

Elektroautos und CO2-Emissionen. Vier Szenarien

Dr. Helmut Zell

Stand 09.05.2024

1.	Fragestellung	1
2.	Szenario 1. 2022-2023. Eine Mio. Verbrenner werden gegen E-Autos getauscht.....	1
2.1	<i>Beschreibung des Szenarios.....</i>	1
2.2	<i>Wie hoch sind die Emissionen durch 1 Mio. Verbrenner?</i>	2
2.3	<i>Fall A: EE-Strom bleibt gleich >> E-Autos laufen mit Fossilstrom</i>	3
2.4	<i>Fall B: Keine E-Autos, aber EE-Strom steigt um 2,4 TWh in 2023.....</i>	4
2.5	<i>Ergebnis. Der zusätzliche EE-Strom von 2,4 TWh führt zu CO2-Einsparung.....</i>	5
3.	Szenario 2: 2022-2030. 15 Mio. Verbrenner werden gegen E-Autos getauscht.....	5
3.1	<i>Beschreibung des Szenarios.....</i>	5
3.2	<i>Wie hoch sind die Emissionen durch 15 Mio. Verbrenner?</i>	6
3.3	<i>Fall A: E-Autos laufen mit Fossilstrom, EE-Strom bleibt gleich.....</i>	7
3.4	<i>Fall B: Keine E-Autos, aber EE-Strom steigt um 36 TWh in 2030.....</i>	7
3.5	<i>Fall A+B. E-Autos fahren mit EE-Strom. Fossilstrom bleibt gleich</i>	8
3.6	<i>Ergebnis im Überblick.....</i>	8
4.	Szenario 3. 2022-2045. 50 Mio. Verbrenner werden gegen E-Autos getauscht.....	9
4.1	<i>Beschreibung des Szenarios.....</i>	9
4.2	<i>Keine Ursache-Wirkungsbeziehung zwischen EE-Strom und E-Auto.....</i>	9
4.3	<i>Wie hoch sind die Emissionen durch 1 Mio. Verbrenner?</i>	10
4.4	<i>Fall A: E-Autos laufen mit Fossilstrom; EE-Strom bleibt gleich.....</i>	10
4.5	<i>Fall B: Keine E-Autos, aber EE-Strom steigt um 120 TWh in 2045.....</i>	12
4.6	<i>Fall A+B: Fossilstrom-Anteil sinkt; EE-Strom erreicht in 2045 100 Prozent</i>	12
4.7	<i>Ergebnisse.....</i>	16
5.	Szenario 4. Strombedarf der alten und der neuen Verbrauchergruppen.....	17
5.1	<i>Die alten Verbraucher werden dekarbonisiert. Situation 2045.....</i>	17
5.2	<i>Der Strombedarf neuer Verbrauchergruppen</i>	17
5.3	<i>Welche Verbraucher sollen zuerst mit neu erzeugtem EE-Strom bedient werden?.....</i>	19
6.	Folgerungen für die Klimabilanz.....	19

1. Fragestellung

Untersucht wird anhand von vier Szenarien die Frage, wie durch den Umstieg von Verbrennern auf E-Autos in Deutschland CO eingespart werden kann und welche Berechnungsmethode anzuwenden ist.

Szenario 1: Eine Mio. Verbrenner werden von 2022 nach 2023 von E-Autos ersetzt

Szenario 2: 15 Mio. Verbrenner werden von 2022 nach 2030 von E-Autos ersetzt

Szenario 3: 50 Mio. Verbrenner werden von 2022 nach 2045 von E-Autos ersetzt

Szenario 4: Neue Verbrauchergruppen (Wärmepumpen, Elektrolyse, etc.) haben zusätzlichen Strombedarf

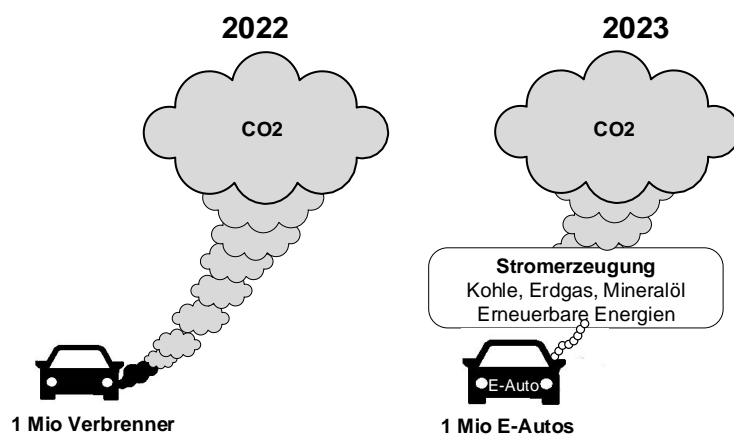
2. Szenario 1. 2022-2023. Eine Mio. Verbrenner werden gegen E-Autos getauscht

2.1 Beschreibung des Szenarios

Zum Stichtag 1. Januar 2023 wurde die Ein-Millionenmarke von batterieelektrischen Pkw überschritten. Doch werden die vielen Milliarden an Subventionen für das E-Auto wirklich dazu beitragen, die klimaschädlichen CO₂-Emissionen des Verkehrs zu senken?

In diesem Szenario werden von 2022 auf 2023 eine Mio. Verbrenner gegen eine Mio. E-Autos ausgetauscht. Wie verändern sich dadurch die CO₂-Emissionen? Dabei berechnen wir zwei Fälle und vergleichen diese miteinander.

- a) Fall A. In 2023 wird so viel EE-Strom wie in 2022 erzeugt, ändert sich also nicht. Somit muss der für die E-Autos benötigte Strom gänzlich durch Fossilstrom gedeckt werden.
- b) Fall B. In 2023 wird so viel EE-Strom zusätzlich erzeugt, wie er von den E-Autos benötigt wird. Fossilstrom ist in 2023 so hoch wie in 2022.



2.2 Wie hoch sind die Emissionen durch 1 Mio. Verbrenner?

48 Mio. Verbrenner in 2022 und ihr Kraftstoffverbrauch

Im April 2023 waren in Deutschland 48,8 Mio. Pkw angemeldet.¹ Im Jahr 2022 betrug die Inländerfahrleistung der Pkws 598 Milliarden Kilometer.² Jedes Fahrzeug legte somit im Durchschnitt rund 12.000 Kilometer zurück. 2019 verbrauchten Pkws 26.593 Mio. Liter Benzin und 20.417 Mio. Liter Dieselkraftstoff.³

CO₂-Emissionen durch 1 Mio. Verbrenner

Nach einer Studie des Umweltbundesamts (UBA) aus 2020 betragen die jährlichen Emissionen der Pkw rund 115 Mio. Tonnen CO₂.⁴ Dabei wurden auch die CO₂-Emissionen der Vorkette berücksichtigt,⁵ die schon bei der Exploration, Gewinnung und Transport der Treibstoffe CO₂-Emissionen anfallen („Well to Tank“). Für 2022 liegen keine Angaben vor, aber man kann davon ausgehen, dass die 48 Mio. Verbrenner-Pkw CO₂-Emissionen in Höhe von ungefähr **115 Mio. Tonnen CO₂** verursacht haben.

Welche Menge CO₂ wird eingespart, wenn in 2023 eine Mio. Verbrenner-Pkw weniger als in 2022 auf deutschen Straßen unterwegs sind? Die Berechnung ($115/48,8 = 2,395$) ergibt folgendes Ergebnis: Wenn eine Mio. Verbrenner aus dem Verkehr genommen werden, sinken dadurch die Emissionen um rund 2,4 Mio. Tonnen CO₂.

Ein anderer Berechnungsansatz:

Berechnung der jährlichen CO₂-Emissionen eines Verbrenners (näherungsweise)

Jährliche Fahrt 12.000 km

7 Liter Kraftstoff pro 100 km

Emissionen seien 3 kg CO₂ pro Liter = 21 kg pro 100 km. Gerundet 20 kg CO₂/km

12.000 km: $120 * 20 \text{ kg} = 2.400 \text{ kg}$ oder 2,4 t CO₂ pro Jahr pro Fahrzeug

1 Mio. Verbrenner emittieren 2,4 Mio. Tonnen CO₂.

Wir kommen zum gleichen Ergebnis: 1 Mio. Verbrenner emittieren 2,4 Mio. Tonnen CO₂.

¹ BMU: Klimaschutz in Zahlen 2020, S. 36, <https://www.bmu.de/publikation/klimaschutz-in-zahlen-2020/>

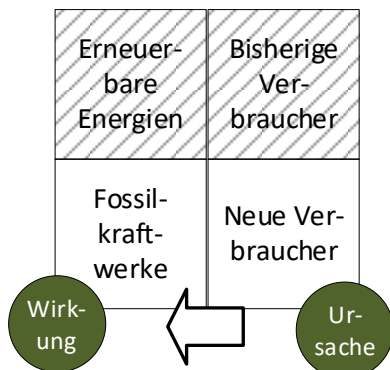
² https://www.kba.de/DE/Statistik/amtliche_statistik_im_kba_pdf.pdf?__blob=publicationFile&v=13

³ BMVI: Verkehr in Zahlen 2019/2020, S. 307, 309

⁴ https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/5750/publikationen/2020_12_03_texte_224-2020_co2-fussabdruecke_alltagsverkehr_0.pdf. Seite 43

⁵ Bei Diesel betragen die THG-Emissionen unter Berücksichtigung der Vorketten 3,08 kg CO₂äq/l und bei Benzin 2,73 kg CO₂äq/l. <https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/cce/2019/klimabilanz-kosten-potenziale-antriebe-pkw-lkw.pdf>.

