Sicht analysiert.

Die zentrale Zielsetzung dieses Artikels ist, die Marktchancen verschiedener Arten von Elektrofahrzeugen zu analysieren. In diesem Zusammenhang ist es vor allem wichtig, die Wirtschaftlichkeit von Elektrofahrzeugen im Vergleich zu konventionellen Fahrzeugen zu untersuchen. Darüber hinaus sind auch die Umweltaspekte zu analysieren, da die Emissionsreduktion die wichtigste Motivation für die Förderung von Elektrofahrzeugen ist. Von besonderem Interesse sind in diesem Zusammenhang die Auswirkungen der verschiedenen Primärenergiequellen, die zur Stromerzeugung eingesetzt werden. Schließlich werden auch die derzeitigen Politiken und unterstützenden Maßnahmen zur Erhöhung der Marktanteile von Elektrofahrzeugen in verschiedenen Ländern diskutiert.

Es ist jedoch wichtig zu betonen, dass Elektrofahrzeuge keine neue, erst kürzlich aufgekommene Technologie sind. Elektrofahrzeuge haben eine lange Geschichte, und sie hatten schon einmal in der Geschichte vor etwa 100 Jahren einen bedeutenden Marktanteil. Daher ist es zunächst von Interesse zu analysieren, warum Elektrofahrzeuge an Attraktivität verloren haben, um Strategien zu identifizieren, die die zukünftige Marktdurchdringung von Elektrofahrzeugen erhöhen können.

Ajanovic, Amela, Institut für Energiesysteme und Elektrische Antriebe, Energy Economics Group, TU WIEN Wien, Österreich (E-Mail: ajanovic@eeg.tuwien.ac.at); **Glatt, Anne**, Institut für Energiesysteme und Elektrische Antriebe, Energy Economics Group, TU WIEN Wien, Österreich

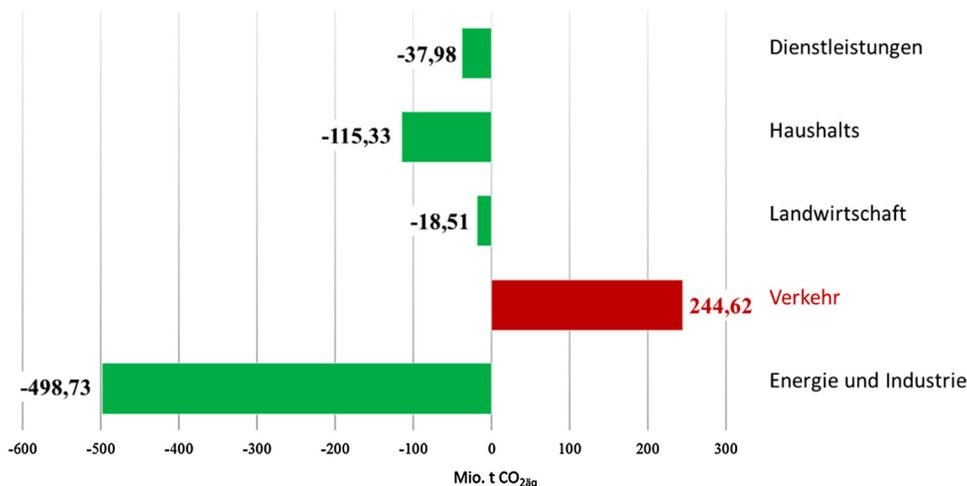


Abb. 1. Änderung der sektoralen Treibhausgasemissionen 1990–2017 in der EU (Eigene Darstellung basierend auf [1])

2. Historische Meilensteine

Die Geschichte der Elektrofahrzeuge wurde von verschiedenen Autoren diskutiert und lässt sich grundsätzlich in drei Hauptphasen einteilen: (i) ihre zunehmende Popularität (etwa 1890–1920); (ii) ihre abnehmende Popularität (nach 1920); und (iii) Versuche, die Verbreitung von E-Autos wiederzubeleben (zuerst nach 1970, vor allem aber ab ca. 2008) [2, 3], siehe Abb. 2.

Die frühe Geschichte der Elektrofahrzeuge begann in den 1830er Jahren mit den ersten experimentellen leichten Elektrofahrzeugen (EVs), die in den USA, Großbritannien und den Niederlanden gebaut wurden [4]. Dies war etwa zehn Jahre, nachdem die Prinzipien des Elektromotors erstmals demonstriert wurden. In den folgenden Jahren fanden umfassende Forschungsaktivitäten zu Batterien statt, die 1859 zur bahnbrechenden Demonstration der ersten Blei-Säure-Batterie zelle führten.

Das „goldene Zeitalter“ der EVs war in der Zeit von 1880–1920 in den USA, wo das Elektroauto weitaus erfolgreicher war als in Europa [5]. Zu dieser Zeit gab es drei Arten von Autos: dampfbetriebene Fahrzeuge, Verbrennungsmotor-Fahrzeuge mit Benzinantrieb und Elektrofahrzeuge. Im Jahr 1900 wurden Elektrofahrzeuge zum meistverkauften Straßenfahrzeug in den USA und eroberten 28 % des Marktes [6]. Bis 1900 wurden in den USA landesweit 936 Benzin-, 1.575 Elektro- und 1.681 Dampffahrzeuge zugelassen [7, 8]. In den großen städtischen Gebieten (New York, Boston und Chicago) dominierten EVs, auf etwa zwei EVs kam ein Benziner [5, 9].

Der Automarkt war damals also zwischen diesen drei Typen aufgeteilt, ohne dass es einen klaren Hinweis darauf gab, welcher Typ letztendlich dominieren würde. Jede Technologie hatte ihre Vor- und Nachteile und kämpfte darum, auf dem offenen Markt in Bezug auf Leistung und Preis wettbewerbsfähig zu sein [10]. Dampfbetriebene Fahrzeuge waren schneller und preiswerter, benötigten aber eine lange Anlaufzeit und häufige Wassertankpausen. Die Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor waren schmutziger, schwieriger zu starten und mäßig teurer, konnten aber längere Strecken mit einer angemessenen Geschwindigkeit zurücklegen, ohne anzuhalten. Die EVs waren sauber und leise, aber langsam und teuer.

Die Hauptvorteile der batterieelektrischen Fahrzeuge gegenüber ihren Konkurrenten waren, dass sie nicht die Vibrationen, den Geruch und den Lärm hatten, die mit Benzinfahrzeugen verbunden waren [11]. Das Problem der Reichweite war zu dieser Zeit nicht dominant, da gute Straßen nur in den Städten existierten und der

größte Teil des Verkehrs auf den städtischen Nahverkehr zurückzuführen war. Daher bedienten EVs in der Zeit zwischen 1890 und 1920 durchweg städtische Gebiete und nicht die ländlichen Haushalte. Dies waren gute Rahmenbedingungen für EVs mit ihrer begrenzten Reichweite.

Im Jahr 1912 erreichte der weltweite Bestand an Elektrofahrzeugen einen historischen Höchststand von 30.000 [6]. Jedoch folgte in den 1920er Jahren ein Rückgang, der aufgrund von zwischen 1900 und 1920 stattfindender technischer wie wirtschaftlicher Entwicklungen bei Benzinfahrzeugen einsetzte [7, 8]:

Die technischen Gründe hierfür waren: (i) Nach 1920 wurde ein besseres Straßennetz außerhalb der Städte eingerichtet, was zu einem Bedarf an Fahrzeugen mit größerer Reichweite und zu immer ungünstigeren Bedingungen für das EV führte; (ii) außerdem wurden die Verbrennungsmotor-Fahrzeuge technisch optimiert, während technische Entwicklungen beim Elektroauto stagnierten. So wurde z.B. die Handkurbel 1912 mit der Erfindung des elektrischen Anlassers überflüssig. Darüber hinaus wurde der Kraftstoffbedarf von Verbrennungsmotor-Fahrzeugen pro gefahrenem Kilometer erheblich reduziert.

Zu den wichtigsten ökonomischen Gründen für den Rückgang des Elektrofahrzeugbestands zählten: (iii) Benzinfahrzeuge wurden günstiger: Das Ford-Modell T – das weltweit einflussreichste Auto des 20. Jahrhunderts – wurde von 1908 bis 1927 produziert. Es war das erste seriengefertigte Fahrzeug mit einer Stückzahl von 15 Millionen. Durch diese Massenproduktion wurde der Preis für Benzinautos erheblich reduziert. Henry Ford machte diese Fahrzeuge für den breiten Einsatz bezahlbar, indem er den Preis von 850 USD im Jahr 1909 auf 260 USD im Jahr 1920 reduzierte [12, 13]. Jedoch gingen die Preise für die weniger effizient produzierten Elektrofahrzeuge nicht zurück. (iv) Außerdem trug die Entdeckung von Erdöl in Texas zur Senkung des Benzinpreises erheblich bei und machte es für den durchschnittlichen Kunden bezahlbar. Gleichzeitig stieg der Preis für elektrischen Strom.

