Vergleich der lebenslangen Treibhausgasemissionen von Elektroautos mit den Emissionen von Fahrzeugen mit Benzin- oder Dieselmotoren

Auke Hoekstra, Forscher und Senior-Berater Elektromobilität
Prof Maarten Steinbuch, Gründer des Masterstudiengangs Automobiltechnik
Eindhoven University of Technology

Inhaltsangabe

Zusammenfassung 3
Berechnung der THG-Emissionen von Elektrofahrzeugen 6
Emissionen der Batterieherstellung 7
Batterie- und Fahrzeuglebensdauer in km 10
Verschlechterung der Batteriespannung 10
Lebensdauer eines Autos 11
Recycling der Batterie 13
Strommix über die Lebensdauer des Autos 14
Energieverbrauch pro Fahrkilometer 19
Berechnung der THG-Emissionen von konventionellen Fahrzeugen 20
Produktion fossiler Brennstoffe 21
Künftige Entwicklungen werden die Elektrofahrzeug-Emissionen weiter reduzierenr 23
Pferdekutschen und das unlösbare Gülleproblem 23
Verbrennungsmotoren ersetzen Pferde und lösen das Gülleproblem 23
Verbrennungsmotoren und das unlösbare CO_2-Problem 24
Elektromotoren ersetzen Verbrennungsmotoren und lösen das CO_2-Problem 24
Literaturverzeichnis 25

Zusammenfassung

Kürzlich haben einige überwiegend deutsche Studien in Frage gestellt, ob das Fahren eines Elektrofahrzeugs weniger Treibhausgase ausstößt oder ob wir warten müssen, bis der Strom weiter dekarbonisiert wird. Dieser Bericht erklärt, dass diese Studien eine Reihe von Mängeln aufweisen und dass ordentliche Berechnungen zeigen, dass Elektrofahrzeuge bereits heute weniger als die Hälfte der Treibhausgase ihrer mit fossilen Brennstoffen betriebenen Pendants ausstoßen. Wenn wir über eine Zukunft spekulieren, in der die Produktion und das Fahren mit erneuerbaren Energien erfolgt, führt dies zu mindestens zehnmal weniger Emissionen als das, was mit Verbrennungsmotoren, die mit fossilen Brennstoffen betrieben werden, erreicht werden kann. Es folgt eine Liste der sechs größten Fehler in Studien, in denen festgestellt wurde, dass Elektrofahrzeuge ähnliche Treibhausgasemissionen haben, wie ihre mit fossilen Brennstoffen betriebenen Gegenstücke. Die Zusammenfassung schließt mit einer Gegenüberstellung der CO_2-Emissionen von Elektrofahrzeugen und Fahrzeugen mit fossilen Brennstoffen in verschiedenen Segmenten.

1. Übertreibung der Treibhausgasemissionen von der Batterieproduktion

Verbesserung und intelligentere Technik (z.B. Konservierung von Wärme im Herstellungsprozess) haben die Energie, die Fabriken zur Herstellung von Batteriezellen benötigen, drastisch gesenkt. Gleichzeitig wird die verwendete Elektrizität stetig dekarbonisiert. All dies reduziert den "Klimarucksack" der Elektrofahrzeuge, aber viele Elektrofahrzeug-kritische Studien ignorieren dies. Beispiele dafür sind Buchal, Karl und Sinn, ADAC, ÖAMTC und Joanneum Research, die davon ausgehen, dass bei der Batterieherstellung 175 kg CO_2 pro kWh Batterie emittiert werden. Sie stützen sich dabei auf eine höchst umstrittene Studie aus dem Jahr 2017. Diese Studie wurde jedoch 2019 aktualisiert und kam zu dem Schluss, dass nun 85 kg CO_2 pro kWh, also die Hälfte des Klimarucksacks" des Elektrofahrzeugs, die Batterie ausmachen. Mazda veröffentlichte 2019 ein Papier mit noch älteren Zahlen. Auf der Grundlage einer Liste der jüngsten Veröffentlichungen gehen wir von einem Bereich von 40 bis 100 kg/kWh mit einem Mittelwert von 75 kg/kWh aus.

2. Unterschätzung der Batterielaufzeit

In vielen Studien (z.B. Buchal, Karl und Sinn, ADAC, ÖAMTC und Joanneum Research) wird vermutet, dass die Lebensdauer der Batterie nur 150 000 km betrifft. Buchal, Karl und Sinn stellen dies sogar einem Dieselauto, das 300 000 km hält, gegenüber. Wir haben jedoch keine Beispiele gesehen, wo dies auf tatsächlichen Forschungen beruhte. Empirische Daten zeigen, dass moderne Batterien höchstwahrscheinlich eine Laufzeit von mehr als 500 000 km haben werden. Neue Studien behaupten, dass mit der heutigen Technologie zwei Millionen km möglich sind. Darüber hinaus nimmt die Lebensdauer von Autos in Europa zu, und man kann davon ausgehen, dass ein durchschnittliches modernes Auto 250 000 km hält. Das ist die in diesem Bericht angenommene Batterielebensdauer.

3. Vermutung, dass die Elektrizität während der Lebensdauer eines Autos nicht sauberer wird

Alle Studien, die hohe Elektroautoemissionen feststellen, gehen davon aus, dass das Elektrofahrzeug mit dem Strommix fahren wird, den es im ersten Jahr verwendet hat. Dies ist verständlich, da es die Berechnungen erleichtert und es vermeidet, dass Annahmen zur Entwicklung des Strommixes verteidigt werden müssen. Es ist aber auch unrealistisch. Genauso wie sich der Strommix in den letzten 20 Jahren dramatisch verändert hat, wird er sich in den nächsten 20 Jahren erneut verändern. Wir schreiben die Entwicklungen der Vergangenheit fort und stützen unsere Schätzungen auf maßgebliche Quellen, um eine zukünftige Zeitreihe mit den Entwicklungen des Strommixes zu erstellen. Dies bedeutet im Grunde genommen, dass Elektrofahrzeuge mit der Zeit immer sauberer

werden. Dieser positive Effekt wird jedoch teilweise durch die Tatsache zunichte gemacht, dass Autos mit zunehmendem Alter weniger fahren. Darüber hinaus müssen wir die stromaufwärts gerichteten Emissionen der Elektrizität hinzurechnen, z.B. durch das Ausbaggern von Kohle, Stromnetzverluste, die wir mit etwa 30% höher schätzen als in der meisten Literatur. Alles in allem sollten Elektrofahrzeuge, die 2020 in Europa verkauft werden, mit 250 g CO_2eq/kWh Elektrizität über ihre gesamte Lebensdauer berechnet werden.

4. Unrealistische Annahmen beim Spritverbrauch

Die Messung der CO_2-Emissionen von Autos ist in Europa zutiefst problematisch, weil die offiziellen Zahlen nicht mehr empirisch, sondern politisch geworden sind. Das Testprotokoll wird in politischen Verhandlungen mit den Herstellern definiert, die dann die Institutionen auswählen und sponsern, die die Tests für sie durchführen. Dies führte zur erfolgreichen Anwendung von Betrugssoftwares, und selbst vollständige Tests unter Verwendung des New European Driving Cycle (NEDC) führen zu Emissionen, die 40% unter der Realität liegen. Die meisten Studien, die Elektrofahrzeuge kritisch gegenüberstehen, verwenden immer noch den NEDC/ NEFZ. Der neue WLTP-Test soll einen Neuanfang darstellen, löst aber keines der oben genannten zugrunde liegenden Probleme, so dass die Verbesserungen begrenzt sind und - wir befürchten – nur vorübergehend sind. Der WLTP ist immer noch nützlich, um die Einhaltung der Vorschriften festzustellen, sollte aber nicht mit empirischen Messungen der tatsächlichen CO_2-Emissionen verwechselt werden. In diesem Bericht verwenden wir Straßenmessungen (von spritmonitor.de) und unabhängige Testmessungen mit einer guten Erfolgsbilanz (von der EPA in den USA).

5. Keine Berücksichtigung der Voremissionen bei Diesel und Benzin bspw. beim Herstellungsprozess

Neue Forschungen über das Abfackeln und andere Quellen von Treibhausgasemissionen haben gezeigt, dass die Emissionen im Zusammenhang mit der Herstellung von Benzin und Diesel größer sind als bisher angenommen. Um die Produktion von Treibstoff zu berücksichtigen, sollten bei Verbrenner-Autos, die mit Benzin fahren, die angenommen CO2 Emissionen um 30% erhöht werden. Autos, die mit Diesel fahren, sollten 24% zu ihren Auspuffemissionen hinzufügen. Die Emissionen pro Liter betragen somit 3310 g bei Diesel und 3140 g bei Benzin. [Diese Zahlen beziehen sich auf die CO2 Emissionen pro Liter und nicht wie sonst üblich auf einen gefahrenen Kilometer]

6. Fehlender Blick in die Zukunft

Die Verbesserungen, die mit der Technologie der Verbrennungsmotoren erreicht werden können, sind begrenzt. Erstens, weil es sich um eine ausgereifte Technologie handelt, bei der nur kleine inkrementelle Verbesserungen möglich sind. Zweitens, weil die Herstellung des Kraftstoffs, den Verbrennungsmotoren benötigen, auf nachhaltige Weise relativ ineffizient und teuer ist. Wenn wir uns an die Pariser Vereinbarung halten, wird die gesamte Lieferkette kohlenstoffarm werden. Vor allem durch den Einsatz von Strom aus erneuerbaren Energien, der auch für industrielle Heizprozesse mit Power-to-Gas genutzt werden wird. Das bedeutet, dass der "Klimarucksack" sowohl bei konventionellen als auch bei Elektrofahrzeugen sehr klein wird. Was bleibt, ist der CO_2-Ausstoß während der Fahrt. Hier kann das Elektrofahrzeug direkt mit erneuerbarem Strom betrieben werden und hat zudem den Vorteil, dass sein Motor im Durchschnitt viermal effizienter ist. Das Endergebnis ist, dass ein Energiesystem mit genügend erneuerbarem Strom zu Elektrofahrzeugen führt, die mindestens zehnmal weniger CO_2 ausstoßen als Autos, die mit Benzin, Diesel oder Erdgas fahren.

Gegenüberstellung von Elektroauto vs. Autos mit Verbrennungsmotor

Das Ergebnis der Vermeidung dieser Fehler bei einer Gegenüberstellung von drei derzeit verfügbaren Automodellen ist unten dargestellt. Die Treibhausgaseinsparungen für verkaufte Autos im Jahr 2020 reichen von 54% bis 82%.

Vergleich der CO_2eq-Emissionen über die Lebensdauer von zwei ähnlichen Autos in Gramm/km

	Toyota Prius 1.8l 2020	**Volkswagen eGolf**
Herstellung ohne Batterie	28	24
Herstellung der Batterie	-	11 (36 kWh Batterie)
Fahren	140	43
Gesamt g CO_2eq per km	**168**	**78 (54% weniger)**
Anzahl der km, die das Elektrofahrzeug benötigt, um die Batterie "zurückzuzahlen"		28 000 km

	Mercedes C 220d	**Tesla Model 3**
Herstellung ohne Batterie	32	28
Herstellung der Batterie	-	23 (75 kWh Batterie)
Fahren	228	40
Gesamt g CO_2eq per km	**260**	**91 (65% weniger)**
Anzahl der km, die das Elektrofahrzeug benötigt, um die Batterie "zurückzuzahlen"		30 000 km

	Bugatti Veyron	**Porsche Taycan S**
Herstellung ohne Batterie	40	36
Herstellung der Batterie	-	28 (93 kWh Batterie)
Fahren	738	76
Gesamt g CO_2eq per km	**778**	**140 (82% weniger)**
Anzahl der km, die das Elektrofahrzeug benötigt, um die Batterie "zurückzuzahlen"		11 000 km

Im Rest dieses Dokuments werden die Berechnungen im Detail erläutert und Quellen angegeben.

