

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/383275396>

Elektromobilität – Fakten und Kontext zu häufig gestellten Fragen (2024)

Preprint · August 2024

CITATIONS

0

READS

109

1 author:



Andreas Braun

Technische Hochschule Ingolstadt

34 PUBLICATIONS 205 CITATIONS

SEE PROFILE

Elektromobilität

Fakten und Kontext zu häufig gestellten Fragen

Dieser Beitrag sammelt Fakten und Hintergrundinformationen über die Elektromobilität. Er soll helfen, das verfügbare Wissen in der öffentlichen Diskussion zu erweitern und häufig gestellte Fragen und Bedenken beantworten. Der Text betrachtet die Situation und die Randbedingungen, die für den deutschen Markt gelten, um die Komplexität der Zusammenhänge überschaubar zu halten. Die angesprochenen Aspekte haben Implikationen, die weit über die Fragestellung der Mobilität hinausgehen und sollen bewusst zum weiteren Nachdenken und Informieren anregen. Jedoch bleibt der Fokus dieser Ausarbeitung – dem Umfang geschuldet – auf dem im Titel genannten Gebiet. Unter anderem werden folgende Themen behandelt:

1. Rohstoffe	Woraus bestehen Batterien?	Seite 7
	Auswirkungen auf Mensch und Umwelt	Seite 12
	Einordnung in unseren Lebensstil abseits der Mobilität	Seite 15
2. Herstellung	Der „CO ₂ -Rucksack“	Seite 11
3. Betrieb	R.I.P.? – Reichweite, Infrastruktur und Preis	Seite 19
	Woher kommt der Strom?	Seite 24
	Und wie wird er verteilt?	Seite 26
4. Lebensdauer	...und was geschieht danach mit den Batterien?	Seite 29
0. Alternativen?	Beginnen wir mit der Frage: Warum eigentlich Elektromobilität?	

Ende 2023 gab es weltweit rund 42 Millionen elektrifizierter Pkw – und damit bereits doppelt so viele wie im Vorjahr. Mehr als die Hälfte davon fuhr im weltgrößten Markt: China (23,4 Millionen, 60 % Wachstum, mehr als ein Drittel aller Neuzulassungen sind E-Fahrzeuge). Weit abgeschlagen gab es 4,8 Millionen elektrifizierter Fahrzeuge in den USA. Deutschland liegt mit 2,3 Millionen auf Platz 3.

Größter Hersteller weltweit ist der chinesische Konzern BYD (3 Millionen Neuzulassungen in 2023) gefolgt von Tesla (1,8 Millionen) und VW mit einer Million [1]. In Westeuropa dominieren derzeit noch westliche Autobauer: Tesla führt mit 18,9 % Marktanteil vor VW mit 15,6 % und Stellantis (u.a. Peugeot, Fiat, Opel, Jeep) mit 12,7 %. Geely (mit den Marken Volvo, Polestar und Lynk) folgt als erster chinesischer Konzern auf Platz vier (10,0 %). BYD belegt hier noch Platz 11 mit einem Marktanteil von 1,7 % - jedoch sieht sich der chinesische Hersteller bis 2030 als Marktführer in Europa. Zuletzt trat er als Hauptsponsor der Fußball-Europameisterschaft 2024 publikumswirksam auf, was sicherlich diesem Anspruch dienen soll [2].

Zum 01. Januar 2023 waren 60,1 Millionen Kraftfahrzeuge (Kfz) in Deutschland zugelassen. Davon 48,8 Millionen Pkw mit Benzin (61,6 %) und Diesel (28,8 %) sowie Elektro- und Hybridfahrzeuge (2,1 % bzw. 5,9 %). Der Bestand an Elektro-Pkw (BEV) lag bei 1,0 Millionen (rund 2 %), der an Hybrid-Pkw inkl. PHEV bei 2,9 Millionen (rund 5 %) [3]. Europaweit betrachtet liegen BEV bei den Neuzulassungen mit 14,6 % knapp vor Diesel (13,6 %) und Plugin-Hybridfahrzeugen (7,7 %) und hinter Hybriden (25,8 %) und Benzinern (35,3 %) [4]. Der Markthochlauf von Elektrofahrzeugen wird bestimmt durch das Interesse der Nutzer*innen.

Dieses wiederum unterliegt verschiedenen gesellschaftlichen Randbedingungen, darunter wachsendes ökologisches Bewusstsein, staatliche Regulation/Incentives und Verfügbarkeit bzw. Preis-/Leistungsangebot der Fahrzeuge.

In den letzten zehn Jahren sind die Preise von Li-Ionen Akkus von 732 US\$ auf 152 US\$ pro kWh gefallen [5]. Gleichzeitig verdoppelte sich deren Kapazität (und somit Reichweite). Es gibt gute Gründe für den Einsatz von batteriebetriebenen Elektrofahrzeugen (BEV). Im Folgenden werden elektrisch betriebene Fahrzeuge und aktuelle Alternativen unter dem Aspekt der Energieeffizienz gegenübergestellt.

Effizienz und Verluste von Antriebsalternativen

Was sagt die Thermodynamik?

Beim Benzinmotor liegt der Wirkungsgrad ab Tank aufgrund der Thermodynamik bei etwa 35 %, beim Dieselmotor bei etwa 42 % im Bestpunkt [6]. Von allen Alternativen im Automotive Bereich sind **direkt elektrische Antriebe die effizienteste Antriebstechnologie** mit 84 % im Antriebsstrang und 70 % ab Quelle (Abbildung 1).

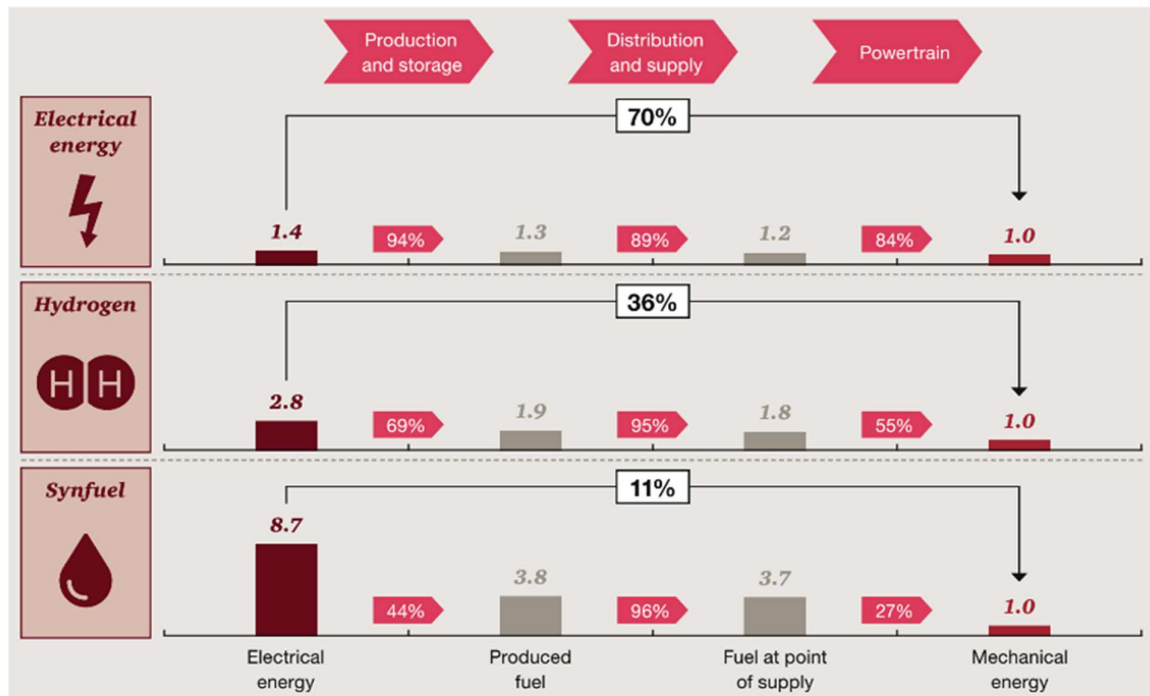
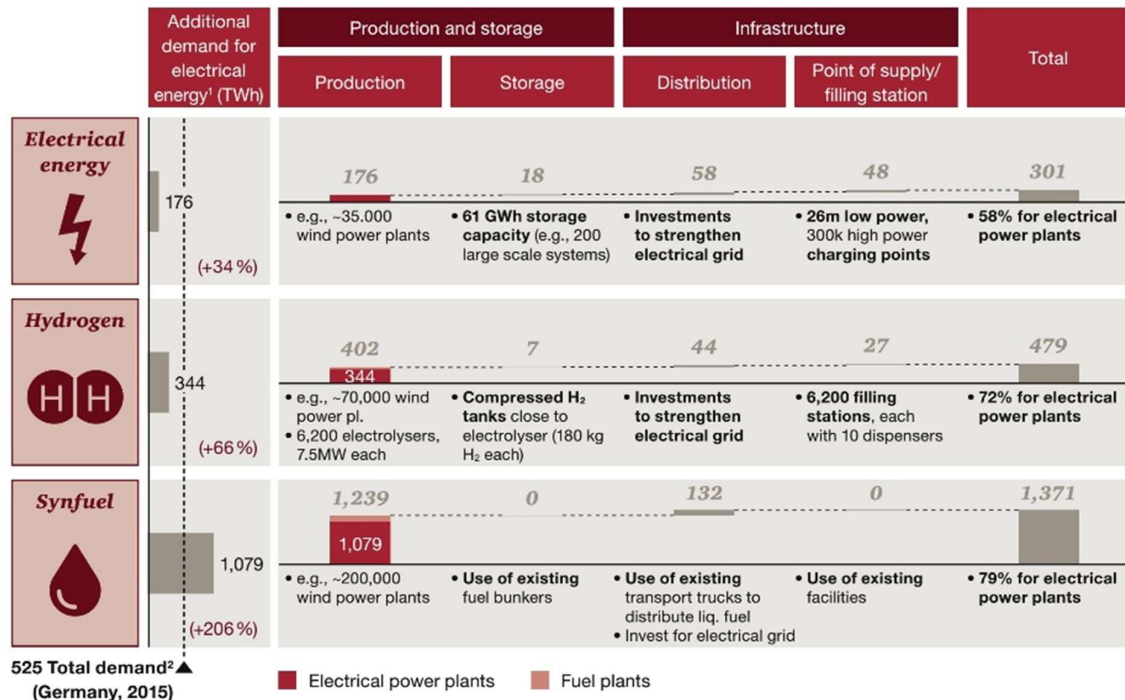


Abbildung 1: Effizienz (in %) und Energiebedarf (in kWh) der Produktionskette von CO₂-neutralen Energien pro kWh mechanischer Energie [7]

Das Brennstoffzellenfahrzeug (Fuel Cell Electric Vehicle – FCEV) benötigt durch die schlechte Wirkungskettens der Herstellung von Wasserstoff, Verteilung, Speicherung und Wandlung in elektrische Energie bis zu viermal so viel (erneuerbare) Energie wie das BEV [6].

Synthetische Kraftstoffe erfordern zusätzlich zur Elektrolyse weitere Energie für CO₂-Gewinnung, Methanisierung und Synthese zu bspw. Polyoxymethyldimethylether (OME). Bei der Verbrennung wird dann ein großer Teil der Energie wiederum als Verlustwärme frei. Die Effizienz liegt insgesamt bei 11 %, die benötigte (erneuerbare) Energie ist ca. 8-mal höher.

Abbildung 2 ordnet die theoretisch notwendigen Investitionen für verschiedene erneuerbare Energieträger für den deutschen Pkw-Markt ein:



¹ Additional demand for automotive fuels, assuming full supply of all light vehicles in Germany.

² Total demand for Germany as of 2015 (Source: BDEW).

Abbildung 2: zusätzlicher Energiebedarf für leichte Fahrzeuge in Deutschland in TWh und Investitionsbedarf von CO₂-neutralen Energien in Mrd. € [7]

100 % direkt elektrische Mobilität in Deutschland würde 34 % mehr erneuerbare Energie als insgesamt 2015 erfordern. Dies entspräche simpel betrachtet bspw. ~35.000 zusätzlichen Windrädern¹. Mit Speichern und Netzausbau lägen die notwendigen Investitionen bei ca. 301 Mrd. € – zur Veranschaulichung umgelegt auf die Pkw-Flotte in Deutschland entspräche dies knapp 6.200 € pro Fahrzeug. Bei Wasserstoff würden 66 % mehr Energie benötigt. Die Investments in Erzeugung und Infrastruktur betrügen ca. 479 Mrd. €. Für Synfuels wären sogar 206 % mehr Energie erforderlich. Das wären ~200.000 Windräder. Die Investitionen beliefen sich auf 1.371 Mrd. € – über 1 Billion mehr als beim direkt elektrischen Antrieb und – wieder zur Veranschaulichung – ca. 28.000 € Zusatzinvestition pro Fahrzeug. Diese einfachen Zahlen vernachlässigen die Zusammenhänge und Synergieeffekte, die eine solche Umstellung auf erneuerbare Energieträger auch für andere Sektoren mit sich bringen würde (Stichwort: Import und Langzeitspeicherung erneuerbarer Energien). Sie geben jedoch ein deutliches Gefühl dafür, welchen wirtschaftlichen Aufwand unsere Mobilitätsgewohnheiten eigentlich bedeuten!

An dieser Stelle sei deutlich gesagt: **Batterieelektrische Fahrzeuge allein halten den Klimawandel nicht auf. Hierzu sind in allen Sektoren erhebliche Veränderungen erforderlich.** Elektrifizierung und Speicherlösungen für erneuerbare Energien sind dafür aber eine wichtige Grundlage. Dennoch gilt generell: Individuelle Mobilität ist immer ein Komfortluxus.

¹ Aktuell gibt es in Deutschland 30.243 Windenergieanlagen, die 2023 rund 139 TWh erzeugt haben [8].

Möglichkeiten und Grenzen für den Betrieb von Pkw-Flotten

Einfach alles auf Elektro umstellen?

Direkt elektrische Antriebe sind die effizienteste Alternative für Pkw. Jedoch verfügen überhaupt nur wenige entwickelte Länder über die infrastrukturellen Voraussetzungen und die private Kaufkraft, um eine vollständige Elektrifizierung ihrer Pkw-Flotte zu ermöglichen. In vielen Regionen der Welt ist eine flächendeckende Individualmobilität, wie wir sie in Europa gewohnt sind, selbst auf absehbare Zeit kaum zu realisieren. Für leichte Fahrzeugtypen gibt es jedoch Beispiele, dass gerade in ärmeren Ländern elektrisch betriebene Fahrzeuge eine erschwingliche und verfügbare Mobilitätslösung darstellen können [9]. Weltweit wird die globale Pkw-Flotte im Jahr 2030 bei 1,7 Milliarden Fahrzeugen gesehen (Annahme: 17 Jahre Flottenlebensdauer, 3 % Wachstumsrate und 6-7 % Anteil an Neuanschaffungen) [10]. Dabei wäre aufgrund der üblichen Austauschrate im Markt ein Anteil von 10 % elektrischen Fahrzeugen zu erwarten. Für den Großteil der Pkw werden Ende des Jahrzehnts also Alternativen zu fossilen Brennstoffen erforderlich sein, wenn Klimawirkungen vermieden werden sollen. Und aufgrund der Lebensdauer der Fahrzeuge im Markt würden Verbrennungsmotoren bis zur Mitte des Jahrhunderts noch einen großen – wenn auch abnehmenden – Anteil der Fahrzeuge antreiben, selbst wenn ab 2035 keine neuen Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor mehr zugelassen werden würden.

Darum, und aufgrund der Herausforderungen einer ausreichenden lokalen Produktion von erneuerbaren Energien in Deutschland, gehen Fachleute davon aus, dass ein **Import von erneuerbarer Energie** in Form von chemischen Energieträgern aus Sonnen- oder Wind-reichen Ländern der Erde gebraucht wird. Dort können erneuerbare Energieanlagen effektiver betrieben werden: So wird bspw. die Erzeugung erneuerbarer Energie aus on-shore Wind in Chile aufgrund des erhöhten Vollastäquivalent-Anteils von 5.000 zu 2.000 Stunden als dreifach höher angesehen als in Deutschland (15 statt 6 GWh pro 3 MW Turbine). Dies würde die Erzeugungsleistung von Wasserstoff oder Methanol-basierten Brennstoffen in Südamerika aus energetischer Sicht vergleichbar zu BEV mit lokalem, europäischem Windstrom machen. Jedoch würden aufgrund der Wirkungsgradverluste (Well-to-Wheel) dennoch weniger Pkw damit betrieben werden können, als wenn diese direkt mit dem (geringeren) Strom aus Windkraft vor Ort betrieben werden würden (43 % bei Brennstoffmaschinen bzw. 85 % bei FCEV).

Letztlich sind jedoch die Kosten der Energieträger – neben der ökologischen und sozialen bzw. geopolitischen Gesichtspunkte – das entscheidende Kriterium. So belaufen sich die gewichteten Kosten von Wasserstoff aus einer lokalen Produktion von 160 GWh mittels alkalischer Elektrolyse vor Ort in Mitteleuropa ebenso auf 18 Cent pro kWh, wie es aus einer PV-Anlage in Nordafrika mit 8 TWh Jahreskapazität und Transport per Schiff und Truck der Fall wäre. 1 kg Wasserstoff an der Zapfsäule (damit kann ein FCEV ca. 100 bis 120 km weit fahren) kostete demnach inklusive aller Verluste ca. 10 € [11]. „Günstiger“ als der Transport von Wasserstoff ist der Transport seiner sogenannten Derivate – das können LOHC², Methanol oder Ammoniak sein. Hierfür sind weitere, Energie- und Verlust-behaftete chemische Syntheseschritte erforderlich. Außerdem müssen das für die Synthese erforderliche CO₂ oder Stickstoff ebenfalls klimafreundlich gewonnen und gegebenenfalls zur Syntheseanlage transportiert werden. Im Szenario einer 1,5 GW Elektrolyseanlage in Tunesien mit einer Jahreserzeugung von 85.000 t Wasserstoff (2,8 TWh) würden für den Transport von dessen Derivaten bei der Kapazität heute verfügbarer Transportschiffe 10 bis 11 Fahrten pro Jahr erforderlich sein. Hinzu kämen 59 Fahrten eines CO₂-Transportschiffs für den CO₂-Rücktransport in einem Kreislaufsystem oder aber die Installation von 13 CO₂ Direct Air Capture Anlagen vom aktuell größten Typ „Mammoth“ von Climeworks mit einer Jahreskapazität von 36.000 t. Der Betrieb dieser Anlagen

² LOHC steht für liquid organic hydrogen carrier, übersetzt flüssige organische Wasserstoffträger.