All diese Entwicklungen führten dazu, dass EVs Ende der 1920er Jahre vom Markt verschwunden sind und diese ungünstigen Rahmenbedingungen tatsächlich bis heute vorherrschen.

Die erste Welle der Wiederbelebung des Interesses an Elektrofahrzeugen begann 1970, ausgelöst in Kalifornien nach der ersten Ölkrise. In den 1980er Jahren erlebten die batterieelektrischen Fahrzeuge (BEVs) eine Renaissance aufgrund der Besorgnis über die

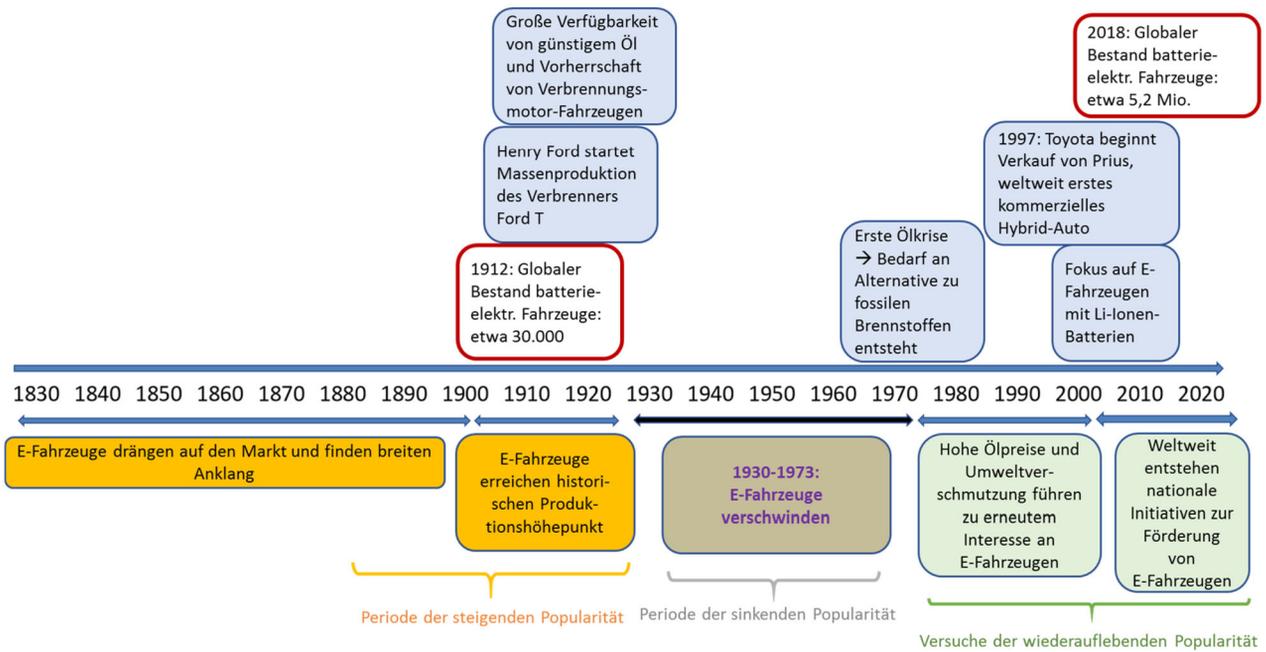


Abb. 2. Die wichtigsten Meilensteine in der Geschichte der Elektrofahrzeuge (Eigene Darstellung basierend auf [3])

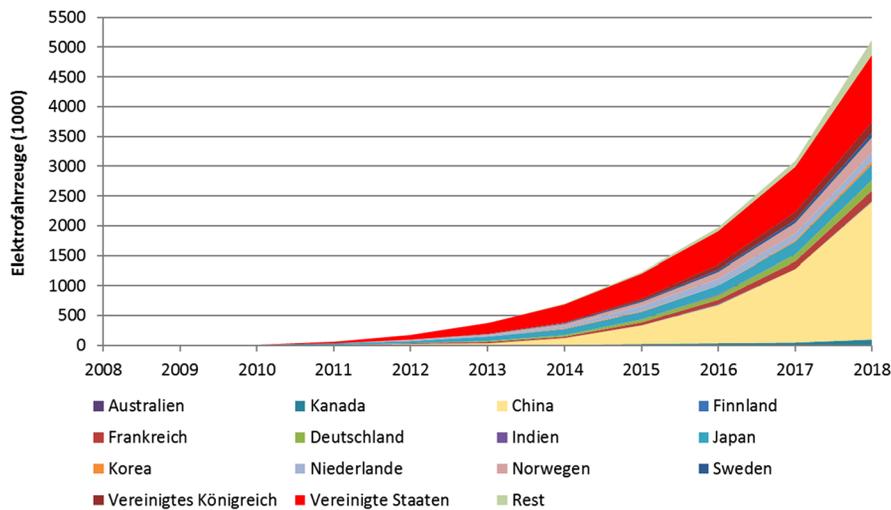


Abb. 3. Entwicklung des Bestands an Elektroautos weltweit (Eigene Darstellung basierend auf [17]) (Farbabbildung online)

Versorgung mit fossilen Brennstoffen. In dieser Zeit wurden zahlreiche BEVs zu Demonstrationszwecken vorgestellt [14–16]. Ein erster wirklicher Wiederaufschwung fand Anfang der 1990er Jahre statt. Damals wurde z.B. in Österreich die Mehrwertsteuer auf E-Autos auf 10 % gesenkt. Die ersten Versuche, den Verkauf von E-Autos anzukurbeln, waren jedoch nicht wirklich erfolgreich, hauptsächlich aus den alten Gründen: hohe Preise der Batterien, begrenzte Reichweiten sowie begrenzte Infrastruktur und lange Ladezeiten. Auch heute wird der zunehmende Einsatz von E-Fahrzeugen hauptsächlich durch unterstützende politische Maßnahmen vorangetrieben (Abb. 2).

3. Aktuelle Entwicklungen – Bestandsaufnahme

Weltweit ist der Trend Richtung Elektromobilität deutlicher geworden, besonders vor dem Hintergrund internationaler klimapolitischer

Vereinbarungen, aber auch aufgrund des Diesel-Skandals. Schon jetzt haben einige europäische Staaten eine Abkehr von konventionellen Verbrennungsmotoren angekündigt, z.B. Norwegen ab 2025, Slowenien, Dänemark, Niederlande ab 2030, Frankreich, Portugal, Großbritannien ab 2040 [17].

Die Neuzulassungen von Elektrofahrzeugen entwickeln sich weltweit zunehmend steigend, siehe Abb. 3. Die am meisten genutzten Elektrofahrzeuge sind Hybridfahrzeuge (HEV). Diese sind, im Grunde genommen, konventionelle Benzin- oder Dieselfahrzeuge mit höherer Effizienz. Rein elektrisch kommen diese Fahrzeuge nur wenige Kilometer weit. Für die Umwelt allerdings sind die wichtigsten Antriebskonzepte diejenigen, die direkt am Stromnetz aufgeladen werden können – batteriebetriebene Fahrzeuge (BEV), Plug-in-Hybride (PHEV) und Range Extender (REX).