2.3 Fall A: EE-Strom bleibt gleich >> E-Autos laufen mit Fossilstrom



Zusätzlicher Strombedarf für 1 Mio. E-Autos

Wenn ein Diesel- oder Benzin-Auto ausgemustert und durch ein E-Auto ersetzt wird, kommt aus dessen Auspuff kein klimaschädliches CO₂ mehr. Allerdings benötigen die E-Autos Strom. Anfang 2023 sind in Deutschland etwas über eine Mio. Elektroautos zugelassen.⁶ Welche Strommenge wird benötigt, um in 2023 eine weitere Anzahl von 1 Mio. E-Autos mit Strom zu versorgen?

Ein Elektroauto, das hinsichtlich jährlicher Fahrleistung von 12.000 Kilometern, Leistung und Komfort einem herkömmlichen Auto der Mittelklasse entspricht (z. B. BMW i3, Volkswagen ID.3, Tesla Model 3), benötigt ungefähr 20 kWh auf 100 km.⁷ 20 kWh auf 100 km und 12.000 km pro Jahr ergeben damit 2.400 kWh pro Auto und Jahr.

Berechnung für 1 Mio. E-Autos: 2.400 kWh * 1 Mio. E-Autos = 2.400 Mio. kWh. Für eine Mio. Fahrzeuge ergibt sich ein Strombedarf von **2,4 TWh** im Jahr.

Nettostromerzeugung in Deutschland in 2023 ⁸	(TWh)	CO ₂ -Emissionen durch Stromerzeugung
Fossile Energie	169,38	223 Mio. Tonnen CO ₂ ⁹
Atomenergie	6,72	
Erneuerbare Energien	260,68	
Energie gesamt	436,78	

Wir gehen bei unserer Berechnung von der Annahme aus, dass die Nettostromerzeugung aus erneuerbaren Energien in 2023 mit 245,7 TWh genauso hoch sein wird wie in 2022 (wir modifizieren diese Annahme unten in einer weiteren Berechnung).

⁶ Das Kraftfahrt-Bundesamt (KBA) hat noch keine Zahlen zum Fahrzeugbestand mit Stichtag 1. Januar 2023 veröffentlicht (7.2.2023). <https://www.electrive.net/2023/01/09/diw-mehr-als-1-million-elektroautos-im-bestand/#:~:text=Das%20Kraftfahrt%20Bundesamt%20hat%20noch,ergeben%20sich%201.038.731%20Elektroautos.>

⁷ Automobilhersteller geben den Stromverbrauch ihre E-Autos meist mit Werten zwischen 15 bis 20 kWh auf 100 Kilometer an. Solche Angaben sind tendenziell „schön-gerechnet“. Mit einem Strombedarf von 20 kWh/100 km rechnet auch: Agora Verkehrswende (2019): Klimabilanz von Elektroautos. Einflussfaktoren und Verbesserungspotenzial. S. 37

⁸ https://www.energy-charts.info/charts/energy_pie/chart.htm?l=de&c=DE&year=2023&interval=year (10.1.2024)

⁹ https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/bilder/dateien/strommix-entwicklung_1990-2021_schaetzung-2022.pdf

Da ab April 2023 kein Strom aus Kernenergie ins Netz eingespeist werden wird, muss diese Strommenge durch Fossilenergie ersetzt werden. Die Menge an fossilem Strom steigt also rechnerisch von 213,0 TWh um 32,8 TWh auf 245,8 TWh. Da die Strommenge aus Erneuerbaren Quellen - entsprechend unserer Annahme - nicht erhöht wird und bei 245,7 TWh bleibt, muss der Ladestrom für die 1 Mio. E-Autos von fossilen Kraftwerken (Stein-, Braunkohle und Gas) kommen. Wie oben errechnet, beträgt der hierfür zusätzlich benötigte Strombedarf **2,4 TWh**.

CO2-Emissionen der zusätzlichen 1 Mio. E-Autos in 2023

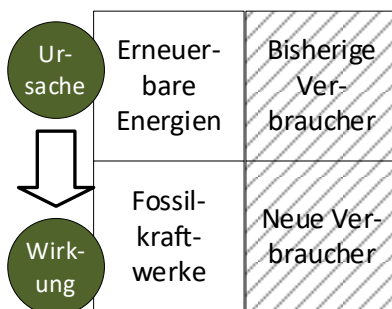
Wie hoch ist der CO2-Ausstoß für die Erzeugung einer Strommenge von 2,4 TWh?

Der Stromsektor erreichte in 2022 mit 255 Mio. t CO2-Äq. knapp das Treibhausgasminderungsziel des Sektors des deutschen Klimaschutzgesetzes.¹⁰ Wir wissen damit, wie viel Nettostrom in Deutschland in 2022 erzeugt wurde (491,5TWh) und wir wissen, wie viel CO2 in diesem Jahr durch die Stromwirtschaft emittiert wurde (255 Mio. Tonnen CO2-Äq). Da bei Strom aus Erneuerbaren Energien näherungsweise keine CO2-Emissionen entstehen, müssen alle CO2-Emissionen den fossilen Kraftwerken zugerechnet werden. Es ist also folgendermaßen zu rechnen: 255 Mio. Tonnen CO2 der Stromerzeugung geteilt durch 245,8 TWh Fossilstrom = 1,04 Mio. t CO2/TWh oder 1,04 kg CO2/kWh. Gerundet beträgt der CO2-Emissionsfaktor für Fossilstrom in Deutschland somit 1 kg/kWh oder 1.000 g/kWh. Eine andere Betrachtung bestätigt diesen Wert: Die CO2-Emissionsfaktoren bezogen auf den Stromverbrauch (g/kWh) für die fossilen Brennstoffe sind für Erdgas 399, Steinkohle 835 und für Braunkohle 1.137 Gramm/kWh.¹¹ Insofern dürfte der durchschnittliche CO2-Emissionsfaktor der fossilen Kraftwerke in 2022 nahe bei 1 kg/kWh liegen.

Ergebnis: Beim Erzeugen einer Strommenge von 2,4 TWh entstehen in fossilen Kraftwerken rund **2,4 Mio. Tonnen CO2** (2,4 TWh * 1 kg/KWh).

Durch den Wechsel von den Verbrennern zu den E-Autos sind im Fall A die CO2-Emissionen von 2022 zu 2023 nicht gesunken. Wenn in 2023 eine Mio. Verbrenner durch eine Mio. E-Autos ersetzt werden und die Menge an EE-Strom gleichbleibt, entstehen 2,4 Mio. Tonnen CO2-Emissionen. Unter den gegebenen Rahmenbedingungen der Stromversorgung führt der Austausch zu keiner Änderung der verkehrsbedingten CO2-Emissionen.

2.4 Fall B: Keine E-Autos, aber EE-Strom steigt um 2,4 TWh in 2023

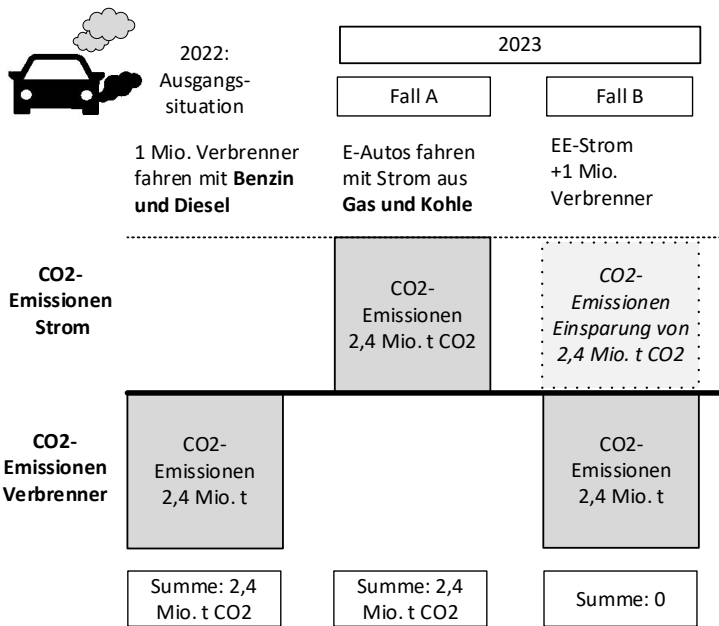


Wir gehen davon aus, dass die 1 Mio. Verbrenner weiterfahren. Es kommen jedoch keine E-Autos zum Einsatz, aber der Strom aus Erneuerbaren Energien steigt nach unserer Annahme trotzdem um 2,4 TWh. Es wird also der Strom aus den fossilen Kraftwerken um diesen Betrag verdrängt. Damit sinken deren Emissionen. Bei dem angenommenen Emissionsfaktor von 1 kg/kWh genau um 2,4 Mio. t CO2.