Es wurde versucht, dies in einer für Laien verständlichen Weise zu tun.

Berechnung der Treibhausgas Emissionen eines Elektrofahrzeugs

Die Grundformeln, die man verwenden sollte, sind einfach:

$$Emissionen\ pro\ km = \frac{\text{Emissionen aus der Herstellung} + \text{Emissionen aus dem Fahrbetrieb}}{\text{gefahrene km}}$$

$$Emissionen\ aus\ der\ Herstellung = Summe\ aus\ (Batterie + Antriebsstrang + Rest\ des\ Pkws$$

$$Emissionen\ aus\ dem\ Fahrbetrieb = Pkw - Energieverbrauch\ in \frac{kWh}{km} * Stromemissionen\ in\ kWh$$

Sobald die Faktoren in diesen Formeln richtig bestimmt sind, werden Vergleiche einfach und unumstößlich. Unsere Feststellungen zu den wichtigsten Faktoren lauten wie folgt:

- Bei der Batterieherstellung werden ca. 75 kg CO2eq/kWh emittiert.
- Die Lebensdauer der im Jahr 2020 verkauften Autos wird auf 250 000 km geschätzt.
- Die Lebensdauer der Elektrizität am Ladegerät für Elektrofahrzeuge, die 2020 in Europa verkauft werden, wird ca. 250 g CO2eq/km betragen.

Emissionen der Batterieherstellung

Die meisten Studien verwenden veraltete und damit unrealistisch hohe Annahmen bezüglich der Emissionen bei der Batterieherstellung. Auf der Grundlage der neuesten Daten gehen wir von 40 bis 100 kg/kWh aus. Unsere gemittelte Schätzung liegt bei 75 kg/kWh.

Wenige Themen sind für den CO_2-Ausstoß pro Kilometer des Elektrofahrzeugs so folgenreich wie der CO_2-Ausstoß bei der Herstellung der Batterie. Kritiker des Elektrofahrzeugs stellen die Batterieherstellung als einen "Klimarucksack" dar, der kaum abzuschütteln ist.[1] Wir werden zeigen, dass dies auf veralteten Studien beruht und, dass der Rucksack im Vergleich zu den Emissionen, die beim Fahren entstehen, ziemlich leicht ist.

Um vernünftig diskutieren zu können, brauchen wir zunächst eine Metrik, die unabhängig von der Batteriegröße ist. Die Metrik der Wahl in der meisten Literatur ist kg CO_2eq pro kWh. Der erste Begriff 'kg CO_2eq' bedeutet, dass alle Emissionen als Äquivalent von kg CO_2 ausgedrückt werden. So werden z.B. Methanemissionen eingeschlossen, aber in CO_2-Äquivalente umgerechnet. Der zweite Begriff bedeutet, dass wir die gesamte Batterie eines Elektroautos durch die Menge an kWh Ladung teilen, die sie aufnehmen kann. Auf diese Weise bleibt die Metrik für große und kleine Batterien gleich, und wir können problemlos Berechnungen für alle Autos durchführen.

Diese Emissionen sind schwer zu ermitteln, da die Fabriken diese Daten als kommerziell sensibel ansehen. Viele wissenschaftliche Studien versuchen es jedoch, und die neuesten Studien stellen fest, dass diese Emissionen bereits zu gering sind, um die Elektrofahrzeuge in fast jedem realistischen Szenario zu benachteiligen, selbst wenn die Produktion im kohleschweren China stattfindet.[2,3] Sie stellen auch fest, dass die Emissionen schnell sinken.

Anfänglich waren die CO_2-Emissionen der Batterien aufgrund (unter anderem) der Produktion in kleinem Maßstab hoch. Leider basieren viele Studien immer noch auf solch veralteten Zahlen. So verwendet z.B. eine wissenschaftliche Arbeit der Produktstrategie-Abteilung von Mazda4 aus dem Jahr 2019 immer noch Zahlen aus den Jahren 2011[5], 2013[6] und 2014[7], um unrealistisch hohe CO_2-Emissionen zu ermitteln. Aber die Emissionen sind in den letzten Jahren stark zurückgegangen.

Das beste Beispiel dafür ist eine Studie, die kürzlich aktualisiert wurde, während Kritiker des Elektrofahrzeugs weiterhin die veraltete Version verwenden. Diese Studie aus dem Jahr 2017 wird von Journalisten oft als "die schwedische Studie" über soziale Medien, von Journalisten als "die IVL-Studie" und von Wissenschaftlern (Romare und Dahllöf, 2017) bezeichnet.[8] Sie kam zu dem Schluss, dass die Emissionen ziemlich hoch sind: "Eine Batterie mit 150-200 kg CO_2-Äquivalent/kWh scheint der Treibhausgasbelastung durch die derzeitige Batterieherstellung zu entsprechen". Obwohl die Studie sofort wegen der Verwendung veralteter Werksdaten[9-11] kritisiert wurde, stützen sich die jüngsten Artikel, in denen Elektrofahrzeuge benachteiligt werden, auf diese Studie. Beispiele aus Deutschland stammen aus dem ADAC[12], ÖAMTC[13] und Buchal, Karl und Sinn[14,15].

Eine Illustration dafür, wie diese Studie oft von außen beeinflusst wird, findet sich in dem Tool von Joanneum Research (JR), das vom ADAC und ÖAMTC[16] verwendet wurde. Das 171 Seiten umfassende Supportdokument listet 11 Quellen für Batterieproduktionsdaten auf. Es ist jedoch nicht klar, inwiefern die meisten dieser Quellen relevant sind, da JR im Text nur auf drei Quellen verweist. Wenn man diese drei Quellen näher betrachtet, ist die erste ein Beispiel für die Diskrepanz zwischen Wissenschaft und aktuellen Marktinformationen. Es handelt sich um eine Studie von Ellingsen aus dem Jahr 2014[7], die die energieverbrauchenden Schritte bei der Batterieherstellung detailliert beschreibt, basierend auf einem Zyklusinventar aus einer Studie von Majeau-Bettez aus dem Jahr 2011[5], die wiederum auf älteren Quellen beruht. Die in den Publikationen verwendeten Methoden sind also zwar immer noch wertvoll, ihre Ergebnisse sind jedoch veraltet.

Der zweite Verweis von JR (und damit von ADAC und ÖAMTC) ist ein Grundsatzpapier des ICCT[17], in dem JR die Emissionen auf 175 kg CO_2eq/kWh beziffert. Aber das ist nicht korrekt. In dem Schriftsatz behauptet der ICCT, dass "die Schulden im Zusammenhang mit den Lebenszyklusemissionen der Batterieherstellung schnell getilgt sind", nennt jedoch keine Zahl und stellt lediglich fest, dass "die Emissionen der Herstellung um den Faktor 10 schwanken, was auf die Notwendigkeit zusätzlicher Forschung in diesem Bereich hinweist". Sie beziehen sich nur auf 175 kg CO_2eq/kWh in der Legende einer Grafik, wo es heißt: "Die Kohlenstoffintensität der Batterieherstellung in dieser Abbildung verwendet die zentrale Schätzung von Romare et al. (siehe Anmerkung c, Tabelle 1) von 175 kg CO_2e/kWh". Wir sind wieder bei Romare 2017 angelangt. Wenn man das Dokument also schnell überfliegt, scheint es 11 Quellen zu geben, aber in Wirklichkeit sind es nur 2, von denen eine fast zehn Jahre veraltete Informationen verwendet, während die andere Romare 2017 ist.

Wir wiesen darauf hin und teilten unseren Quellen mit, dass diese nicht verfügbar waren, als das Werkzeug an den ADAC übergeben wurde. Aber die Art und Weise, wie sie jetzt in dem Dokument verwendet werden, ist merkwürdig. In einer Bemerkung auf Seite 129 stellt JR fest: "Für die Energienutzung bei der Batterieherstellung haben wir 163 kWh Energie pro kWh Batterie auf der Grundlage von Romare 2017 und Ellingsen 2014 genommen. Neueste Studien schätzen 16 kWh/kWh in großen kommerziellen Fabriken, und dies scheint in zukünftigen Fabriken mit Giga-Einheiten möglich zu sein"[1]. Damit wird im Grunde genommen zugegeben, dass veraltete Informationen verwendet wurden, ohne sie zu korrigieren. Sehr merkwürdig.

Der Kommentar im ifo Schnelldienst von Buchal, Karl und Sinn[14] verwendet (Romare und Dahllöf, 2017) als einzige Quelle.

Aber (Romare und Dahllöf, 2017)[8] wurde auf (Emilsson und Dahllöf, 2019)[18] aktualisiert, und die mittlere Schätzung fiel von 175 auf 87 kg CO_2eq/kWh: Im Grunde genommen halbierten sie ihre Schätzung nach zwei Jahren. Die Aktualisierung kommt zu dem Schluss: "Auf der Grundlage der neuen und transparenten Daten wurde eine Schätzung von 61-106 kg CO_2-Äq/kWh Batteriekapazität berechnet". Der Bericht erklärt die Änderung wie folgt: "Ein wichtiger Grund ist, dass dieser Bericht die Batterieherstellung mit nahezu 100 Prozent fossilienfreier Elektrizität in der Spanne einschließt, was noch nicht üblich ist, aber wahrscheinlich in der Zukunft der Fall sein wird. Der Rückgang am oberen Ende der Spanne ist hauptsächlich auf neue Produktionsdaten für die Zellenproduktion zurückzuführen, darunter realistischere Messungen der Prozessenergien in Trockenräumen für Fabriken im kommerziellen Maßstab und Schätzungen der Verdampfung von Lösungsmittelschlamm, die der tatsächlichen Produktion besser entsprechen. Einfach ausgedrückt: Wenn die Produktion zunimmt und die Elektrizität kohlenstoffarm wird, nehmen die Batterieemissionen schnell ab.

Unserer Meinung nach waren die Ergebnisse der Elektrofahrzeug-kritischen Studien von ADAC, ÖAMTC und Buchal, Karl und Sinn bereits aus vielen anderen Gründen unhaltbar, aber die Aktualisierung ihrer Hauptquelle macht dies zu einem offenen Fall. Die Umsetzung dieser Aktualisierung ihrer im Grunde genommen einzigen Quelle zu den Emissionen bei der Batterieherstellung zeigt sofort, dass das Elektrofahrzeug viel weniger CO_2 ausstößt als seine Pendants mit Verbrennungsmotor, selbst wenn die anderen Fehler in den Studien nicht korrigiert werden, und selbst wenn man sie mit Erdgas vergleicht und den kohlenstoffreichen deutschen Energiemix heranzieht.

[1] Page 129: "Für die Batterieproduktion wird ein durchschnittlicher Energiebedarf von 163 kWh Strom pro kWh Batteriekapazität angenommen (nach Romare 2017, Ellingsen 2014). Jüngste Studien schätzten den Energiebedarf für die Batterieproduktion im kommerziellen Großmaßstab deutlich unter 16 kWh/kWh (Dai 2017, Ahmed 2016), was mit zukünftigen Batterieproduktionssystemen im Giga-Maßstab machbar erscheint."