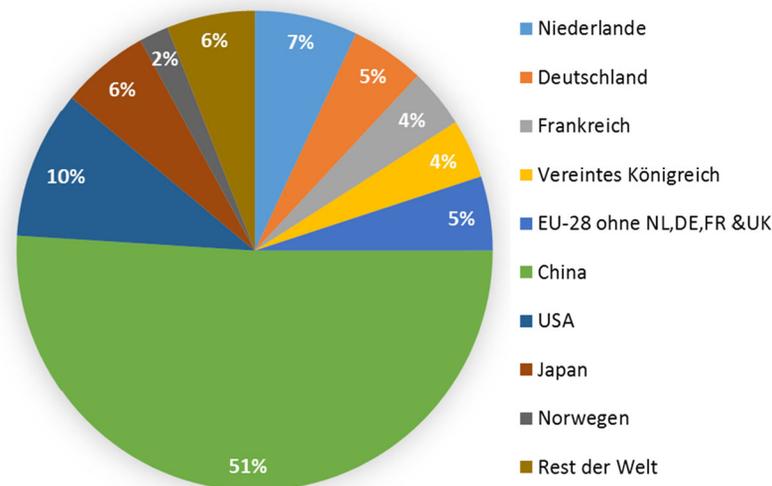


Abb. 4. Anteile an den weltweiten öffentlich zugänglichen Ladestationen in 2018 (Eigene Darstellung basierend auf [18–28]) (Farbabbildung online)

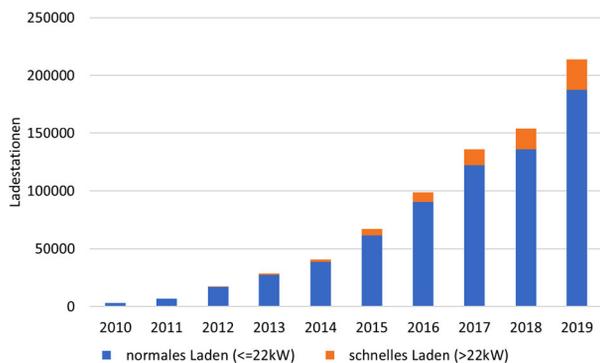


Abb. 5. Entwicklung der Ladestationen in der EU, UK, EFTA und Türkei von 2010–2019 (Eigene Darstellung basierend auf [23]) (Farbabbildung online)

Im Jahr 2018 erreichte der weltweite Bestand an Elektroautos, die am Stromnetz aufgeladen werden können, etwa 5,2 Millionen Fahrzeuge, siehe Abb. 3, wobei China einen Anteil von 45 % aufweist. Norwegen ist der europäische Spitzenreiter, dort ist fast jeder fünfte neu zugelassene Pkw ein Elektroauto.

Auch bei den öffentlich zugänglichen Ladestationen weist China mit 275.000 Ladestationen im Jahr 2018 den größten Anteil an den weltweit 540.000 öffentlich verfügbaren Ladestationen auf (siehe Abb. 4). In Europa stellt die Niederlande mit knapp 35.875 Ladestationen den Spitzenreiter dar, dicht gefolgt von Deutschland mit 27.459 und Frankreich mit 24.327 öffentlichen Ladestationen. Anders als beim Elektroauto-Bestand kommt Norwegen bei den öffentlich zugänglichen Ladepunkten im europäischen Vergleich mit über 10.700 Stück nur auf Platz 5, zumindest bei den absoluten Zahlen.

In Abb. 5 ist die Entwicklung des Bestands an Ladestationen für Elektrofahrzeuge in den Ländern der EU-28 (also inklusive des Vereinten Königreichs), in denen der Europäischen Freihandelsassoziation (EFTA: Schweiz, Norwegen, Liechtenstein und Island) und der Türkei von 2010 bis 2019 dargestellt. Während es im Jahr 2010 in diesen Ländern noch gar keine Schnellladestationen mit einer Leistung von mehr als 22 Kilowatt gab, machten sie 2019 mit über 26.500 Stationen einen Anteil von gut 12 % aus. Am globalen Be-

stand öffentlicher Ladestationen hatten Schnellladestationen 2018 einen Anteil von fast 26 %, in China sogar über 40 %, in den Niederlanden hingegen weniger als 3 %.

4. Typen von Elektroautos

In diesem Beitrag werden verschiedene Arten von Elektrofahrzeugen analysiert: Batterie-, Hybrid-, Plug-In-Hybrid- und Range-Extender-Elektrofahrzeuge. Abbildung 6 zeigt die Struktur der analysierten Elektrofahrzeuge im Vergleich zu konventionellen Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor. Im Folgenden werden diese verschiedenen Typen näher erläutert.

Hybrid-Elektrofahrzeuge verwenden eine Kombination aus einem Verbrennungsmotor und einem Elektromotor. Die Energie für den Elektromotor kommt aus einer Batterie, die nur eine geringe Kapazität hat und ausschließlich mit rückgewonnener Bremsenergie geladen wird. Da Laden am Stromnetz nicht möglich ist, können diese Fahrzeuge nicht zur Substitution fossiler Kraftstoffe beitragen.

Plug-in-Hybrid-Elektrofahrzeuge entsprechen im Aufbau den Hybrid-Elektrofahrzeugen, haben aber eine deutlich größere Batterie, die neben dem Laden mit zurückgewonnener Bremsenergie auch am Stromnetz aufgeladen werden kann. Bei diesem Antriebssystem liegt die rein elektrische Reichweite in der Regel zwischen 30 und 60 km.

Elektrofahrzeuge mit Range Extender sind hauptsächlich batteriebetriebene Fahrzeuge, die aber neben dem Elektromotor über einen kleinen Verbrennungsmotor verfügen, der bei Bedarf die leere Batterie des Elektrofahrzeugs laden kann, um die Gesamtreichweite zu erhöhen. Der Verbrennungsmotor und fossile Kraftstoffe dienen ausschließlich dazu, die Batterie zu laden.

Batterie-Elektrofahrzeuge werden vollständig von Elektromotoren angetrieben. Sie verfügen nur über ein einziges Speichersystem – die Batterie – die direkt an das Stromnetz angeschlossen wird. Die Reichweite dieses Elektrofahrzeugs hängt hauptsächlich von der Batteriekapazität ab.

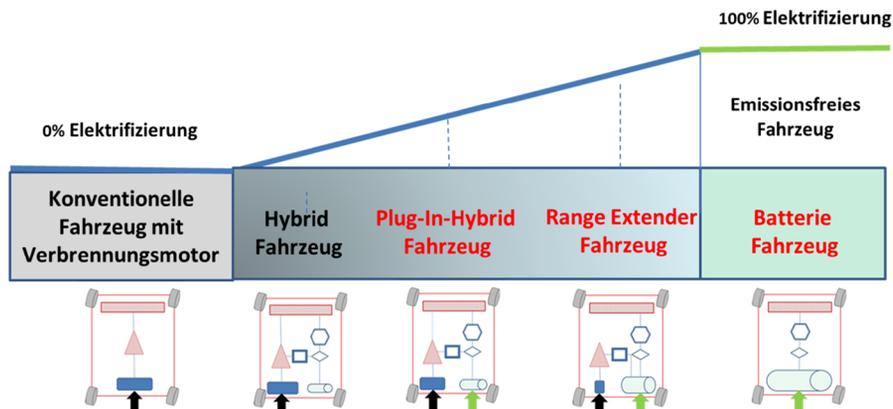


Abb. 6. Architekturen verschiedener Typen von Elektrofahrzeugen

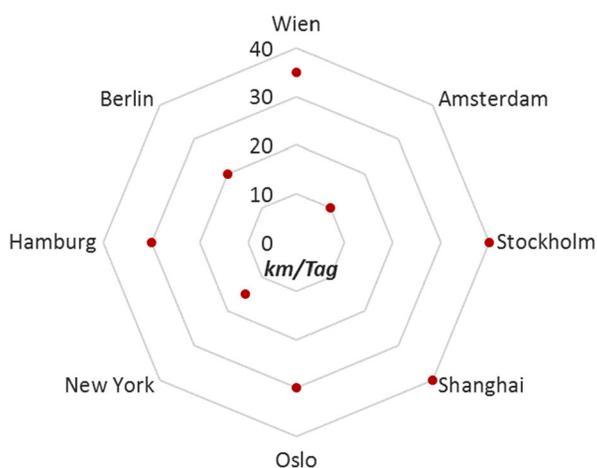


Abb. 7. Die täglichen Autofahrten in verschiedenen Städten [29]

Alle diese Elektrofahrzeuge haben einige Vorteile und Nachteile. Für die zukünftige Marktdurchdringung von Elektrofahrzeugen ist die elektrische Reichweite von besonderer Bedeutung.

Die Reichweite der meisten Elektrofahrzeuge ist wesentlich geringer als die von Diesel- oder Benzin-Fahrzeugen. Derzeit sind Batterie-Elektrofahrzeuge grundsätzlich für kurze und mittlere Strecken geeignet. Deren durchschnittliche Reichweite liegt zwischen 150 und 300 km und ist damit ausreichend, um die tägliche Distanz der meisten Autofahrten abzudecken. Besonders in urbanen Gebieten sind die meisten Autofahrten kürzer als 50 km, siehe Abb. 7.

Die Reichweite der Elektroautos wird durch die Batteriekapazität bestimmt. Die Batteriekapazität der meisten Batterie-Elektrofahrzeuge liegt zwischen 20 und 80 kWh. Für Hybridantriebssysteme werden deutlich kleinere Batterien genutzt, siehe Abb. 8.