(grob 1.000 kWh pro Tonne CO₂) sowie der Treibstoff für die Transportschiffe (alternativ der Energieverbrauch der Pumpenstationen einer Pipeline – siehe unten) sind zu dem Gesamtenergieeinsatz dieser Kette hinzuzurechnen. So ergeben sich Kosten von 4,59 € für 1 kg Ammoniak bzw. 4,49 € für 1 kg Methanol [12]. Letzteres hätte einen Brennwert von 6,3 kWh – etwas weniger als die Hälfte von LNG (flüssigem Erdgas). Aufgrund der höheren Oktanzahl als bei Benzin kann von einer etwas höheren Effizienz ausgegangen werden, was zu mindestens 11 km Reichweite führen würde. Das Methanol-Brennstoffzellen-Fahrzeug von Gumpert könnte damit 16 km weit fahren (Herstellerangaben: 820 km Reichweite mit einem 65 l Tank). Insgesamt wäre also von folgenden **Treibstoffkosten für 100 km im Pkw** auszugehen:

- BEV, 22 kWh lokal produzierter Ökostrom: 6,23 € Haushaltsstrom, 10,15 € DC Schnellader³
- FCEV, 0,83 kg Wasserstoff – im Beispiel aus Tunesien: 8,30 €⁴
- Methanolbrennstoffzelle, 6,25 kg – ebenso aus Tunesien: 28,06 €⁴
- ICE, 9,09 kg Methanol – ebenso aus Tunesien: 40,82 €⁴

Es bleibt abzuwarten, wie sich Endkundenpreise für synthetische Kraftstoffe entwickeln werden. Die Herstellkosten liegen aktuell um einen Faktor > 10 über denen fossiler Brennstoffe; diese werden allerdings erheblich subventioniert: laut IWF mit fast einer halben Billion € jährlich! [13]

In jedem Fall führen diese Betrachtungen vor Augen, dass das Ausmaß der Individualmobilität westlicher Volkswirtschaften unter dem Aspekt der Ökologie nur schwerlich global auf alle Regionen ausgerollt/übertragen werden kann (sollte). Und auch ein Land wie Deutschland muss sich die Frage stellen, ob es auch künftig sinnvoll sein kann, dass wir 250 Millionen Autositze für 84 Millionen Einwohner haben...

Volts 4 Oil

Wie viel Strom brauchen übrigens Benzin und Diesel?

Betrachtet man – zusätzlich zu den Wirkungsgradverlusten ab Tank – auch noch die Wertschöpfungskette von fossilen Energieträgern für den Verkehr unter energetischen Gesichtspunkten, wird besonders deutlich, wie ineffizient diese Technologie ist: Für die Bereitstellung des Kraftstoffs eines Verbrennerfahrzeugs müssen jährlich rund 1.400 kWh elektrische Energie („*Graustrom*“) aufgewendet werden. Damit allein könnten Elektrofahrzeuge **8.000 km** weit fahren (das sind knapp 2/3 der als Berechnungsgrundlage herangezogenen Jahresfahrleistung von 12.500 km). Umgerechnet „verbraucht“ fossiler Kraftstoff also ca. 11,2 kWh/100 km an elektrischer Energie *zusätzlich* zum eigentlichen chemischen Energieinhalt. Das sind **pro Liter 1,634 kWh**. Hochgerechnet fallen in Deutschland insgesamt knapp 89 TWh pro Jahr an. Das wäre **genug elektrische Energie für 41 Millionen Elektrofahrzeuge** und entspricht 34 % der erneuerbaren Energieerzeugung Deutschlands 2023. Jedoch ist die Herstellung fossiler Kraftstoffe eine energieintensive Industrie, die vor allem Grundlast-Strom aus fossilen oder atomaren Quellen bezieht. Berechnet wurden u.a. nach [7] folgende Aufwände:

- Deutschland importierte 2016 rund 91 Millionen Tonnen Rohöl [16]. 2/5 (weltweit knapp 2 Mrd. t) werden per Schiff, 3/5 mittels Pipelines transportiert [17]. Die Weltflotte von rund 90.000 Schiffen verbrennt etwa 370 Millionen Tonnen Treibstoff pro Jahr und produziert dabei 20 Millionen Tonnen Schwefeloxid [18]. Der deutsche Anteil am Rohölexport erfordert demnach bspw. 195 Tanker zu je 100.000 BRT, die 800.000 t Treibstoff bzw. 347,2 GWh an elektrischer Energie zu deren Herstellung benötigen.

³ Endpreise Stand 27.05.2024 für Deutschland, ausgewählte markenoffene Tarife für Vielfahrer [14][14]

⁴ Kosten, nicht Endpreis!

- Das Rohölpipelinennetz in Deutschland mit 2.004 km Länge [19] erfordert für ca. 88 Pumpen á 1.900 kW (nach [15]) 1,46 TWh pro Jahr an elektrischer Antriebsleistung.
- Für die Raffination von Rohöl werden laut einer Anfrage des Department of Energy in den USA von 2009 rund 1,585 kWh für die Erzeugung eines Liters an Kraftstoff benötigt. Aus der aktuelleren Umwelterklärung 2018 der Gunvor Raffinerie Ingolstadt GmbH lassen sich 1,2275 kWh/l ableiten [20] – hochgerechnet 83,9 TWh pro Jahr in Deutschland.
- 13 Raffinerien beliefern 14.478 Tankstellen in Deutschland [19] mit 54 Millionen Tonnen Treibstoff [21]. Über die Distanz von vereinfacht betrachtet je 100 km würden bspw. über 2 Millionen Fahrten bei Annahme von 26-Tonnern mit 25 l Verbrauch pro 100 km anfallen; allein für die Bereitstellung von deren Kraftstoff fielen nochmals 90,8 GWh an.
- 2,9 TWh Graustrom ist für die Pumpen, Beleuchtung, Klimatisierung und Shop-Betrieb der Tankstellen erforderlich.
- Noch nicht betrachtet wurden in dieser Aufstellung primäre und sekundäre energetische Aufwände für die Exploration von Öl. Erstere werden mit durchschnittlich 14,4 GWh pro fündiger Bohrung beziffert [22]. Auch Aufwände für Terminalbetrieb, Zwischenlager etc. sind noch außer Acht gelassen. Ebenso wurden weitere Aufwände für die Bereitstellung, Distribution und Entsorgung von Betriebsmitteln für Verbrennungsmotoren wie Luftfilter, Schmiermittel, Zündkerzen, Dichtungen, Abgasnachbehandlung etc. noch nicht berücksichtigt.

Unter dem Strich: Die Frage „woher der Strom kommen soll“ kann also kaum ein Argument gegen Elektrofahrzeuge und für konventionelle Verbrenner sein.

Und grundsätzlich: Erdöl ist ein wichtiger Rohstoff für die chemische Industrie und eine begrenzte Ressource um die Kriege geführt werden. Es ist viel zu schade, um massenhaft mit schlechtem Wirkungsgrad verbrannt zu werden. Über 70 % der Ölimporte der EU kommen aus politisch instabilen Regionen [7]. Die Ölförderung geht mit Umwelt- und Klimabelastungen einher: CO₂-Emissionen (40,3 kg CO₂-Äquivalent pro Barrel im gewichteten Durchschnitt aller Regionen durch direkte und indirekte Emissionen sowie Abfackelung), hoher Energieverbrauch bei konventioneller Förderung und sogar 7-8fach höherer Aufwand bei Ölsand, Sondermüll (529.000 Tonnen 2014 alleine bei Shell) und unbeabsichtigte Ölaustritte (Shell verzeichnet etwa 1 Vorfall > 100 kg pro Tag). Hinzu kommen fortlaufend Ölunfälle auf Offshore Plattformen und an Land, Raffinerie-Unfälle und Tankerunglücke mit mehreren Millionen Tonnen auslaufenden Öls und katastrophalen Folgen [23].

Rohstoffe

Woraus bestehen Batterien und sind diese Rohstoffe knapp?

Abbildung 3 zeigt die Zusammensetzung einer typischen Li-Ionen Batterie Anfang der 2020er Jahre. Hersteller sind bestrebt, die Energie- und Leistungsdichte zu steigern, in dem sogenannte Passivmaterialien reduziert werden. Es soll also der Anteil an Elektrodenmaterial in Relation zu den übrigen Tragstrukturen (z.B. Gehäuse) und Funktionselementen (z.B. Stromschienen) gesteigert werden. Dies führt entweder zu einem abnehmenden Batteriegewicht oder die Reichweite bzw. Leistung steigt bei gleichbleibenden Packgrößen.

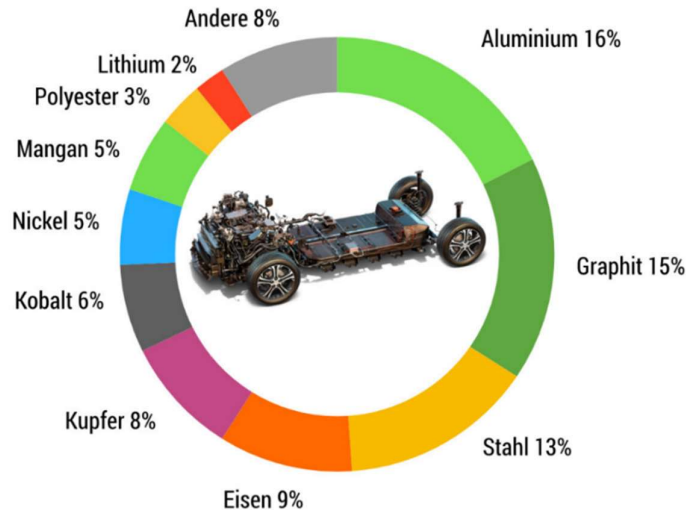


Abbildung 3: Rohstoffbestandteile einer Elektrofahrzeug-Batterie am Beispiel eines Chevrolet Bolt [24]

Batteriezellen enthalten im Gegensatz zu manchen Motoren oder Leistungselektronik übrigens keine seltenen Erden.

Selbst bei einer starken Marktdurchdringung von Elektrofahrzeugen (optimistisches Szenario) sind die globalen Ressourcen der oben aufgeführten Rohstoffe ausreichend, um den Bedarf zu decken. Zudem wird die Versorgung durch eine stark zunehmende Kreislaufwirtschaft kontinuierlich verbessert (siehe Kapitel Recycling). Gleichwohl können temporäre Rohstoffverknappungen am Markt zu teils drastischen Preisanstiegen einzelner Rohstoffe führen, was vor allem für Lithium und Kobalt erwartet wird. Hierbei sind vorübergehende Verknappungen insbesondere auf nicht ausreichende Erschließung von Vorkommen im Zusammenhang mit komplexen politischen Situationen zurückzuführen. Im Folgenden werden Vorkommen, Verwendung und Bedarfsprognose für Lithium, Kobalt und Nickel dargestellt [25].

Lithium

Verwendung	<ul style="list-style-type: none"> 36% der aktuellen Fördermenge wird zur Herstellung von Lithium-Ionen-Akkus für E-Fahrzeuge verwendet
Größte Förderländer 2022 [26]	<ul style="list-style-type: none"> Australien (61.000 Tonnen) Chile (39.000 Tonnen) China (19.000 Tonnen) Argentinien (6.200 Tonnen)

Jahresproduktion von Lithium [27]	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 53.000 Tonnen in 2016 ▪ 180.000 Tonnen in 2022
Globaler Bedarf	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 275.000 Tonnen 2030 ▪ 1,1 Millionen Tonnen 2050
Vorhandene Reserven (aktuell bekannte, mit der vorhandenen Technologie rentabel ausbeutbare Vorkommen)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 14 Millionen Tonnen
Vorhandene Ressourcen (aktuell bekannte, aber noch nicht rentabel ausbeutbare Vorkommen)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 47 Millionen Tonnen
Recyclingquote	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Experten rechnen damit, dass künftig bis zu 98 % des Lithiums aus Lithium-Ionen-Batterien recycelt werden könnte. Derzeit wird diese Möglichkeit aber noch kaum genutzt.

Kobalt

Verwendung	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 41 % der aktuellen Fördermenge wird zur Herstellung von Lithium-Ionen-Akkus für E-Fahrzeuge verwendet
Größte Förderländer 2022 [28]	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Demokratische Republik Kongo (170.200 Tonnen) ▪ China (18.000 Tonnen) ▪ Australien (4.600 Tonnen)
Jahresproduktion von Kobalt [28]	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 129.000 Tonnen in 2016 ▪ 230.000 Tonnen in 2022
Globaler Bedarf	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 400.000 Tonnen 2030 ▪ 800.000 Tonnen 2050
Vorhandene Reserven (aktuell bekannte, mit der vorhandenen Technologie rentabel ausbeutbare Vorkommen)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 7 Millionen Tonnen
Vorhandene Ressourcen (aktuell bekannte, aber noch nicht rentabel ausbeutbare Vorkommen)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 25-120 Millionen Tonnen
Recyclingquote	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 95 % des in Batterien verwendeten Kobalts müssen laut EU-Richtlinie bis 2030 wiedergewonnen werden [29]

Nickel

Verwendung	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 2 % der aktuellen Fördermenge wird zur Herstellung von Lithium-Ionen-Akkus für E-Fahrzeuge verwendet [30]
Größte Förderländer 2022 [31]	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Indonesien (1,6 Millionen Tonnen) ▪ Philippinen (330.000 Tonnen) ▪ Russland (220.000 Tonnen) ▪ Neukaledonien (190.000 Tonnen) ▪ Australien (160.000 Tonnen)
Jahresproduktion von Nickel [31]	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 2 Millionen Tonnen in 2016 ▪ 3,6 Millionen Tonnen in 2022
Globaler Bedarf	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 125.000 Tonnen 2030 ▪ 700.000 Tonnen 2050
Vorhandene Reserven (aktuell bekannte, mit der vorhandenen Technologie rentabel ausbeutbare Vorkommen)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 130 Millionen Tonnen [32]
Vorhandene Ressourcen (aktuell bekannte, aber noch nicht rentabel ausbeutbare Vorkommen)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 300-400 Millionen Tonnen
Recyclingquote	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 95 % des in Batterien verwendeten Nickels müssen laut EU-Richtlinie bis 2030 wiedergewonnen werden [29]

Produktion

Woher kommen Batterien (heute) – und was hat es mit dem CO₂-Rucksack auf sich?

Im Zuge globaler Skalierungsaktivitäten wird der weltweite Absatz von Lithium-Ionen-Batterien für das Jahr 2023 erstmals über der Marke von 1 TWh gesehen. Bis 2030 dürfte sich die Nachfrage mehr als verdreifachen. Dem tragen Ankündigungen von Anoden- und Kathodenmaterial-Herstellern Rechnung sowie publizierte Roadmaps der Zellhersteller, Automobil-OEMs, Start-ups und ihrer Joint Ventures [33].

Treiber der Marktentwicklung sind Batterien für Elektrofahrzeuge mit einem Gesamtvolumen von 558 GWh in 2022 [34]. Abbildung 4 zeigt die sechs aktuell größten Hersteller mit deren Produktionskapazitäten in GWh und ihren Anteil am globalen Lithium-Ionen Batteriemarkt:

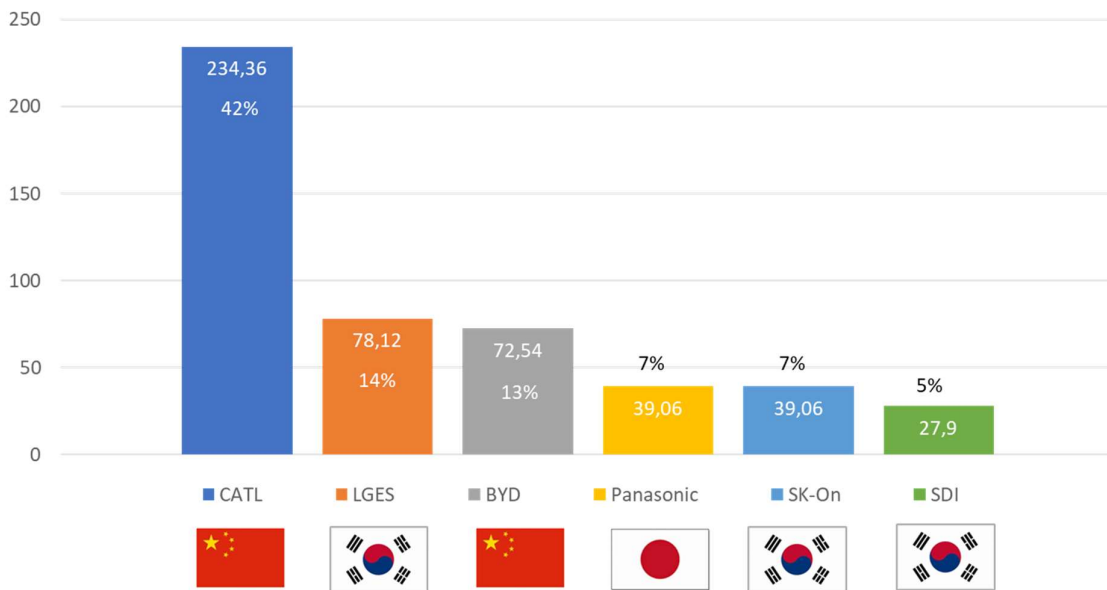


Abbildung 4: Batterie-Hersteller, Länder und Produktionskapazität in GWh [34]

Die Branche wird von asiatischen Herstellern dominiert. Europäische Unternehmen sind darauf angewiesen, dass die zugekauften Systeme unter ökologischen und humanitären Bedingungen produziert werden und sehen sich kommerziell einem Anbietermarkt ausgesetzt.

Realistische Einschätzungen der Pläne zum Aufbau europäischer Zellproduktionskapazitäten gehen bis 2030 von rund 1 TWh hiesiger Produktionskapazität aus – vorausgesetzt, dass politische Entscheidungsträger diesen Weg konsequent umsetzen. Es wird angestrebt, 30 Prozent der weltweiten Zellproduktion auf europäischem Boden anzusiedeln [33].