¹⁰ Katharina Hartz, Thorsten Lenck, Simon Müller: Die Energiewende in Deutschland: Stand der Dinge 2022. Rückblick auf die wesentlichen Entwicklungen sowie Ausblick auf 2023, ERLIN, 10. JANUAR 2023, https://static.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2022/2022-10_DE_JAW2022/2023-01-10_Praesentation_Webinar_JAW_2022.pdf, folie 6

¹¹ https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2020-04-01_climate-change_13-2020_strommix_2020_fin.pdf, Seite 16

2.5 Ergebnis. Der zusätzliche EE-Strom von 2,4 TWh führt zu CO2-Einsparung



Ein verstärkter Ausbau erneuerbarer Energien ist ein wichtiger Bestandteil der Energiewende. Mehr Strom wird aus Windrädern, Photovoltaikanlagen und anderen erneuerbaren Quellen stammen, wodurch die Stromerzeugung klimafreundlicher und emissionsärmer wird. Wir werden diese möglichen Entwicklungen in den folgenden Szenarien genauer betrachten.

3. Szenario 2: 2022-2030. 15 Mio. Verbrenner werden gegen E-Autos getauscht

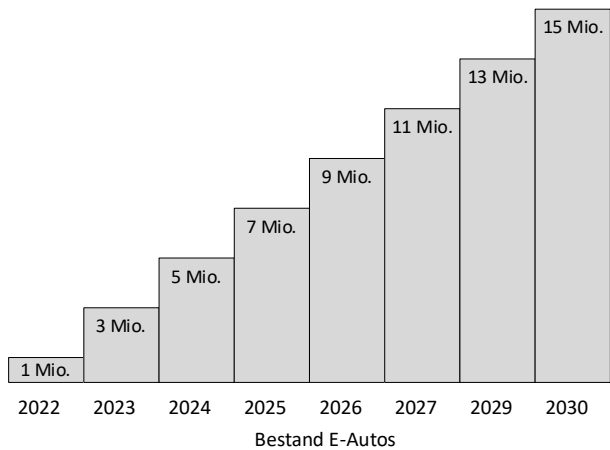
3.1 Beschreibung des Szenarios

Die Bundesregierung möchte die Emissionen des Verkehrssektors von 150 Mio. Tonnen CO₂ im Jahr 2020 auf 85 Mio. Tonnen CO₂ im Jahr 2030 senken. Ungefähr 60 Prozent der Sektor-Emissionen sind dem Pkw-Verkehr zuzurechnen. Die CO₂-Emissionen der Pkws sollen durch den Ausbau der Elektromobilität reduziert werden. Nach dem Koalitionsvertrag der Ampelregierung vom Dezember 2021 sollen bis Ende 2030 15 Mio. vollelektrische Pkw auf deutschen Straßen fahren. Dafür müssen in den nächsten Jahren jährlich ungefähr 2 Mio. E-Autos neu zugelassen werden. Also eine sehr ambitionierte Zielsetzung.

"Das Umweltbundesamt stellt fest, dass durch Effizienz und Elektrifizierung für Pkw und leichte Nutzfahrzeuge die Treibhausgasemissionen des Verkehrs in Summe im Jahr 2030 um rund 13 bis 15 Mio. Tonnen CO₂-Äq. gesenkt werden."¹²

Ob dieses anspruchsvolle Ziel erreicht werden kann?

¹² UBA, Klimaschutzinstrumente im Verkehr, 15.3.2023



Das Bild zeigt, wie es sich der Zuwachs an E-Autos über die zukünftigen Jahre hinweg vorstellen könnte.

Wir fragen, wie sich die CO₂-Emissionen verändern, wenn 15 Mio. Verbrenner durch 15 Mio. E-Autos ersetzt werden. Dabei berechnen wir die Veränderungen für zwei unterschiedliche Annahmen.

- Im Fall A gehen wir für die Berechnung davon aus, dass der Strombedarf für die 15 Mio. E-Autos vollständig durch Fossilstrom gedeckt wird.
- Im Fall B gehen wir davon aus, dass der für die 15 E-Autos benötigte Strom vollständig durch EE-Strom gedeckt wird.

3.2 Wie hoch sind die Emissionen durch 15 Mio. Verbrenner?

Wir verwenden den Berechnungsansatz von Szenario 1:

Berechnung der jährlichen CO₂-Emissionen eines Verbrenners (näherungsweise)
 Jährliche Fahrt 12.000 km
 7 Liter Kraftstoff pro 100 km
 Emissionen seien 3 kg CO₂ pro Liter = 21 kg pro 100 km. Gerundet 20 kg CO₂/km
 12.000 km: 120 * 20 kg = 2.400 kg oder 2,4 t CO₂ pro Jahr pro Fahrzeug
 1 Mio. Verbrenner emittieren 2,4 Mio. Tonnen CO₂.

Wenn eine Mio. Verbrenner aus dem Verkehr genommen werden, sinken die Emissionen um rund 2,4 Mio. Tonnen CO₂. Für 15 Mio. Verbrenner errechnet sich somit eine Reduktion von 36 Mio. Tonnen CO₂ (15 * 2,4).

Strombedarf der 15 Mio. E-Autos

Ein E-Auto benötigt 2.400 kWh Strom pro Jahr.

Eine Mio. E-Autos benötigen 2,4 TWh;

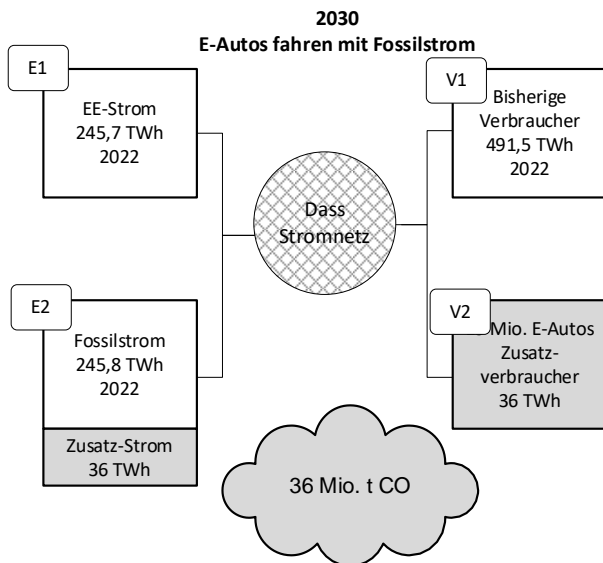
15 Mio. E-Autos benötigen 36 TWh (2,4 TWh * 15 Mio.).

Ausgangssituation 2022. Die Stromversorgung

Im Jahr 2022 betrug die deutsche Nettostromerzeugung 491,5 TWh, wovon 245,8 TWh fossiler Herkunft und 245,7 TWh von Erneuerbaren Quellen kamen.

3.3 Fall A: E-Autos laufen mit Fossilstrom, EE-Strom bleibt gleich

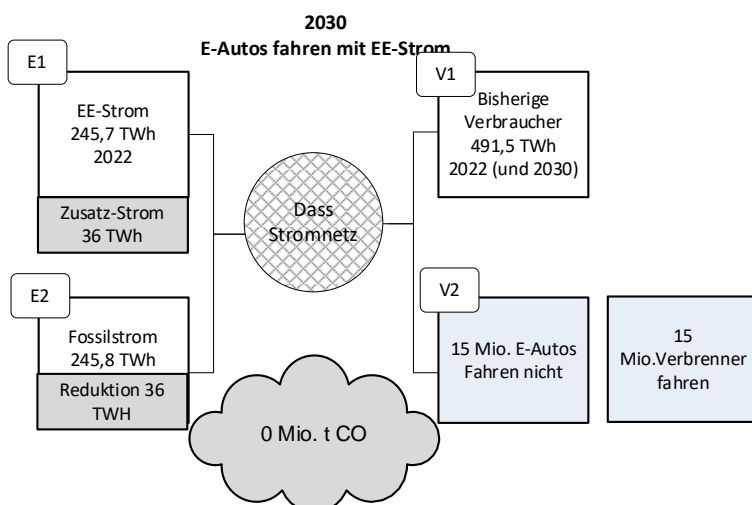
Das nachfolgende Diagramm vergleicht die Veränderungen bei der Stromwirtschaft von 2022 zu 2030 durch den Zusatzbedarf an Strom durch die 15 Mio. E-Autos.



Wenn die E-Autos mit Fossilstrom geladen werden, sind die CO₂-Emissionen genau so hoch wie für die 15 Mio. Verbrenner. Man hätte also für das Klima gar nichts erreicht. Für das Klima wäre bei dieser Stromversorgung die Art des Antriebs gleichgültig.