Für die Analyse in diesem Bericht sehen wir die aktualisierte Romare-Studie als nur einen von vielen Datenpunkten an. Ein weiterer neuerer Datenpunkt ist eine Studie von Hao et al.[2], die aktuelle Daten über die Herstellung von kohleschwerem chinesischem Energiemix verwendet und zu dem Schluss kommt, dass bei der Herstellung von NCM-Batterien etwa 104 kg CO2eq/kWh2 emittiert werden. Eine weitere Studie von Yin et al. aus dem Jahr 2019 verwendet die bekannte GREET-Software und gibt aktuelle Zahlen ein, um zu 111 kg/kWh für NCM in China zu gelangen, was Hao bestätigt. Unter Verwendung der gleichen Methodik setzt Yin NCA (z.B. in Tesla-Autos verwendet) in China auf 82 kg/kWh. Allerdings werden nicht alle Batterien in China hergestellt. Yin schätzt, dass die Emissionen in den USA bei 43 kg/kWh für die NCA-Batterie und 58 kg/kWh für eine NMC-Batterie liegen würden. In einer Studie von Melin19 aus dem Jahr 2019 wird dieser Wert auf durchschnittlich 73 kg CO_2-eq/kWh und bei Herstellung in Europa noch niedriger angesetzt. Eine Studie von James Frith von BloombergNEF aus dem Jahr 2019 schätzt 20-80 kg CO_2-eq/kWh, wobei der Median deutlich niedriger liegt, jedoch ohne Bergbau[20]. Wenn es einen roten Faden gibt, dann den, dass die Emissionen umso geringer sind, je aktueller die Quelldaten sind und je näher sie an den tatsächlichen Messungen liegen. Dies deckt sich gut mit der oben zitierten Bemerkung von Joanneum Research.

Ein Datenpunkt, den wir aufgrund des schieren Volumens der dort produzierten Batterien für relevant halten, ist die Tesla Giga-Fabrik, die kürzlich einen Wirkungsbericht herausgegeben hat, der den Kohlenstoff-Fußabdruck der Batterieproduktion in der Fabrik spezifiziert. Aus diesem Bericht (und nachdem wir die Autoren um eine Klarstellung gebeten haben) entnehmen wir Emissionen auf Packungsebene von 86,5 kg/kWh im Jahr 2017 und 76,7 im Jahr 2019, was (bei linearer Extrapolation) 71,8 im Jahr 2020 ergeben würde.

Basierend auf all diesen Quellen schätzen wir, dass für 2020 Emissionen von 75 kg CO_2eq/kWh wahrscheinlich der beste Mittelwert ist.

Im Laufe der Zeit werden die THG-Emissionen bei der Batterieherstellung noch niedriger werden, und zwar aufgrund: effizienterer Produktion, vermehrter Nutzung erneuerbarer Energien und der Anwendung neuer Chemikalien wie Lithiumschwefel, die ebenfalls billigere und reichlich vorhandene Materialien verwenden.

Batterie- und Fahrzeuglebensdauer in km

In vielen Studien wird angenommen, dass die Batterie nur 150 000 km hält, was die Emissionen von Elektrofahrzeugen erhöht. Wir haben jedoch keine Beispiele gesehen, wo dies auf tatsächlichen Forschungen basierte. Empirische Daten zeigen, dass moderne Batterien das Auto leicht überleben werden. Darüber hinaus nimmt die Lebensdauer von Autos in Europa zu, und man kann davon ausgehen, dass ein modernes Auto 250 000 km hält.

Verschlechterung der Batteriespannung

Viele Menschen haben die Erfahrung gemacht, dass Lithiumbatterien in Mobiltelefonen selten länger als fünf Jahre halten. Bei Elektrofahrzeugen ist das anders. Aber wie anders?

In der wissenschaftlichen Literatur wird der Frage der Batterielebensdauer sehr wenig Aufmerksamkeit geschenkt. Eine Studie von Ellingsen et all[21] aus dem Jahr 2016 stellt z.B. einfach fest:

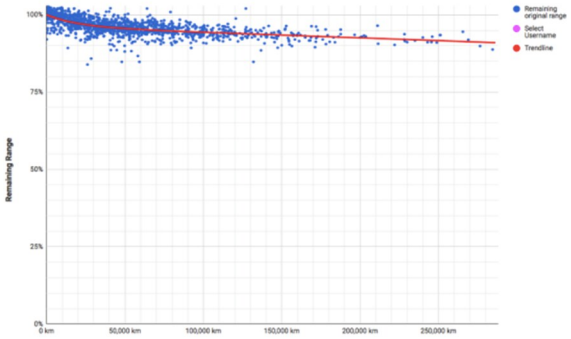
"Die Lebensdauer ist ein Parameter, der unabhängig von der Antriebsstrangkonfiguration Unsicherheiten bei der Folgenabschätzung von Fahrzeugen mit sich bringt. Industrieberichte gehen am häufigsten von einer Elektrofahrzeug-Nutzungsphase von 150 000 km aus (Volkswagen AG 2012, Daimler AG2012, Volkswagen AG 2013, Volkswagen AG 2014, Daimler AG 2014, Nissan Motor Co. LTD 2014). Die Hersteller sind hinsichtlich der Lebensdauer wahrscheinlich etwas konservativ. Wir gingen von einer Lebensdauer von 12 Jahren und einer jährlichen Laufleistung von 15 000 km aus, was zu einer Gesamtlaufleistung von 180 000 km führt".

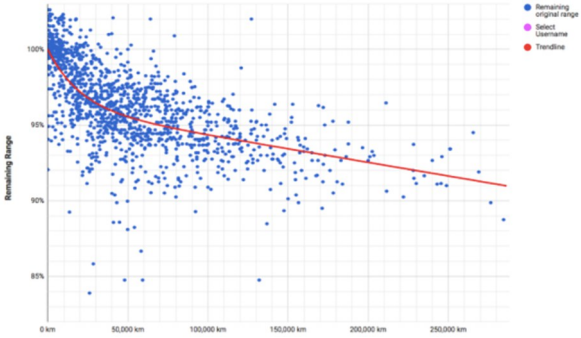
Eine andere kürzlich von Mazda[4] durchgeführte Studie behauptete: "CO_2-Emissionen für den Ersatz der Batterie durch eine neue sollten hinzugefügt werden, wenn die lebenslange Fahrstrecke mehr als 160 000 km beträgt". Diese Wahl wurde verteidigt, indem auf eine große Anzahl von zugrundeliegenden Quellen verwiesen wurde. Die Untersuchung dieser Quellen (mit Schätzungen zwischen 100 000 und 320 000 km) zeigt jedoch, dass sie nicht über die Lebensdauer der Batterie, sondern über die Lebensdauer des Autos sprechen, und alle Schätzungen sind nicht verteidigte Quellen. Es wäre besser gewesen, einfach zu sagen: "Wir haben keine Quellen gefunden, auf die sich eine Schätzung der Batterielebensdauer stützen könnte, aber wir werden eine Zahl von 160 000 km zugrunde legen".

Ein Blick in die umfangreichen empirischen Daten zeigt, dass die frühen Elektrofahrzeuge manchmal unzureichend gekühlt waren, was zu einer schnelleren Verschlechterung (insbesondere in wärmeren Klimazonen) und einem suboptimalen Batteriemanagement (Aufladen der Batterie von sehr niedrig bis fast 100%) führte. Es zeigt aber auch, dass moderne Autobatterien in der Regel länger halten als das Auto. Geotab hat gerade eine Analyse von 6300 Elektrofahrzeugen veröffentlicht, zu denen sie Zugang haben (einschließlich Werkzeug)[22] und kommt zu dem Schluss, dass der durchschnittliche Verschlechterung in den ersten Jahren bei 2,3% pro Jahr liegt, fast unabhängig von der Laufleistung. Sie sagen jedoch, dass "in der Regel erwartet wird, dass Elektrofahrzeug-Batterien nichtlinear abnehmen: ein anfänglicher Rückgang, der dann weiter abnimmt, jedoch in einem weitaus moderateren Tempo. Gegen Ende ihrer Lebensdauer wird eine Batterie einen letzten signifikanten Rückgang verzeichnen". In ihrer Flotte haben sie noch nicht wirklich gesehen, wie Autos diesen signifikanten Rückgang erreichen, und sie kommen zu dem Schluss, dass "die überwiegende Mehrheit der Batterien die nutzbare Lebensdauer des Fahrzeugs überdauern wird".

Dieser Befund wird durch Hunderte von Tesla-Fahrern bestätigt und verfeinert, die ihre privaten Daten aufgezeichnet haben (siehe Abbildung)[23]. Im Durchschnitt weisen sie einen Kapazitätsverlust von 2,5% über die ersten 25 000 km, einen zusätzlichen Verlust von 2,5% über die nächsten 75 000

km und einen Verlust von 1% für jede weiteren 50 000 km auf. Wenn wir willkürlich sagen, dass die Batterie in einem Auto das Ende ihrer Lebensdauer erreicht hat, wenn sie 80 % der Kapazität erreicht hat (eine fragwürdige, aber übliche Schwelle), wäre das Ende der Lebensdauer bei 800 000 km erreicht.



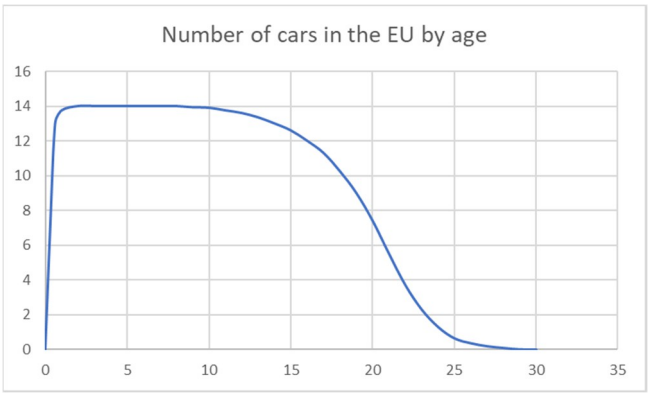


Und in der Tat gibt es einige wenige Tesla-Fahrer, die inzwischen eine Million km gefahren sind. Ein bekannter Fahrer in Deutschland hatte am Start einige Probleme, ist aber inzwischen 680 000 km mit dem neuesten Motor und 480 000 km mit der neuesten Batterie, die immer noch 86% Kapazität hat, gefahren[24].

Dies wird durch viele Erkenntnisse in der jüngsten wissenschaftlichen Literatur bestätigt. In einem Papier aus dem Jahr 2019 über die umfangreichen Tests von NMC-Zellen stellen Harlow et al. fest: „Wir kommen zu dem Schluss, dass Zellen dieses Typs in der Lage sein sollten, ein Elektrofahrzeug über 1,6 Millionen Kilometer (1 Million Meilen) anzutreiben und mindestens zwei Jahrzehnte in der Speicherung von Netzenergie zu überdauern[25]. Ihre Ergebnisse wurden im Labor erzielt, aber dennoch: Dies ist keine Science-Fiction.

Alles in allem ist die häufige Annahme, dass die Batterie nach 150 000 km gewechselt werden muss (z.B. in aktuellen Studien des ADAC[12], ÖAMTC[13]), nicht korrekt und hat keine wissenschaftliche Grundlage. Es ist nur eine Annahme, die bisher nicht in Frage gestellt wurde.