CO₂-Ausstoß bei der Batterieproduktion

Während bei konventionellen verbrennungsmotorisch betriebenen Fahrzeugen etwa 20 % der CO₂-Emissionen bei der Produktion und 80 % im Betrieb anfallen, ist dieses Verhältnis bei BEV anders. Die Produktion der Rohstoffe trägt erheblich zur CO₂-Gesamtbilanz bei. Werden dann noch Leichtbauwerkstoffe in der Karosserie eingesetzt, die in der Herstellung sehr energieintensiv sind, trägt die Produktion je nach verwendetem Strom-Mix 50-80 % zur CO₂-Gesamtbilanz in Produktion und Betrieb bei [6].

Die Bestandteile von Batterien haben folgende Emissionen bei deren Herstellung:

- Kupfer: 9 kg CO₂-Äquivalente pro kWh Akkukapazität
- Aluminium: 6 kg CO₂-Äquivalente pro kWh Akkukapazität
- Kobalt: 5 kg CO₂-Äquivalente pro kWh Akkukapazität
- Lithium: 5 kg CO₂-Äquivalente pro kWh Akkukapazität
- Nickel: 5 kg CO₂-Äquivalente pro kWh Akkukapazität
- Sonstige Teile: 35 kg CO₂-Äquivalente pro kWh Akkukapazität [35].

Das IFEU in Heidelberg nennt ungefähre Werte für die Emissionen bei der Produktion eines Gesamtspeichers: Demnach kann man für eine kWh Batteriekapazität etwa 125 kg CO₂-Emissionen ansetzen [36]. Bei 95 g/km CO₂ entspricht dies $125.000/95=1.315,789$ km Äquivalent eines Verbrenners. Selbst eine Batterie mit 100 kWh amortisiert sich also noch deutlich vor Ende der Fahrzeuglebensdauer.

Selbst im ungünstigsten Fall spart ein durchschnittliches BEV in 13 Jahren gegenüber einem Diesel-Kleinwagen 5 Tonnen CO₂-Emissionen ein, gegenüber einem Oberklasse-Benziner 23 Tonnen; relativ gesehen liegt die CO₂-Reduktion zwischen 28 % und 42 %. Dieser Betrachtung liegt der Strommix in Deutschland von 2019 mit einem Anteil von erneuerbaren Energien von 36 Prozent zugrunde. Eine konsequente Nutzung von Ökostrom zur Herstellung und Ladung von BEV resultiert hingegen in Einsparungen der Treibhausgasemissionen von 65 % – 75 % [37]. Langfristig wird das BEV folglich immer besser abschneiden.

Die Schwedenstudie

Exkurs: Wie aus einer Studie über journalistische Fehler ein Mythos wurde ...welcher von bestimmten Medien jedoch nur zu gerne aufgegriffen wird ([38], ergänzend siehe auch [39]-[43])

- Am 14. Juni 2017 erschien [in der "Welt"](#) (und weiteren Medien) ein kurzer Artikel über die CO₂-Emissionen, die angeblich bei der Produktion von Akkus für Elektroautos anfallen. Die Metastudie des schwedischen Umweltforschungsinstituts IVL, die später als "*Schweden-Studie*" bekannt wurde, hatte ihrerseits mehrere Studien untersucht. Eine Aussage tauchte seitdem in vielen Diskussionen über die Klimafreundlichkeit von Elektroautos auf: *Ein E-Auto-Akku sei für über 17 Tonnen CO₂ verantwortlich und amortisiere sich erst nach 8 Jahren.*
- "Schuld" ist der schwedische Journalist Johan Kristensson. In einem [Artikel für das Magazin Ny Teknik](#) nutzte er die Zahlen als Beispiele. "Ich wollte dem Leser eine Vorstellung davon vermitteln, was das für Autos solcher Größe bedeutet." Aber: "Da eine 100-Kilowattstunden-Batterie eine im Vergleich sehr große ist, ist die Aussage, dass ein durchschnittlicher E-Auto-Akku solche Emissionen verursacht, natürlich nicht gültig."
- Das dänische Magazin "Ingeniøren" [übernahm den Text](#) von "Ny Teknik" im Rahmen einer Kooperation. Diesen Text griff wiederum der Journalist Jon Thulstrup für das dänische Portal [nordschleswiger.dk](#) auf, das seinerseits mit der Schleswig-Holsteiner-Zeitung kooperiert. [Deren Übersetzung](#) griff schließlich die Motor-Agentur Spotpress auf, welche unter anderem den Springer-Verlag (Welt) und Burda (Focus) mit Mobilitätsthemen beliefert. In der Übersetzung ist der Sachverhalt noch zurückhaltend formuliert: "Damit sich ein Elektro-Auto von der Größe eines Tesla Model S ökologisch rechnet", heißt es dort, "muss man acht Jahre damit fahren."
- In zahlreichen „Zitaten“ taucht seitdem der Hinweis darauf *nicht* mehr auf, dass es sich bei der ursprünglichen Quelle um eine Metastudie handelt und Kristensson mit der überdurchschnittlichen 100 kWh-Batterie ein plakatives Anschauungsbeispiel einführte.
- Der Zeitraum von acht Jahren beruht im Übrigen auf einer Berechnung des IVL-Forschers Mats-Ola Larsson, die Kristensson in seinem Artikel ebenfalls zitiert. Aber auch da heißt es: "Acht Jahre für eine Batterie in [größter] Tesla-Größe, wenn man eine Reihe von Annahmen zugrunde legt."
- Larsson rechnet nämlich zum Beispiel, wie in Schweden üblich, auch alle Hybride zu den Verbrennern, was die Durchschnittsemissionen natürlich deutlich senkt. In Schweden besteht Benzin zudem zu einem Fünftel aus Ökokraftstoffen, die nicht in die Rechnung einfließen. Und: Der Forscher hat den Durchschnittswert eines Korridors gewählt, den die beiden Autorinnen der "Schweden-Studie" angeben – der aber nicht qualitativ gewichtet ist. So kommt Larsson letztlich auf eine Klimabelastung des Akkus von etwa 170-180 kg CO₂ pro kWh Kapazität. Realistische Werte dürften [nach \[edison.handelsblatt.com\]](#) mindestens 30 kg niedriger sein.
- Kristensson: "Viele interpretierten die Studie leider so, dass die Ergebnisse direkt auf eine Tesla-Batterie anwendbar seien – aber das ist falsch. Und in meinem Artikel habe ich auch klar geschrieben, dass dies nicht geht."

Wirtschaftspolitik und Verantwortung

Fakten und Kontext zu Kinderarbeit und Wasserverbrauch

Die Gewinnung von Kobalt und Lithium kann – wie bei allen Rohstoffen – erheblichen sozialen und ökologischen Einfluss auf die Gesellschaften der Abbauregionen haben. Sie sind daher gute Beispiele, weshalb nur verantwortungsbewusste Ökonomien damit betraut sein sollten.

Artisanaler Kobaltabbau im Kongo

Oft wird die Elektromobilität mit Kinderarbeit in Verbindung gebracht. Der Kontext hierzu ist wiederkehrend die Berichterstattung über den Abbau von Kobalt in Afrika. Tatsächlich liegen ca. 50 % der weltweiten Kobaltreserven in der DR Kongo. Davon werden je nach Quelle ca. 15-25 % im artisanalen Kleinbergbau gewonnen [44]. (Unsicherheitsbehaftete) Schätzungen legen daraus resultierend 3-4 % Anteil von Kinderarbeit an der weltweiten Kobaltproduktion nahe. Davon werden ca. 18 % für die Elektromobilität verwendet [45]. Folglich können 0,3 Promille der Bestandteile einer Fahrzeugbatterie einen Kinderarbeit-Anteil enthalten – was im westlichen Verständnis ohne Frage nicht tolerierbar ist. Dies muss genauso für alle anderen Bereiche, in denen Kobalt eingesetzt wird, gelten. Abbildung 5 zeigt die Verwendung von Kobalt in der Industrie.

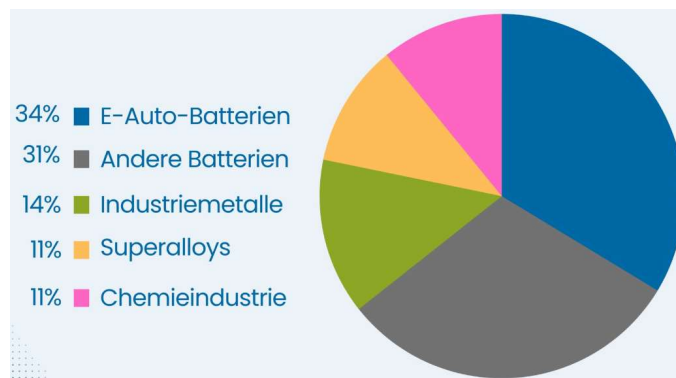


Abbildung 5: Verwendung von Kobalt (2021) in verschiedenen Industrieprodukten [46]

Es ist sehr zu begrüßen, dass verantwortungsvolle Staaten Lieferkettengesetze einführen und die EU bspw. mit der Batterieverordnung auf Nachhaltigkeit in der Beschaffung setzt [47].

Die Elektromobilität allein „verursacht“ Kinderarbeit jedoch entgegen mancher populistischen Aussage nicht.

Da das Thema in der Berichterstattung emotional aufgeladen wird, folgen einige Hintergründe und Fakten:

61 % der Kobaltproduktion werden als Nebenprodukt aus dem Kupfer- und 37 % aus dem Nickelbergbau gewonnen. Weltweit werden lediglich 2 % des Kobalts als Primärprodukt gefördert, dabei handelt es sich vor allem um die Förderung aus Primärkobaltlagerstätten in Marokko sowie den selektiven artisanalen Abbau in der DR Kongo.

Zu Kobalt-Lieferketten mit Bezug zur DR Kongo wurde in den letzten Jahren wiederholt Kritik von zivilgesellschaftlicher Seite geäußert und die verstärkte Umsetzung von Sorgfaltspflichten der Abnehmer eingefordert, um den sozialen Missständen wie Kinderarbeit oder prekären Arbeitsbedingungen bei der Förderung zu begegnen.

Der Zusammenbruch des kongolesischen Bergbausektors, einhergehend mit dem Niedergang der parastaatlichen Unternehmen, infolge von Kriegen, Krisen und Misswirtschaft in den 1990er Jahren führte zu einer Ausbreitung des artisanalen Kleinbergbaus.

Mit der erneuten sukzessiven Etablierung des privatwirtschaftlich dominierten Bergbaus, insbesondere im vergangenen Jahrzehnt, wird Kobalt in der DR Kongo heute überwiegend als Nebenprodukt der industriellen Kupfergewinnung in Tagebergbau gewonnen.

Die OECD, das europäische Parlament sowie die USA (Dodd-Frank Act) regeln Berichts- und Sorgfaltspflichten (Legalität, keine schwere Form der Kinderarbeit, keine Konfliktfinanzierung und Nachverfolgbarkeit der Lieferkette.)

Dies führte dazu, dass auch einige Unternehmen und Industrievereinigungen in der nachgelagerten Kobalt-Lieferkette die Notwendigkeit zur Sorgfaltspflicht besonders betonen. Die Chinese Chamber of Commerce for Metals, Minerals & Chemicals (CCCCM) hat gemeinsam mit einigen zum Teil internationalen Unternehmen bspw. die Responsible Cobalt Initiative (RCI) ins Leben gerufen.

CRU international Ltd. schätzt die Jahresförderung des artisanal gewonnenen Kobalts im Jahr 2014 auf etwa 8.000 t Kobalt und für das Jahr 2015 auf etwa 10.500 t. Der Anteil schwankt in Abhängigkeit von sozialen und ökonomischen Faktoren in der Region (Abbildung 6).

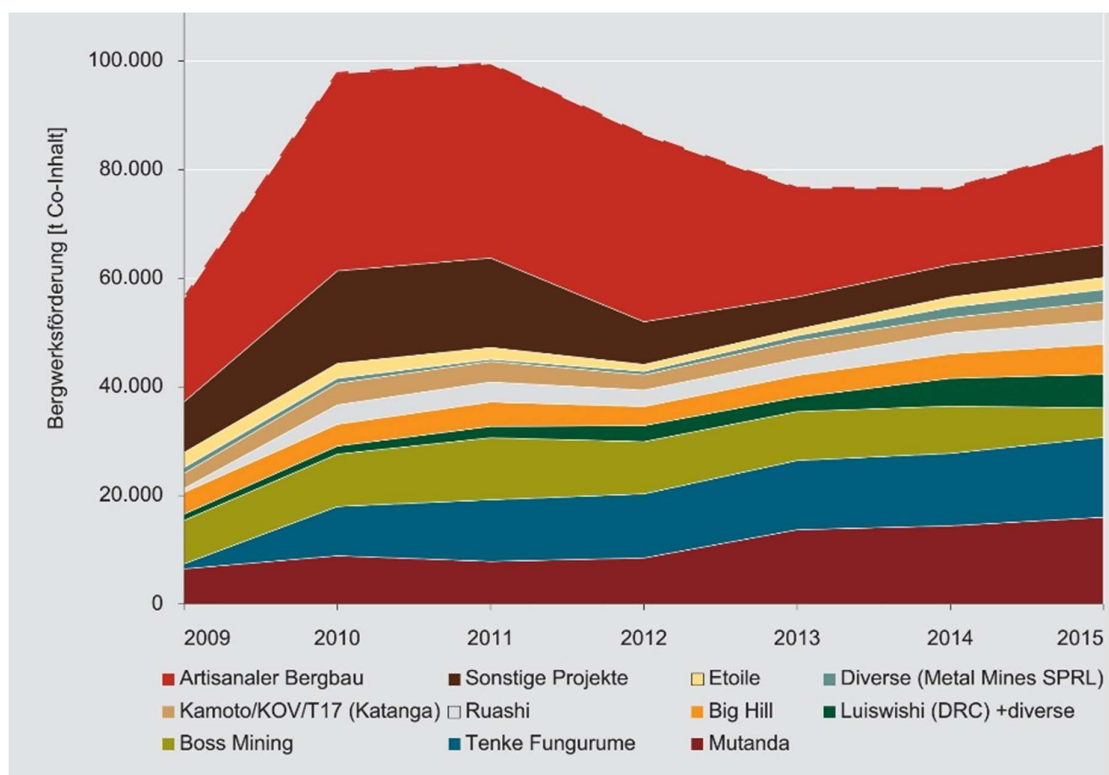


Abbildung 6: Entwicklung der Kobaltförderung im Kongo [48]

In den Jahren 2015 und 2016 wurden geschätzt 15-20 % der kongolesischen Kobaltförderung im artisanalen Abbau gewonnen, dies entspricht etwa 12.000-18.000 t mit einem Gesamtexportwert von etwa 330-500 Millionen US\$. Amnesty International schätzt 2016, dass nach wie vor 110.000-150.000 Menschen im artisanalen Kobaltbergbau aktiv sind.

Deren Anzahl ist in der Größe in etwa vergleichbar mit der Anzahl an Personen, die im gesamten Ostkongo Zinn, Tantal und Wolfram im Kleinbergbau gewinnen, deren Förderung seit mehreren Jahren im Fokus der internationalen Aufmerksamkeit steht (z. B. „Blutcoltan“).

Der artisanale Abbau erfolgt sowohl Untertage als auch im Tagebau auf historischen Halden. Die im Kleinbergbau gewonnenen Konzentrate werden an lokale Zwischenhändler in den Abbauregionen verkauft und von diesen an die größeren im Land etablierten, zumeist chinesischen und indischen Handelsgesellschaften und Aufbereiter weiterveräußert.

Während einige Kleinbergleute den Abbau als Hauptberuf permanent betreiben, dient er anderen als Ergänzung der Subsistenzlandwirtschaft und wird entsprechend saisonal oder „in Teilzeit“ betrieben.

Sowohl das Öko-Institut e.V. als auch Amnesty International (unter Berufung auf eine UNICEF Erhebung aus dem Jahr 2011) weisen in ihren Studien auf die Verbreitung der Kinderarbeit im artisanalen Kobaltabbau in der DR Kongo hin. Die dort vorgenommenen Schätzungen liegen bei ca. 40.000 Kindern. Für die Region Katanga gegen konservative Schätzungen von mindestens 22.000 Kindern aus [49].

Diese Schätzungen basieren auf einer aus einer kleinen Stichprobe heraus auf die gesamte Katanga-Provinz hochgerechneten Zahl. Sie sind daher mit einer hohen Unsicherheit behaftet. Es ist jedoch unstrittig, dass eine signifikante Anzahl an Kindern im kongolesischen Kobalt-Sektor beschäftigt ist. Dokumentierte Beispiele (z.B. zdf 2018 [50]) zeigen etwa Kinder, die ihre Mütter begleiten, die am Fluss Kobalterz waschen.

Die prekären Abbaubedingungen für 18.000 Tonnen Kobalt durch 150.000 Menschen sind nicht akzeptabel. Im Kontext anderer Industrien wird jedoch deutlich, dass noch wesentlich schlimmere Bedingungen existieren, die aktuell nicht in der öffentlichen Debatte stehen. Zur Einordnung: Das unprofessionelle „Recycling“ (offenes Einschmelzen) von konventionellen Bleibatterien bspw. bedroht direkt die Gesundheit von 1 Million Menschen [51]. In Afrika allein werden jährlich 1,23 Millionen Tonnen Altbatterien (Blei) aus Benzin- und Dieselfahrzeugen eingeschmolzen [52].

Wasserverbrauch in der Atacama-Wüste

Argentinien und Chile bedienen etwa ein Drittel des globalen Lithium Markts und sind die mit Abstand größten Lieferanten von Lithium-Carbonat aus Sole [53]. Die Förderung erfolgt in dieser Region durch Verdunstungsbecken, in die salzhaltige Lake gepumpt wird.

Auch dieses Thema wird oft mit hohen Emotionen diskutiert. Daher wird im Folgenden einiges an Kontextinformationen dargelegt am Beispiel des Salar de Atacama:

Die Atacama ist mindestens 15 Millionen Jahre alt und war schon immer Wüste. Es leben 0,24 Einwohner pro Quadratkilometer [54], 50 Siedlungen in der Atacama nehmen gerade mal anderthalb Quadratkilometer ein. Die größte Siedlung hatte Anfang der 2000er Jahre keine 2.000 Einwohner und nur 690 Häuser [55], [56].