3.4 Fall B: Keine E-Autos, aber EE-Strom steigt um 36 TWh in 2030

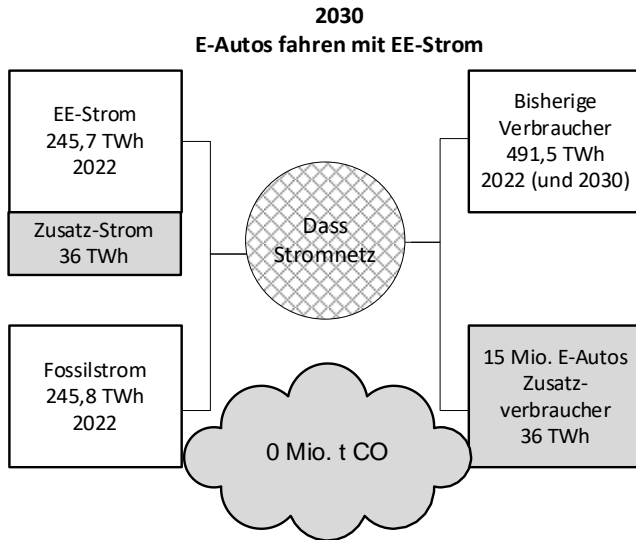
Wir gehen davon aus, dass 15 Mio. Verbrenner weiterfahren und keine E-Autos eingesetzt werden, aber der Strom aus Erneuerbaren Energien um 36 TWh wächst. Es wird also der Strom aus den fossilen Kraftwerken um diesen Betrag verdrängt. Damit sinken deren Emissionen. Bei dem angenommenen CO₂-Faktor von 1 kg/kWh genau um 36 Mio. Tonnen CO₂.



Im Stromnetz gibt es CO₂-Einsparungen, aber die 15 Mio. Verbrenner stoßen nach wie vor 15 Mio. t CO₂ aus.

3.5 Fall A+B. E-Autos fahren mit EE-Strom. Fossilstrom bleibt gleich

Der von E-Autos benötigte Strom wird aus Erneuerbaren Quellen gedeckt. Der EE-Strom steigt von 245,8 TWh in 2022 um 36 TWh auf 281,8 TWh in 2030. Es reduzieren sich die Emissionen durch die Verbrenner. Aber für die E-Autos entsteht unter diesen Annahmen kein CO₂.



Die Emissionen für die 15 Mio. Fahrzeuge sind gleich null.

3.6 Ergebnis im Überblick



2022:
Ausgangs-
situation

15 Mio.
Verbrenner fahren
mit **Benzin und
Diesel**

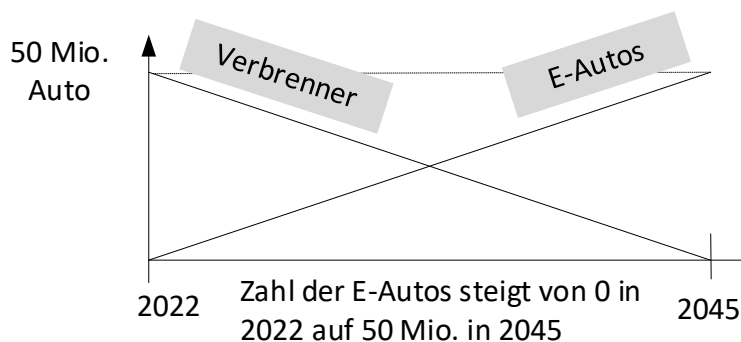
		2030		
		Fall A	Fall B	Fall A + B
		E-Autos fahren mit Strom aus Gas und Kohle	EE-Strom +15 Mio. Verbrenner	EE-Strom +15 Mio. E- Autos
CO₂- Emissionen Strom		CO ₂ - Emissionen 36 Mio. t CO ₂	CO ₂ - Emissionen <i>Einsparung von 36 Mio. t CO₂</i>	CO ₂ - Emissionen 36 Mio. t
CO₂- Emissionen Verbrenner	CO ₂ - Emissionen 36 Mio. t		CO ₂ - Emissionen 36 Mio. t	CO ₂ - Emissionen <i>Einsparung von 36 Mio. t CO₂</i>
	Summe: 36 Mio. t CO ₂	Summe: 36 Mio. t CO ₂	Summe: 0	Summe: 0

8 Millionen bis 2030 sind vielleicht realistisch, sagt Automobil-Experte Stefan Bratzel. Bis 2030 sei mit einem Bestand von 7 bis 8 Millionen Stromern zu rechnen, also nur halb so viel wie von der Regierung geplant.¹³

4. Szenario 3. 2022-2045. 50 Mio. Verbrenner werden gegen E-Autos getauscht

4.1 Beschreibung des Szenarios

Von 2022 bis 2045 werden die 50 Mio. Verbrenner schrittweise durch E-Autos ersetzt.



Zu Beginn wird der Strom für die E-Autos aus Fossilkraftwerken gedeckt. Auch gehen wir davon aus, dass das Stromnetz bis 2045 klimaneutral auf Erneuerbare Energien umgestellt wird. Die Zahl der Verbrenner sinkt jedes Jahr um rund 2 Mio. Fahrzeuge, die Zahl der E-Autos steigt jeweils um rund 2 Mio. Fahrzeuge. Wie ändern sich die CO₂-Emissionen?

Wir betrachten zwei Fälle mit unterschiedlichen Annahmen:

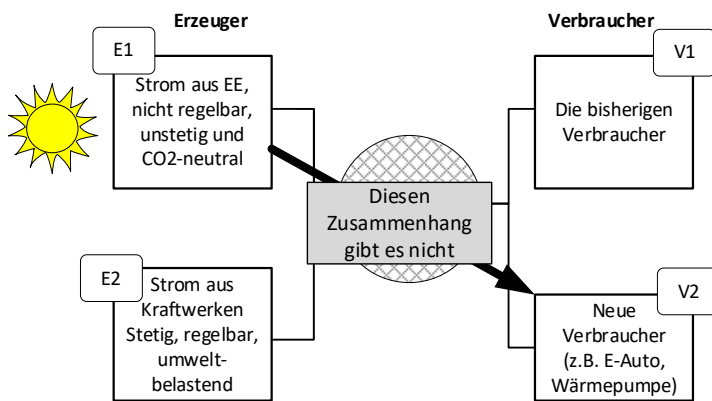
- Fall A. Der im Zeitverlauf steigende Strombedarf der E-Autos wird gänzlich mit zusätzlichem Fossilstrom gedeckt. Die Menge an EE-Strom in der Stromversorgung bleibt gleich.
- Fall B. Der im Zeitverlauf steigende Strombedarf der E-Autos wird mit Strom gedeckt, der von Jahr zu Jahr einen höheren Anteil an Strom aus Erneuerbaren Energien enthält.

Beide Fälle stellen zwar nicht undenkbare, so doch sehr ideale -Annahmen für einen Übergang auf E-Autos bei einer klimaneutralen Stromversorgung bis 2045. In der folgenden Analyse betrachten wir, wie sich die CO₂-Emissionen im Fall A, wie im Fall B ändern werden?

4.2 Keine Ursache-Wirkungsbeziehung zwischen EE-Strom und E-Auto

Wenn in einem Jahr in einer Gegend die Storchpopulation um ein Prozent zugenommen hat und gleichzeitig die Zahl der neugeborenen Babys ebenfalls um ein Prozent gestiegen ist, heißt das nicht, dass das eine mit dem anderen zu tun hat.

¹³ <https://www.welt.de/wirtschaft/article247042372/E-Auto-Bundesregierung-verfehlt-Ziel-von-15-Millionen-E-Autos-bis-2030-Realitaetscheck-notwendig.html>



Ebenso wenig wird ein Zuwachs an EE-Strom unmittelbar die Zahl der E-Autos steigen lassen. Auch wird eine steigende Zulassung von E-Autos den Verbrauch an EE-Strom steigen lassen (es wird der Fossilstrom steigen). Es besteht kein physikalischer Zusammenhang zwischen Erzeuger E1 und Verbraucher V2.

4.3 Wie hoch sind die Emissionen durch 1 Mio. Verbrenner?

CO₂-Emissionen von 50 Mio. Verbrennern

Berechnung der jährlichen CO₂-Emissionen eines Verbrenners (näherungsweise)

Jährliche Fahrt 12.000 km

7 Liter Kraftstoff pro 100 km

Emissionen seien 3 kg CO₂ pro Liter = 21 kg pro 100 km. Gerundet 20 kg CO₂/km

12.000 km: 120 * 20 kg = 2.400 kg oder 2,4 t CO₂ pro Jahr pro Fahrzeug

1 Mio. Verbrenner emittieren 2,4 Mio. Tonnen CO₂.

50 Mio. Verbrenner emittieren jährlich 120 Mio. Tonnen CO₂.

Wird ein Verbrenner durch ein E-Auto ersetzt, entstehen für dieses Fahrzeug keine CO₂-Emissionen mehr. Die Zahl der Verbrenner fällt von Jahr zu Jahr, entsprechend fallen auch deren CO₂-Emissionen.

4.4 Fall A: E-Autos laufen mit Fossilstrom; EE-Strom bleibt gleich

Strombedarf für die 50 Mio. E-Autos

Vor 2022 gibt es nach unseren Annahmen keine E-Autos. Somit wird in diesem Jahr für die E-Mobilität kein Strom verbraucht. Für die Folgejahre gehen wir von folgenden realitätsnahen Annahmen aus:

Berechnung des jährlichen Strombedarfs für ein Durchschnitts-E-Auto (näherungsweise)

Jährliche Fahrleistung 12.000 km

Strombedarf 20 kWh pro 100 km (Durchschnittsverbrauch von E-Autos).

Strombedarf für ein E-Auto pro Jahr = 2.400 kWh (12.000 * 20 kWh/100)

Strombedarf für eine Mio. E-Autos pro Jahr = 2,4 TWh (2.400 * 1 Mio.)