Lebensdauer eines Autos



Eine Frage, die schwieriger zu beurteilen ist, ist, wie lange Elektrofahrzeuge fahren werden, bevor sie verschrottet werden. Wir sollten damit beginnen, zu beurteilen, wie lange konventionelle Autos gefahren werden. Da wir in der Literatur keine verlässlichen Berechnungen finden konnten, haben wir eine Berechnung anhand von Daten aus der Eurostat-Datenbank, den ACEA-Berichten und dem Bundesamt in Deutschland erstellt [26-28]. Zunächst untersuchten wir das Alter von Straßenfahrzeugen. Aus dem ACEA-Bericht wissen wir, dass Fahrzeuge im Durchschnitt 10,8 Jahre alt sind. Aus der Eurostat-Datenbank kennen wir die Anzahl der Fahrzeuge in den Bereichen 0-2, 2-5, 5-10, 10-20 und älter als 20 Jahre. Auf dieser Grundlage haben wir eine Kurve angepasst, die alle Kriterien erfüllt (siehe Abbildung).

Die nächste Frage ist, wie weit die Fahrzeuge jedes Jahr fahren. Die durchschnittlich zurückgelegte Entfernung ist, wie aus der folgenden Tabelle hervorgeht, von Land zu Land unterschiedlich, (Quellen26-28):

	Österreich	Belgien	Kroatien	Dänemark	Finnland	Frankreich	Deutschland	Lettland	Den Niederlande	Slovenien	Schweden
Anzahl der Fahrzeuge (Tausend)	4,898	5,785	1,596	2,530	3,398	32,005	45,956	689	8,373	1,117	4,844
Durchschnittliche km/Jahr	13,900	14,770	12,688	15,882	15,101	11,900	13,727	14,157	13,024	12,653	12,000
Benzin		9,861		13,365	11,205	8,290	12,900	10,107	10,529	10,235	8,970
Diesel		18,480		22,002	20,327	14,540	20,169	16,240	23,240	16,879	16,930

Nimmt man den gewichteten Durchschnitt aller 111 Millionen Fahrzeuge in dieser Stichprobe, beträgt die in Europa pro Personenkraftwagen und Jahr zurückgelegte Strecke 13 202 km. Nimmt man die soeben gefundene Altersverteilung und multipliziert sie mit der jährlichen Fahrleistung, so ergibt sich, dass ein durchschnittliches Auto derzeit rund 255 000 km zurücklegt, bevor es verschrottet wird. Wir werden dies auf 250 000 km abrunden und als Grundlage für weitere Berechnungen verwenden.

Uns ist klar, dass diese Zahl von 250 000 höher ist als in den meisten anderen Quellen, aber sie hat den Vorteil, dass sie durch nachvollziehbare Daten untermauert wird. Außerdem denken wir, dass sie sich als konservativ erweisen wird, da sie die Unterschiede zwischen den Antriebssträngen noch immer nicht berücksichtigt. Wir wissen bereits (und die obige Tabelle zeigt ein Beispiel dafür), dass Dieselfahrzeuge mehr Kilometer fahren als Benzinfahrzeuge. Das ist auch der Grund, warum Buchal, Karl und Sinn[14] von 300 000 km als Lebensdauer des Dieselfahrzeugs im Vergleich zum Elektrofahrzeug ausgegangen sind. Der erste Grund dafür, dass Diesel mehr Kilometer fährt, ist, dass Diesel pro Kilometer billiger ist, und der zweite, dass der Motor länger hält. Dies gleicht den höheren Aufkleber-Preis aus und ist vor allem für Leute interessant, die viel fahren. Beide Argumente gelten noch stärker für Elektrofahrzeuge, wo die Kosten pro Kilometer noch niedriger sind und der Motor (und wie wir gesehen haben, die Batterie) noch länger hält. Würden wir die Laufleistung von Dieselfahrzeugen als Maßstab nehmen, wäre die Laufleistung von Elektrofahrzeugen noch viel höher.

Einige Leute sagten uns, dass dies nicht das ist, was sie um sich herum sehen: Autos scheinen jünger zu sein, als unsere Zahlen vermuten lassen. Das ist richtig, widerspricht aber nicht unseren Ergebnissen. Der Grund dafür ist, dass Autos in den ersten Jahren ihres Lebens mehr gefahren werden, wie wir auf späteren Seiten näher ausführen (und grafisch darstellen) werden. Die Auswirkungen dieser Tatsache lassen sich an einem Beispiel erklären. Nehmen wir an, dass Autos in den ersten fünf Jahren 25 000 km pro Jahr gefahren werden, 15 000 in den nächsten fünf Jahren, 7 000 in den nächsten fünf Jahren und 3 000 in den letzten fünf Jahren. Damit würde die Fahrleistung 250 000 km betragen, das Gesamtalter der Autos 20 Jahre und das Durchschnittsalter 10 Jahre. Wenn Sie jedoch jedes Mal, wenn Sie ein Auto sahen, eine Momentaufnahme machen und sein Alter überprüfen würden, läge das Durchschnittsalter bei 6 Jahren. Das liegt daran, dass die jüngeren Autos mehr gefahren werden und man sie daher häufiger sieht. Außerdem ist das Durchschnittsalter in einigen Ländern niedriger als in anderen: wohlhabende Länder wie Deutschland verschrotten oder exportieren Autos viel früher als zum Beispiel Polen.

Alles in allem sind 250 000 km eine konservative Schätzung für die Fahrleistung von Autos, bevor sie 2019 in Europa verschrottet werden, und wir denken, dass dies derzeit die am besten unterstützte Zahl in der Literatur ist.

Recycling der Batterie

Recycling kann die THG-Emissionen reduzieren, aber dies ist keine Selbstverständlichkeit. „Second Life“ wird die THG-Emissionen zwar senken, aber um wie viel, lässt sich nur schwer quantifizieren. In dieser Studie verfolgen wir einen konservativen Ansatz und ignorieren beides.

Ein weiterer strittiger Punkt ist die Frage, wie „Second Life“ und Recycling zu zählen sind. Wir beginnen mit dem Recycling. Ganz einfach ausgedrückt: Wenn Sie die Batterie schmelzen müssen, um an den Inhalt zu gelangen, sparen Sie zwar Material, aber keine Energie. Der CO_2-Ausstoß könnte also sogar steigen, wenn Sie mit kohlenstoffreicher Energie recyceln. Wenn die Materialien jedoch wiederverwendet werden können, ohne die gesamte Batterie schmelzen zu müssen, sind große Energieeinsparungen möglich.

Melin gibt einen guten Überblick[19]. Ein Beispiel, das Energie spart, ist das direkte Kathodenrecycling[29,30]. Ein Beispiel, bei dem dies nicht der Fall ist, sind pyrometallurgische und hydrometallurgische Recyclingverfahren, die oft mehr Energie benötigen als der Bergbau [30,31]. Da der Großteil des Recyclings auch in Zukunft stattfinden wird, wenn das Stromnetz weniger kohlenstoffintensiv ist, könnte dies in beiden Fällen immer noch eine erhebliche Einsparung an Treibhausgasemissionen bedeuten, aber um auf der konservativen Seite zu bleiben, haben wir die CO_2-Einsparungen für das Recycling in unserem Vergleich nicht berücksichtigt.

Die Nutzung im „Second Life“ ist noch ungewiss, könnte aber ein guter Weg sein, Stromnetze zu stabilisieren, die einen großen Anteil von Sonne und Wind nutzen. Wir haben bereits eine andere Studie durchgeführt, die vorsieht, dass Batterien in Zukunft 20 Jahre lang als Netzspeicher verwendet werden, nachdem sie als Autobatterie eingesetzt wurden[25], aber es ist schwierig, dazu eine Zahl zu nennen. Eine zweite Nutzung hätte natürlich das Potenzial, die Treibhausgasemissionen zu senken, aber da es viele Möglichkeiten gibt, dies zu quantifizieren, erweist es sich als schwer fassbar und führt meist zu subjektiven Diskussionen, die dazu benutzt werden könnten, das bereits robuste Ergebnis, dass ein Elektrofahrzeug während seiner Lebensdauer viel weniger CO_2 ausstößt, zu entkräften. Daher werden wir diesen Vorteil in diesem Bericht nicht quantifizieren.

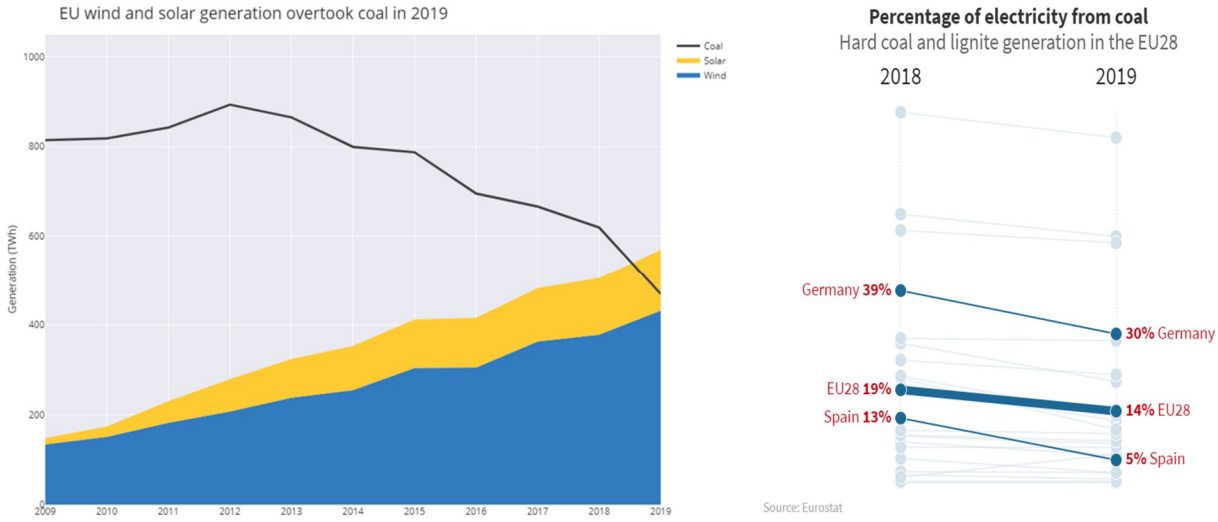
Strommix über die Lebensdauer des Autos

Elektrofahrzeuge, die 2020 in Europa verkauft werden, sollten über ihre Lebensdauer mit 250 g CO_2eq/kWh Strom rechnen. Viele Studien gehen davon aus, dass das Elektrofahrzeug mit dem Strommix fahren wird, den es im ersten Jahr verbraucht hat. Dies ist falsch, da die Autos etwa 20 Jahre lang auf der Straße bleiben und sich der Strommix in diesem Zeitraum voraussichtlich drastisch verändern wird. Daher verwenden wir den Strommix über die Jahre, die das Fahrzeug voraussichtlich gefahren wird, gewichtet nach den pro Jahr gefahrenen Kilometern. Dazu addieren wir die vorgelagerten Emissionen, den Handel und die Verluste.

Dies ist ein komplexes Thema, das in der Literatur selten richtig behandelt wird, und deshalb gehen wir etwas ins Detail. Zunächst bestimmen wir den Strommix über die Lebensdauer der Elektrofahrzeuge. Dann bestimmen wir die Anzahl der Kilometer pro Jahr, die das Elektrofahrzeug fährt. Schließlich fügen wir die Treibhausgasemissionen aufgrund von vorgelagerten Emissionen, Handel und Netzverlusten hinzu.

Der europäische Strommix ändert sich über die Lebensdauer des Elektrofahrzeugs von 260 g CO_2-Äq/kWh im Jahr 2019 auf 117 g CO_2Äq/Jahr im Jahr 2040.