Im Salar verdunsten auf natürliche Weise jährlich 145 Mrd. l Wasser. Nach einer Abschätzung aus dem Jahr 1996 erreichen den Salar jährlich 52 Mrd. l Wasser durch oberirdische, und 90 Mrd. l durch unterirdische Zuflüsse. Davon werden 27 Mrd. l für landwirtschaftliche Bewässerung abgezweigt [57].

Heiner Marx vom deutschen Ingenieursdienstleister K-Utec, der die Lithiumförderung in Bolivien mitentwickelt hat, erklärt: "Am bolivianischen Salar de Uyuni gibt es drei Monate Regenzeit, mit einem Wasserüberstand von bis zu einem halben Meter, sodass der Verbrauch bei der Solarevaporation mehr als ausgeglichen wird." [58]

Die vielzitierte Relation „zwei Millionen Liter Sole pro gewonnener Tonne Lithium“ geht zurück auf eine Aussage des forensischen Geologen Fernando Díaz [im Magazin "Exactamente"](#) der Universität Buenos Aires aus dem Jahr 2011. In ihr untersuchten die Forscher die Sole an verschiedenen Orten und geben auch den Lithium-Gehalt pro Liter an. Sie kamen dabei auf die Werte, die Díaz für die von ihm genannten Orte anführt. Aber an anderen Förderorten wie etwa der Salar de Atacama ist die Lithium-Konzentration wesentlich höher, sodass in Summe und rein rechnerisch bei der Lithium-Gewinnung statt zwei Millionen nur noch 0,4 Millionen Liter Wasser verdunsten. Das Unternehmen SQM fördert laut [Geschäftsbericht 2017 \(pdf\)](#) etwa 48.000 Tonnen Lithiumcarbonat im Jahr. Daraus könnten 13.000 Tonnen Lithium gewonnen werden – das entspräche anderthalb statt zwei Millionen Litern [58].

Der Durchschnittliche Li-Anteil pro Akku (2018) liegt bei etwa 15 kg. „Damit wäre ein Akku im günstigsten Fall für einen Sole-Verbrauch von etwa 6.000 Litern verantwortlich – im ungünstigsten Fall für rund 30.000 Liter. Doch ob nun 6.000 oder 30.000 Liter Sole in einer Wüste – das ist immer noch viel, keine Frage. Aber dem stehen zwischen 10.000 und 30.000 Liter Benzin oder Diesel gegenüber, die über seine Laufzeit in einen Verbrennungsmotor fließen. Es handelt sich also um etwa dieselbe Menge, aber mit einem Rattenschwanz an Folgen. In Nigeria sind durch die Erdölförderung Mangroven, Sümpfe, Flussarme und Trinkwasser verseucht. Und vor Mexiko verendeten nach der durch die Explosion der Förderplattform Deepwater ausgelösten Ölpest 2010 Millionen Vögel und Fische. Und die 21.000 Millionen Liter im Salar sind nur ein Dreißigstel der Menge Wasser, die im Lausitzer Braunkohlerevier täglich abgepumpt werden muss. [Da] ist es schwierig wie ungerecht, den lateinamerikanischen Staaten die Lithiumförderung vorzuwerfen.“ [58]

Lebensstil und Klimawandel

Kontext: Wasserverbrauch und CO₂-Ausstoß im übrigen Konsum und Alltag

Wasserverbrauch der Herstellung von Lebensmitteln und Gebrauchsgütern

Viele Lebensmittel und Gebrauchsgüter verursachen einen sehr hohen Wasserverbrauch – auch indirekt. Abbildung 7 zeigt einige Beispiele für sogenanntes „virtuelles Wasser“:

„Virtuelles Wasser“ wird unterschieden in

- „grünes virtuelles Wasser“: z.B. Niederschlag oder Bodenfeuchte
- „blaues virtuelles Wasser“: künstlicher Wassereinsatz
- „graues virtuelles Wasser“: wird während der Nutzung beeinträchtigt (z.B. durch Düngemittel, Pestizide oder Industrieabfälle) und kann nur bedingt wiederverwendet werden [59].

Während landwirtschaftliche Erzeugnisse und Folgeprodukte (z.B. Rindfleisch mit 16.726 l/kg) vor allem infolge von grünem virtuellem Wasser aufscheinen, sind Öl- und Gasförderung vor allem durch blaues und graues virtuelles Wasser belastend. Wenn durch Schwermetalle und giftige Salze kontaminiertes Formationswasser, das bei der Ölförderung mit zu Tage kommt, nicht zurückgepumpt wird, entstehen folgenschwere Umweltauswirkungen für Flüsse, Oberflächen- und Grundwasser [60]. Um Öl aus Ölsand zu gewinnen, wird sogar bis zu doppelt so viel Wasser verbraucht [61], siehe auch [62]. Beim Fracking werden zwischen acht und 19 Millionen Liter Wasser für die Ausbeutung einer Gasquelle benötigt [63]. In Raffinerien benötigt man zweieinhalb Liter Wasser, um einen Liter fossilen Kraftstoff herzustellen. Weltweit werden aktuell ca. 1.000 Barrel pro Sekunde verbraucht [64], deren Raffination täglich also über 34 Mrd. l virtuelles Wasser bedeuten.

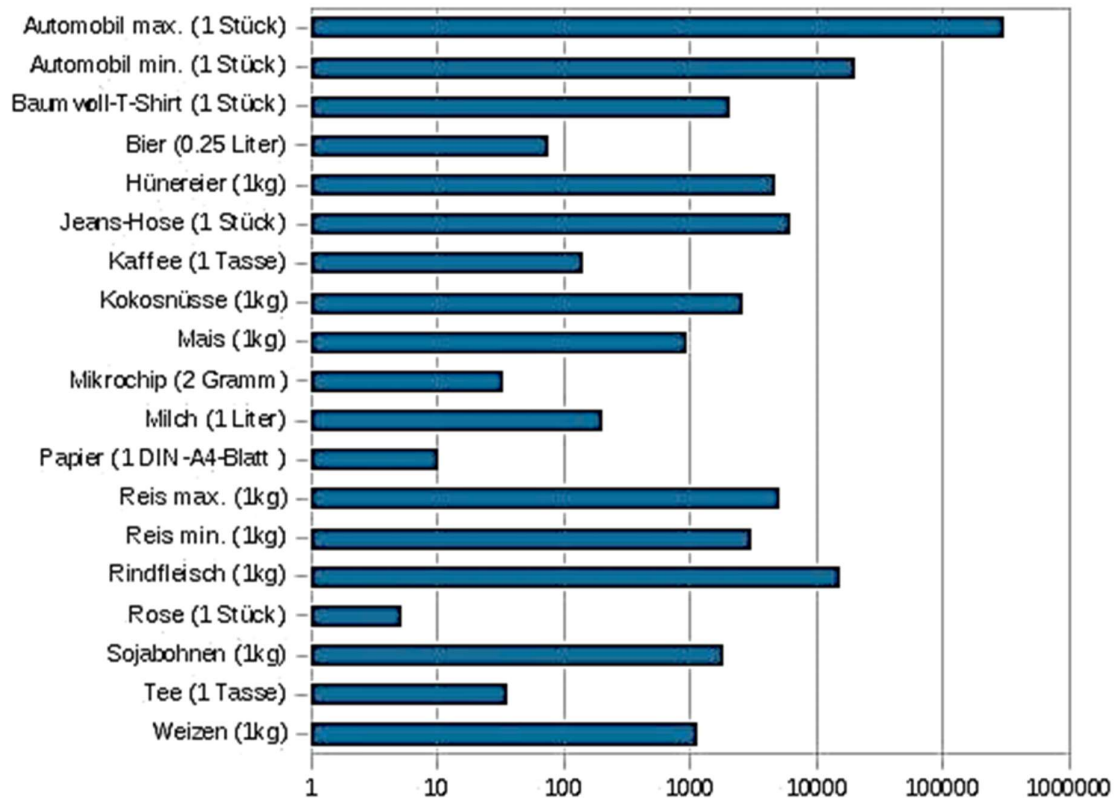


Abbildung 7: logarithmische Darstellung des virtuellen Wasserverbrauchs für verschiedene Alltagsgüter in Liter [65]

CO₂-Ausstoß im Vergleich

Bei einem Kohlenstoffausstoß von ab heute 250 Gigatonnen besteht Modellrechnungen zufolge noch eine Chance, die Erderwärmung auf 1,5 Grad zu begrenzen. Derzeit werden weltweit etwa 40 Gigatonnen CO₂ pro Jahr emittiert. Das weltweite Budget wäre demnach bei aktuellem Emissionsniveau in sechs Jahren aufgebraucht [66]. Bei einer angenommenen mittleren Weltbevölkerung von 8,2 Mrd. Personen im Zeitraum von 2020 bis 2050 bedeutet dies, dass jedem Menschen auf dieser Erde ein **klimaverträglicher Ausstoß von im Durchschnitt noch jährlich knapp 2 t CO₂** zusteht. Technologien und Geschäftsmodelle zur Dekarbonisierung sind heute schon marktreif. Sie kommen aber nicht in die Anwendung, weil Benzin, Diesel, Heizöl und Gas viel zu billig sind [67].

Weltweit werden fossile Energien laut Internationalem Währungsfonds mit rund 500 Milliarden Dollar pro Jahr subventioniert. Nachgelagerte Subventionen und Kosten, die Volkswirtschaften durch die Nutzung fossiler Energien entstehen, summieren sich auf 4.300 Milliarden Dollar. In einer umfassenden Analyse wurden hierfür auch Gesundheits- und Umweltschäden berücksichtigt [68]. Die Ölförderung allein verursacht über 500 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalent täglich (1.000 bbl/s á 40,3 kg CO₂). In weiterer Folge emittieren die fossilen Kraftstoffe im Verkehr dann 7,3 Milliarden Tonnen CO₂ [64]. Effiziente Fahrzeuge können den persönlichen CO₂-Fußabdruck um bis zu 9 % (Median 3,7 %) verringern [69]. Dennoch ist der Einfluss eines Fahrzeugs immer nur ein kleiner Anteil (26,6 % der Emission dem eines Privathaushalts [70]). Ein Elektrofahrzeug zu halten, ist 28-42 % „besser“ als einen Verbrenner (siehe oben). Noch besser sind jedoch immer Carsharing, ÖPNV oder wo immer möglich der Verzicht auf

motorisierten Verkehr. Dieser ist jedoch nur einer von mehreren Sektoren, die es allesamt zu optimieren gilt (Abbildung 8).

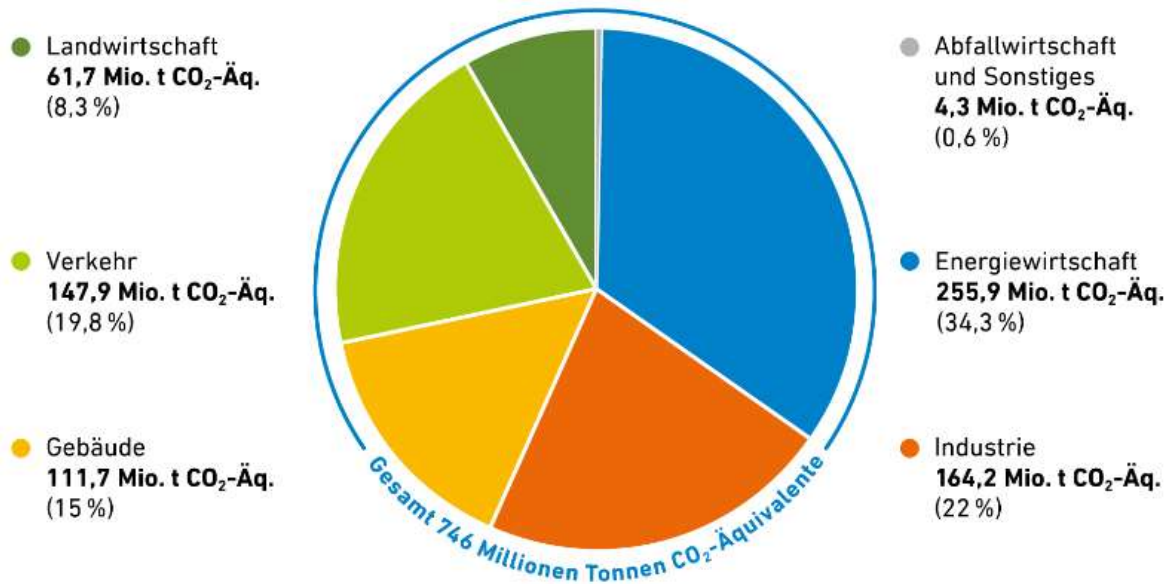


Abbildung 8: CO₂-Ausstoß in Deutschland 2022 nach Sektoren [71]

Während Energie, Industrie und Landwirtschaft durch den Einzelnen nur mittelbar (bspw. durch Wahlentscheidungen) beeinflusst werden können, sind Verkehr und Haushalt direkt durch eigene Entscheidungen beeinflussbar. Abbildung 9 zeigt die durchschnittliche Verteilung der Faktoren für CO₂-Emissionen privater Haushalte. Der Bereich Wohnen spielt dabei die größte Rolle. Energieeffiziente Haushaltsgeräte (vor allem Kühl- und Gefrierschränke oder Wäschetrockner) und klimaschonende Heizungsanlagen, Dämmung, Solarthermie sowie Photovoltaik sind starke Hebel.

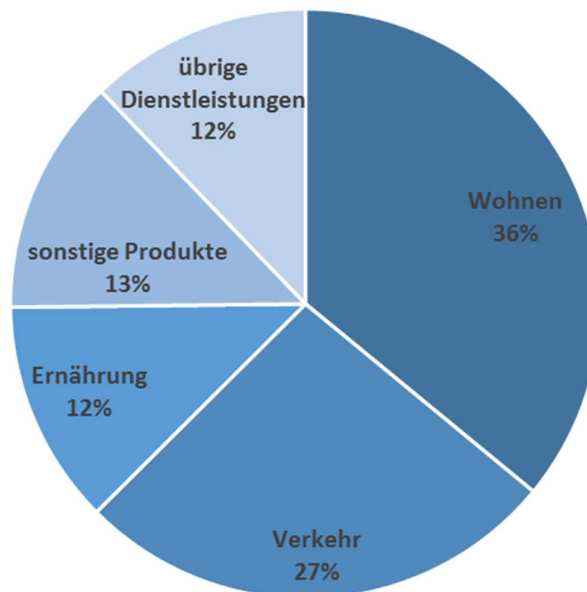


Abbildung 9: CO₂-Emissionen privater Haushalte 2019 gemäß Statistischem Bundesamt [72]

Konsum und Ernährung machen die nächstgrößten Anteile aus. Weniger Tierprodukte können den persönlichen CO₂-Fußabdruck um bis zu 22 % (Median 4,7 %) verringern [69]. Um ein kg Rindfleisch zu erzeugen, sind bis zu 25 kg Futter und entsprechende Anbauflächen notwendig. 200 g Steak entsprechen dann 5.340 g CO₂-Äquivalent [69], [70]. Die Herstellung einer durchschnittlichen 30 kWh Batterie entspricht also 700 Steaks. Zudem muss auf regionale Herkunft geachtet werden. Die Gesamtemissionen für den Transport eines kg Weintrauben aus Chile belaufen sich bspw. auf 7.410 g [71].

Und auch andere ausgewählte alltägliche CO₂-Quellen sind bemerkenswert und unterliegen unserem direkten Einfluss:

- 1.000 Google Anfragen erzeugen 7 kg CO₂-Äquivalent [73].
- Ein Baumwollpullover erzeugt 10 kg CO₂-Äquivalent [73].
- Die Haltung einer Katze kommt für Futter, Müll und Reinigungsaufwand auf insgesamt 2.200 kg Kohlenstoffdioxid im Jahr. Das entspricht einem durchschnittlichen Kleinwagen mit 6 Litern Verbrauch und rund 16.000 gefahrenen Jahreskilometern [74].
- Flugreisen sind besonders umweltschädlich. Ein Flug von Deutschland auf die Kanarischen Inseln und zurück verursacht pro Person einen Ausstoß von ca. 1.800 kg klimaschädlichem CO₂. Mit einem vollbesetzten Mittelklassewagen kann man dafür rund 45.000 km weit fahren [75].
- Ein Kreuzfahrtschiff stößt pro Tag so viel CO₂ aus wie fast 84.000 Autos, so viel Stickoxide wie etwa 421.000 Autos, so viel Feinstaub wie etwa über 1 Million Autos und so viel Schwefeldioxid wie gut 376 Millionen Autos [76].

Insgesamt belaufen sich die CO₂-Emissionen eines Deutschen im Schnitt auf 11,3 Tonnen [77]. Über 1/10 davon sind übrigens Emissionen, die sich aus öffentlichen Dienstleistungen, wie Gesundheitswesen, Verwaltung, Verteidigung, Bildung etc. ergeben [73]. Diese allein machen ungefähr die Summe aus, die dem Individualverkehr zuzuschreiben ist. Und noch einmal zur Einordnung von Elektrofahrzeugen: Bei 40 kWh Batterie über 8 Jahre Laufzeit und mit 12.500 km pro Jahr (18 kWh/100 km) beläuft sich der CO₂-Ausstoß auf jährlich 1.480 kg im aktuellen Strommix. Was bedeutet das für unseren Lebensstil und unsere Konsumententscheidungen?