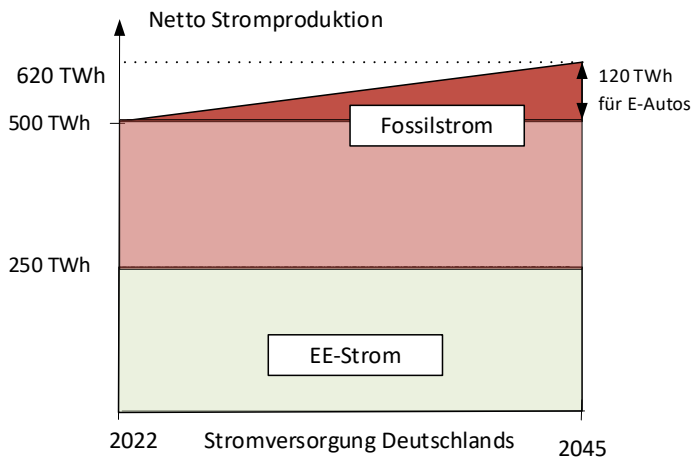
Strombedarf für 50 Mio. E-Autos pro Jahr = 120 TWh.

Stromversorgung Deutschland in 2022

In 2022 wurden konventionell 249 TWh (fossil + Kernenergie) und erneuerbar 242,44 TWh erzeugt.¹⁴ Wir vereinfachen und gehen davon aus, dass im Ausgangsjahr 2022 250 TWh fossil und 250 TWh von

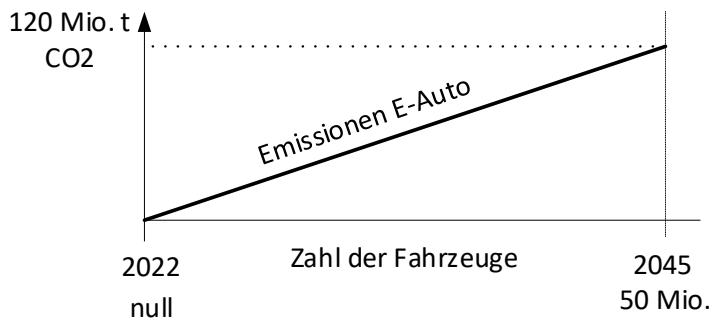
¹⁴ https://www.energy-charts.info/charts/energy_pie/chart.html?l=de&c=DE&interval=year&year=2022

erneuerbaren Quellen erzeugt wurden. Gemäß unseren Annahmen ergibt sich folgende Entwicklung: Die Jahresverbräuche an EE-Strom und fossiler Energie (500 TWh) der bisherigen Verbraucher bleiben gleich. Die Verbrenner werden von Jahr zu Jahr durch E-Autos ersetzt. Dadurch steigt der Bedarf der E-Autos an fossilem Strom. Das ist im folgenden Diagramm dargestellt.

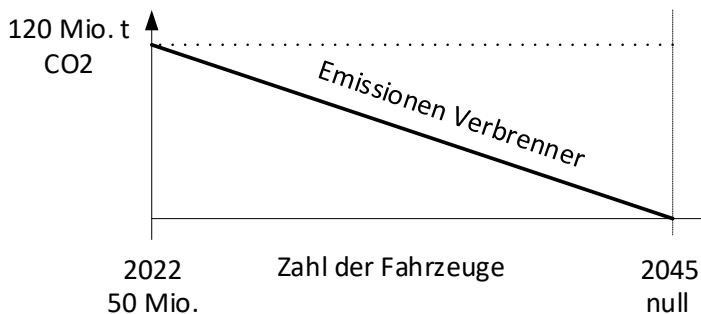


CO₂-Emissionen der 50 Mio. E-Autos

Die Zahl der Verbrenner geht zurück, entsprechend sinken ihre Emissionen. Jedoch steigt die Zahl der E-Autos, wodurch auch deren Emissionen steigen.



Werden die E-Autos mit Fossilstrom betrieben, sinken die CO₂-Emissionen nicht. Sie bleiben unverändert hoch.



Solange E-Autos ausschließlich mit Fossilstrom betrieben werden, sinken die Emissionen der 50 Mio. Fahrzeuge nicht. Das gilt auch dann, wenn der Anteil des EE-Stroms an der Stromversorgung in dieser Zeit steigt. Solange Fossilstrom im Netz ist und die E-Autos mit Fossilstrom versorgt werden, erfolgt keine CO₂-Reduktion durch die E-Autos.

Berechnungen des CO₂-Emissionsfaktors im Fall A für 2045

Die E-Autos sind eine neue Verbrauchergruppe. Der Strombedarf von 120 MWh für die in den Verkehr gebrachten E-Autos wird von Fossilkraftwerken geliefert.

Grenzstrom-Ansatz: Der zusätzlich benötigte Strombedarf wird durch Fossilkraftwerke erzeugt. Die Emissionen steigen gemäß dem CO₂-Emissionsfaktors für Fossilstrom (1 kg/kWh) für die gesamte Zeit des Übergangs.

Durchschnittsstrom-Ansatz: In 2022 beträgt der Emissionsfaktor für den Durchschnittsstrom 0,5 kg/kWh. Für 2045 berechnet sich ein Anstieg auf 0,74 kg/kWh (370 Mio. t CO₂/ 500 TWh)

4.5 Fall B: Keine E-Autos, aber EE-Strom steigt um 120 TWh in 2045

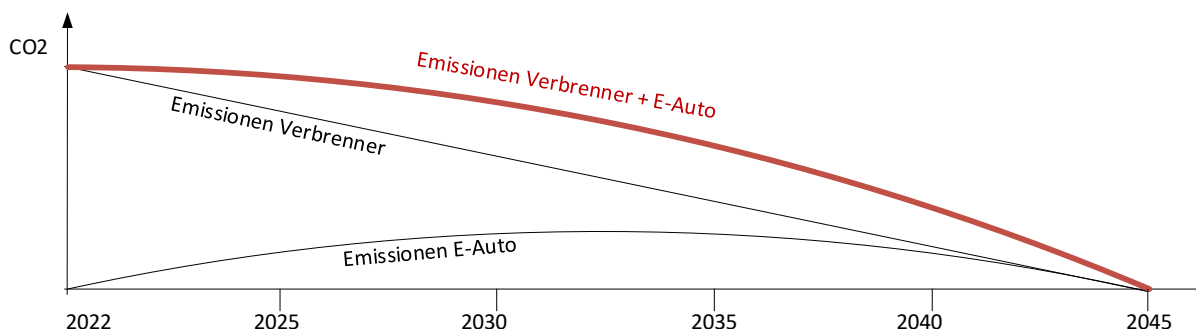
Wir gehen davon aus, dass keine E-Autos zum Einsatz kommen, aber der Strom aus Erneuerbaren Energien um 120 TWh wächst. Es wird also der Strom aus den fossilen Kraftwerken um diesen Betrag verdrängt. Damit sinken deren Emissionen. Bei dem angenommenen CO₂-Faktor von 1 kg/kWh genau um 120 Mio. Tonnen.

4.6 Fall A+B: Fossilstrom-Anteil sinkt; EE-Strom erreicht in 2045 100 Prozent

Der Übergang vom Verbrenner zum E-Auto

Nach und nach werden die 50 Mio. Verbrenner ausgemustert und durch eine gleiche Zahl an E-Autos ersetzt.

Jedes E-Auto, das neu in Betrieb gesetzt wird, wird mit dem Strom aus dem Netz geladen. Die Stromversorgung des Landes wird parallel zur Umstellung auf Elektromobilität bis 2045 komplett auf EE-Strom umgestellt. Anfänglich werden die EE-Autos mit Fossilstrom geladen. Von Jahr zu Jahr wird ihr Ladestrom auf mehr EE-Strom umgestellt, so dass sie im Jahr 2045 nur noch EE-Strom beziehen. Anfänglich sind die CO₂-Emissionen für den Betrieb der E-Autos hoch, sinken - wegen des steigenden Anteils des EE-Stroms - von Jahr zu Jahr und erreichen in 2045 den Wert null. Man hat also eine fallende und eine steigende Kurve der Emissionen der E-Autos, was im Diagramm unten dargestellt ist. Die oberste Kurve „Emissionen Verbrenner + E-Auto“ repräsentiert die Summe beider Kurven.