Die Stromerzeugung ist keine statische Größe. Von allen menschlichen Quellen von THG-Emissionen hat die Stromerzeugung den schnellsten Rückgang der Emissionen pro Energieeinheit verzeichnet, und dieser Trend wird sich voraussichtlich fortsetzen [32,33]. Die Emissionen des Stromsektors in Europa sind seit 2012 um 32% und allein 2019 um 12% zurückgegangen, was die Emissionen für die Erzeugung auf 267 g CO_2Äq/kWh im Jahr 2019 bringt[33]. Wir haben Zahlen der Europäischen Umweltagentur[34] und der Agora Energiewende/Sandbag[33,35] kombiniert, um eine Zeitreihe von 1990 bis 2019 zu erstellen, und eine lineare Trendlinie (R2 0,964) eingefügt, die zeigt, dass die Emissionen in diesem 29-jährigen Zeitraum um relativ konstante 7,2 g CO_2Äq/kWh pro Jahr zurückgegangen sind. Es gibt Anzeichen dafür, dass eine auf dem Pariser Abkommen basierende Politik in Verbindung mit einem beschleunigten Rückgang der Kohle und der Einführung von Solar- und Windenergie diesen Trend beschleunigen könnte. Um jedoch konservativ zu bleiben, haben wir angenommen, dass sich der lineare Trend fortsetzen wird.



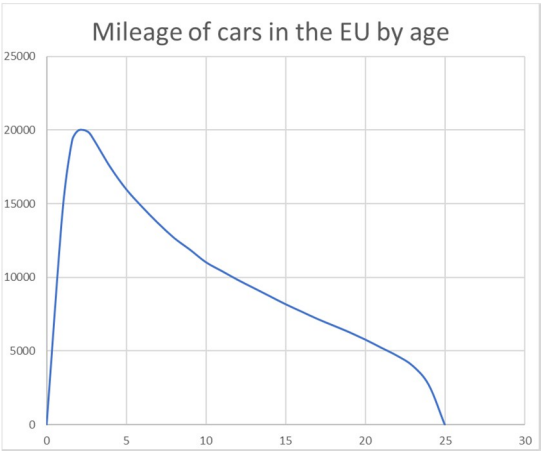
Agora Energiewende & Sandbag Analyse des europäischen Stromsektors im Jahr 2019[33]

Das bedeutet, dass ein Elektrofahrzeug, das 2020 gekauft wird, mit einer Stromversorgung fährt, die etwa 260 g CO_2Äq/Jahr ausstößt, aber 20 Jahre später mit einer Stromversorgung fährt, die nur 117 g CO_2Äq/kWh ausstößt. Das ist eine signifikante Reduktion über die Lebensdauer des Fahrzeugs, die nicht ignoriert werden sollte (wie es die meisten Studien leider tun).

Die Anzahl der pro Jahr gefahrenen Kilometer ist höher, wenn ein Auto noch jung ist, und nimmt mit zunehmendem Alter allmählich ab. Daher wird der meiste Strom verbraucht, wenn das Auto jung ist, und der Strommix besteht immer noch überwiegend aus fossilen Brennstoffen.

Wir können nicht einfach den Durchschnitt des Strommixes über die Lebensdauer des Autos nehmen, denn Autos fahren mehr, wenn sie jünger sind. Auf die gleiche Weise, wie wir eine Kurve für das Alter der Autos konstruiert haben, werden wir auch eine Kurve für die Anzahl der jährlich gefahrenen Kilometer konstruieren. Wir werden auch wieder die Eurostat-Datenbank[26] und die gleichen Altersklassen verwenden. Wir verwenden hauptsächlich Informationen aus dem Jahr 2015, weil dies der aktuellste vollständige Datensatz ist und wir diese spezifischen Informationen nur aus Belgien, Deutschland, Irland, Kroatien, Malta, den Niederlanden, Slowenien, Schweden und Norwegen haben, aber das gibt uns immer noch mehr als 71 Millionen Autos, mit denen wir arbeiten können. Das Gesamtergebnis ist die folgende Tabelle. Wie Sie hier sehen können (und wie wir bereits erwähnt haben), werden Autos in Deutschland nicht alt. Unsere Vermutung ist, dass sie häufig exportiert werden.

Age (years)	<2	2-4	5-9	10-19
Belgien	12,873	20,116	16,085	12,789
Deutschland	19,009	16,017	15,078	2,101
Irland	26,287	21,143	17,263	19,510
Kroatien	17,869	16,647	13,652	6,651
Malta	7,143	15,208	9,167	8,125
Den Niederlande	11,031	19,389	14,704	5,891
Slovenien	16,160	29,737	12,953	8,005
Schweden	8,619	19,636	15,622	14,045
Norwegen	11,998	16,167	14,732	10,829
EU gesamt	14,554	19,340	14,362	9,772



Wir haben für Europa eine durchschnittliche Fahrleistung pro Jahr angesetzt, die sowohl diesen Ergebnissen als auch unserer zuvor erläuterten Annahme von durchschnittlich 250 000 km pro Auto entsprach. Die Ergebnisse sind grafisch dargestellt.

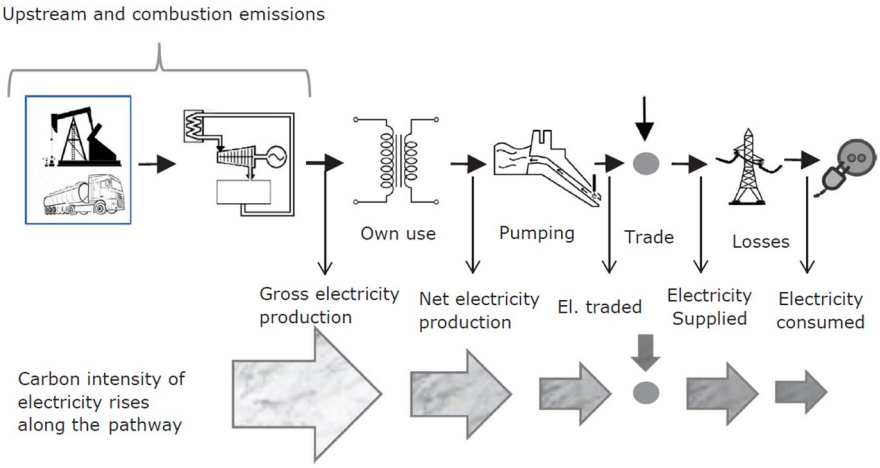
Der gewichtete Durchschnitt der europäischen Stromversorgung über die Lebensdauer eines im Jahr 2020 verkauften Elektrofahrzeugs beträgt etwa 192 g CO_2Äq/kWh. Addiert man die vorgelagerten Emissionen, den Handel und die Netzverluste, so ergibt sich eine Gesamtkohlenstoffintensität des von Elektrofahrzeugen verbrauchten Stroms von etwa 250 g CO_2-Äq/kWh.

Unter Verwendung sowohl der jährlichen Fahrleistung als auch des jährlichen Strommixes können wir die gewichteten durchschnittlichen Treibhausgasemissionen des Strommixes über die Lebensdauer des Fahrzeugs bestimmen. Das Ergebnis ist, dass in Europa verkaufte Elektrofahrzeuge im Jahr 2020 eine Stromproduktion von 192 g CO_2Äq/kWh annehmen sollten.

Der letzte Schritt, den wir unternehmen müssen, ist die Berücksichtigung der vorgelagerten Emissionen, des Handels und der Netzverluste. Vor allem die vorgelagerten Emissionen und der

Handel werden oft vergessen, aber da sie zu Treibhausgasemissionen führen, sollten sie einbezogen werden. Es gibt viele mögliche Ansätze[36], aber die Essenz aller Ansätze ist in der folgenden Abbildung und Tabelle aus Moro et. al. dargestellt.

Generation	Upstream hinzufügen	Eigengebrauch hinzufügen	Add pumping	Handel hinzufügen	HV Verluste hinzufügen	MV Verluste hinzufügen	LV Verluste hinzufügen	**Gesamter Anstieg**
100%	14%	5%	1%	1%	3%	1%	3%	**31%**



Bei Berechnungen auf der Grundlage des Energiemixes für das EU-Stromnetz im Jahr 2013 machen all diese Faktoren zusätzlich zur Primärproduktion 31% der Treibhausgasemissionen aus. Moro et al. ist die gründlichste Quelle, die wir finden konnten, produziert aber auch die höchsten Emissionen. Wir sind also wieder einmal konservativ.

Addiert man diese 31% zu den 192 g CO_2Äq/kWh, die wir bereits für die Erzeugung über die Lebensdauer des Elektrofahrzeugs festgelegt hatten, ergibt sich eine Summe von 251, die wir auf 250 g CO_2Äq/kWh aufrunden werden.

Wir haben keinen "Grenzstrom" verwendet, weil er zu subjektiv ist.

Einige Leute argumentieren, dass Elektrofahrzeuge den marginalen Strommix nutzen sollten. Einfach ausgedrückt: Versuchen Sie, die spezifische Energiequelle festzunageln, die zum Aufladen des Elektrofahrzeugs verwendet wurde. Wir denken, das ist noch nicht machbar. Dazu muss man wissen, wann und wo das Elektrofahrzeug lädt und unter welchem Vertrag der Strom produziert wird. Man muss auch eine Reihenfolge festlegen, in der sowohl das Angebot als auch die Nachfrage von

Elektrizität gezählt werden. Und man kommt in fast philosophische Diskussionen über Ursache und Wirkung.

Nehmen wir ein Beispiel: Jemand baut ein neues Haus mit (unter anderem) Sonnenkollektoren, einer Wärmepumpe und einer Ladestation für ein Elektrofahrzeug, das intelligentes Laden verwendet. Diese Person hat auch einen Vertrag mit einem 1000 km entfernten Windpark, der zusätzlichen Strom liefern soll.

Wie zählen wir die Elektrizität des Elektrofahrzeugs?

1. Man könnte sagen, dass Elektrofahrzeuge dann aufgeladen werden, wenn es am billigsten ist. Wir erwarten diese Entwicklung, weil sie der EU jährlich Dutzende von Milliarden Euro zu sehr geringen Kosten einsparen würde. Unsere Simulationen zeigen, dass dadurch die Versorgung mit fossilen Brennstoffen weitgehend vermieden würde. Aber es wird bisher nur in kleinem Maßstab umgesetzt. In welchem Jahr gehen wir also davon aus, dass es von diesem Auto übernommen wird?
2. Man könnte sagen, dass alles aus Wind und Sonne kommt, denn darauf weist ihr Vertrag hin. Allgemeiner gesagt: Wir wissen, dass die öffentlichen Stromzapfsäulen in den meisten Ländern Verträge über erneuerbare Energien haben und, dass die meisten Käufer von Elektrofahrzeugen auch Verträge für Ökostrom haben. Aber wenn man das mitzählen würde, würde der CO_2-Ausstoß des Elektrofahrzeugs stark sinken.
3. Wir könnten versuchen, Netzverluste auf der Grundlage des tatsächlichen Vertrags einzubeziehen und so einen Bonus für die Energie aus dem lokalen Solarpanel und einen Malus wegen des weit entfernten Windparks zu geben. Aber wir würden argumentieren, dass sich die Elektronen nicht um Verträge scheren.
4. Wir könnten sagen, dass Verträge keine Rolle spielen, aber ihre eigenen Sonnenkollektoren schon, und wir könnten versuchen, herauszufinden, welcher Teil der Energie an das Elektroauto geht. Auf persönlicher Ebene ist es das, wofür wir bei uns zu Hause optimieren, aber es auf Europa hochzuskalieren, bringt große Unsicherheiten mit sich.
5. Wir könnten sagen, dass das Elektrofahrzeug und die Wärmepumpe als "neuer Bedarf" bezeichnet werden und daher erst dann gezählt werden, wenn der gesamte andere Strom gezählt ist. Aber zählen Sie zuerst die Wärmepumpen oder die Elektrofahrzeuge? Und warum zählt nicht das ganze neue Haus (oder eine ganze neue Fabrik) als neuer Bedarf und nicht nur das Elektrofahrzeug? Wenn man wirklich versucht, es in einem Modell zu programmieren, stellt man fest, dass es eine Menge willkürlicher Entscheidungen gibt.
6. Wir könnten sagen, dass die neue Nachfrage durch die neue Energieversorgung erfüllt wird, da sie ohne das neue Angebot nicht vorhanden wäre. Das würde die CO_2-Emissionen von Elektrofahrzeugen noch einmal drastisch reduzieren.
7. Man könnte sagen, dass die neue Nachfrage den Ausstieg aus den derzeitigen (fossilen) Energiequellen nur verlangsamt, und deshalb fahren Elektrofahrzeuge hauptsächlich mit fossilen Brennstoffen. Dadurch würden die Emissionen von Elektrofahrzeugen ansteigen.
8. Wir könnten uns die so genannte Merit-Order ansehen und schauen, welches die Energiequelle mit den höchsten Grenzkosten ist (oft Kohle), die abgeschaltet würde, wenn Elektrofahrzeuge abgeschaltet würden. Aber warum sollten wir dies für Elektrofahrzeuge tun und nicht für die Wärmepumpe oder den Fernseher oder die Klimaanlage oder die neue Fabrik?