Vorweg: *„Es ist global betrachtet nahezu vollkommen gleichgültig, ob Sie persönlich jetzt nie wieder fliegen, nur noch vegan essen oder der Fortpflanzung entsagen. Wir werden den Klimanotstand nur dann in den Griff bekommen, wenn wir kollektiv handeln, das heißt: politisch. Und international. China, die USA und Indien mitzunehmen ist die wichtigste Priorität.“* [78]

Neben CO₂-Äquivalenten ist ein anderes Maß für die Auswirkung unseres Lebensstils der *ökologische Fußabdruck in gha* (globale ha). Die pro Erdenbürger verfügbare Biokapazität beträgt derzeit 1,7 gha. Dabei ist die Biokapazität noch nicht berücksichtigt, die benötigt wird, um die Vielfalt der Tier- und Pflanzenwelt zu erhalten. Der verantwortungsvoll zu nutzende Fußabdruck liegt also eigentlich deutlich unter 1,7 gha. Der ökologische Fußabdruck beträgt im Weltdurchschnitt aber 2,8 gha. Wir nutzen so viel Natur als hätten wir 1,6 Planeten Erde. In Deutschland ist der durchschnittliche Naturverbrauch pro Kopf sogar 4,9 gha. In Bangladesch sind es zum Vergleich nur 0,8 gha. In Deutschland wird über ein Drittel des durchschnittlichen Fußabdrucks für Ernährung benötigt. Davon stehen rund 80 % für tierische Lebensmittel. Im Bereich Wohnen ist der größte Anteil die Heizenergie. Beim Konsum bieten Modelle des Teilens und langlebige, umweltverträgliche Produkte die Möglichkeit den Fußabdruck zu verkleinern. Im Mobilitätsbereich sind eine Mäßigung der Mobilitätsansprüche und eine Bevorzugung klimaschonender Verkehrsmittel die Hauptansatzpunkte. [79].

Fakten und Hintergründe zum Betrieb von Elektrofahrzeugen

Informationen in konkreten Zahlen – von der Anschaffung über die Nutzung bis zur Entsorgung

Anschaffungspreis

Elektroautos werden zunehmend erschwinglich. Die Kosten für eine Batterie sind in den letzten zehn Jahren um rund 80 % gesunken [5]. Sie machen ca. 40 % der Herstellkosten eines Elektrofahrzeuges aus. Die Endkundenpreise für Neufahrzeuge unterliegen verschiedenen weiteren Faktoren, die Angebot und Nachfrage beeinflussen. Das sind insbesondere politische Rahmenbedingungen, die Hersteller und Käufer betreffen – maßgeblich staatliche Förderungen, welche sich auf Investitions- bzw. Kaufentscheidungen auswirken, oder politische (Un-)Sicherheit, die sich auf Standortwahl und Produktionsvolumen auswirken. Beispiele für wirtschaftliche Faktoren sind Energiepreise oder Importzölle. Kundinnen und Kunden haben inzwischen die Auswahl aus über 130 verschiedenen E-Fahrzeugen [80]. Mit allen Varianten gibt es derzeit 705 Modelle von 13.980 € (Renault Twizy 45 Cargo mit 100 km Reichweite) bis Lucid Air Sapphire mit 687 km Reichweite ab 250.000 € [81].

Aktuelle Kompaktfahrzeuge mit Reichweiten von 220 bis 410 km kosten 23.000 bis 40.000 € [82]. Es ist zu erwarten, dass sich der gegenwärtige Ausbau von Gigafactories durch Skaleneffekte bei der Batterieproduktion positiv auf die Preise auswirken wird. Im Zuge des Markthochlaufs von günstigeren Chemiesystemen (LFP und LMFP, gegebenenfalls Na-Ionen Technologie) ist für künftige Fahrzeuggenerationen mit weiteren Preissenkungen zu rechnen. Im Segment der Mittelklasse sind Reichweiten von über 400 bis 620 km und Preise von 38.000 € bis über 70.000 € aktuell. Oberklassefahrzeuge bei Preisen bis 100.000 € und darüber haben aktuell Reichweiten bis knapp 800 km und können oft aufgrund der zunehmend zum Einsatz kommenden 800 V Technologie vergleichsweise schnell laden [83]. So genügt ein 20- bis 30-minütiger Stopp, um auf Langstreckentouren wieder auf 80 % SoC nachzuladen. In diesem Fahrzeugsegment sind Marke und Ausstattung gewichtige Preisfaktoren, die meist deutlich über den Einfluss der reinen Technologie (Teilekosten) hinausgehen.

Die Preise für gebrauchte Elektrofahrzeuge sind in Deutschland im Jahr 2023 auf durchschnittlich 36.703 € gesunken, nachdem sie im Jahr 2022 Höchstwerte erreicht hatten. Das Angebot an gebrauchten Elektrofahrzeugen hat sich von 2021 bis 2023 verdreifacht. Allein im Jahr 2023 stieg das Angebot um 134 % im Vergleich zum Vorjahr [84].

Unterhaltskosten

Abbildung 10 zeigt die variablen Kosten für Endnutzer verschiedener alternativer Energieträger im Vergleich. Dabei wird vereinfachend jeweils ein Szenario mit 100 % Marktdurchdringung für Deutschland angenommen. Es wird deutlich, dass die zu erwartenden Preise für die verschiedenen alternativen Antriebsarten in Abhängigkeit der notwendigen Investitionen (siehe Abbildung 2) und weiterer Preisfaktoren – insbesondere staatlicher Förderungen – variieren werden.

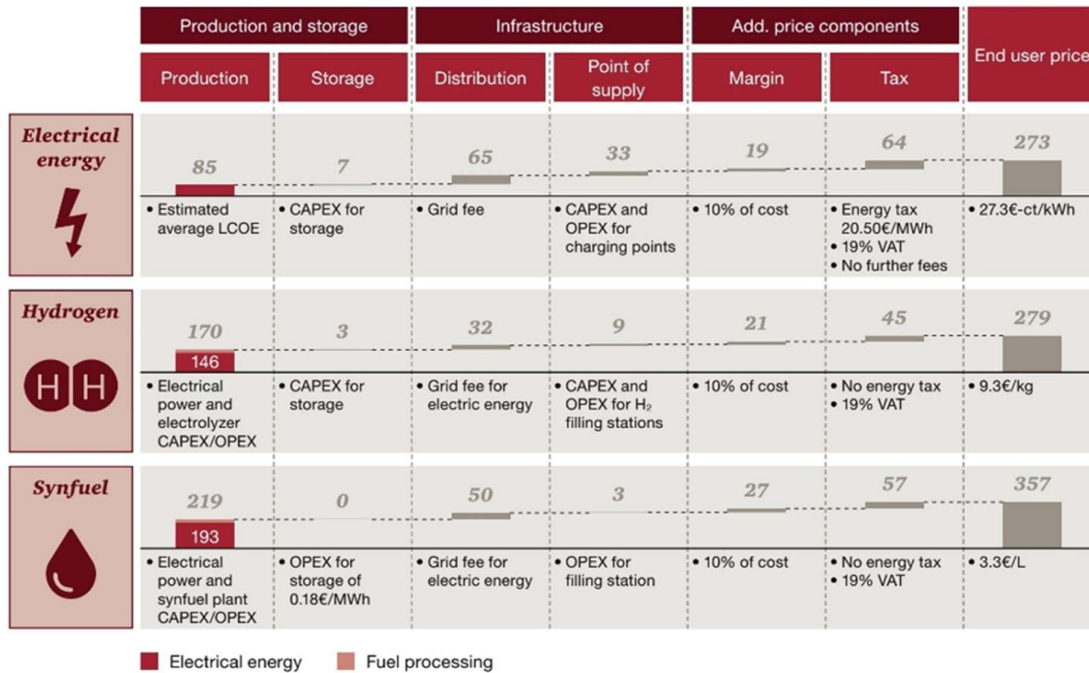


Abbildung 10: Aufschlüsselung der variablen Kosten in €/MWh Treibstoff sowie Preis pro kWh, kg bzw. l [7]

Elektrofahrzeuge haben insbesondere einen Kostenvorteil gegenüber verbrennungsmotorisch betriebenen Kfz: Die laufenden Kosten des Elektroautos sind niedriger. Vor allem perspektivisch – mit steigendem CO₂-Preis – kostet Strom weniger als Benzin oder Diesel. Aktuelle kWh-Preise deutscher Ladeanbieter variieren von 0,39 €/kWh bis 0,89 €/kWh für das Schnellladen (markenoffene Tarife für Vielfahrer, teilweise mit monatlicher Grundgebühr von 9,99 € bis 17,99 €). Damit belaufen sich die Kosten für 1.000 km im Monat auf 85,99 € bis 118 €. Zum Vergleich kostet das Laden mit Hausstrom 60-85 € (mit 0,25-0,35 €/kWh und Abschreibung der Wallbox) [14]. Außerdem sind die fälligen Steuern gering und die Kosten für Service und Wartung betragen im Vergleich zu konventionell betriebenen Fahrzeugen nur etwa ein Drittel. Hinzu kommen gegebenenfalls noch staatliche Kaufprämien [1].

Abbildung 11 vergleicht die Kosten für 100 km Fahrt zwischen BEV (mit sehr hoch angesetztem Verbrauch), Brennstoffzellenfahrzeug (FCEV) und Verbrennungsmotor (ICE). Letzterer kostet aktuell 7-12 €/100 km; dieser Preis wird sich bei synthetisch hergestellten Kraftstoffen mindestens verdoppeln [7]. Es wird eine Frage von Angebot und Nachfrage sein und auch Subventionen werden wie bereits heute einen maßgeblichen Teil an der Preisgestaltung von Treibstoffen haben (siehe oben).

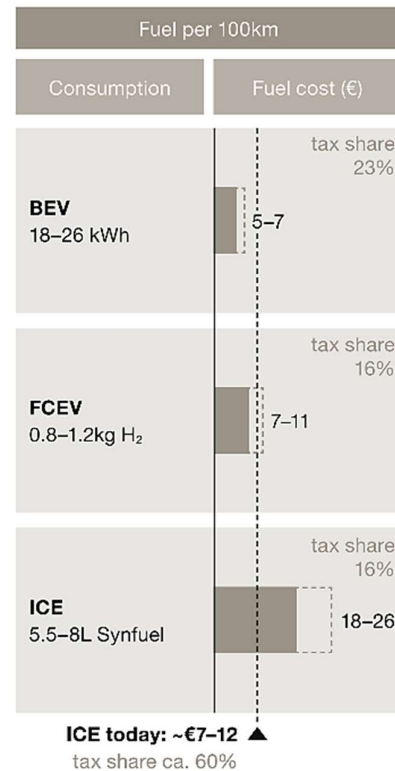


Abbildung 11: Treibstoffkosten Anteil der Steuern für 100 km [7]

Fahrzeuge mit elektrifiziertem Antrieb haben einer aktuellen ADAC-Vergleichsstudie für die Gesamtkosten über die Lebensdauer der Pkw zufolge oft einen Kostenvorteil gegenüber ihren vergleichbaren Fahrzeugtypen mit Verbrennungsmotor. Dies gilt auch nach Wegfall der Kaufprämien in Deutschland zu den 2020er Jahren. Ein wesentlicher Kostentreiber ist der Wertverlust nach der Anschaffung [85]. Zurzeit beobachten wir eine rasante Entwicklung bei Elektroantrieben, sodass gebrauchte Fahrzeuge technisch bereits nach wenigen Jahren nicht mehr auf den neuesten Stand sind und entsprechend rasch an Wert verlieren. Dies wird mit zunehmender Reife der Technologie weniger stark ins Gewicht fallen. Und mit künftigen Anstiegen der CO₂-Bepreisung sowie dem weiter zu erwartenden Preisrückgang bei BEV, ist bereits mittelfristig mit einer weiteren Verbesserung dieses Kostenvergleichs zu rechnen.

Reichweite

Neben dem Preis ist die Reichweite ein weiterer, wichtiger Faktor bei der Entscheidung von Käufer*innen. Die nutzbare Kapazität in kWh (das ist der Anteil der installierten Kapazität, welcher vom Batterie-Management-System (BMS) als Ladefenster freigegeben ist) bedingt die Reichweite von BEV. Sie wird bestimmt durch Materialauswahl und designtechnische Ausführung von Kathode und Anode und unterliegt außerdem folgenden Einflussfaktoren:

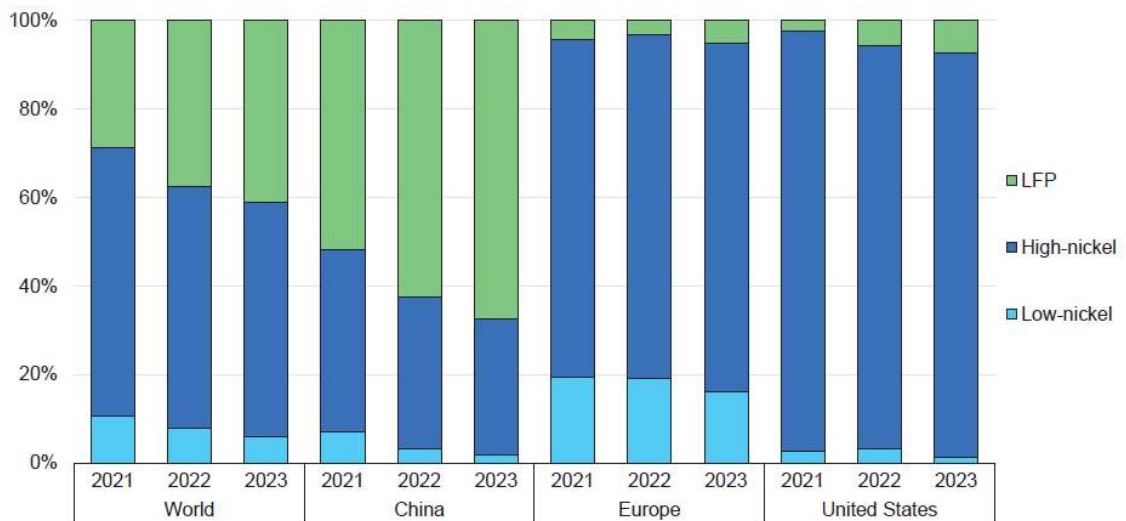
- Temperatur – 10-15 % sinkt die Kapazität bei kalter Batterie. Durch hohe Heizleistung (im Pkw bis 5 kW) kann die Reichweite sogar über 40 % sinken [85]. Zudem können die meisten aktuell verbauten Batterie-Zellmaterialien bei negativen Temperaturen keine Ladung aufnehmen, was die Rekuperation bei Minusgraden verhindert. Abhilfe an kalten Tagen schaffen eine Vorkonditionierung am Kabel und Technologien wie Wärmepumpen.
- Alterung – eine Batterie am Lebensende verfügt noch über 70-80 % der ursprünglichen Kapazität. Eine gealterte Batterie kann zudem nur verringerte Strommengen abgeben bzw. aufnehmen⁵.
- Stromstärke – bspw. sinkt die Netto-Kapazität bei schnellen Autobahnfahrten.
- Ganz grundsätzlich beeinflussen freilich Fahrverhalten und Nebenverbraucher die Reichweite.

Aktuelle Lithium-Ionen Batteriezellen kommen auf Energiedichten von 210 bis 360 Wh/kg bzw. 400 bis 930 Wh/l je nach eingesetzter Chemie (die angegebenen Werte beziehen sich auf LFP und LCO. Dazwischen liegen NMC und NCA). Jüngere Entwicklungen steigern die Energiedichte durch Einsatz von Mangan in LMFP Systemen für Preis-sensitive Anwendungen sowie durch Einsatz von mehr und mehr Silikon in den Anoden [87]. Die Entwicklung befasst sich intensiv mit Verbesserungen der Zyklenstabilität und der Herstellverfahren, um Lebensdauer und Kapazität zu verbessern und Kosten sowie den Energieeinsatz zur Produktion zu senken.

LFP	Lithium-Eisenphosphat	relativ günstig, geringere Energiedichte
LMFP	Lithium-Mangan-Eisenphosphat	verbesserte Energiedichte
NMC	Lithium-Nickel-Mangan-Kobaltoxid	relativ teuer, hohe Energiedichte
NCA	Lithium-Nickel-Aluminiumoxid	teuer, hohe Energie- und Leistungsdichte
LCO	Lithium- Kobaltoxid	am teuersten, höchste Leistungsdichte

⁵ Die maximal zulässige Stromstärke wird vom BMS in Abhängigkeit vom State of Health – SoH, der Temperatur und gegebenenfalls weiteren Faktoren berechnet und überwacht (sogenanntes Derating).

Abbildung 12 zeigt die Verteilung und die jüngste Veränderung der aktuellen Chemie-Systeme [88]. Während in Europa und auch in den USA noch sehr wenig LFP zum Einsatz kommt, zeigt sich in China eine erhebliche Zunahme des Marktanteils. Dies hat seine Ursache in den unterschiedlichen Anforderungen der Märkte und der damit einhergehenden Strategien der Hersteller: In China steht – vermutlich typisch für ein Entwicklungs- oder Schwellenland – primär die Verfügbarkeit erschwinglicher Individualmobilität im Vordergrund. Hingegen finden sich Elektrofahrzeuge im Portfolio deutscher Hersteller derzeit ausschließlich im Segment von Premiumfahrzeugen (mit entsprechen hohen Margen – welche die Einführung der neuen Technologie für die Konzerne wirtschaftlicher machen). Eine Ausnahme stellen der VW ID3 und seine Schwestermodelle der Konzernmarken dar; wobei eine wirkliche Konkurrenz zu günstigen Volumenfahrzeugen unterhalb der Klasse dieses Wagens bislang vom VW-Konzern nur angekündigt ist. Andere europäische Hersteller, die in ihren Segmenten von günstigeren, modernen LFP-Akkus margentechnisch profitieren könnten und damit dennoch eine für ihre Käuferschicht akzeptable Reichweite erzielen würden, haben augenscheinlich aktuell noch nicht die dafür erforderlichen Lieferstrukturen etabliert.



IEA. CC BY 4.0.

Notes: LFP = lithium iron phosphate. Low-nickel includes lithium nickel manganese cobalt oxide (NMC) 333, NMC442, and NMC532. High-nickel includes NMC622, NMC721, NMC811, lithium nickel cobalt aluminium oxide (NCA), and lithium nickel manganese cobalt aluminium oxide (NMCA). Cathode sales share is based on the battery capacity of EVs registered in the different regions. This calculation assumes that 90% of electric trucks and buses sold in China use LFP, and that 70% of electric trucks and electric buses sold outside of China uses high-nickel chemistries. Two/three-wheelers are excluded from the analysis.

Sources: IEA analysis based on data from [EV Volumes](#) and [China Automotive Battery Industry Innovation Alliance](#).