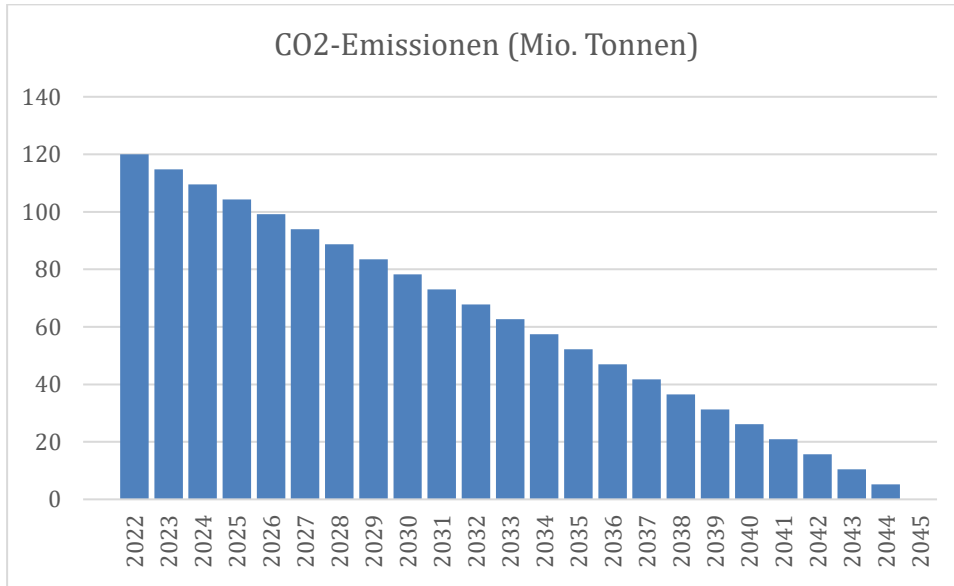
CO₂-Emissionen-Verbrenner

Für das E-Auto, das einen Verbrenner ersetzt, entstehen für die Herstellung des Ladestroms erhebliche CO₂-Emissionen (Die höheren CO₂-Emissionen, die bei der Herstellung von E-Autos entstehen, klammern wir für unsere Berechnungen zur Vereinfachung aus).

Die CO₂-Emissionen der Verbrenner zu Beginn in 2022 betragen 120 Mio. Tonnen CO₂ jährlich. Wir gehen davon aus, dass jedes Jahr rund 2 Mio. Verbrenner ausscheiden, was jedes Jahr die CO₂-Emissionen um 4,8 Mio. Tonnen mindert (120/23).

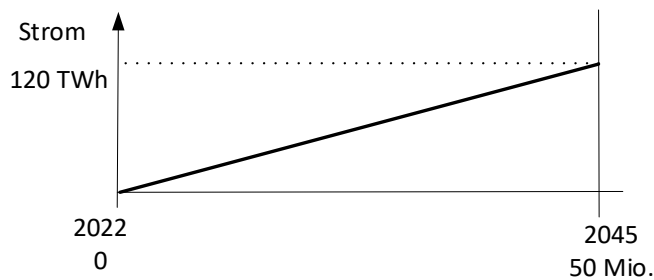
$$\text{CO}_2 - \text{Emissionen} = 120 \text{ Mio. t CO}_2 - \frac{120}{23} * t$$

Die jährlichen Emissionen der Verbrenner fallen linear von Jahr zu Jahr.



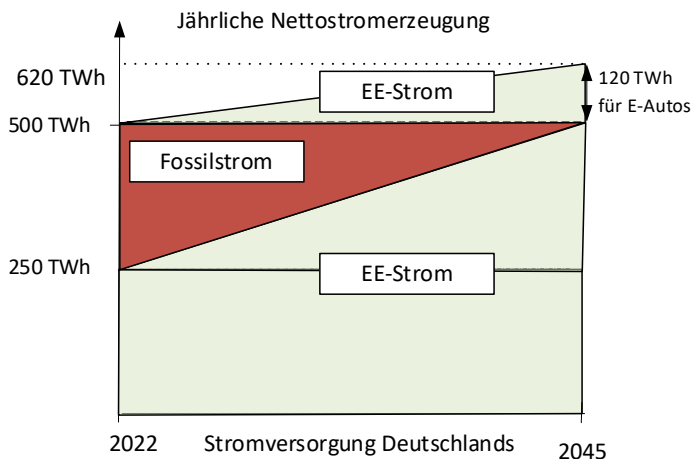
Strombedarf für die E-Autos

Der Strombedarf der E-Autos nimmt mit der Zahl der Fahrzeuge linear zu und wird dann in 2045 bei einem Bestand von 50 Mio. einen Bedarf von 120 TWh haben.



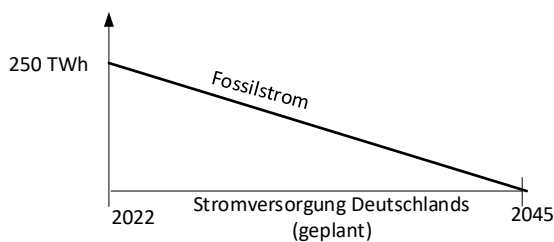
Fossilstrom bei der Stromversorgung sinkt und erreicht null in 2045

Ab 2022 nimmt der Anteil von EE-Strom am Strommix immer mehr zu und in 2045 wird es nur noch EE-Strom im Netz geben.



Annahme: Der Strombedarf der bisherigen Verbraucher in 2022 von 500 TWh ändert sich in dem betrachteten Zeitraum nicht. Allerdings wird die Stromproduktion Deutschlands bis 2045 vollständig auf Erneuerbare Energien umgestellt. Fossilstrom wird kontinuierlich von 2022 bis 2045 vollständig durch EE-Strom ersetzt. Ebenso wird der Strombedarf der E-Autos in 2045 mit immer mehr Erneuerbaren Energien gedeckt. Dabei gilt folgende Formel:

$$\text{Fossilstrom} = 250 \text{ TWh} - \frac{250 \text{ TWh}}{23 \text{ Jahre}} * t$$

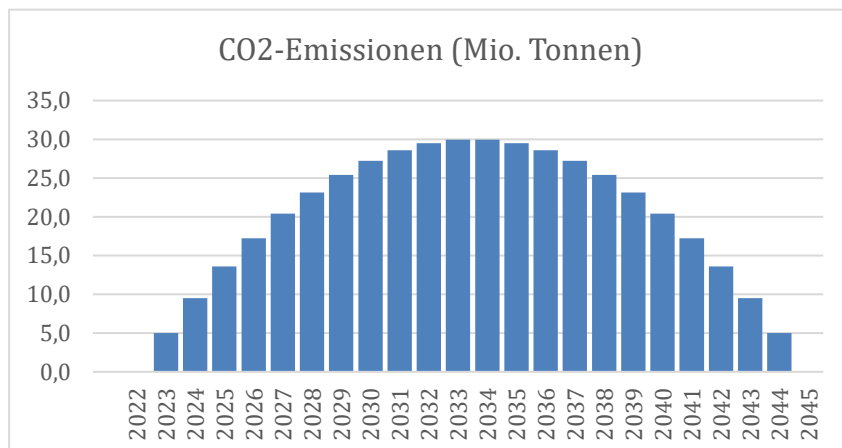


CO2-Emissionen der E-Autos

Wie verändern sich die CO2-Emissionen der E-Autos, deren Zahl von Jahr zu Jahr steigt?

Im Jahr 2022 sind noch keine E-Autos in Betrieb, also entstehen durch sie auch keine CO2-Emissionen. Im Jahr 2023 werden 2 Mio. Verbrenner durch 2 Mio. E-Autos ausgetauscht. Der Prozess setzt sich in den Folgejahren fort. Die CO2-Emissionen im Zeitablauf bis 2045 errechnen sich nach der Formel:

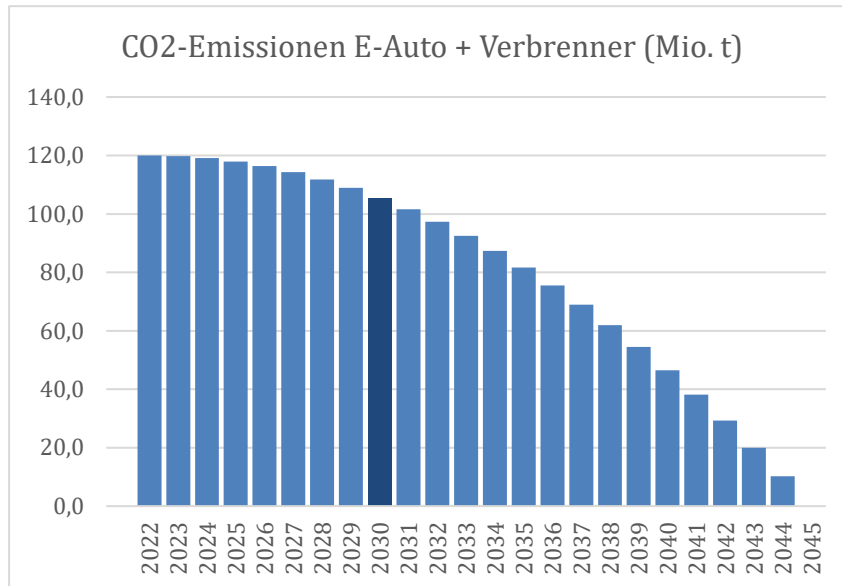
$$\text{CO2 - Emissionen} = \frac{120 \text{ Mio. t CO2}}{23} * t - \left(\frac{120}{23 * 23} * t^2 \right)$$



Die jährlichen CO2-Emissionen der E-Autos steigen in den Jahren 2033 und 2034 auf ein Maximum. Danach sinken die E-Auto-bedingten Emissionen wieder und erreichen im Jahr 2045 null.