Elektrofahrzeuge fahren nicht mit 100% Kohle

Kürzlich erschien eine Studie von Stahl Automotive Consulting [38], die sich ganz auf den oben genannten Ansatz bezog und verkündete, dass Elektrofahrzeuge ausschließlich mit Kohle fahren.

Aufbauend auf dem obigen Beispiel wollen wir wiederholen, warum die uns bekannten Wissensinstitutionen dies nicht für den richtigen Ansatz halten:

- Es ist willkürlich zu sagen, dass Elektrofahrzeuge der letzte Strom sind, der zur Gesamtnachfrage hinzukommt. Warum nicht Wärmepumpen? Warum nicht Industrien, die elektrifizieren? Warum nicht Computer oder Datenzentren? Es ist etwas vereinfachend, anzunehmen, dass eine bestimmte Nachfrage, die einem nicht gefällt, 100 % Kohle nutzt. Wenn jeder, der einen negativen Bericht über irgendeine Form der Energienutzung schreibt, dies tun würde, würde dies schnell die verfügbare Strommenge von Kohlekraftwerken übersteigen.
- Es ignoriert Verträge mit Stromversorgern und einzelne Investitionen. Elektrofahrzeug-Eigentümer und Betreiber von Stromzapfsäulen kaufen oft Ökostrom und kombinieren den Kauf eines Elektrofahrzeugs mit dem Kauf von Sonnenkollektoren. Es ist umstritten, wie dies einbezogen werden sollte, aber die Annahme, dass die Elektrofahrzeuge vollständig mit Kohle fahren, ist das andere Extrem.
- Der Anteil der Kohle nimmt schnell ab. Ein vollständiger Ausstieg aus der Kohle könnte zehn oder zwanzig Jahre dauern, und solange die Anlagen nicht stillgelegt werden, nimmt die installierte Kapazität nur langsam ab, aber die Menge des mit Kohle erzeugten Stroms nimmt schnell ab. (Siehe auch Bild oben.) Die Annahme, dass Elektrofahrzeuge mit Kohle fahren, funktioniert also nur, wenn man die Entwicklung des Mix über die Lebensdauer des Fahrzeugs außer Acht lässt.
- Der Zeitpunkt des Aufladens sollte nicht vergessen werden, wenn man einen Ansatz wählen will, bei dem Elektrofahrzeuge irgendwie die letzte Ladung sind, die dem Mix hinzugefügt wird. Zunehmend wird es Momente im Laufe des Tages geben, in denen die Kohle ganz oder fast abgeschaltet wird.
- Smart Charging ist ein Ansatz, bei dem das Elektrofahrzeug dann aufgeladen wird, wenn die Energie am billigsten ist und dies mit dem Moment zusammenfällt, in dem die Energie aus Wind oder Sonne kommt. Dies wird zunehmend als eine kostengünstige, einfach zu implementierende Lösung angesehen (Standards wie OCPP und IEC15118 unterstützen dies bereits), die das Elektrofahrzeug tatsächlich viel besser machen würde als der durchschnittliche Mix.

Was in der Studie von Stahl Automotive Consulting noch bemerkenswerter ist, ist, dass sie eine sauberere Alternative in Form von Verbrennungsmotoren mit eFuels vorschlagen. Laut der Quelle, die sie uns auf diese eFuels verwiesen haben, könnten diese eFuels im Jahr 2030[39] etwa 15 Cent pro kWh kosten, was viel teurer als erneuerbare Energie ist (zum Teil, weil etwa 75% der Energie bei der Umwandlung von Elektrizität in eFuel verloren geht) und weitere Verluste im Verbrennungsmotor entstehen würden (da dieser etwa 75% seiner Energie als Wärme verliert). Alles in allem würde diese Option fast zehnmal mehr erneuerbare Energie benötigen, wie kann dies zu geringeren Kohlenstoffemissionen führen? Wie in vielen Studien üblich, die Elektrofahrzeuge mit Alternativen vergleichen (z.B. auch in dieser Studie von Fraunhofer über Wasserstoffautos[40]), wird dies dadurch erreicht, dass Elektrofahrzeuge einen völlig anderen Strommix erhalten. Während das Elektrofahrzeug zu 100 % mit Kohle fährt, wird der eFuel mit möglichst sauberer erneuerbarer Energie hergestellt. Wir denken, dass es sinnvoller ist, den gleichen Energiemix als Input zu verwenden, wenn Elektrofahrzeuge mit Alternativen wie Wasserstoff eFuel verglichen werden.

Energieverbrauch pro Fahrkilometer

Wir verwenden EPA-Messungen, weil sie unabhängig sind und eine gute Erfolgsbilanz aufweisen.

Dieses Thema ist in der Literatur häufig ein Problem. Viele Quellen (z.B. Buchal, Karl und Sinn[14]) verwenden Messungen nach dem Neuen Europäischen Fahrzyklus oder NEFZ. Dies ist problematisch, weil wir wissen, dass der NEFZ - sogar abgesehen von der Verwendung von Abschalteinrichtungen[41] - um 40% zu niedrig ist [42,43]. Bei einem durchschnittlichen Elektrofahrzeug ist die Auswirkung auf einen Vorteil von 5 g CO_2-Äq/km begrenzt, bei Verbrennungsmotoren liegt der Vorteil jedoch in der Regel bei 50-100 g CO_2-Äq/km. Dies sollte nicht überraschen, da dieser Test von den Automobilherstellern über Jahrzehnte hinweg optimiert wurde, um ihre offiziellen CO_2-Emissionen so niedrig wie möglich zu machen.

Der neue WLTP-Zyklus sollte weniger von der Realität abweichen, aber das zugrunde liegende Problem wurde nicht angegangen. Dieses Grundproblem besteht darin, dass die Automobilhersteller in Europa den Test mit Fahrzeugen, Bedingungen, Orten und Institutionen ihrer Wahl initiieren und da sie für den Test bezahlen, können sie verlangen, dass alles, was nicht ausdrücklich gesetzlich verboten ist, getan wird, um die Ergebnisse zu verfälschen.

Dieses Problem besteht nicht in den Vereinigten Staaten, die vor Jahrzehnten die Entscheidung getroffen haben, eine unabhängige Organisation - mit unabhängigen Finanzen - mit der Durchführung dieser Tests zu beauftragen: die Environmental Protection Agency oder kurz EPA. Und wie zu erwarten ist, entsprechen ihre Tests weitgehend der Realität. Ein weiterer Vorteil der EPA-Zahlen ist, dass sie den Energieverbrauch von Elektrofahrzeugen an der Steckdose messen und somit Ladeverluste mit einbeziehen. Schließlich zeigen sie auf der Website fueleconomy.gov bequem die Messwerte aller Autos an, die sie getestet haben. Aus diesen Gründen verwenden wir EPA-Zahlen für die Emissionen verschiedener Autos. Wenn die Messungen der EPA nicht verfügbar sind (was bei einigen Dieselfahrzeugen, die nicht in den USA verkauft werden, der Fall ist), empfehlen wir, eine andere unabhängige Quelle zu suchen und vorzugsweise Tests an vielen Fahrzeugen durchzuführen. Eine gute Option ist spritmonitor.de, wo es oft tausende von Messungen für populäre Dieselfahrzeuge gibt und man könnte argumentieren, dass es schwierig ist, näher an den realen Einsatz heranzukommen. Allerdings gibt es eine Überrepräsentierung deutscher Fahrer, was bedeutet, dass die deutsche Autobahn (mit ihrer unbegrenzten Höchstgeschwindigkeit) den Energieverbrauch etwas in die Höhe treiben könnte.

Schließlich ist es offensichtlich wichtig, vergleichbare Quellen für die Energienutzung von Fahrzeugen mit fossilen Brennstoffen und Elektrofahrzeugen zu nutzen. Z.B. berechnet Stahl Automotive Consultancy[38] den Durchschnitt der höchsten und niedrigsten Messwerte aus einem ADAC-Test für Elektrofahrzeuge, aber wir denken, dass ein gewichteter Durchschnitt der EPA-Werte leichter zu verteidigen gewesen wäre.

Berechnung der THG-Emissionen von konventionellen Fahrzeugen

Die Grundformeln ähneln denen, die zur Berechnung der Elektrofahrzeug-Emissionen verwendet werden, mit Ausnahme des Ausschlusses der Batterie und des Ersatzes von Elektrizität durch fossile Brennstoffe:

$$Emissionen\ pro\ km = \frac{\text{Emissionen aus der Herstellung} + \text{Emissionen aus dem Fahrbetrieb}}{\text{gefahrene km}}$$

$$Emissionen\ aus\ der\ Herstellung = Summe\ aus\ (Batterie + Antriebsstrang + Rest\ des\ Pkws)$$

$$Emissionen\ aus\ dem\ Fahrbetrie = \ Pkw - Energieverbrauch\ in\ \frac{Liter}{100\ km} * Emissionen\ pro\ Liter$$

Sobald die Faktoren in diesen Formeln richtig bestimmt sind, können wir klarer die Emissionen von Elektrofahrzeugen und Verbrennern vergleichen.

Wir haben all diese Variablen bereits im vorherigen Kapitel diskutiert, mit Ausnahme der Emissionen pro Liter Benzin und Diesel, so dass wir dies hier erklären werden.

Produktion fossiler Brennstoffe

Neue Forschungen über das Abfackeln und andere Quellen von Treibhausgasemissionen haben gezeigt, dass die Emissionen im Zusammenhang mit der Produktion von Benzin und Diesel etwas größer sind als bisher angenommen. Um die Produktion von Treibstoff zu berücksichtigen, sollten Autos, die mit Benzin fahren, ihre Auspuffemissionen um 30% erhöhen. Autos, die mit Diesel fahren, sollten 24% zu ihren Auspuffemissionen hinzufügen. Die Emissionen pro Liter betragen 3310 g bei Diesel und 3140 g bei Benzin.