Abbildung 12: Anteil von Elektrochemie-Systemen in Fahrzeugen nach Weltregion und Veränderungen von 2021-2023

Der bisherige Langstreckenrekord eines Elektrofahrzeugs mit Straßenzulassung inklusive Nachladens in 24 Stunden mit einem Tesla Model 3 aus 2019 (2.781 km) wurde inzwischen von einem Porsche Taycan mit 3.036 km eingestellt. Die Durchschnittsgeschwindigkeit des Model 3 auf der A20 betrug dabei ca. 116 km/h (einschließlich Ladestopps). Jede Etappe dauerte eine Stunde mit einer Durchschnittsgeschwindigkeit von 160 km/h. Dazwischen wurde jeweils in etwa 15-16 Minuten mit einem IONITY-Ladegerät um etwa 52 % geladen [89]. Der Taycan verbrauchte 1.309 Kilowattstunden (kWh) Strom, was ca. 149 Litern Superbenzin bzw. einem Verbrauch von 4,9 Liter auf 100 Kilometer entspräche. Die Schnittgeschwindigkeit lag bei 126,5 km/h. Das Fahrzeug wurde bei 30 Ladestopps insgesamt vier Stunden und 48 Minuten lang geladen: Das

entspricht 1/5 der Gesamtzeit [90]. Solche Demonstrationen liegen fern von Distanzen, die im Alltag erforderlich sind.

Untersuchungen [der TU München] in 50 Megacities weltweit haben gezeigt, dass der übliche Mobilitätsbedarf – auch eines Erstfahrzeugs – mit einer realen Reichweite von 200 km bereits fast komplett abgedeckt werden kann [1]. Die eingangs dargestellten Energiedichten der hier aufgeführten Energiesysteme sind sämtlich geeignet, diese Anforderung in Pkw überzuerfüllen.

Im alltäglichen Verkehr nutzen 26 % der Stadtbewohner und 59 % im dörflichen Raum täglich einem Pkw. Der Median der zurückgelegten Wegelängen ist dabei 6,7 km. Der Mittelwert aller Wegstrecken ist 15,8 km (dies inkludiert auch seltenere Langstrecken wie bspw. Urlaubsfahrten). Durchschnittlich 3,1 Strecken am Tag ergeben zusammen 39 km täglich [91]. Somit wäre eine Reichweite von 200 km oder eine Batteriekapazität von ca. 12 kWh eigentlich ausreichend für den bei weitem größten Teil der Fahrzeugnutzung. Wer für seltene Fernreisen nicht auf öffentliche Langstreckenverkehrsmittel oder Sharing-Fahrzeuge mit größerer Batterie ausweichen will, und stattdessen mit seinem eigenen Fahrzeug weitere Strecken zurücklegen möchte, ist darauf angewiesen, nachzuladen.

Eine Untersuchung des ADAC ergab übrigens, dass im Szenario eines Staus bei 35° C Außentemperatur 1,3 – 1,5 kW Kühlleistung erforderlich sind, um den Innenraum bei 20° C zu halten. Bei einem E-Fahrzeug wie dem Tesla Model Y bedeutet das stündlich 2 % Akkukapazität bzw. 8 km Reichweite. Ein Verbrennungsmotor würde unter diesen Bedingungen je nach Motorgröße und Motortyp zwischen 1 und 1,5 Liter Kraftstoff pro Stunde verbrauchen und dabei Abgase erzeugen. Betrachtet man die lokale Effizienz, so entspricht das umgerechnet mit dem Energieinhalt des Kraftstoffs ca. 10 bis 15 kWh pro Stunde – Faktor 10 mehr als beim E-Fahrzeug [92].

Ladeinfrastruktur

Anfang 2024 gab es in Deutschland laut Bundesnetzagentur insgesamt 103.226 Normalladepunkte und 25.291 Schnellladepunkte [93]. Letztere sind im Grunde nur erforderlich, wenn lange Strecken mit mehreren Ladestopps zurückgelegt werden sollen. Ansonsten genügen die verfügbaren Normalladepunkte. Hinzu kommen noch weitere, nicht öffentliche Ladepunkte in Wohnhäusern, Unternehmen und anderen privaten Einrichtungen, deren Zahl schätzungsweise mehrere Hunderttausend beträgt. Zum Vergleich: Konventionelle Tankstellen gibt es ca. 14.500 [94].

Eine Jahresfahrleistung von 14.000 km erfordert rechnerisch 60-70 Ladevorgänge pro Fahrzeug (40 kWh). Rund 70 % aller Ladevorgänge finden zu Hause oder bei der Arbeit statt, man startet also oft schon mit einem voll aufgeladenen Fahrzeug [95].

Eaton rechnet bis 2040 mit 23-29 Millionen Elektrofahrzeugen, die dann 4 Millionen Ladestationen benötigen werden. Höchstens 60 % der privaten Haushalte verfügen über eine Parkmöglichkeit, die mit einer Ladevorrichtung ausgestattet werden kann. Daraus folgt eine Nachfrage von 13-17 TWh Ladekapazität auf industriellen und gewerblichen Flächen mit durchschnittlich je 6 MWh pro Standort [96].

Auf öffentlichen und privaten Parkplätzen stehen Fahrzeuge rund 23 h pro Tag [97]. Für knapp 290 Millionen Pkw [98] existierten laut Schätzung in Westeuropa (EU-15) etwa 300 Millionen öffentliche Parkplätze. Davon sind über 80 % im öffentlichen Raum.

Startups wie Ubitricity entwickeln zudem Ladekabel, die eine Abrechnung eichrechtskonform inkludieren. Damit können günstige Lösungen bspw. für sogenannte Laternenparker geschaffen werden. Die Systeme laden sich direkt in Straßenlaternen einbauen [99]. Auch Anbieter wie die Telekom investieren in eine Aufrüstung ihrer Infrastruktur – hier Verteilerkästen – für

Ladeangebote [100]. So kann insgesamt davon ausgegangen werden, dass sich die erforderliche Ladeinfrastruktur für eine weitestgehende Elektrifizierung des Individualverkehrs implementieren lässt. Fahrzeuge im öffentlichen Personenverkehr sind aufgrund ihrer gut vorhersagbaren Routen und Fahrzeiten hingegen grundsätzlich einfach zu elektrifizieren.

Stromerzeugung

gleich Vorab: Der Strom reicht auch für 100 % Elektrifizierung aus.

Und er kann infolge der Fixkostenverteilung für die Privathaushalte dadurch sogar bis zu 4 % günstiger werden [101]. Das Potential erneuerbarer Energien und der Technologien dahinter, inklusive Stromspeicherungssysteme, sind in der Lage Strom effizient und sicher zu erzeugen und damit den weltweiten Energiebedarf bis 2050 zu decken. Es wird prognostiziert, dass die Weltbevölkerung von 7,3 Mrd. auf 9,7 Mrd. Menschen anwächst. Daher wird auch der weltweite Energiebedarf im Energiesektor von 24.310 TWh im Jahr 2015 auf ungefähr 48.800 TWh im Jahr 2050 ansteigen. Die weltweite Energiewende hin zu 100 % erneuerbaren Energien schafft 36 Millionen Arbeitsplätze bis 2050, im Vergleich zu 19 Millionen Arbeitsplätzen im Stromsektor im Jahr 2015. Der Gesamtverlust eines 100 % erneuerbaren Energiesystems beläuft sich auf rund 26 % des gesamten Endenergiebedarfs. Im Vergleich dazu weist das aktuelle Stromsystem einen Verlust von rund 58 % der Primärenergie auf [102].

Und wie steht es um den CO₂-Ausstoß der Stromproduktion?

Die Verlagerung von fossilen auf erneuerbare Energien bei den Energieträgern findet global statt [103]. Sie ergibt sich schon alleine daraus, dass erneuerbare Energien inzwischen die günstigste Form der Stromerzeugung sind. Folglich erfolgt der Zubau in aller Regel erneuerbar. Abbildung 13 zeigt die Entwicklung ab 2012 und gibt einen Ausblick bis 2040. Diese Prognose wird sich noch deutlich in Richtung erneuerbarer Energien verschieben, je mehr ökologische Ziele in der Staatengemeinschaft an Gewicht erhalten.

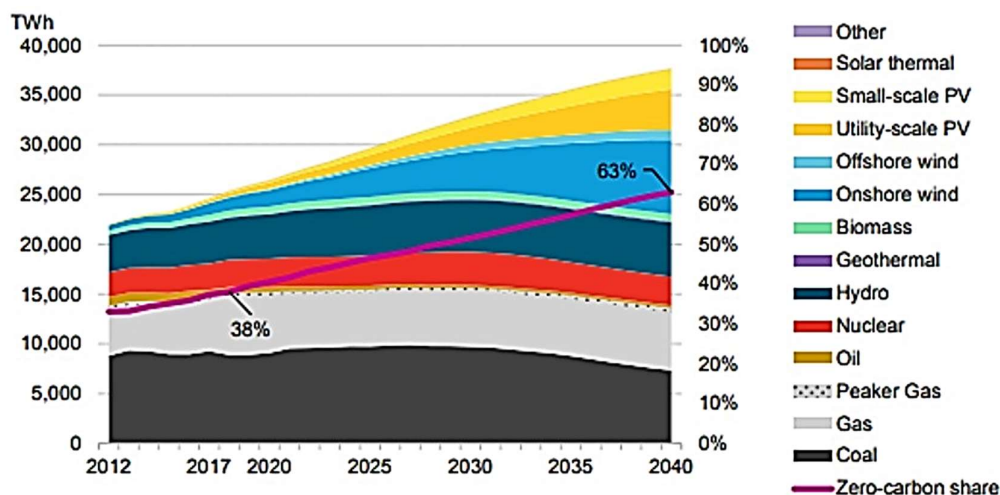


Abbildung 13: Prognose für die globale Energieerzeugung und Anteil der CO₂-neutralen Energiequellen [103]

Abbildung 14 verdeutlicht, wie sich der Emissionsvorteil weltweit verbessern wird. Die durchschnittlichen CO₂-Emissionen von Verbrenner-Fahrzeugen in dieser Grafik wurden anhand der Verkaufszahlen in den sechs Ländern gewichtet.

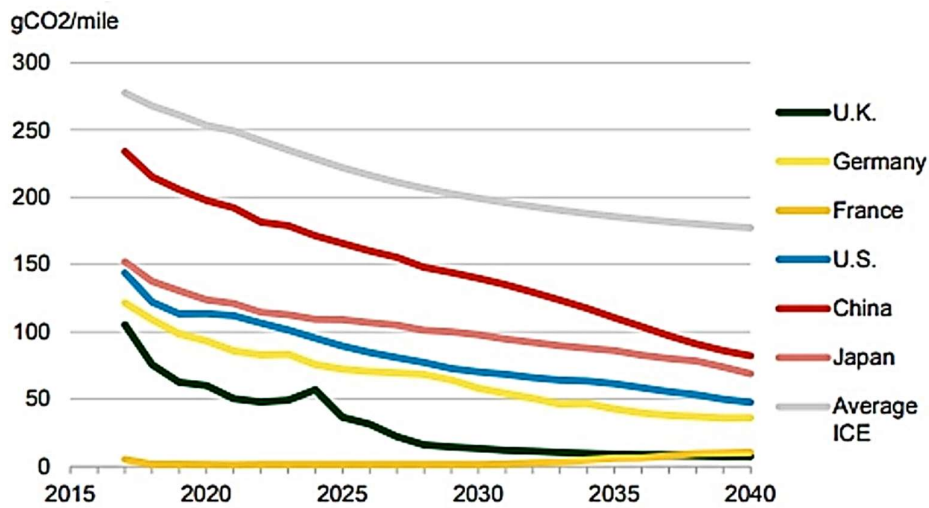


Abbildung 14: strombezogene CO₂-Emissionen von BEV im Vergleich zu Verbrenner-Fahrzeugen [103]

Interessant dabei ist, dass BEV heute weltweit bereits weniger als Verbrenner emittieren – sogar in China, das heute noch einen hohen Kohlestromanteil hat [103]. In Deutschland beträgt der Anteil erneuerbarer Energien in der Stromerzeugung inzwischen 59,8 % und liegt seit 2019 höher als der von fossilen Energieträgern. Abbildung 15 zeigt die aktuelle Verteilung der Nettostromerzeugung hierzulande.

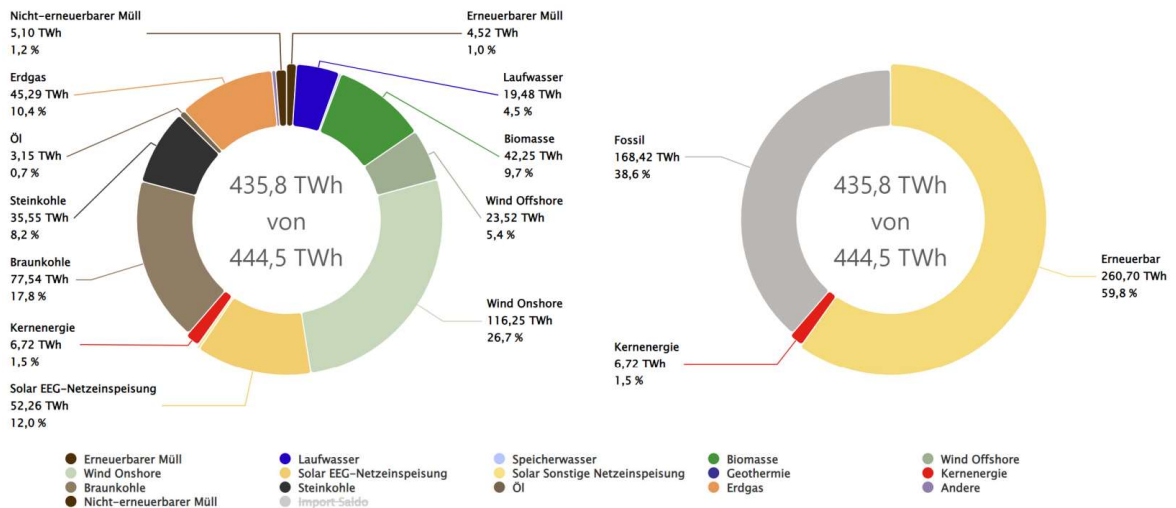


Abbildung 15: Aktuelle Verteilung der öffentlichen Nettostromerzeugung in Deutschland [104]

Die geringste fossile Stromerzeugung 2023 in Deutschland gab es am 01.07.2023 um 14:00 Uhr: lediglich 5,3 GW waren erforderlich, um 9,4 % der Last zu decken – alle andere Energie konnte erneuerbar erzeugt werden. Hingegen versorgten fossile Energien am 01.12.2023 um 18:15 Uhr mit 45,0 GW 66,2 % der elektrischen Last [104]. Insgesamt betragen die CO₂-Emissionen der Stromerzeugung 2023 in Deutschland 380 g/kWh [105]⁶.

Sogenannte Dunkelflauten können sich im Winter unter Hochdruckeinfluss (Windstille und Nebel) ereignen. Die Bundesnetzagentur schreibt für solche Ereignisse Kontingente von

⁶ Weil so gerne der Vergleich zu Verbrennern (Vorgabe seit 2021: 95 g/km) gezogen wird: Das entspricht bei 18 kWh/100 km 68,4 g/km. Somit erreichen BEV bereits heute annähernd die CO₂-Vorgabe von 2030.

Gaskraftwerkskapazität vor. Diese bleiben auch nach Kohle- und Atomausstieg gefordert und sind durch entsprechende Förderungen rentabel. Grundlast-Kraftwerke basieren oft noch auf fossilen Energieträgern; künftig sollen sie mit erneuerbar erzeugten Energieträgern (z.B. Wasserstoff oder dessen Derivate) betrieben werden. Zu Zeiten hoher Verfügbarkeit erneuerbarer Energien sind Speicher (auch Elektrofahrzeuge) netzdienlich. Wenn sie gezielt zugeschaltet werden, kann dies dazu führen, dass weniger erneuerbare Erzeugungsleistung abgeregelt werden muss.

Stromnetz

Warum gehen eigentlich immer die Lichter aus und nicht die Ladesäulen?

Der Jahresstromverbrauch in Deutschland liegt bei rund 520 TWh. Eine Million E-Fahrzeuge brauchen im Jahr rund 2,4 TWh – also gerade mal 0,5 % des Gesamtbedarfs [6]. Selbst wenn im Jahr 2030 zehn Millionen Stromeerzeuger unterwegs sind, wird der Bruttostromverbrauch in Deutschland laut BDEW um gerade 4-5 % zulegen [106].

Schnellladen findet fast ausschließlich entlang von Fernverkehrsstraßen und der Autobahn statt, was wiederum circa 10 % der Fahrten entspricht. Berechnungen des KIT zufolge würde es genügen, wenn in Deutschland bis 2030 mindestens 128 Schnellladestationen mit 150 kW installiert wären. Auch die Belastung der Transportnetze durch Schnellladen für 100 % E-Fahrzeuge im Jahr 2050 sei vernachlässigbar. (Unbegründete) Sorgen vieler Bürgerinnen und Bürger wurzeln nicht zuletzt in Aussagen des Wissenschaftsjournalisten Prof. Harald Lesch in der Fernsehsendung „Terra X“: Würden in Deutschland nur eine Million E-Autos gleichzeitig an einer Schnellladestation mit 350 Kilowatt laden, müsste das Stromnetz dauerhaft eine Leistung von 350 Gigawatt bieten – das Sechsfache der aktuellen Kapazität [107]. Sowohl regelungstechnisch als auch angesichts des tatsächlichen Nutzerverhaltens ist diese Hypothese jedoch abwegig. Inzwischen hat auch Lesch selbst diesen Irrtum eingeräumt und spricht sich nun deutlich für die Elektromobilität aus [108]. Tatsächlich können Elektrofahrzeuge als steuerbare Verbraucher einen erheblichen Teil dazu beitragen, Netze zu stabilisieren und die Gesamtwirtschaftlichen Kosten der Energiewende zu reduzieren.