Die größere Batterie ermöglicht eine längere Reichweite, erhöht aber gleichzeitig das Gewicht, die Kosten sowie den ökologischen Fußabdruck des Fahrzeugs.

5. Ökologische Bewertung

Da der Verkehrssektor eben einer der größten Verursacher verschiedener Emissionen ist, besteht ein enormer Bedarf, eine nachhaltige Entwicklung dieses Sektors zu ermöglichen. Elektrofahrzeuge bieten eine Reihe von wichtigen Umweltvorteilen, insbesondere in verschmutzten städtischen Gebieten. Sie gelten als umweltfreundliche Technologie, und ihr Einsatz wird in vielen Ländern durch ver-

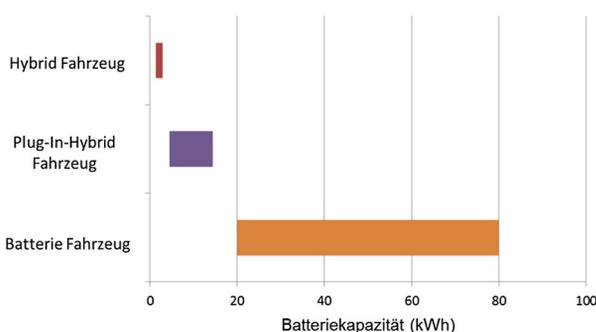


Abb. 8. Die übliche Batteriekapazität von Elektrofahrzeugen

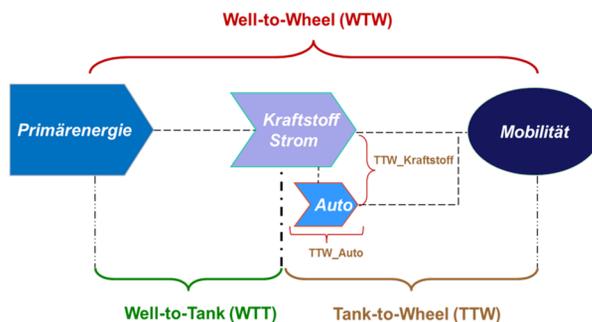


Abb. 9. Methodische Vorgangsweise bei der Emissionsbewertung

schiedene monetäre und nicht-monetäre Maßnahmen unterstützt. Obwohl diese Maßnahmen derzeit hauptsächlich zur Steigerung der Attraktivität der E-Autos beitragen, ist das Endziel, den Energieverbrauch und die korrespondierenden THG-Emissionen im Verkehr zu verringern.

Um die Emissionen konventioneller Autos mit denen von Elektrofahrzeugen zu vergleichen, ist es jedoch wichtig, die gesamte Energieversorgungskette zu analysieren. Das bedeutet, sowohl die Tank-to-Wheel (TTW)-Emissionen, die durch den Kraftstoffverbrauch im Auto entstehen sind zu berücksichtigen, als auch die Well-to-Tank (WTT)-Emissionen, die bei der Produktion und der Bereitstellung von Energie (fossile Kraftstoffe oder Strom). Weiters werden auch die Emissionen für die Materialien, die Herstellung und die Entsorgung des Fahrzeugs berücksichtigt, siehe Abb. 9.

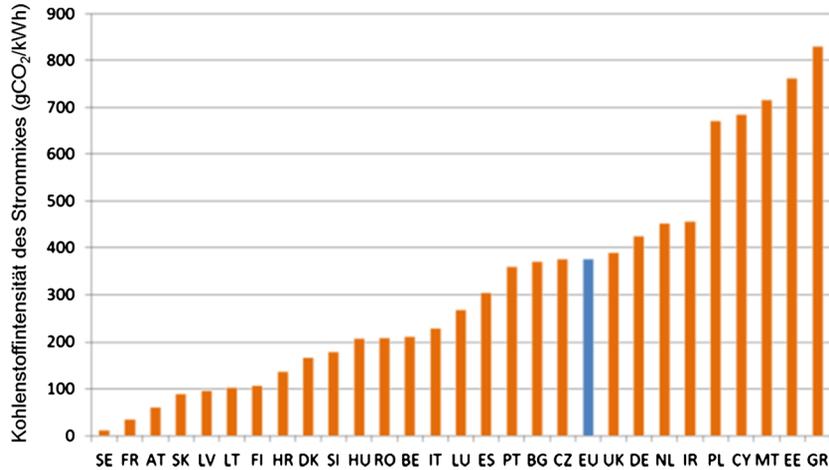


Abb. 10. Kohlenstoffintensität des Strommixes in verschiedenen europäischen Ländern, 2014 (eigene Zusammenstellung basierend auf [30]) (Farbabbildung online)

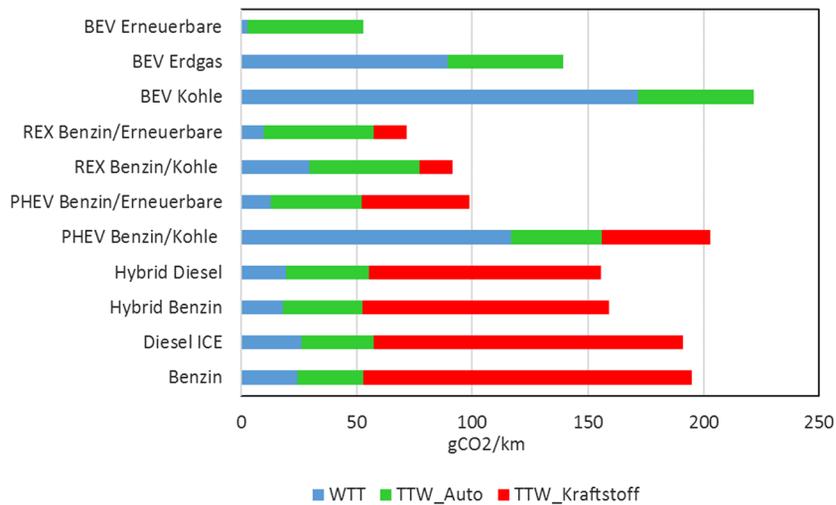


Abb. 11. WTW-Bilanz der CO₂-Emissionen pro 100 km für verschiedene Elektrofahrzeugtypen im Vergleich zu Benzin- und Dieselfahrzeugen (Leistung des Fahrzeugs: 80 kW) (Farbabbildung online)

Der für die Stromerzeugung verwendete Energiemix hat erhebliche Auswirkungen auf die WTT und schließlich auch auf die gesamten Well-to-Wheel (WTT)-Emissionen. Der für die Stromerzeugung verwendete Energiemix ist jedoch von Land zu Land sehr unterschiedlich und dementsprechend auch die ökologische Auswirkung der E-Fahrzeuge. Abbildung 10 zeigt die Kohlenstoffintensität des Strommixes in den EU-Ländern. Es ist offensichtlich, dass Elektrofahrzeuge in einigen Ländern, z.B. Schweden, Frankreich, Österreich, die Treibhausgasemissionen reduzieren können, aber z.B. in Griechenland können sie nur die lokale Luftverschmutzung reduzieren.

Darüber hinaus sind für eine fundierte Bewertung der Gesamtemissionen (CO₂-Total) auch die bei der Autoherstellung und Verschrottung verursachten Emissionen zu berücksichtigen.

$$CO_{2Total} = CO_{2WTT} + CO_{2TTW_Kraftstoff} + CO_{2TTW_Auto} \quad (1)$$

Bei CO_{2WTT} handelt es sich um Emissionen, die bei der Herstellung und Lieferung von Energie (Kraftstoff oder Strom) entstehen, bei CO_{2TTW_Kraftstoff} um Emissionen, die bei der Verbrennung von Kraft-

stoffen im Auto entstehen, und bei CO_{2TTW_Auto} um Emissionen, die bei der Herstellung und Verschrottung des Autos entstehen.

Die WTT-Emissionen sind stark abhängig vom Kohlenstoffgehalt des Primärenergieträgers, der Effizienz und der Art des Stromerzeugungsverfahrens:

$$CO_{2WTT} = \sum_{i=1}^n CO_{2PE} \cdot \frac{S_{PE_i}}{\eta_i} \quad (2)$$

Dabei ist *i* die Art der Primärenergiequelle, CO_{2PE} die Kohlenstoffintensität der Primärenergiequellen, S_{PE_i} deren Anteil am Kraftstoff/Strom-Mix.