Aus einer neueren maßgeblichen wissenschaftlichen Studie, die Aspekte wie das Abfackeln einschließt und 98% der Ölfelder abdeckt, wissen wir, dass der Transport eines Barrels Öl zur Raffinerie mehr Treibhausgase ausstößt als bisher angenommen: der globale gewichtete Durchschnittswert liegt bei etwa 10,3 Gramm CO_2eq/MJ[44].

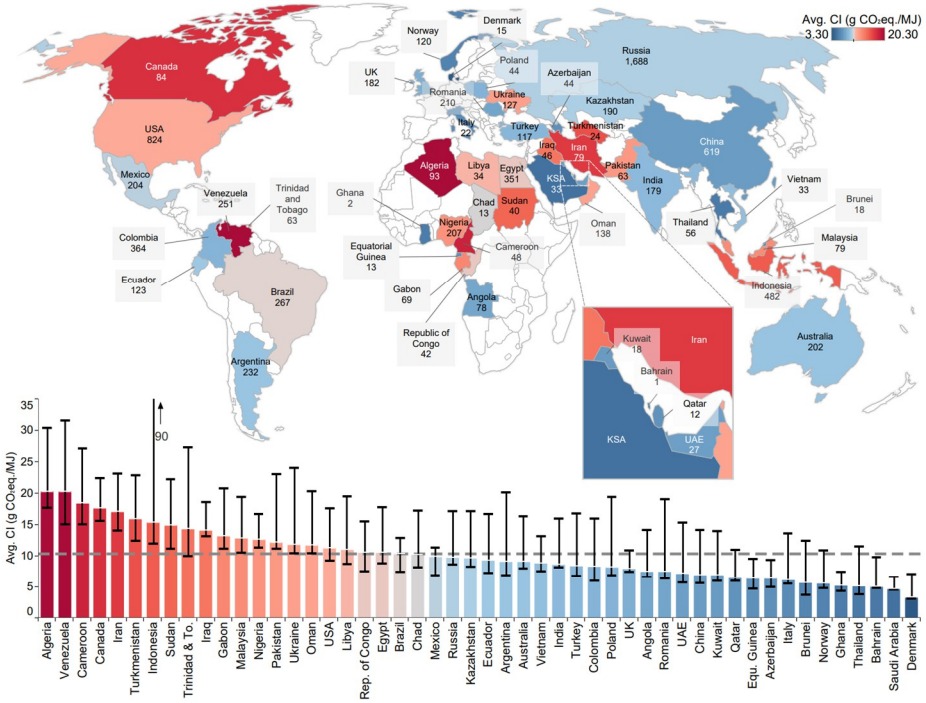


Fig. S22. Estimated global crude oil upstream carbon intensity (2015): national volume-weighted-average upstream GHG intensities in g CO_2eq./MJ crude oil delivered to refinery (color) with corresponding error bars (5-95%ile of Monte Carlo simulation to explore the uncertainty associated with missing input data, see SM section 1.7 and 2.4). Map shows number of fields analyzed below each country name. The global volume-weighted CI estimate is shown by the dashed line (~10.3 g CO_2eq./MJ). Reference year is 2015. Only countries with ≥0.1% of global oil production share are mapped (see the SM Results Data Excel file for full list). Color scheme reflects national volume-weighted-average CI: dark blue for lowest CI, dark red for highest CI.

Der nächste Schritt ist die Raffination von Öl. Eine kürzlich für die EU durchgeführte Studie hat sich eingehend mit diesem Thema befasst und schätzt, dass Raffinerien 10,2 Gramm CO_2eq/MJ für Benzin und 5,4 Gramm für Diesel hinzufügen[45]. Raffinerien außerhalb Europas und Nordamerikas haben jedoch höhere Emissionen[46] und machen etwa die Hälfte der Weltproduktion[47] aus, so dass dies bei der Schätzung der globalen Zahlen wahrscheinlich eine konservative Schätzung ist.

In Europa kommt bei der Kraftstoffverteilung etwas mehr als 1 gr CO_2eq/MJ[48].

Damit beläuft sich die Gesamtmenge der Kraftstoffproduktion auf 21,5 gr CO_2eq/MJ für Benzin und 16,7 gr CO_2eq/MJ für Diesel. Wir müssen dies mit 33,5 MJ für einen Liter Benzin und 38,3 MJ für einen Liter Diesel multiplizieren[49]. Das bedeutet, dass ein Auto, das mit Benzin betrieben wird, zusätzlich zu den Auspuffemissionen 720 gr CO_2eq pro Liter und ein Auto, das mit Diesel betrieben wird, 640 gr $CO2_2$eq pro Liter ausstößt. Dies kommt also zu den 2420 gr/l bei reinem Benzin und 2670

gr/l bei reinem Diesel hinzu[50]. Damit ergibt sich eine Gesamtmenge von 3140 g/l bei Benzin und 3310 g/l bei Diesel.

Wir weichen der Diskussion über die CO_2-Emissionen im Zusammenhang mit Biokraftstoffen aus, indem wir reine fossile Kraftstoffe und nicht die Mischung nehmen, die Sie auf dem Markt finden könnten. Biokraftstoffe können mit geringen CO_2-Emissionen hergestellt werden (z.B. aus Abfall, Algen, Doppelkulturen und ungenutzten Brachflächen), aber selbst dann sind die CO_2-Emissionen nicht gleich Null, und so werden sie jetzt gezählt. Darüber hinaus hat ein großer Teil des derzeit verwendeten Biokraftstoffs tatsächlich einen größeren CO_2-Fußabdruck als Benzin und Diesel, wenn man indirekte Landnutzungsänderungen in die Berechnungen einbezieht (Palmöl ist ein berüchtigtes Beispiel), und obwohl einige dieser Kraftstoffe auslaufen, werden sie in den offiziellen europäischen Publikationen immer noch als Null-Emissionen gezählt. Indem wir reines Benzin und Diesel nehmen, vermeiden wir, dass sich diese Themen in der Diskussion um Elektrofahrzeuge gegenüber Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor verheddern.

Künftige Entwicklungen werden die Elektrofahrzeug-Emissionen weiter reduzieren

Dort, wo das Verbesserungspotenzial ausgereifter Verbrennungsmotorentechnologie hinsichtlich der Treibhausgasemissionen sehr begrenzt ist, sind die mit Elektrofahrzeugen möglichen Verbesserungen beträchtlich.

Stellen Sie sich eine Zukunft vor, in der Strom aus erneuerbaren Energien allgegenwärtig ist. Gegenwärtig senken Sonnenkollektoren und Windmühlen die Emissionen bereits um 90%[51] , obwohl sie überwiegend mit fossilen Brennstoffen hergestellt werden. Wenn Bergwerke und Fabriken erneuerbare Energien zur Herstellung von Windmühlen und Sonnenkollektoren verwenden würden, würden die Emissionen erneuerbarer Energien schließlich fast auf Null sinken. Stellen Sie sich nun vor, dass Bergwerke und Stahlfabriken diese fast kohlenstofffreie Energie zur Herstellung von Autos und Batterien verwenden würden. Das Endergebnis wären Elektroautos, die produziert werden und fahren würden, ohne nennenswerte CO_2-Emissionen zu verursachen. Die Ressourcennutzung wäre immer noch ein Problem (vor allem, wenn die Zahl der Autos weiter steigen würde und es an Recycling fehlen würde), die CO_2-Emissionen jedoch nicht.

Dies ist nur Spekulation und eine Machbarkeitsstudie dieser Perspektive wäre außerhalb des Rahmens dieses Berichts. Aber um zu zeigen, dass der Wandel schneller vonstatten gehen könnte, als die meisten Experten erwarten, gibt es hier noch einen historischen “Ausflug”:

Pferdekutschen und das unlösbare Gülleproblem

Ende des 19. Jahrhunderts ertranken die Großstädte "in Pferdemist "[52] durch von Pferden gezogene Taxis, Karren, Busse und Kutschen. Jedes Pferd produzierte etwa 15 Kilo Dung pro Tag, und 1894 sagte die Times voraus, dass "in 50 Jahren jede Straße in London unter 2,75 Meter (9 Fuß) Dung begraben sein wird".[53] Später wurde dies als die "Große Pferdemist-Krise von 1894" bekannt[53]. Abgesehen von dem Schmutz und Gestank, die dies verursachte, zog sie auch Fliegen an, die Typhus und andere Krankheiten verbreiteten. 1898 fand in New York die erste internationale Planungskonferenz der Welt statt. Sie wurde nach 3 der geplanten 10 Tage abgebrochen, weil keiner der Delegierten eine Lösung für die wachsende Düngerkrise sehen konnte[54].

Verbrennungsmotoren ersetzen Pferde und lösen das Gülleproblem

Die Güllekrise wurde durch den Aufstieg von Autos mit Verbrennungsmotoren gelöst. Deutschland spielte bei der Entwicklung des Verbrennungsmotors mit Erfindern wie Nikolaus Otto, Karl Benz, Rudolf Diesel, Felix Wankel und Ferdinand Porsche und mit Unternehmern wie Gottlieb Daimler und Wilhelm Maybach eine entscheidende Rolle. Die Bilder veranschaulichen, wie schnell und vollständig der Übergang vom Pferd zum Auto vollzogen wurde.

Fifth Avenue New York am 15. April 1900 (ein Auto) und am 23. März 1913 (ein Pferd)[55].

Verbrennungsmotoren und das unlösbare CO_2-Problem

Mit genügend Anstrengung könnten die Verbrennungsmotoren immer leiser werden, obwohl das leise Brummen der Lastwagen und das hohe Wimmern der Pizzalieferungsroller derzeit aus den Städten nicht mehr wegzudenken sind. Der Erfolg mit der EU-VI-Norm für Lastwagen zeigt, dass große Fortschritte bei der Reduzierung des Feinstaubausstoßes aus dem Auspuffrohr möglich sind, aber der Dieselklappen-Skandal zeigt, dass dies weder einfach noch billig ist.

Die Effizienz eines Hybridfahrzeugs könnte theoretisch fast 50% höher werden als bei heutigen Autos, aber das würde eine Reihe von Durchbrüchen erfordern, die derzeit nicht in Sicht sind. Darüber hinaus übertrifft das Verbraucherinteresse an großen SUVs mit leistungsstarken Motoren die bescheidenen Effizienzfortschritte, und wenn wir den Fahrversuch als Maßstab [bspw. spritmonitor.de] nehmen, gab es in den letzten 20 Jahren im Grunde keine Verbesserung der CO_2-Emissionen pro Kilometer[56-58].

Kohlendioxidemissionen sind eine grundlegende Eigenschaft von Verbrennungsmotoren, die niemals verschwinden wird. So wie Pferde Mist produzieren, produzieren Verbrennungsmotoren CO_2. Es ist dem langen Prozess der Bildung fossiler Brennstoffe inhärent, der von Pflanzen eingeleitet wurde, die Sonnenenergie nutzten, um CO_2 zu binden und als Pflanzenmaterial zu speichern. Um die Sonnenenergie aus fossilen Brennstoffen zu gewinnen, muss man sie an Sauerstoff (O_2) binden und Kohlendioxid (CO_2) freisetzen.

Elektromotoren ersetzen Verbrennungsmotoren und lösen das CO_2-Problem

Doch so wie das "unlösbare" Problem der Gülle aus dem Straßenverkehr mit der Einführung des Verbrennungsmotors gelöst wurde, kann das "unlösbare" Problem der CO_2-Emissionen aus dem Straßenverkehr mit der Einführung des Elektrofahrzeugs gelöst werden.