Summe Emissionen der Verbrenner und E-Autos

Wenn die Emissionswerte für die Verbrenner und die der E-Autos addiert werden, ergibt sich folgender Verlauf:

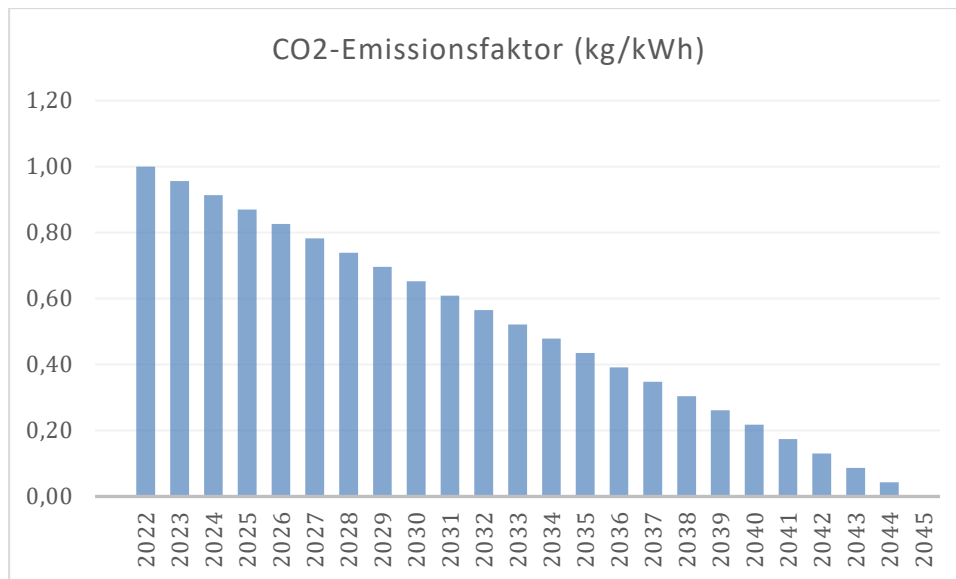


Beispielsweise werden in 2030 gegenüber 2022 die CO2-Emissionen der Pkw nach obigen Berechnungen 105,5 Mio. Tonnen betragen, also ein Rückgang von rund 10 Prozent. Damit würde das Ziel für den Sektor Verkehr im Klimaschutzgesetz (KSG) verfehlt, das für 2030 nur eine zulässige Jahresemissionsmenge von 85 Mio. Tonnen CO2äqui. vorsieht (einschließlich der anderen Verkehrsträger). Das ist bemerkenswert, da wir ja bei unserer Berechnung von der günstigen Annahme (EE-Strom steigt entsprechend E-Auto-Bedarf) ausgegangen sind. Erst in den folgenden Jahren werden die kombinierten CO2-Emissionen von Verbrenner und E-Auto rasch sinken und in 2045 null erreichen.

Berechnungen des CO2-Emissionsfaktors

Durchschnittsstrom-Ansatz: Im Ausgangsjahr 2022 liefern die Fossilkraftwerke und die Erneuerbaren je 250 TWh. In den folgenden 23 Jahren steigt der EE-Anteil von Jahr zu Jahr und erreicht in 2045 100 %. Für die Übergangszeit berechnet sich der CO2-Emissionsfaktor nach der Formel:

$$CO_2 - Emissionsfaktor = 1 \text{ kg/kWh} - \frac{1}{23} * t$$



Grenzstrom-Ansatz: Jedes neu in den Verkehr gebrachte E-Auto erhöht den Verbrauch an Fossilstrom mit einem Emissionsfaktor 1 kg/kWh. Erst in 2045 mit dem endgültigen Abschalten der Kohle- und Gaskraftwerke sinkt der Emissionsfaktor auf null.

4.7 Ergebnisse

Die Fälle A und B

Nach den Modellannahmen sind 2045 alle 50 Mio. Verbrenner gegen 50 Mio. E-Autos ausgetauscht und das Stromnetz ist in 2045 vollständig auf Erneuerbare Energien umgestellt. Unsere Analyse ergibt folgende Ergebnisse:

Fall A: In 2045 sind alle Verbrenner durch E-Autos ausgetauscht. Da diese gemäß unseren Annahmen mit Fossilstrom betreiben werden, bleiben die CO₂-Emissionen auf dem Niveau der Ausgangssituation in 2022, als von 120 Mio. Tonnen. Allerdings kommt das schädliche CO₂ nicht mehr aus den Auspuffen der Autos, sondern aus den Schloten der fossilen Kraftwerke.

Fall B: Die Verbrenner werden schrittweise durch E-Autos ersetzt. In 2045 gibt es nur noch 50 Mio. E-Autos, die zu 100 Prozent mit EE-Strom geladen werden. Gemäß unseren Annahmen wird in diesem Zeitraum auch die deutsche Stromversorgung wird auf EE-Strom umgestellt. Die E-Autos werden somit in 2045 gänzlich mit emissionsfreiem Strom geladen und die jährlichen CO₂-Emissionen durch den Pkw-Verkehr sind gleich null.

Wie hoch ist die aggregierte Menge an CO₂ während der Zeit des Übergangs?

Wie groß ist der Unterschied bezüglich der CO₂-Emissionen zwischen den Fällen A und B?

Fall A: In den Jahren des Übergangs (von 2022 nach 2045) entstehen CO₂-Emissionen in Höhe von 2.760 Mio. Tonnen (120 x 23 Jahre).

Fall B: In diesem Zeitraum entstehen CO₂-Emissionen in Höhe von 1.900 Mio. Tonnen (CO₂-Emissionen E-Auto + Verbrenner 1.899,1). Berechnung Vergleich Fall A zu Fall B: 2.760 minus 1.900. Es wurden in diesem Zeitraum 860 Mio. t CO₂ eingespart.

Doch wie realistisch ist obiger Verlauf? Reicht der EE-Strom?

Unsere Betrachtung geht davon aus, dass die Verbrenner durch E-Autos ersetzt werden und der EE-Strom in Höhe von 120 TWh in 2045 zur Verfügung stehen wird. Angesichts der aktuell absehbaren Entwicklung ist kaum davon auszugehen, dass die für die Modellberechnungen genannten Annahmen beim Pkw-Verkehr (Zahl der Fahrzeuge, Erzeugung von EE-Strom, etc.) zutreffen werden.

Vermutlich geht die Umstellung auf E-Mobilität des Straßenverkehrs langsamer als geplant vonstatten. Entsprechend werden vermutlich die CO₂-Emissionen weniger stark sinken und das Ziel von null Emissionen in 2045 wird vermutlich nicht erreicht werden. Solange die Stromversorgung nicht gänzlich aus Erneuerbaren Quellen kommt, werden E-Autos auch nach 2045 mit Fossilstrom und zu dessen Emissionsfaktor versorgt werden.

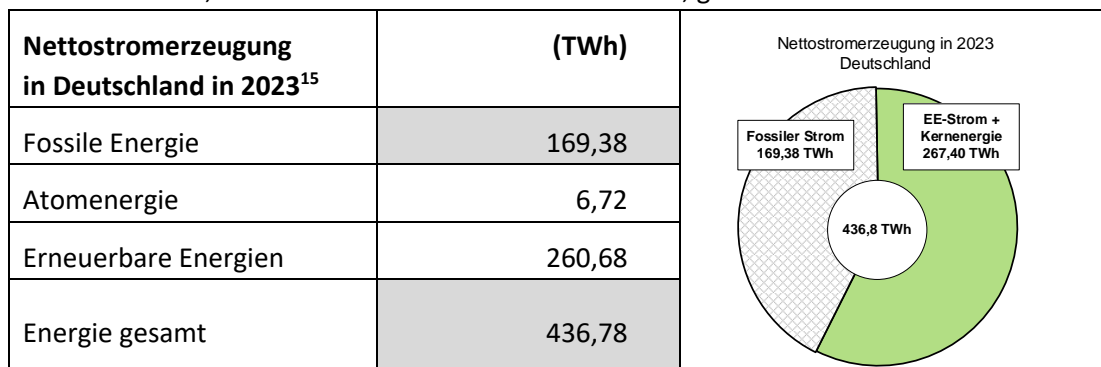
Wenn die Erzeugung von EE-Strom mit der steigenden Zulassung von E-Autos so schön parallel verläuft - wie in unseren beiden Szenarien 2 und 3, ist das unseren Annahmen zu verdanken. Denn es gibt keinen logischen Grund, warum mehr EE-Strom auch zu mehr E-Autos führen sollte.

5. Szenario 4. Strombedarf der alten und der neuen Verbrauchergruppen

5.1 Die alten Verbraucher werden dekarbonisiert. Situation 2045

Wenn wir davon ausgehen, dass sich der Stromverbraucher der „alten“ Stromverbraucher, also diejenigen in 2023, nicht verändert, werden wir in 2045 eben diesen Verbrauch an fossiler Energie von rund 170 TWh dekarbonisiert haben werden. Wobei die Gesamtmenge für die alten Verbraucher bei 437 TWh bleibt.

E-Autos 120 TWh, die alten Verbraucher fossil = 170 TWh; gesamt 290 TWh.



5.2 Der Strombedarf neuer Verbrauchergruppen

Die Bundesregierung hat sich das Ziel gesetzt, dass die Erneuerbaren Energien die Stromerzeugung der fossilen Kraftwerke bis 2045 weitgehend verdrängen. Es ist nicht ersichtlich, woher die Bundesregierung ihren Optimismus hat, wie der zukünftig wachsende Strombedarf von Erneuerbaren Energien gedeckt werden soll.