Die Emissionen im Zusammenhang mit der Autoherstellung, den Materialien des Autos und dessen Verschrottung (CO_{2TTW_Auto}) werden wie folgt berechnet:

$$CO_{2TTW_Auto} = \frac{CO_{2Auto_i}}{LD_i \cdot skm_i} \quad (3)$$

Bei CO_{2Auto} handelt es sich um die gesamten bei der Autoherstellung und -verschrottung auftretenden Emissionen inklusive der material-inhärenten Emissionen des Autos, LD ist die Lebensdauer

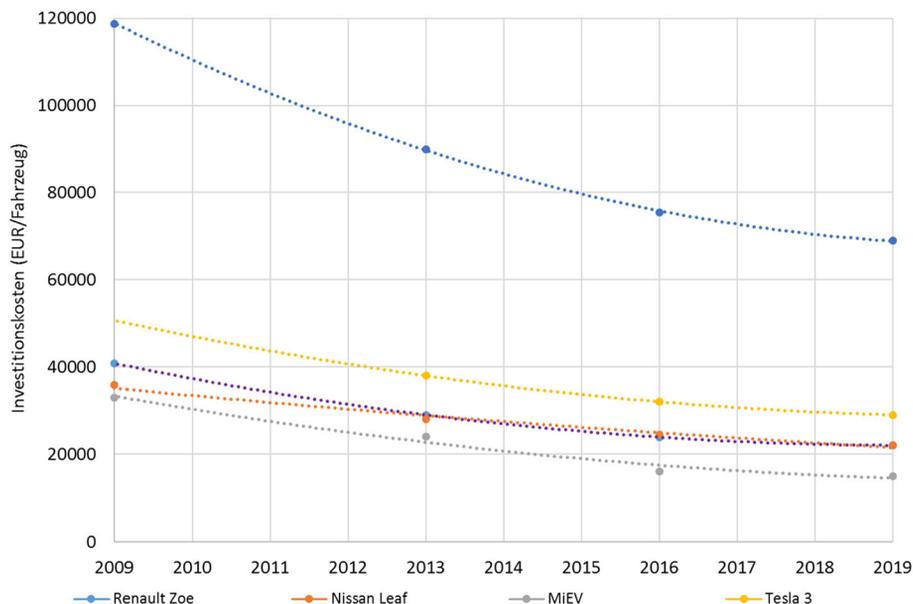


Abb. 12. Entwicklung der Investitionskosten verschiedener Marken von Batteriefahrzeugen (Farbabbildung online)

des Autos, skm ist die Anzahl der pro Auto und Jahr gefahrenen spezifischen Kilometer, i ist der Autotyp.

Abbildung 11 zeigt die aktuellen CO₂-Emissionen pro 100 km für die gesamte Energieversorgungskette und für verschiedene Typen von Elektrofahrzeugen im Vergleich zu konventionellen Benzin- und Dieselfahrzeugen. Die Leistung aller untersuchten Autos beträgt 80 kW, die angenommene Fahrleistung für alle Fahrzeuge ist 15.000 km pro Jahr.

Die niedrigsten CO₂-Emissionen haben BEV, die mit Strom aus erneuerbaren Energiequellen – Wind, PV oder Wasserkraft – betrieben werden. Sie liegen bei etwa 50 g CO₂ pro gefahrenem Kilometer. Dies ist sehr niedrig im Vergleich zu den CO₂-Bilanzen von BEV, die mit Kohle betrieben werden (ca. 222 g CO₂ pro km).

Die THG-Emissionsreduzierung beträgt bei HEVs etwa 25 %-im Vergleich zu den konventionellen Benzin- oder Dieselfahrzeugen. Im Falle von PHEVs und REXs hängen die CO₂-Bilanzen vom Anteil der Elektrizität am Gesamtenergieverbrauch ab. Im in Abb. 11 dargestellten Szenario wird angenommen, dass bei PHEVs und REXs der Stromverbrauch 50 % bzw. 90 % des Gesamtenergieverbrauchs beträgt.

6. Wirtschaftliche Bewertung

Einer der wichtigsten Aspekte für eine breitere Nutzung von Elektrofahrzeugen ist, dass sie gegenüber konventionellen Benzin- oder Dieselfahrzeugen wirtschaftlich wettbewerbsfähig werden. Weiters hängt die zukünftige Nutzung von Elektrofahrzeugen sehr von der weiteren Entwicklung der Batterietechnologie sowie den Kosten der Batterien ab.

Die heute verwendeten Batterien haben drei große Nachteile: eine geringe Energiedichte, ein hohes Gewicht und hohe Kosten. In den letzten Jahren wurden jedoch erhebliche Verbesserungen der Batterieleistung und eine Kostenreduktion erreicht, wodurch Elektrofahrzeuge gegenüber konventionellen Fahrzeugen wettbewerbsfähiger geworden sind. Durch die Lern- und Skaleneffekte in der Batteriezellproduktion haben sich die Lithium-Ionen-Batteriekosten pro kWh in den vergangenen fünf Jahren gedrittelt. Während die Batteriekosten sinken, nehmen allerdings die Batteriekapazitäten zu, um höhere Reichweiten von Elektrofahrzeugen zu ermöglichen. Trotzdem sind die Anschaffungskosten von Elektrofahrzeugen in den

letzten Jahren deutlich gesunken, wie aus Abb. 12 zu erkennen ist.

Abbildung 12 zeigt die Entwicklung der Investitionskosten für einige Marken von Batteriefahrzeugen zwischen 2009 bis 2019. Wie man sieht, gab es bei allen Fahrzeugmarken eine deutliche Reduktion der Investitionskosten. Insgesamt kann festgestellt werden, dass von 2009 bis 2019 eine durchschnittliche Investitionskostenreduzierung von etwa 40 %-Punkten erreicht wurde. Es ist zu beachten, dass sich die technischen Konfigurationen der Fahrzeuge in diesem Zeitraum meistens ebenfalls geändert haben.

Obwohl meistens der Anschaffungspreis bei Kaufentscheidungen im Vordergrund steht, ist es wichtig, die Gesamtkosten der elektrischen Antriebe untereinander sowie mit den konventionellen Fahrzeugen aus energiewirtschaftlicher Sicht zu analysieren. Bei diesen Gesamtkosten werden neben den Investitionskosten auch die Kosten für Kraftstoff oder Strom, sowie die Betriebs- und Wartungskosten mitberücksichtigt.

Um die Wirtschaftlichkeit verschiedener Fahrzeugtypen zu bewerten, werden die Mobilitätskosten pro 100 gefahrenen Kilometern (MK_{km}) wie folgt berechnet:

$$MK_{km} = \frac{IK \cdot \alpha}{skm} + EP \cdot EV + \frac{C_{B\&W}}{skm} \quad (4)$$

mit:

IK – Investitionskosten

α – Annuitätenfaktor

skm – Spezifische gefahrene Kilometer pro Auto und Jahr

EP – Energiepreis (Kraftstoff oder Strom) inkl. Steuern

EV – Energieverbrauch

$C_{B\&W}$ – Betriebs- und Wartungskosten

Der Energiepreis hängt von den Kosten für die verbrauchte Energie (K_e) und verschiedenen Steuern (τ_i) ab:

$$EP = K_e + \sum_i \tau_i \quad (5)$$

Die Struktur der Gesamtmobilitätskosten der analysierten Fahrzeuge ist in Abb. 13 für eine durchschnittliche Fahrleistung von 15.000 km pro Jahr dargestellt. Der größte Teil der Kosten aller

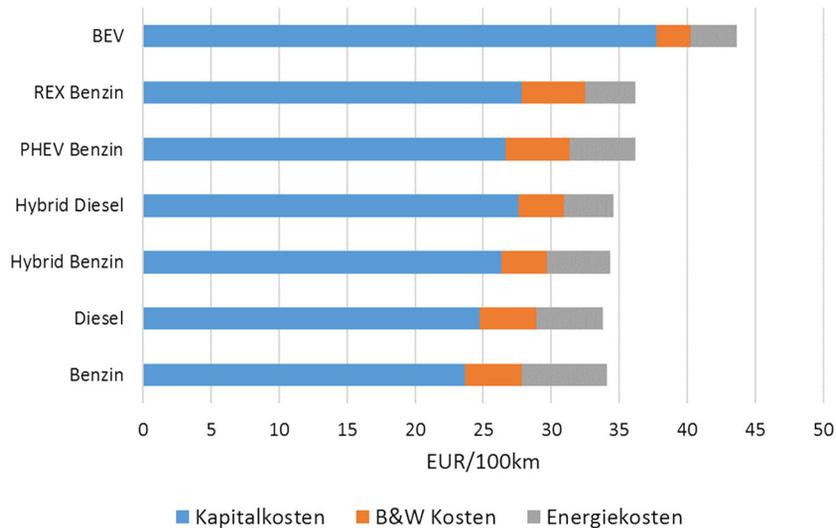


Abb. 13. Struktur der Gesamtmobilitätskosten verschiedener EV-Typen im Vergleich zu konventionellen Fahrzeugen (Fahrzeugleistung 80 kW), 2018 (Farbabbildung online)