Dies bedeutet nicht, dass Elektroautos Fahrräder und öffentliche Verkehrsmittel ersetzen sollten. Autos haben andere Nachteile, wie ihre Unvereinbarkeit mit dichten und sicheren Städten, ihren Ressourcenbedarf und die Auswirkungen auf die Ökologie, die mit der Ressourcennutzung verbunden sind. Aber sie könnten sicherlich konventionelle Autos ersetzen und dabei die Treibhausgasemissionen von Autos weitgehend eliminieren.

Literaturverzeichnis

1. ADAC. Elektroautos mit schwerem Klima-Rucksack unterwegs. https://presse.adac.de/meldungen/adac-ev/verkehr/elektroautos-mit-schwerem-klima-rucksack-unterwegs.html (2019).

2. Hao, H., Mu, Z., Jiang, S., Liu, Z. & Zhao, F. GHG Emissions from the Production of Lithium-Ion Batteries for Electric Vehicles in China. *Sustainability* **9**, 504 (2017).

3. Yin, R., Hu, S. & Yang, Y. Life cycle inventories of the commonly used materials for lithium-ion batteries in China. *Journal of Cleaner Production* **227**, 960–971 (2019).

4. Kawamoto, R. *et al.* Estimation of CO2 Emissions of Internal Combustion Engine Vehicle and Battery Electric Vehicle Using LCA. *Sustainability* **11**, 2690 (2019).

5. Majeau-Bettez, G., Hawkins, T. R. & Strømman, A. H. Life Cycle Environmental Assessment of Lithium-Ion and Nickel Metal Hydride Batteries for Plug-In Hybrid and Battery Electric Vehicles. *Environ. Sci. Technol.* **45**, 4548–4554 (2011).

6. Amarakoon, S., Smith, J. & Segal, B. Application of Life-Cycle Assessment to Nanoscale Technology: Lithium-ion Batteries for Electric Vehicles. (2013).

7. Ellingsen, L. A.-W. *et al.* Life Cycle Assessment of a Lithium-Ion Battery Vehicle Pack. *Journal of Industrial Ecology* **18**, 113–124 (2014).

8. Romare, M. & Dahllöf, L. *The Life Cycle Energy Consumption and Greenhouse Gas Emissions from Lithium-Ion Batteries*. 58 (2017).

9. Regett, A., Mauch, W. & Wagner, U. Carbon footprint of electric vehicles - a plea for more objectivity. 8.

10. Elektroauto-Akkus: So entstand der Mythos von 17 Tonnen CO2. *Edison - Heimat der Generation E* https://edison.media/erklaeren/elektroauto-akkus-so-entstand-der-mythos-von-17-tonnen-co2/23828936.html (2019).

11. Elon Musk. Calling this cueless would be generous. Much less energy required for lithium-ion batteries & Gigafactory is powered by renewables anyway. *Twitter* https://twitter.com/elonmusk/status/877029802758201344.

12. Kroher, T. Treibhausgas-Bilanz: Das Klima braucht die Energiewende | ADAC. https://www.adac.de/verkehr/tanken-kraftstoff-antrieb/alternative-antriebe/klimabilanz/?redirectId=quer.klimabilanz.

13. Guenter Rauecker. CO2 Klimabilanz eines Autolebens. *auto touring* 18–21 (2019).

14. Buchal, C., Karl, H.-D. & Sinn, H.-W. Kohlemotoren, Windmotoren und Dieselmotoren: Was zeigt die CO2-Bilanz? 15.

15. Buchal, C. & Sinn, H.-W. Decarbonizing mobility: Thoughts on an unresolved challenge. *Eur. Phys. J. Plus* **134**, 599 (2019).

16. Gerfried Jungmeier, Lorenza Canella, Johanna Pucker-Singer & Martin Beermann. *Geschätzte Treibhausgasemissionen und Primärenergieverbrauch in der Lebenszyklusanalyse von Pkw-basierten*

Verkehrssystemen. 171 https://www.adac.de/-/media/pdf/tet/lca-tool---joanneum-research.pdf?la=de-de&hash=F06DD4E9DF0845BC95BA22BCA76C4206 (2019).

17. Effects of battery manufacturing on electric vehicle life-cycle greenhouse gas emissions | International Council on Clean Transportation. https://theicct.org/publications/EV-battery-manufacturing-emissions.

18. Emilsson, E. & Dahllöf, L. Lithium-Ion Vehicle Battery Production. 47 (2019).

19. Melin, H. E. *Analysis of the climate impact of lithium-ion batteries and how to measure it*. 17 (2019).

20. James Frith. *Lithium-Ion Battery Manufacturing Emissions*. (2019).

21. Ellingsen, L. A.-W., Singh, B. & Strømman, A. H. The size and range effect: lifecycle greenhouse gas emissions of electric vehicles. *Environ. Res. Lett.* **11**, 054010 (2016).

22. Charlotte Argue. What can 6,000 electric vehicles tell us about EV battery health? *Geotab Blog* https://www.geotab.com/blog/ev-battery-health/ (2019).

23. Steinbuch. Tesla Model S battery degradation data. *Steinbuch* https://steinbuch.wordpress.com/2015/01/24/tesla-model-s-battery-degradation-data/ (2015).

24. Hajek, S. Hajeks High Voltage #2: Wie lange hält der Akku im Elektroauto? https://www.wiwo.de/my/technologie/mobilitaet/hajeks-high-voltage-2-wie-lange-haelt-der-akku-im-elektroauto/25279020.html.

25. Harlow, J. E. *et al.* A Wide Range of Testing Results on an Excellent Lithium-Ion Cell Chemistry to be used as Benchmarks for New Battery Technologies. *J. Electrochem. Soc.* **166**, A3031–A3044 (2019).

26. Database - Eurostat. https://ec.europa.eu/eurostat/web/transport/data/database.

27. *ACEA Report - Vehicles in use - Europe 2019*. 21 www.acea.be (2019).

28. Kraftfahrt-Bundesamt - Verkehr in Kilometern. https://www.kba.de/DE/Statistik/Kraftverkehr/VerkehrKilometer/verkehr_in_kilometern_node.html.

29. Dunn, J. B., Gaines, L., Barnes, M., Sullivan, J. L. & Wang, M. *Material and Energy Flows in the Materials Production, Assembly, and End-of-Life Stages of the Automotive Lithium-Ion Battery Life Cycle*. https://www.osti.gov/biblio/1177517 (2014) doi:10.2172/1177517.

30. Ciez, R. E. & Whitacre, J. F. Examining different recycling processes for lithium-ion batteries. *Nat Sustain* **2**, 148–156 (2019).

31. Golroudbary, S. R., Calisaya-Azpilcueta, D. & Kraslawski, A. The Life Cycle of Energy Consumption and Greenhouse Gas Emissions from Critical Minerals Recycling: Case of Lithium-ion Batteries. *Procedia CIRP* **80**, 316–321 (2019).

32. Diesendorf, M. & Elliston, B. The feasibility of 100% renewable electricity systems: A response to critics. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **93**, 318–330 (2018).

33. *The European Power Sector in 2019*. 48 https://sandbag.org.uk/wp-content/uploads/2020/02/Sandbag-European-Power-Sector-Review-2019.pdf (2019).

34. Overview of electricity production and use in Europe. *European Environment Agency* https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/overview-of-the-electricity-production-2/assessment-4.

35. Dave Jones, Alice Sakhel, Matthias Buck & Patrick Graichen. *The European Power Sector in 2018*. 44.

36. Khan, I. Greenhouse gas emission accounting approaches in electricity generation systems: A review. *Atmospheric Environment* **200**, 131–141 (2019).

37. Moro, A. & Lonza, L. Electricity carbon intensity in European Member States: Impacts on GHG emissions of electric vehicles. *Transportation Research Part D: Transport and Environment* (2017) doi:10.1016/j.trd.2017.07.012.

38. Dr. Martin Stahl, Dr. Markus Seeberger & José Miguel Escobar Coto. *Der Weg Hin Zu Einer CO2-armen Mobilität*. https://www.sac-group.eu/download/.

39. Agora Energiewende. *The Future Cost of Electricity-Based Synthetic Fuels*. 96 (2018).

40. Fraunhofer ISE vergleicht Treibhausgas-Emissionen von Batterie- und Brennstoffzellenfahrzeugen - Fraunhofer ISE. *Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE* https://www.ise.fraunhofer.de/de/presse-und-medien/news/2019/fraunhofer-ise-vergleicht-treibhausgas-emissionen-von-batterie-und-brennstoffzellenfahrzeugen.html.

41. The International Council on Clean Transportation. VW defeat devices: a comparison of US and EU required fixes. https://www.theicct.org/sites/default/files/publications/ICCT-briefing_VW-fixes_USvEU_20171214.pdf (2017).

42. *CO2 emissions from cars: The facts*. https://www.transportenvironment.org/publications/co2-emissions-cars-facts (2018).

43. Tietge, U. *et al.* A 2016 update of official and 'real-world' fuel consumption and co2 values for passenger cars in Europe. 64 (2016).

44. Masnadi, M. S. *et al.* Global carbon intensity of crude oil production. *Science* **361**, 851–853 (2018).

45. Gordillo, V., Rankovic, N. & Abdul-Manan, A. F. N. Customizing CO2 allocation using a new non-iterative method to reflect operational constraints in complex EU refineries. *Int J Life Cycle Assess* **23**, 1527–1541 (2018).

46. Mohammed Atris, A. Assessment of oil refinery performance: Application of data envelopment analysis-discriminant analysis. *Resources Policy* **65**, 101543 (2020).

47. FuelsEurope. FuelsEurope Statistical Report 2018. (2018).

48. Edwards, R. *et al. Well-to-wheels analysis of future automotive fuels and power trains in the European context report version 3c, July 2011.* (Publications Office, 2011).

49. Energy conversion calculators - U.S. Energy Information Administration (EIA). https://www.eia.gov/energyexplained/units-and-calculators/energy-conversion-calculators.php.

50. P.J. Zijlema. *List of fuels and standard CO2 emission factors*. https://english.rvo.nl/sites/default/files/2019/05/The%20Netherlands%20list%20of%20fuels%20version%20January%202019.pdf (2019).

51. Pehl, M. Understanding future emissions from low-carbon power systems by integration of life-cycle assessment and integrated energy modelling. *Nature Energy* **2**, 7 (2017).

52. Davies, S. The Great Horse-Manure Crisis of 1894 | Stephen Davies. https://fee.org/articles/the-great-horse-manure-crisis-of-1894/ (2004).

53. The Great Horse Manure Crisis of 1894. *Historic UK* https://www.historic-uk.com/HistoryUK/HistoryofBritain/Great-Horse-Manure-Crisis-of-1894/.

54. Groom, B. The wisdom of horse manure. *Financial Times* https://www.ft.com/content/238b1038-13bb-11e3-9289-00144feabdc0 (2013).

55. Battery Banter 1: Are Internal Combustion Engines Going the Way of the Horse? *Risk and Well-Being* https://riskandwellbeing.com/2015/03/22/charts-du-jour-21-march-2015-battery-banter/ (2015).

56. Growing preference for SUVs challenges emissions reductions in passenger car market – Analysis. *IEA* https://www.iea.org/commentaries/growing-preference-for-suvs-challenges-emissions-reductions-in-passenger-car-market.

57. Average CO2 emissions from new cars and new vans increased in 2018. *European Environment Agency* https://www.eea.europa.eu/highlights/average-co2-emissions-from-new.

58. Mission Possible: How carmakers can reach their 2021 CO2 targets and avoid fines | Transport & Environment. https://www.transportenvironment.org/publications/mission-possible-how-carmakers-can-reach-their-2021-co2-targets-and-avoid-fines.