Kontext: Verteilung, Redispatch und Einspeisemanagement

- Leistung aus erneuerbaren Energien steht nicht kontinuierlich zur Verfügung. Es kann zu einer Unterversorgung kommen aber auch zu Lastspitzen, die vom Netz nicht aufgenommen werden können. Unter Redispatch versteht man Eingriffe in die Erzeugungsleistung von Kraftwerken, um Leitungsabschnitte vor einer Überlastung zu schützen.
- Die gesamten Einspeisereduzierungen durch Redispatch-Maßnahmen beliefen sich im Jahr 2023 auf 25.000 GWh, die Einspeiserhöhungen von Markt- und Netzreservekraftwerken auf 25.000 GWh (in Summe 50.000 GWh). Der Anteil, der durch Redispatch verursachten Absenkungen von Kraftwerken belief sich damit auf 5,6 % bezogen auf die in die Netze eingespeiste Erzeugung aus nicht-erneuerbaren Energieträgern. Die Kosten für Redispatch-Maßnahmen mit Markt- und Netzreservekraftwerken stiegen im Jahr 2023 auf rund 3,1 Milliarden € an.
- Die Menge der Ausfallarbeit durch Einspeisemanagementmaßnahmen lag im Jahr 2023 mit insgesamt 8,1 TWh ebenfalls auf dem bislang höchsten Niveau. Im Vergleich zum Vorjahr stieg die abgeregelte Menge um gut 47 % an (2022: 5,5 TWh). Damit belief sich der Anteil der Ausfallarbeit gemessen an der gesamten Erzeugungsmenge von Erneuerbare-Energien-Anlagen, für die ein Zahlungsanspruch nach dem EEG besteht (auch Direktvermarktung), auf 2,9 % (2022: 2,3 %). Die insgesamt im Jahr 2023 entstandenen geschätzten Entschädigungsansprüche von Anlagenbetreibern stiegen auf das Niveau von 610 Millionen € an [109].

- Steuerbare Verbrauchseinrichtungen (u.a. Ladepunkte) können die Regelung der Verteilnetze unterstützen. Bereits 60.000 Fahrzeug-Batterien mit 150 kW Leistung könnten die bisher erforderlichen Redispatch-Maßnahmen rechnerisch kompensieren [110]. Der VDA geht davon aus, dass die Speicherkapazität der Automobile beim sogenannten *vehicle to grid* in einigen Jahren größer sein wird, als die der gesamten Notstromkraftwerke. Und heruntergebrochen auf eine Familie: Der Strombedarf eines Dreipersonenhaushalts könnte eine Woche lang aus einer Autobatterie gespeist werden [111].

Kosten für den erforderlichen Netzausbau

- Für diese Form des Lastmanagements und eine entsprechende digitale Aufrüstung des Netzes, müsste bspw. E.on in seinem Netzgebiet insgesamt rund 1,25 Milliarden € investieren – verteilt über einen Zeitraum von immerhin 25 Jahren. Ohne das netzdienliche Laden wären es 2,5 Milliarden €. Das sind überschaubare Beträge, weil E.on heute bereits circa eine Milliarde € in die Netze investiert – pro Jahr. Das Szenario des Energiekonzerns unterstellt, dass in den kommenden 25 Jahren sämtliche Pkw im E.on-Netzgebiet – rund 6,5 Millionen Wagen – einen Elektroantrieb hätten und entsprechend Strom bräuchten [106].
- Die durchschnittlichen Stromkosten könnten dadurch sinken: Durch netzdienliches Laden könnten Elektrofahrzeuge je nach Ladeleistung Endkundenpreise um bis zu 4 % senken [101].

Sicherheit

Etlche Kommentare und Meinungen in den sozialen Medien suggerieren, dass Elektrofahrzeuge unsicher wären. Nachrichten und Bilder brennender BEV werden vielfach geteilt. Dies verzerrt die öffentliche Wahrnehmung und lenkt davon ab, dass auch konventionelle Fahrzeuge brennen können – was anders als bei BEV beim aktuellen ICE-Fahrzeugbestand statistisch pro Mrd. gefahrener km sogar relativ häufig der Fall ist. In aller Kürze sei hier lediglich vermerkt, dass für alternativ angetriebene Fahrzeuge dieselben Zulassungskriterien gelten und die Hersteller sich denselben Homologationsverfahren unterziehen müssen, wie „klassische“ Verbrennerfahrzeuge. Insgesamt sind in Deutschland und Europa zugelassene Fahrzeuge als sicher anzusehen.

Alterung

Die hauptsächlichen Alterungsfaktoren von wiederaufladbaren Batterien sind:

- Stromstärke beim Laden und Entladen – DC-Schnellladen schädigt mehr als mit AC
- Entladetiefe (DoD – *Depth of Discharge*) und Vollladung (genutztes SoC-Fenster – *State of Charge*); für die übliche tägliche Fahrstrecke in Deutschland reichen 20 % Ladung einer durchschnittlichen Batterie
- Weitere Faktoren, die vom Nutzerverhalten abhängen: Lade-/Entlade-Frequenz
- Weitere Faktoren, die automatisch vom Thermalsystem und von der Betriebsstrategie geregelt werden: Temperatur (vor allem Temperaturunterschied einzelner Zellen), Spitzenströme (sogenannter SoF – *State of Function*)

Kalendarische Alterung: Auch im nicht genutzten Zustand finden in der Zelle Wechselwirkungen zwischen Elektrolyt und Aktivmaterialien sowie Korrosionsvorgänge statt, die Einfluss auf die Lebensdauer haben. Entwicklungsziele sind für Fahrzeuge typischerweise 10 Jahre.

Zyklische Alterung: Bei Consumer-Produkten wie bspw. Laptops oder Handys wird die volle Batteriekapazität genutzt. Dementsprechend ergeben sich für diese Anwendungen Lebensdauern von wenigen Jahren bzw. bis zu 500 Zyklen. Bei Pkw können bis zu 6.000 Zyklen (bei 70 % SOC und 80 % DOD) und mehr erreicht werden [112]. Laufleistungen von über 400.000 km sind keine Seltenheit [113]. Hersteller Geely hat jüngst eine Technologie auf LFP-Basis vorgestellt, die Akkus mit 3.500 Vollladezyklen ermögliche, was eine Gesamtreichweite von

1 Million km entspräche. Interessant für den Nutzwert der Batterie ist, dass die Chemie dabei hohe Schnellladeraten und dies bei extrem niedrigen Temperaturen bis $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ erlaube [114].

Generell kann heute davon ausgegangen werden, dass die Batterie mindestens so lange hält, wie die übrigen Komponenten eines Fahrzeugs. Die meisten Hersteller gewähren eine Garantie auf die Batterie von acht Jahren oder 160.000 km [115]. Besonders für volumenstarke Modelle könnten sich danach Anbieter von Tauschbatterien etablieren, die dann technologisch deutlich bessere Batterien zu vergleichbaren Preisen oder deutlich günstigere Batterien mit den Leistungsspezifikationen heutiger Batterien anbieten werden. Wie immer wird es eine Frage von Angebot und Nachfrage sein, welche Möglichkeiten des Refurbishments sich entwickeln werden.

2nd Life

Kontext: Batterien haben am Ende des Fahrzeuglebens noch eine Restkapazität von 70-80 %. Eine weitere Nutzung im Fahrzeug (hohe Ströme, hohes SoC-Fenster) würde die Batterie dann jedoch unter Umständen stärker schädigen als bisher. Daher werden sie in einer zweiten Nutzungsphase – nach der Zeit im Automobil – noch für weitere Anwendungen eingesetzt. Hierbei sind netzintegrierte Pufferspeicher ein prädestinierter Use Case – insbesondere wenn es sich um Einsatzgebiete mit vergleichsweise hohen und sehr schnellen Lastanforderungen handelt. Für Pufferspeicher bspw. an Schnellladepunkten passt die Dimensionierung per se. Auch für den Einsatz im Smart Grid zum sogenannten Peak-Shaving (Lastspitzenabdeckung) eignen sich ehemalige Automotive-Batterien mit ihrer hohen Reaktionsfähigkeit sehr gut.

Die verbleibende Lebensdauer unter Randbedingungen des Netzeinsatzes kann im zweiten Leben noch einmal über 10 Jahre betragen. Folgende Umstände wirken sich positiv aus:

- ein geringer SoC-Hub in die Mittel-Lage (50%) ist ausreichend
- es herrschen niedrige Ströme durch Parallelisierung der Zellen/Packs
- es gibt eine sehr gute Vorhersagbarkeit der Lasten je nach Anwendung
- es gibt eine sehr gute Möglichkeit zur Fernwartung/Diagnose
- im Bedarfsfall gibt es eine einfache Möglichkeit, Module oder Packs zu tauschen.

Durch das zweite Leben senkt bspw. Renault die Preise. Der Kunde kauft nur das Fahrzeug, was den Anschaffungspreis reduziert. Heimspeicher-Partner übernehmen die gebrauchten Batteriepacks und sparen rund 30 % im Vergleich zur Nutzung neuer Batterien. Auch BMW und Daimler Batterien werden für stationäre Anwendungen weiterverwendet. Letztere setzen Batterien auch bereits vor der Verwendung im Fahrzeug zusammen mit dem Übertragungsnetzbetreiber Tennet für die Primärregelleistung ein [116].

Batterien stellen die Schlüsseltechnologie für Photovoltaik dar. Bis zu 31 % des globalen Strombedarfs im Jahr 2050 wird Schätzungen zufolge von Speichern abgedeckt werden, wovon wiederum 95 % durch Batteriespeicher bereitgestellt werden. Batteriespeicher werden vor allem die täglichen Schwankungen ausgleichen, während Gas, aus erneuerbaren Energien erzeugt, die saisonale Speicherung decken wird [101] und je nach dem, welche Import- und Export-Beziehungen sich global für das Energiesystem entwickeln werden, einen Teil der Speicherleistung – insbesondere für den Langstreckentransport – in Form von Wasserstoffderivaten ausmachen.

Recycling

Alte Batterien werden heute bereits wiederverwendet. Langfristig ist eine Recyclingquote von bis zu 97 % möglich. Seltene Ressourcen werden also immer weniger benötigt [6]. Die neue EU-Batterieverordnung, die am 10. Juli 2023 verabschiedet wurde, legt spezifische Recyclingquoten für verschiedene Arten von Batterien fest [117].

Recyclingverfahren und Lieferketten:

- Marktführer beim sogenannten pyrometallurgischen Recycling ist die belgische Umicore. Bei der heißen Verwertung schmelzen die dünnen Kupferfolien der Batterie und bilden gemeinsam mit Kobalt und Nickel eine Legierung, die wiederverwertet werden kann. Das Lithium, das Graphit, der flüssige Elektrolyt und das Aluminium in der Batterie verbrennen jedoch und landen in der Schlacke. Sie sind für eine wirtschaftliche Weiterverwendung verloren.
- Die Preisentwicklung von Übergangsmetallen steigert aber die Rentabilität von deren Wiedergewinnung und treibt die Entwicklung neuer Verfahren.
- Für den Transport werden Lieferketten und strategische Partnerschaften aufgebaut. Frachtcontainer mit eingebauter Feuerlöschanlage ermöglichen dies auch für havarierte Batterien.
- Konzerne wie Volkswagen sowie Verbände und Stiftungen bspw. in Deutschland und der Schweiz entwickeln Recyclingverfahren für große Mengen. Denn bereits bis Ende der 2020er Jahre werden zahlreiche Rückläufer erwartet.
- Ein aktuelles Verfahren, welches die höchste Rückgewinnungsquote verspricht, ist das kalte Schreddern von entladene Batterien unter Stickstoffatmosphäre mit dem bereits 96 % aller Materialien wiedergewonnen werden können [118], [119].

Somit werden durch effektive Recyclingverfahren bis zum kommenden Jahrzehnt schließlich auch die CO₂-Emissionen und die Kosten neuer Batteriespeicher und Elektrofahrzeuge weiter sinken und die Energiewende dadurch mitgetragen werden können.

Fazit und abschließende Einordnung

Die Elektromobilität kann und wird allein nicht die globalen Herausforderungen des Klimawandels lösen. Dies kann auch nicht ihr Anspruch sein. Vielmehr ist eine breite Veränderung unseres Lebensstils unumgänglich, wenn das Fortschreiten der CO₂-bedingten Erwärmung und unser Ressourcenverbrauch aufgehalten werden sollen. Das wird nicht nur bei der Betrachtung der sozialen und ökologischen Auswirkungen der Mobilität deutlich, sondern auch der vieler anderer Konsumbedürfnisse. Dieser Wandel wird nicht ohne entschiedenen politischen Willen möglich sein; eine Verschiebung der Verantwortung vom gesellschaftlichen Kollektiv hin zum „CO₂-Fußabdruck“ einzelner Konsumentinnen und Konsumenten lenkt – sehr bewusst und sehr zu verurteilen – vom erforderlichen Handlungsmoment ab.

Die öffentliche Debatte um die Klimaveränderung und unser kollektives Konsumverhalten ist emotional aufgeladen und wird von verschiedenen Interessensgruppen aktiv beeinflusst. In der vorliegenden Ausarbeitung wurden Hintergrundinformationen und aktuelle Zahlen, Daten und Fakten zusammengestellt, um den Diskurs zur E-Mobilität zu untermauern. Um den Umfang übersichtlich zu halten, wurde auf die Situation im Markt Deutschland fokussiert. Falschmeldungen wurden aufgezeigt und deren Korrekturen dargestellt; gängige Mythen und Unklarheiten wurden aufgeklärt. Dies betrifft insbesondere

- die Verfügbarkeit der notwendigen Batterierohstoffe,
- die sozialen und ökologischen Randbedingungen, unter denen sie gewonnen werden,
- den CO₂-Ausstoß bei der Batterieherstellung,
- R.I.P – Reichweite, Infrastruktur und Preis (bzw. Kosten) sowie
- Angebot und Kreislauffähigkeit von BEV.

Insgesamt lässt sich feststellen, dass elektrisch betriebene Pkw unter dem Aspekt der Energieeffizienz die vorteilhafteste Technologie sind, um – so gewollt – eine individuelle Mobilität zu realisieren. Auch für andere Anwendungen wie Busse oder Lkw gibt es in weiten Bereichen von technologischer Seite inzwischen keine Einschränkungen mehr. Anwendungen mit höherem Leistungs- oder Energiebedarf bspw. im Bereich der Luftfahrt, werden auf absehbare Zeit auf flüssige Energiespeicher, die mittels Wasserstoffderivaten aus erneuerbaren Energien erzeugt werden könnten, angewiesen sein. Überlegungen, dass diese bei entsprechend hoher Verfügbarkeit im Zuge der gesamten Energie-Transformation dann auch in Verbrennungskraftmaschinen zum Einsatz kommen können, erscheinen anhand der Tatsache, dass auch Mitte des Jahrhunderts noch ein großer Anteil ICE-basierter Pkw in der weltweiten Flotte sein werden, interessant. Jedoch erforderte diese Idee ein umso schnelleres Entscheiden auf politischer Ebene (global!), damit die notwendigen Abstimmungen, Vereinbarungen und Investitionen in die Transformation des Energiesystems erfolgen können.

Ein konsequentes Umdenken (und entsprechendes Handeln) in unserem kollektiven Verhalten – weit über die Frage nach „dem richtigen Antriebskonzept“ von Pkw hinaus – hätte die besten Aussichten, den menschengemachten Einfluss auf den Planeten einzudämmen. Wenn sich der Klimawandel weiter in der aktuellen Geschwindigkeit fortsetzt, steht jedoch zu befürchten, dass uns in der ersten Welt die Entscheidungsfindung bezüglich unserem Wirtschaftssystem und Konsumverhalten von den sich ergebenden Realitäten jäh abgenommen werden wird. Diese zentrale Perspektive steht ungleich weit über sämtlichen Einzelfragestellungen, die in den vorangegangenen 30 Seiten besprochen wurden – und ~~sollte~~ **muss** darum der eigentliche Gegenstand unserer gemeinsamen Diskussion sein!

Quellen

Zahlreiche Artikel und Postings verbreiten derzeit Meinungen, die sich auf fragwürdige oder keine Quellen stützen. Ein aufgeklärter Diskurs muss auf Fakten basieren. Die folgenden Quellen sind nicht aus elitären wissenschaftlichen Kreisen, sondern für jedermann über gängige Internet-Suchmaschinen zugänglich. Sie sollen den interessierten Lesenden auch als Anschauungsbeispiel dienen und zu eigenen Nachforschungen ermuntern.