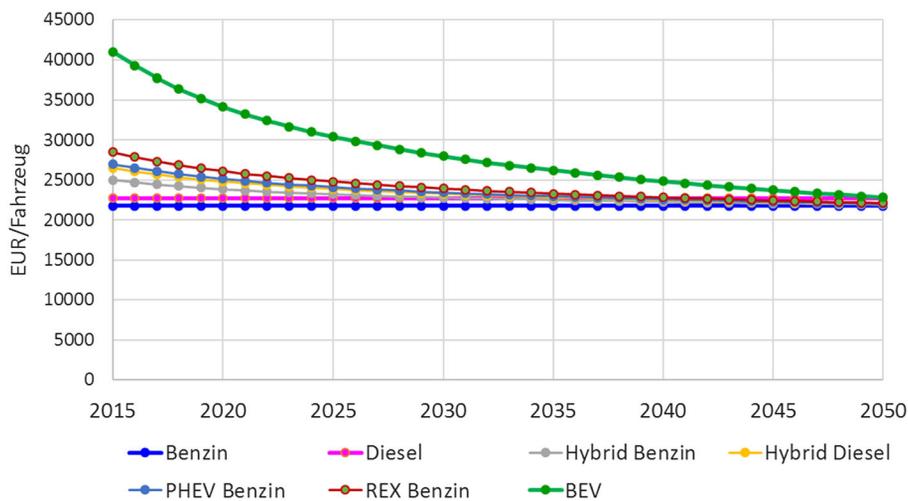


Abb. 14. Entwicklung der Investitionskosten von Elektro- und konventionellen Fahrzeugen über die Zeit bis 2050 unter Berücksichtigung der Lerneneffekte (Farbabbildung online)

Fahrzeugtypen sind Kapitalkosten. Diese Kosten sind bei BEV besonders hoch, während der Einfluss der Energiekosten relativ gering ist.

Aufgrund von Massenproduktion, technologischer Innovationen sowie des Learning-by-doing könnten die Kapitalkosten, insbesondere bei BEVs, bis 2050 jedoch deutlich sinken. Um die dynamischen Auswirkungen der durch diese Mechanismen bedingten Veränderungen der Investitionskosten von Kraftfahrzeugen zu erfassen, wird der Ansatz des technologischen Lernens angewandt. Technologisches Lernen kann durch sogenannte Erfahrungs- oder Lernkurven quantifiziert werden. Gleichung (6) wird verwendet, um so eine Erfahrungskurve zu beschreiben:

$$IK_{New}(x_t) = IK(x_{t_0}) \cdot \left(\frac{x_t}{x_{t_0}}\right)^{-b} \quad (6)$$

Dabei sind IK_{New} die Investitionskosten der neuen Technologie zum Zeitpunkt t , b ist ein Lernindex, IK sind die Investitionskosten

zum Zeitpunkt t_0 und x ist die kumulierte Anzahl der Fahrzeuge zu den Zeitpunkten t und t_0 .

Basierend auf technologischem Lernen sind BEVs in den letzten Jahren bereits billiger geworden. Abbildung 14 zeigt die mögliche Entwicklung der Investitionskosten der untersuchten Fahrzeuge im Zeitraum 2015 bis 2050. Diese Werte beziehen sich auf ein durchschnittliches 80-kW-Fahrzeug. Konventionelle Fahrzeuge sind technisch ausgereift, so dass keine weitere Kostenreduktion erwartet wird. Weiters ist anzumerken, dass die Verbesserungen der Servicequalität in den Autos (z.B. die Elektronik) den größten Teil der Kosteneinsparungen, die beim „nackten“ Auto durch das Lernen entstanden sind, praktisch kompensiert haben. Für die untersuchten E-Fahrzeuge wird hingegen noch immer ein erhebliches Lernpotential erwartet.

Bis 2050 werden zwei wesentliche Auswirkungen auf die Entwicklung der Kostenstrukturen erwartet. Zum einen werden die Investitionskosten aufgrund von Lerneffekten deutlich sinken, siehe Abb. 14. Zum anderen werden die Energiekosten aufgrund der steigen-

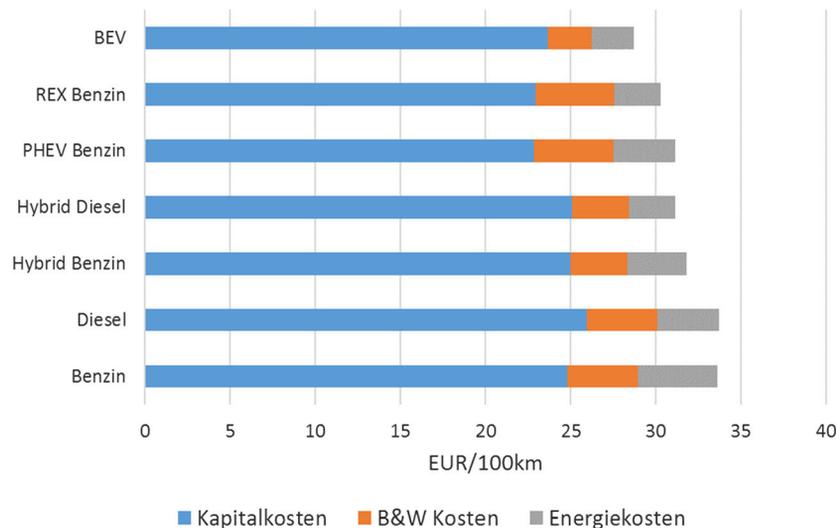


Abb. 15. Szenario für die Entwicklung der Gesamtkosten der Mobilität verschiedener Elektrofahrzeuge im Vergleich zu konventionellen Benzin- und Dieselfahrzeugen, 2050 (Farbabbildung online)

den Kraftstoffpreise und der Einführung von CO₂-basierten Steuern deutlich ansteigen. Abbildung 15 zeigt die Kostenstruktur der Gesamtfahrkosten pro km im Jahr 2050. Wie man sieht, liegen die Gesamtkosten in einer etwas kleineren Bandbreite als in Abb. 13 für 2018 dargestellt. In diesem Szenario sind insgesamt die BEVs am kostengünstigsten.

7. Politische Maßnahmen zur Förderung von E-Autos

Aufgrund der derzeit ungünstigen Wirtschaftlichkeit von Elektrofahrzeugen im Vergleich zu konventionellen Fahrzeugen ist es wichtig, verschiedene Fördermaßnahmen zu setzen, um die Akzeptanz von E-Autos zu erhöhen. Diese Maßnahmen lassen sich grundsätzlich in monetäre und nicht-monetäre Maßnahmen unterteilen.

Die in Europa am häufigsten eingesetzten monetären Maßnahmen sind Befreiungen (oder Ermäßigungen) von Steuern, z.B. der jährlichen Kraftfahrzeugsteuer, der Dienstwagensteuer, der Zulassungssteuer oder der Kraftstoffverbrauchssteuer. Zusätzlich gibt es Subventionen, die zur Anschaffung von Elektrofahrzeugen eingesetzt werden können. Zu den nicht-monetären Förderungen gehören kostenlose Parkplätze, die Möglichkeit für EV-Fahrer die Busspuren zu nutzen, die breite Verfügbarkeit von Schnellladestationen sowie die Erlaubnis für EVs, in Stadtzentren und Null-Emissions-Zonen zu fahren.

Auf europäischer Ebene sind aufgrund der drängenden Umweltprobleme viele politische Ziele auf die Reduzierung von Treibhausgasemissionen und die zunehmende Nutzung erneuerbarer Energiequellen ausgerichtet. Einige der Politiken und Ziele unterstützen den Einsatz von Elektroautos indirekt, z.B. die EU-Verordnung über CO₂-Emissionen (Nr. 333/2014) [34], das europäische Klima- und Energiepaket [31, 32] und das Witte-Papier zum Verkehrswesen [33].

In dieser Verordnung wird eine Reihe von bestehenden Maßnahmen dokumentiert und bewertet, die sich direkt oder indirekt auf die Nutzung von BEV auswirken. Einige davon sind Verbote von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren, Subventionen für die Anschaffung von Elektrofahrzeugen, verschiedene Steuervorteile für Elektrofahrzeuge und finanzielle Unterstützung für die Ladeinfrastruktur.