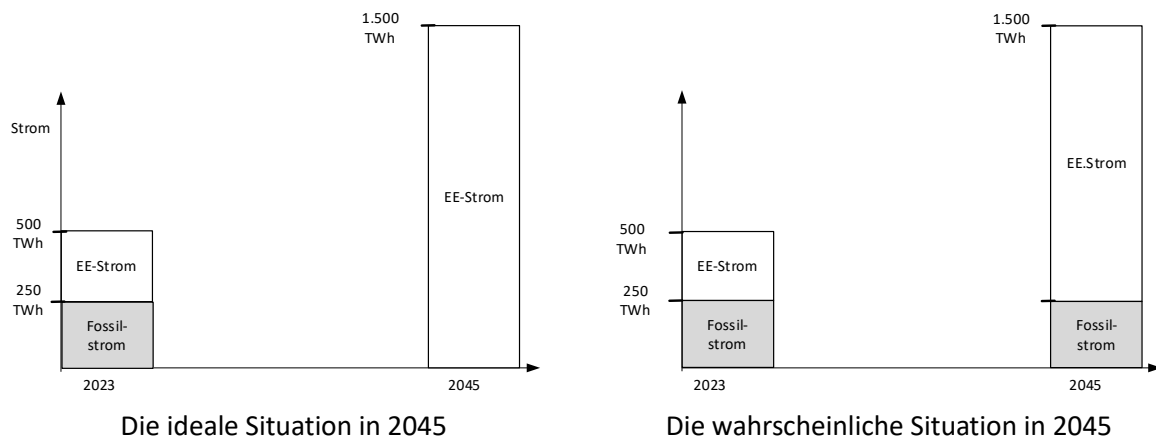
Gegenwärtig beträgt der Stromverbrauch rund 500 TWh. Zukünftig werden weitere Verbrauchergruppen erheblichen Bedarf an Strom anmelden. Dazu gehören:

¹⁵ https://www.energy-charts.info/charts/energy_pie/chart.html?l=de&c=DE&year=2023&interval=year (10.1.2024)

- wachsende Zahl an E-Autos
- steigende Anzahl von Wärmepumpen und Power-to-Heat-Anlagen
- Wasserstoff Elektrolyse-Anlagen
- Dekarbonisierung der Industrieprozesse
- mehr Klimalanlagen wegen Klimaerwärmung

Insgesamt ist mit einem deutlich steigenden Stromverbrauch zu rechnen.¹⁶ Zur Abdeckung der Dunkelflauten wird man Speicher und Wasserstoff benötigen.

Durch die zunehmende Elektrifizierung des Gebäude-, Verkehrs- und Industriesektors steigt der Bruttostromverbrauch weiter an. Der Netzentwicklungsplan (Stand 12.6.2023) rechnet damit, dass er im Jahr 2045 auf 1.079 bis 1.303 TWh ansteigen wird.¹⁷ Das ist mehr als eine Verdopplung des gegenwärtigen deutschen Stromverbrauchs. Sollte die deutsche Stromversorgung gänzlich mit erneuerbaren Energien gedeckt werden, bedeutet dies auch eine Verfünffachung der Nettoerzeugung von EE-Strom von gegenwärtig 250 TWh auf geschätzte 1.250 TWh (1.079 bis 1.303 TWh lt. Netzentwicklungsplan) in 2045.



Es ist jedoch zweifelhaft, ob tatsächlich eine vollständige Elektrifizierung des Landes erreicht werden kann. Vermutlich werden zur Stabilisierung des Stromnetzes weiterhin fossile Kraftwerke notwendig sein, wie sie im rechten Schaubild oben dargestellt ist.

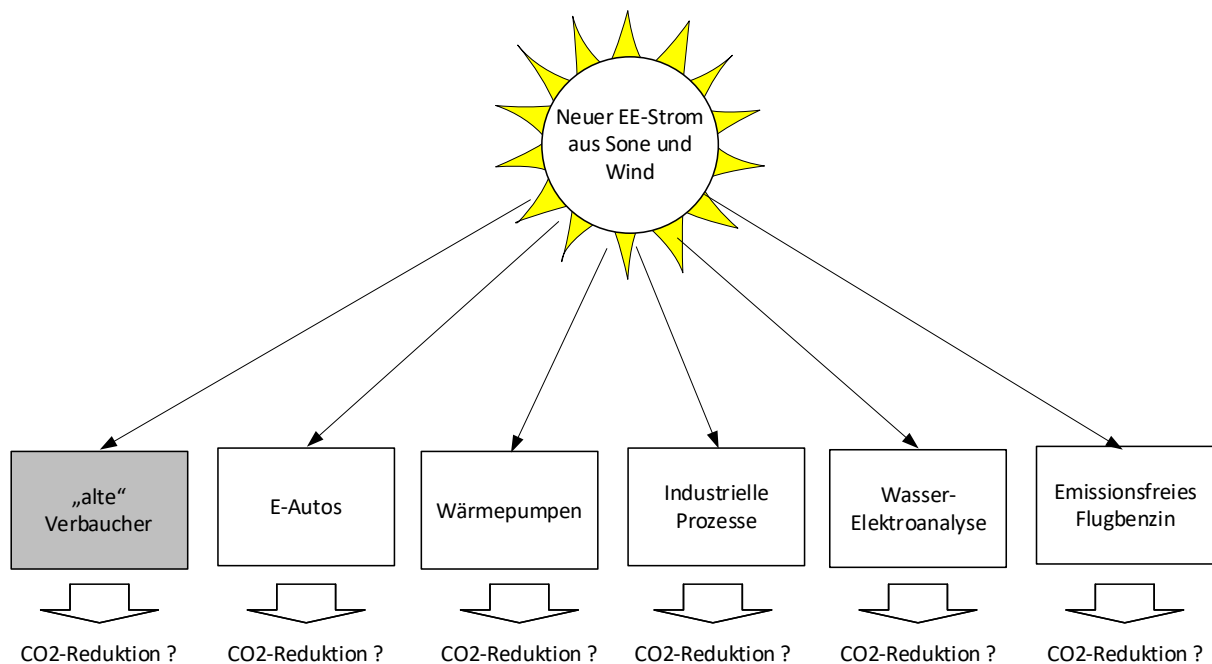
Solar- und Windenergie unterliegen tages- und jahreszeitlichen sowie wetterabhängigen Schwankungen. Konventionelle Kraftwerke unterliegen diesen Schwankungen nicht.¹⁸ Regelbar sind fossile Kraftwerke, Wasserkraft, Windenergie, Photovoltaik, Biomasse, Wasserstoff-Kraftwerke.

¹⁶ <https://www.netzausbau.de/Ausbaubedarf/Szenariorahmen/de.html>

¹⁷ https://www.netzentwicklungsplan.de/sites/default/files/2023-12/NEP%20kompakt_2037_2045_V2023_2E.pdf, Seite 3

¹⁸ <https://www.bundesrechnungshof.de/SharedDocs/Downloads/DE/Berichte/2024/energiewende-volltext.html>, S. 18

5.3 Welche Verbraucher sollen zuerst mit neu erzeugtem EE-Strom bedient werden?



Auf Jahre hinaus wird man nicht ausreichend EE-Strom für alle Verbraucher haben. Insofern stellt sich die Frage, welche Verbrauchsgruppe sollte prioritär mit EE-Strom versorgt zu werden. In ähnlicher Weise kann man auch fragen, ob überhaupt damit beginnen sollte, neue Verbrauchsgruppen überhaupt mit EE-Strom zu versorgen, solange noch die „alten“ Verbraucher noch nicht gänzlich mit EE-Strom versorgt werden. Die Höhe der Vermeidungskosten für die einzelnen Verwendungen stellt dabei ein zentrales Kriterium dar.

6. Folgerungen für die Klimabilanz

Fossile Kraftwerke zeichnen sich dadurch aus, dass sie regelbar sind und ihre Leistungsabgabe je nach Bedarf im Netz anpassen können. Diese Flexibilität ermöglicht es, die Schwankungen der Stromnachfrage auszugleichen und das Netz stabil zu halten. Wenn beispielsweise die Nachfrage nach Strom steigt, können fossile Kraftwerke ihre Leistung erhöhen, und senken, wenn die Nachfrage sinkt.

Erneuerbare Energien wie Wind- und Solarenergie sind nicht regelbar, was zusätzliche Anpassungen im Netz erforderlich macht. Stromnetze müssen daher auf Technologien wie Speicherung und intelligente Netze setzen, um diese Schwankungen auszugleichen und die Zuverlässigkeit zu gewährleisten. Elektrofahrzeuge können auch eine Rolle im Stromnetz spielen, wenn sie als Teil eines intelligenten Lade- und Entlademanagementsystems betrieben werden. Ob und in welchem Maß diese Option realisiert werden kann, wird die Zukunft zeigen.

Die CO₂-Emissionen stammen hauptsächlich aus den Emissionen fossiler Kraftwerke. Erneuerbare Energien wie Wind- und Solarenergie haben im Vergleich dazu einen deutlich geringeren CO₂-Fußabdruck während des Betriebs. Die Reduzierung des CO₂-Ausstoßes ist eng mit dem Übergang zu saubereren Energiequellen und der Verringerung der Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen verbunden.