- [1] <https://www.spiegel.de/auto/elektroautos-china-europa-usa-batterie-pkw-sind-auf-dem-vormarsch-03.08.2024>, 12:30
- [2] Der Spiegel Nr. 26, 22.06.2024, S. 63
- [3] <https://www.kba.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/Fahrzeugbestand/2023/> 05.07.2024, 16:00
- [4] <https://insideevs.de/news/705193/automarkt-europa-2023-acea-elektroautoquote/> 19.07.2024, 14:00
- [5] <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/534429/umfrage/weltweite-preise-fuer-lithium-ionen-akkus/> 19.07.2024, 14:15
- [6] Lienkamp, M.: Status Elektromobilität 2016 oder wie Tesla nicht gewinnen wird, <https://www.researchgate.net/publication/304247929> 31.05.2019, 09:00
- [7] Bollmann, O., Neuhausen, J., Stürmer, C., Andre, F., Kluschke, P.: From CO2 neutral fuels to emission-free driving, PricewaterhouseCoopers GmbH Wirtschaftsprüfungsgesellschaft, 2017
- [8] <https://strom-report.com/windenergie/> 23.07.2024, 12:35
- [9] <https://www.dw.com/de/wie-elektro-pioniere-afrika-mobil-machen/a-64535383> 22.07.2024, 11:15
- [10] <https://www.iea.org/articles/global-ev-data-explorer> 05.07.2024, 15:00
- [11] Alwin Tuschkan und andere, International Symposium on Automotive and Engine Technology, Stuttgart, 02.-03.07.2024
- [12] Scheffler, F.: H2-Import, Fraunhofer IST, <https://youtu.be/7N1AwwSvpQw> 17.06.2024
- [13] <https://de.euronews.com/green/2023/10/13/neuer-weltbankprasident-signalisiert-dass-die-zeit-der-milliarden-subsidien-fur-fossile> 06.07.2024, 15:00
- [14] Nextmove, nextnews #284 <https://youtu.be/Kia8wIzJbXM?feature=shared> 06.07.2024, 15:00
- [15] <https://edison.handelsblatt.com/e-hub/so-viel-strom-brauchen-autos-mit-verbrennungsmotor/20826274.html> 15.07.2019, 15:00
- [16] <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Artikel/Energie/mineraloel-oelimporte-und-rohoelproduktion-in-deutschland.html> 16.07.2019, 22:30
- [17] https://www2.klett.de/sixcms/list.php?page=infothek_artikel&extra=fundamente-online&artikel_id=90880&inhalt=klett71prod_1.c.158046.de 16.07.2019, 22:30
- [18] <https://www.srf.ch/kultur/wissen/schiffahrt-das-schmutzigste-gewerbe-der-welt> 16.07.2019, 22:30
- [19] https://www.mwv.de/wp-content/uploads/2016/06/180830_MWV_Jahresbericht-2018_RZ_Web_es_small.pdf 15.07.2019, 16:00
- [20] https://gunvor-raffinerie-ingolstadt.de/download/apqvmo1a47gsn6rflc1q4lvas9f/Umwelterklaerung_2018.pdf?ITServer=ad7ruaij7ogct8uhq0734th4f9m&l=95454463 16.07.2019, 22:00
- [21] <https://www.mwv.de/statistiken/mineraloelabsatz/> 15.07.2019, 16:15
- [22] https://www.bgr.bund.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/Commodity_Top_News/Energie/08_energiebilanz_erdoel_erdgas_deutschland.pdf?blob=publicationFile&v=3 04.08.2024, 20:00

- [23] https://de.m.wikipedia.org/wiki/Liste_bedeutender_%C3%96lunf%C3%A4lle?wprov=sfla1 07.07.2019, 10:00
- [24] <https://e-engine.de/chart-der-woche-batteriebestandteile-am-beispiel-eines-chevrolet-bolt/> 20.06.2019, 10:45
- [25] NOW GmbH: Factsheet: Elektromobilität und Rohstoffe – Bedarfe, Verfügbarkeiten und Umweltauswirkungen, 2020
- [26] <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/159933/umfrage/laender-mit-den-groessten-lithiumreserven-weltweit/> 07.06.2027, 16:00
- [27] <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1357771/umfrage/weltweite-produktion-von-lithium/> 07.06.2024, 16:00
- [28] <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/38452/umfrage/produktion-von-cobalt-in-ausgewaehlten-laendern/> 07.06.2024, 16:30
- [29] <https://insideevs.de/news/572809/europaisches-parlament-batterieverordnung-recyclingquote-90prozent/> 07.06.2024, 16.30
- [30] <https://knaufautomotive.com/de/nickel-in-der-automobilbranche/> 07.06.2024, 16.30
- [31] <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1371681/umfrage/verteilung-der-weltweiten-foerderung-von-nickel-nach-laendern/> 07.06.2024, 16.30
- [32] <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/193970/umfrage/reserven-von-silber-weltweit-nach-laendern/> 22.07.2024, 12:45
- [33] Hettesheimer, T. et al.: Lithium-Ion Battery Roadmap – Industrialization Perspectives toward 2030, Fraunhofer ISI, 2023
- [34] Pillot, C. und Renard, F.: The Rechargeable Battery 2022-2030 – Global Battery Raw Materials, AABC Europe, Mainz, 2023
- [35] <https://edison.handelsblatt.com/erklaren/diese-emissionen-haben-batterien-von-elektroautos/22654274.html> 17.07.2019, 09:30
- [36] <https://www.zeit.de/mobilitaet/2014-01/elektroauto-energiebilanz/seite-2> 01.06.2019, 15:45
- [37] Wietschel, M., Kühnbach, M., Rüdiger, D.: Die aktuelle Treibhausgasemissionsbilanz von Elektrofahrzeugen in Deutschland, Fraunhofer ISI, 2019
- [38] <https://edison.handelsblatt.com/erklaren/elektroauto-akkus-so-entstand-der-mythos-von-17-tonnen-co2/23828936.html> 21.06.2019, 18:15
- [39] Romare, M. und Dahllöf, L.: [The Life Cycle Energy Consumption and Greenhouse Gas Emissions from Lithium-Ion Batteries](#)", IVL Swedish Environmental Research Institute, 2017
- [40] Peters, J., Baumann, M., Zimmermann, B., Braun, J., Weil, M.: The environmental impact of Li-Ion batteries and the role of key parameters – A review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Bd. 67, S. S 491-506, 2017
- [41] Ambrose, H. and Kendall, A.: Effects of battery chemistry and performance on the life cycle greenhouse gas intensity of electric mobility, Transportation Research Part D: Transport and Environment, Bd. 47, S. 182-194, 2016
- [42] Ellingsen, L., Majeau-Bettez, G., Singh, B., Srivastava, A., Valøen, L., Strømman, A.: [Life cycle assessment of a lithium-ion battery vehicle pack](#), Journal of Industrial Ecology, Bd. 18, S. 113-124, 2014
- [43] Kim, H., Wallington, T., Arsenault, R., Bae, C., Ahn, S., Lee, J.: [Cradle-to-gate Emissions from a commercial electric vehicle li-ion battery: a comparative analysis](#), Environmental Science & Technology Bd. 50, Nr. 14, S. 7715-7722, 2016
- [44] Al Barazi, S., Näher, U., Vetter, S., Schütte, P., Liedtke, M., Baier, M., Franken, G.: Kobalt aus der DR Kongo – Potenziale und Bedeutung für den Kobaltmarkt, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover, 2017
- [45] Buchert, M., Dolega, P., Degreif, S.: Gigafactories für Lithium-Ionen-Zellen – Rohstoffbedarfe für die globale Elektromobilität bis 2050, Öko-Institut e.V., Freiburg, 2019
- [46] <https://www.sharedeals.de/wissen/rohstoffe/energiemetall-kobalt/> 22.07.2024, 13:00

- [47] https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=OJ:JOL_2023_191_R_0001 09.06.2024, 12:45
- [48] B. Sovacool: The precarious political economy of cobalt: Balancing prosperity, poverty, and brutality in artisanal and industrial mining in the Democratic Republic of the Congo, *The Extractive Industries and Society*, Volume 6, Issue 3, 2019
- [49] Deutschlandfunk Hintergrund: Kobaltabbau im Kongo – Der hohe Preis für Elektroautos und Smartphones, 26.07.2019
- [50] <https://www.zdf.de/dokumentation/planet-e/planet-e-der-wahre-preis-der-elektroautos-100.html> 23.06.2019, 11:00
- [51] Green Cross & Blacksmith Institute (ed.): *The World's Worst Pollution Problems: Assessing Health Risks at Hazardous Waste Sites*. New York, Zürich, 2012
- [52] Manhart, A., Amera, T., Kuepouo, G., Mathai, D., Mng'anya, S., Schleicher, T.: *The deadly business – Findings from the Lead Recycling Africa Project*. Oeko-Institut e.V., Freiburg, 2016
- [53] <https://www.gtai.de/de/trade/lateinamerika/branchen/wird-argentinien-bald-groesster-lithiumproduzent-lateinamerikas--934596> 09.06.2024, 13:30
- [54] Francisco Labbé Opazo, Eduardo Carrasco Arriagada: *Censo 2012. Resultados XVIII Censo de la Población*. Hrsg.: Instituto Nacional de Estadísticas. Santiago de Chile, S. 484, 2013
- [55] CADE-IDEPE Consultores en Ingeniería: *Cuenca de Salar de Atacama*. In: *Gobierno de Chile Ministerio de Obras Públicas Dirección General de Aguas (Hrsg.): Diagnostico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad*, 2005
- [56] Nelson Infante Fabres, Manuel Pino Castillo: *Chile. Ciudades, Pueblos, Aldeas y Caseríos*. Hrsg.: Instituto Nacional de Estadísticas. Santiago de Chile, 2005
- [57] Hugo Alonso, Francois Risacher: *Geoquímica del Salar de Atacama. Parte 1: origen de los componentes y balance salino*. In: *Revista Geológica de Chile*. Band 23, Nr. 2, 1996, S. 113–122
- [58] <https://edison.handelsblatt.com/erklaeren/lithium-aus-lateinamerika-umweltfreundlicher-als-gedacht/24022826.html> 09.06.2024, 13:30
- [59] https://de.wikipedia.org/wiki/Virtuelles_Wasser?wprov=sfla1 17.07.2019, 10:15
- [60] Pieprzyk, B., Kortlüke, N., Hilje, P.: *Auswirkungen fossiler Kraftstoffe – Treibhausgasemissionen, Umweltfolgen und sozioökonomische Effekte*. Endbericht, era – energy research architecture, 2019
- [61] <https://www.br.de/themen/wissen/wasser-deutschland-verbrauch-import-100.html> 17.07.2019, 10:00
- [62] Carmona, L.G., Whiting, K., Carrasco, A.: *The Water Footprint of Heavy Oil Extraction in Colombia: A Case Study*. *Water*, Bd. 9, Nr. 5:340, 2017
- [63] <https://www.handelsblatt.com/technik/das-technologie-update/nachgeforscht/f-wie-fracking-zwischen-gasboom-und-gefahren/10104260.html> 18.07.2019, 21:30
- [64] Bukold, S., Feddern, J.: *Öl. Report 2016*, Greenpeace, Hamburg, 2015
- [65] https://commons.wikimedia.org/wiki/File%3ADiagramm_Logarithmische_Darstellung_des_virtuellen_Wasserverbrauchs_fuer_verschiedene_Alltagsgueter.jpg 17.07.2019, 10:00
- [66] <https://www.br.de/nachrichten/wissen/neue-studie-deutlich-weniger-vom-co2-budget-uebrig-als-gedacht,TuYez8W> 09.06.2024, 13:45
- [67] Harhoff, D., Vorsitzender der Expertenkommission Forschung und Innovation und Direktor am Max-Planck-Institut für Innovation und Wettbewerb: *Interview in VDI nachrichten Nr. 9*, 01.03.2019
- [68] <https://www.dw.com/de/gigantische-subventionen-f%C3%BCr-fossile-energien/a-18463252> 28.07.2019, 16:00
- [69] Lacroix, K.: *Comparing the relative mitigation potential of individual pro-environmental behaviors*. *Journal of Cleaner Production*, Bd. 195, S. 1398-1407, 2018
- [70] <https://www.global2000.at/fleischkonsum-%C3%B6sterreich> 19.07.2019, 18:00

- [71] https://www.ots.at/presseaussendung/OTS_20070316_OTSS0098/proell-co2-rucksack-von-lebensmitteln-ist-problembereich 19.07.2019, 18:30
- [72] <https://www.unendlich-viel-energie.de/mediathek/grafiken/treibhausgasemissionen-in-deutschland-nach-sektoren-2022> 09.06.2024, 14:00
- [73] <http://agenda21-treffpunkt.de/archiv/09/daten/11-Tonnen-CO2.htm> 19.07.2019, 17:45
- [74] <https://nachhaltig-sein.info/privatpersonen-nachhaltigkeit/luna-waldi-und-hansi-so-viel-co2-verursachen-unsere-haustiere> 19.07.2019, 18:30
- [75] <https://www.umweltbundesamt.de/umwelttipps-fuer-den-alltag/garten-freizeit/urlaubsreisen#textpart-2> 19.07.2019, 18:45
- [76] https://www.nabu.de/downloads/TabelleVergleichKreuzfahrtschiff_Pkw.pdf 19.07.2019, 23:00
- [77] <https://www.tagesschau.de/faktenfinder/co2-emissionen-103.html> 18.07.2019, 22:00
- [78] <https://www.spiegel.de/wissenschaft/mensch/rezo-video-die-politik-lullt-ein-und-die-jugend-wehrt-sich-a-1269173.html> 01.06.2019, 15:45
- [79] <https://www.fussabdruck.de/oekologischer-fussabdruck/ueber-den-oekologischen-fussabdruck/> 18.07.2019, 21:45
- [80] <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1076875/umfrage/anzahl-der-modelle-an-elektrofahrzeugen-in-deutschland> 20.07.2024, 12:00
- [81] <https://efahrer.chip.de/elektroautos> 03.08.2024, 12:00
- [82] <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/elektromobilitaet/elektroauto/kleinwagen-marktuebersicht/> 19.07.2024, 14:30
- [83] <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/elektromobilitaet/elektroauto/elektroautos-uebersicht/> 19.07.2024, 14:30
- [84] <https://www.autoscout24.de/unternehmen/mediacenter/daten/gebrauchte-e-autos-so-entwickelt-sich-der-markt-in-deutschland/> 22.07.2024, 15:15
- [85] <https://assets.adac.de/Autodatenbank/Autokosten/E-AutosVergleich.pdf> 22.07.2024, 20:00
- [86] <https://www.elektroauto-news.net/2019/studie-reichweite-elektroauto-sinkt-bei-7-grad-celsius-um-41-prozent/> 27.07.2019, 20:00
- [87] Shmuel De-Leon: Rechargeable Cells & Batteries, 2024
- [88] International Energy Agency: Global EV Outlook 2024, 2024
- [89] Nyland, B.: Model 3 LR 24h world record attempt, <https://youtu.be/CjCAXn5hfBE> 07.07.2019, 12:30
- [90] <https://ecomento.de/2021/06/17/elektroauto-rekord-3036-km-in-24-stunden-porsche-taycan/> 20.07.2024, 10:15
- [91] infas, DLR, IVT und infas 360: Mobilität in Deutschland (im Auftrag des BMVI), 2018
- [92] <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/elektromobilitaet/laden/elektroauto-reichweite-klimaanlage-verbrauch/> 03.08.2024, 11:30
- [93] <https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Fachthemen/ElektrizitaetundGas/E-Mobilitaet/start.html> 20.07.2024, 12:00
- [94] <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/2621/umfrage/anzahl-der-tankstellen-in-deutschland-zeitreihe/> 20.07.2024, 12:00
- [95] <https://ecomento.de/2019/05/30/vw-12-mythen-der-e-mobilitaet/> 30.05.2019, 18:00
- [96] Aurora Energy Research und Eaton in VDI nachrichten 01.03.2019, S. 17
- [97] <https://www.zukunft-mobilitaet.net/13615/strassenverkehr/parkraum-abloesebetrag-parkgebuehr-23-stunden/> 28.07.2019, 09:00
- [98] <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/163405/umfrage/pkw-bestand-in-ausgewaehnten-europaeischen-laendern/> 28.07.2019, 09:00
- [99] Schulzki-Haddouti, C.: Dezentrale Lademeister. In: vdi-nachrichten Nr. 47/48, 23.11.2018
- [100] <https://www.electrive.net/2018/11/04/telekom-startet-aufbau-von-ladenetz-fuer-elektroautos/> 28.07.2019, 15:30

- [101] Fraunhofer ISI: Niedrigere Haushaltsstrompreise durch Elektrofahrzeuge, 26.11.2018, Pressemitteilung zu Working Paper 21/2018 „Auswirkungen der Elektromobilität auf die Haushaltsstrompreise in Deutschland“
- [102] Ram, M., Bogdanov, D., Aghahosseini, A., Oyewo, A., Gulagi, A., Child, M., Fell, H.-J., Breyer, C.: Global Energy System based on 100 % Renewable Energy – Power Sector. Lappeenranta University of Technology and Energy Watch Group, Berlin, 2017
- [103] BloombergNEF <https://www.bloomberg.com/news/articles/2019-01-15/electric-cars-seen-getting-cleaner-even-where-grids-rely-on-coal> 21.06.2019, 19:00
- [104] energy-charts.info/downloads/Stromerzeugung_2023.pdf 21.07.2024, 19:00
- [105] <https://www.umweltbundesamt.de/themen/co2-emissionen-pro-kilowattstunde-strom-2023> 21.07.2024, 19:15
- [106] <https://edison.handelsblatt.com/ertraeumen/stromnetze-verkraften-noch-deutlich-mehr-elektroautos/24392490.html> 31.05.2019, 19:00
- [107] <https://www.businessinsider.de/stromnetz-besser-auf-das-e-auto-vorbereitet-als-viele-glauben-2019-6> 28.07.2019, 18:15
- [108] <https://youtu.be/OtnHAn32Ybc> 22.07.2024, 15:45
- [109] <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/916903/umfrage/volumen-redispatchmassnahmen-im-deutschen-uebertragungsnetz/> 21.07.2024, 19:30
- [110] <https://www.spiegel.de/wissenschaft/technik/netzausbau-gigabatterien-sollen-stromnetz-entlasten-a-1252422.html> 28.07.2019, 13:15
- [111] Bracklo, C., Senior Consultant beim Verband der Automobilindustrie (VDA): Interview in VDI nachrichten Nr. 17, 26.04.2019
- [112] Rahimzei, E., Sann, K., Vogel, M.: Kompendium: Li-Ionen-Batterien, VDE, Frankfurt, 2015
- [113] <https://efahrer.chip.de/news/900000-km-deutscher-stellt-rekord-mit-tesla-model-s-auf-101008> 23.07.2019, 19:30
- [114] <https://efahrer.chip.de/news/laeuft-1-million-kilometer-und-fuenfzig-jahre-autokonzern-bringt-mega-akku-1020812> 21.07.2024, 18:30
- [115] <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/elektromobilitaet/laden/elektroauto-batterie/> 22.07.2024, 20:30
- [116] <https://edison.handelsblatt.com/ertraeumen/die-drei-leben-einer-elektroauto-batterie/20701254.html> 28.07.2019, 13:30
- [117] https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=OJ:JOL_2023_191_R_0001 21.07.2024 19:45
- [118] <https://www.pv-magazine.de/2022/09/05/zsw-forscher-entwickeln-verfahren-fuer-direktes-kathoden-und-anoden-recycling/> 21.07.2024 19:45
- [119] <https://edison.handelsblatt.com/erklären/wohin-mit-den-alten-akkus/24674526.html> 28.07.2019, 15:15

Impressum

Dies ist eine private und unabhängige Informationssammlung, die ohne finanzielle Unterstützung eines externen Geldgebers entstanden ist. Sie ist im Sinne der Creative Commons als Free Cultural Work lizenziert und für die weitere Nutzung freigegeben. Die Inhalte sind ohne Anspruch auf Vollständigkeit und repräsentieren den frei verfügbaren Wissensstand im August 2024 entsprechend den angegebenen Quellen. Trotz sorgfältiger Recherche werden fehlerhafte Informationen nicht ausgeschlossen.

Dr.-Ing. A. Braun https://www.researchgate.net/profile/Andreas_Braun20, Ingolstadt, 21.08.2024