Derzeit ist in Europa nicht geplant, eine direkte Quote für BEVs einzuführen. Die EU hat jedoch ein CO₂-Ziel für die neuen Personenkraftwagen eingeführt (Verordnung 443/2009) [35]. Diese Maß-

nahme unterstützt die Produktion kohlenstoffarmer Fahrzeuge, insbesondere BEVs, da die gesetzten Ziele ohne die verstärkte Nutzung von Nullemissionsfahrzeugen kaum zu erreichen sind.

Das erste verbindliche Ziel für das Jahr 2015 – 130 Gramm CO₂-Emissionen pro Kilometer – wurde bereits 2013 erreicht. Das nächste Ziel liegt bei 95 g CO₂/km für das Jahr 2021. Um dieses Ziel zu erreichen, wird es notwendig sein, den Einsatz von alternativen Automobiltechnologien wie Elektrofahrzeugen zu erhöhen. Kürzlich wurden ehrgeizigere Ziele und strengere Emissionsprüfverfahren für 2025 und 2030 festgelegt.

Andere Maßnahmen, die indirekt die Nutzung von BEVs unterstützen, sind Verbote von konventionellen Fahrzeugen. Normen oder Verbote, die Fahrzeuge mit bestimmten technologischen Merkmalen verbieten, sind eine übliche Regulierungsmaßnahme in der Verkehrspolitik [36]. Ein Verbot konventioneller Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor sollte die Entwicklung, Produktion und den Kauf alternativer Automobilantriebe mit niedrigen und Null-Emissionen fördern.

Viele Städte haben bereits Niedrig- oder Null-Emissions-Zonen eingeführt, die den Einsatz von Fahrzeugen mit fossilen Brennstoffen einschränken. Darüber hinaus haben kürzlich eine Reihe von Ländern als Reaktion auf drängende Umweltprobleme Pläne angekündigt, neue Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren in Zukunft zu verbieten. Norwegen plant, den Verkauf neuer Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor bereits ab 2025 zu verbieten. Darüber hinaus haben einige EU-Länder, die Niederlande, Irland und Slowenien, ab 2030 ein Verbot von Benzin- und Dieselfahrzeugen angekündigt [17].

Die Ankündigung von Verboten konventioneller Autos ist ein klares Signal an die Automobilindustrie. Auf dieser Grundlage ist zu erwarten, dass die Herstellung von BEVs in den nächsten Jahren zunehmen wird. Viele Autohersteller haben bereits angekündigt, dass sie viele ihrer zukünftigen Modelle als Elektroautos verkaufen wollen [17, 37].

Aufgrund des Diesel-Emissionsskandals sowie der aktuellen Beschränkung von Diesel-Pkw in einigen städtischen Gebieten ist der Verkauf von Diesel-Neuwagen in der EU in den letzten Jahren deutlich zurückgegangen [38]. Da BEVs für die meisten Nutzer jedoch immer noch zu teuer sind, ist derzeit eine Verlagerung von Diesel- auf Benzin-Pkw zu beobachten [39].

Um dies zu ändern und BEVs attraktiver und erschwinglicher zu machen, bieten viele EU-Länder verschiedene Zuschüsse (nicht rückzahlbare Mittel, die die Verbraucher beim Kauf von EV erhalten) für ihren Kauf an. Die Zuschüsse könnten eine wirksame Methode sein, um die Nutzung von BEVs zu erhöhen, sofern sie in ausreichender Höhe zur Verfügung stehen. Eine größere Wirkung könnte erreicht werden, wenn sie auf kleinere und billigere EVs abzielen, bei denen der Anreiz für den Käufer einen erheblichen Unterschied macht [40]. Darüber hinaus werden sie oft mit anderen Maßnahmen wie Steuervorteilen oder der Unterstützung beim Aufbau von Ladeinfrastruktur kombiniert. Viele EU-Länder nutzen bereits Steuerbefreiungen oder -ermäßigungen (z.B. von der Mehrwertsteuer (MwSt.) und/oder der Zulassungssteuer) mit dem Ziel, die Gesamtkosten von BEVs zu senken.

Maßnahmen und Politiken, die zum Zeitpunkt des Kaufs von BEVs angewandt werden (z.B. Steuerbefreiungen), sind die wirksamsten finanziellen Anreize, insbesondere in Ländern mit hohen Steuersätzen für Benzin- und Dieselfahrzeuge, wie Norwegen und den Niederlanden [41, 42]. Vorteile in einer späteren Phase, wie z.B. Befreiungen oder Ermäßigungen bei der jährlichen Kraftfahrzeugsteuer, haben oft kein starkes Preissignal und nur geringe Auswirkungen auf den Kauf von BEVs [43]. Die Anreize für private Elektrofahrzeuge in verschiedenen EU-Ländern liegen immerhin zwischen 2.000 und 10.000 Euro [39].

8. Schlussfolgerungen

Es gibt noch eine Reihe von Hindernissen, die es zu überwinden gilt, um die Verbreitung von Elektrofahrzeugen zu steigern. Im Falle der BEVs sind die wichtigsten Hindernisse die gleichen wie vor etwa 100 Jahren – hohe Kosten, hauptsächlich aufgrund der Batterie, und eine geringe Reichweite im Vergleich zu Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor. Diese Probleme könnten mit PHEV und REX etwas verringert werden. Diese Technologien haben zwar in der gesamten Energieversorgungskette geringere CO₂-Emissionen als konventionelle Autos, sind allerdings im Gegensatz zu BEVs keine Nullmissionsfahrzeuge.

Die derzeit populärsten E-Fahrzeuge sind Hybridautos. Sie haben ähnliche Kosten und Betriebsbereiche wie herkömmliche Benzin- und Diesel-Fahrzeuge, aber da sie von fossilen Brennstoffen abhängig sind, können sie nur als Energieeffizienzmaßnahme gesehen werden. Sie könnten jedoch als Überbrückungstechnologie dienen – solange BEVs keine hohe Popularität erlangt haben – und zusammen mit PHEVs und REX könnten sie zu schnellerem Technologischen Lernen und zur Reduktion der Batteriekosten beitragen.

Trotz der bestehenden Probleme haben E-Fahrzeuge derzeit gute Aussichten auf eine höhere Marktdurchdringung, vor allem, weil aufgrund der weltweiten Verpflichtungen zur Reduzierung der Treibhausgasemissionen wird derzeit ein sehr breites Portfolio verschiedener Maßnahmen und unterstützender Strategien für Elektrofahrzeuge umgesetzt wird. Die besten Ergebnisse könnten mit einer Kombination aus monetären und nicht-monetären Anreizen erzielt werden.

Um jedoch die vollen ökologischen Vorteile von Elektroautos auszuschöpfen, muss der Strom nachweislich aus erneuerbaren Energiequellen erzeugt werden – andernfalls könnten die gesamten CO₂-Emissionen möglicherweise noch höher sein als die von konventionellen Autos. Die Einführung von CO₂-basierten Kraftstoffsteuern würde dieses Ziel unterstützen.

Danksagung

Open access funding provided by TU Wien (TUW).

Hinweis des Verlags Der Verlag bleibt in Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutsadressen neutral.

Open Access Dieser Artikel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden. Die in diesem Artikel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen. Weitere Details zur Lizenz entnehmen Sie bitte der Lizenzinformation auf <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>.

Literatur

1. Statistical pocketbook (2019): https://ec.europa.eu/transport/facts-fundings/statistics/pocketbook-2019_en.
2. Anderson, C.D., Anderson, J. (2012): Electric and hybrid cars: a history. Jefferson: McFarland and Company.
3. Ajanovic, A. (2015): The future of electric vehicles: prospects and impediments. WIREs Energy Envir., 4(6), 521–536. <https://doi.org/10.1002/wene.160>.
4. Høyer, K. G. (2008): The history of alternative fuels in transportation: the case of electric and hybrid cars. Util. Policy, 16, 63–71.
5. Reiner, R., Cartalos, O. (2010): Evrigenis A., Viljamaa K. (2010): Challenger for a European market for electric vehicles. IP/AITRE/NT/2010-004.
6. Santini, D. J. (2011): Electric vehicle waves of history: lessons learned about market deployment of electric vehicles. www.intechopen.com.
7. Plug-in hybrid cars. http://eartheasy.com/move_plug-in_cars.html.
8. Green car congress: energy, technologies and policies for sustainable mobility, Electric (Battery). http://www.greencarcongress.com/electric_battery/index.html.
9. Ajanovic, A., Dahl, C., Shipper, L. (2012): Modelling transport (energy) demand and policies—an introduction. Energy Policy, 41, iii–xiv.
10. Chan, C. C. (2002): The state of the art of electric and hybrid vehicles. Proc. IEEE, 90, 247–275.
11. Plug-in hybrid cars. http://eartheasy.com/move_plug-in_cars.html.
12. OECD/IEA (2013): Global EV outlook.
13. Bellis, M. (2006): The early years, the history of electric vehicles. New York: About.com.
14. Mom, G. (2004): The electric vehicle: technology and expectations in the automobile age. Baltimore: The John Hopkins University Press.
15. Weiss, M., Patel, M., Junginger, M., Perujo, A., Bonnel, P., Grootveld, G. (2012): On the electrification of road transport—learning rates and price forecasts for hybrid-electric and battery-electric vehicles. Energy Policy, 48, 374–393.
16. Sulzberger, C. (2004): An early warrior: electric vehicles in the early years of the automobile. Piscataway: IEEE Power Engineering Society.
17. Global, I. E. A., Outlook, E. V. (2019): Scaling-up the transition to electric mobility. Paris: International Energy Agency.
18. BOVAG und rai Vereniging (September 2019): number of charging stations for electric vehicles in the Netherlands from 2011 to 2019*, In Statista. <https://www.statista.com/statistics/658043/number-of-charging-stations-for-electric-vehicles-in-the-netherlands/>.
19. EAFO (Oktober 2018): Number of electric vehicle charging stations in the Netherlands from 2010 to 2018, by type, In Statista. <https://www.statista.com/statistics/933026/number-of-electric-vehicle-charging-stations-in-the-netherlands/>.
20. EAFO (Oktober 2018): Number of electric vehicle charging stations in France from 2012 to 2018, by type, In Statista. <https://www.statista.com/statistics/932730/number-of-electric-vehicle-charging-stations-france/>.
21. EAFO (Oktober 2019): Number of electric vehicle charging stations by type in Germany from 2012 to 2019. In Statista. <https://www.statista.com/statistics/932998/number-of-electric-vehicle-charging-stations-germany/>.
22. EAFO (Oktober 2019): Number of electric vehicle charging stations by type in the United Kingdom (UK) from 2011 to 2019. In Statista. <https://www.statista.com/statistics/932692/number-of-electric-vehicle-charging-stations-uk/>.
23. EAFO (2019): Normal and fast public charging points. <https://www.eafo.eu/alternative-fuels/electricity/charging-infra-stats#>.
24. IEA (2019): Global EV outlook 2019. <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2019>.
25. IEA (2019): Number of publicly available electric vehicle chargers (EVSE) in 2018, by major country and type. In Statista. <https://www.statista.com/statistics/571564/publicly-available-electric-vehicle-chargers-by-country-type/>.

26. IEA (2019): Global EV outlook 2019—scaling-up the transition to electric mobility, S. 218–219. https://nangs.org/analytics/download/4002_6d971ffab5d5448c049d2100a16527c7.
27. Norsk Elbilforening (Januar 2019): Number of charging stations for electric cars in Norway from 2011 to 2018, by type. In Statista. <https://www.statista.com/statistics/696548/number-of-electric-car-charging-stations-in-norway-by-type/>.
28. Norsk Elbilforening (Dezember 2019): Antall offentlige ladepunkt i Norge. <https://elbil.no/elbilstatistikk/ladestasjoner/>.
29. Ajanovic, A., Haas, R. (2016): Dissemination of electric vehicles in urban areas: major factors for success. *Energy*, 115, 1451–1458.
30. European Energy Agency, (2018): [https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/daviz/co2-emissionintensity-3#tab-googlechartid_chart_11_filters=%7B%20row-Filters%3A%7B%7D%3B%20columnFilters%3A%7B%20pre_config_ugeo%3A%5B%20Union%20\(28%20countries\)%5D%7D%7D](https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/daviz/co2-emissionintensity-3#tab-googlechartid_chart_11_filters=%7B%20row-Filters%3A%7B%7D%3B%20columnFilters%3A%7B%20pre_config_ugeo%3A%5B%20Union%20(28%20countries)%5D%7D%7D).
31. European Commission (2018): https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2020_en.
32. European Commission (2018): https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2030_en.
33. European Commission (2011): ISBN 978-92-79-18270-9. <https://doi.org/10.2832/30955>.
34. Regulation (EU) No. 333/2014 of the European Parliament and of the Council of 11 March 2014 amending regulation (EC) No. 443/2009 to define the modalities for reaching the 2020 target to reduce CO₂ emissions from new passenger car. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32014R0333&from=EN>.
35. Regulation 443/2009 regulation (EC) No. 443/2009 of the European Parliament and of the Council of 23 April 2009 setting emission performance standards for new passenger cars as part of the community's integrated approach to reduce CO₂ emissions from light-duty vehicles.
36. Kazmierczyk, P. (2007): Sustainable consumption and production in South East Europe and Eastern Europe, Caucasus and Central Asia—joint UNEP-EEA report on the opportunities and lessons learned. https://www.eea.europa.eu/publications/eea_report_2007_3.
37. Burch, I., Gilchrist, J. (2018): Survey of global activity to phase out internal combustion engine vehicles. Centre for Climate Protection. <https://theclimatecenter.org/wp-content/uploads/2018/09/Survey-on-Global-Activities-to-Phase-Out-ICE-Vehicles-FINAL.pdf>.
38. Kodjak, D. (2018): How to think about vehicle bans: an update after two major European judicial decisions. International Council on Clean Transportation. <https://www.theicct.org/blog/staff/how-think-about-vehicle-bans-update-after-two-major-european-judicial-decisions>.
39. ACEA (European Automobile Manufacturers' Association) (2019): Share of diesel in new passenger cars. <https://www.acea.be/statistics/tag/category/share-of-diesel-in-new-passenger-cars>.
40. Hardman, S., Chandan, A., Tal, G., Turrentine, T. (2017): The effectiveness of financial purchase incentives for battery electric vehicles—a review of the evidence. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 80, 1100–1111.
41. Velten, E. K., Stoll, T., Meinecke, L. (2019): Measures for the promotion of electric vehicles. Berlin: Ecologic Institute. Commissioned by Greenpeace e.V.
42. Haugneland, P., Lorentzen, E., Bu, C., Hauge, E. (2017): Put a price on carbon to fund EV incentives—Norwegian EV policy success. In EVS30 symposium, Stuttgart.
43. Runkel, M., Mahler, A., Ludewig, D., Rückes, A. L. (2018): Loss of revenues in passenger car taxation due to incorrect CO₂ values in 11 EU states. http://www.foes.de/pdf/2018-03-10_FOES_Taxation_loss_due_incorrect_CO2_values.pdf.

Autoren



Amela Ajanovic

Amela Ajanovic ist Senior Scientist am Institut für Energiesysteme und Elektrische Antriebe der TU Wien. Sie studierte Elektrotechnik an der TU Wien und promovierte 2006 auf dem Fachgebiet „Energiewirtschaft“.

Ihr aktueller Forschungsschwerpunkt ist Energiewirtschaft im Verkehr. Dies beinhaltet im Einzelnen die energetische, ökologische und

ökonomische Bewertung alternativer Antriebssysteme und Kraftstoffe im Verkehr, die Modellierung von Verkehrsnachfrage, Analysen energiepolitischer Instrumente sowie die Erstellung von Szenarien.

Sie hat in diesem Bereich in Forschungsprojekten mit der EU, der IEA und anderen nationalen und internationalen Forschungseinrichtungen kooperiert und eine Vielzahl von Arbeiten in internationalen peer-reviewten Zeitschriften publiziert.



Anne Glatt

Anne Glatt ist seit Oktober 2019 als wissenschaftliche Mitarbeiterin in der Energy Economics Group an der TU Wien tätig. Ihr Forschungsschwerpunkt liegt beim öffentlichen und privaten Personenverkehr sowie Gütertransport. Sie betrachtet dabei ökologische wie ökonomische Aspekte und entwickelt Lösungen zur Treibhausgasemissionsreduktion im Verkehrssektor.

Sie hat einen Master-Abschluss in Elektro- und Informationstechnik des Karlsruher Instituts für Technologie mit Vertiefung in Regenerativen Energien. Ihre Masterthesis verfasste sie am Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie über orts aufgelöste Untersuchungen in Redox-Flow-Batteriezellen. Von 2016–2019 arbeitete sie als Entwicklungsingenieurin bei Proton Motor Fuel Cell GmbH im Bereich der Brennstoffzellensystem-Technologie.