



UMWELT DIE ÖKOBILANZ DER E-MOBILITÄT

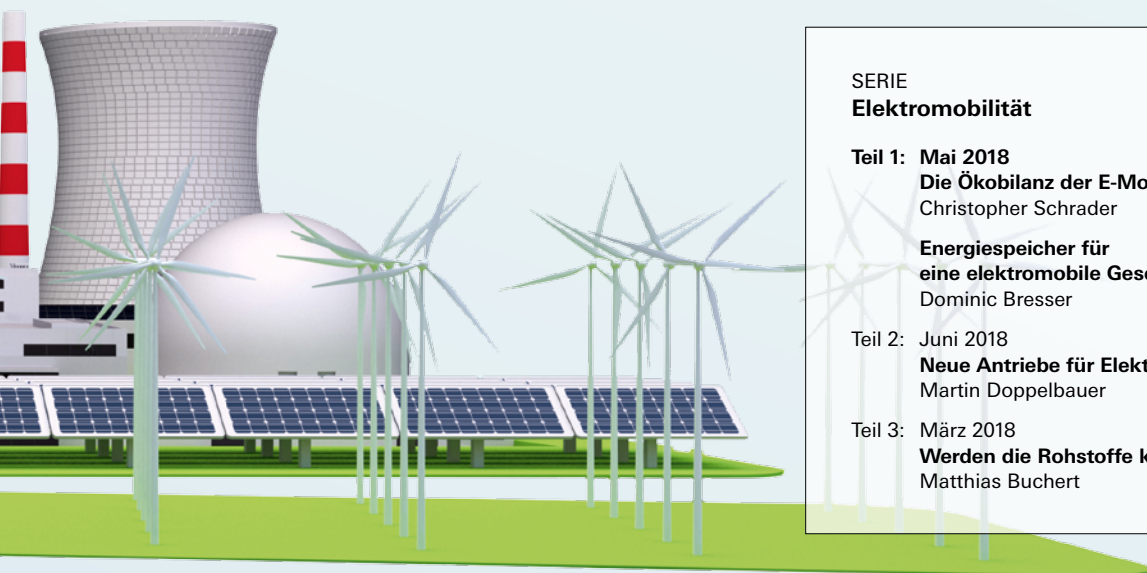
SERIE ELEKTROMOBILITÄT

Sind Elektroautos ein entscheidender Teil der Energiewende, wie Politik und Industrie gerne behaupten? Oder nutzen sie dem Klima weit weniger als erwartet? Eine Spurensuche.

Elektroautos tanken Strom – aber längst nicht immer kommt dieser aus erneuerbaren Energiequellen. Nur Anlagen, die extra für die Betankung von E-Autos gebaut wurden, garantieren eine gute CO₂-Bilanz.

► Wer ein Elektroauto fährt oder auf der Straße vorbeizischen sieht, denkt oft: Geht doch, Autofahren völlig ohne Emissionen. Der Gesetzgeber stuft die Stromer sogar als komplett sauber ein. Laut dem Fahrzeugverzeichnis des Kraftfahrtbundesamts stoßen rein elektrisch angetriebene Autos kein Kohlendioxid aus. Das perfekte Umweltmobil, oder nicht?

Natürlich stimmt das nicht. Auch bei der Elektromobilität entstehen Emissionen. Zwar besitzen Teslas, Elektro-Smarts, e-Golfs und i3-BMWs keinen Auspuff. Dafür haben aber Kohle- und Gaskraftwerke, die in Deutschland 2017 immer noch etwa die Hälfte des Stroms erzeugten, Schornsteine. Die klimatischen Auswirkungen dieser Meiler werden von den Windrädern und Solarparks im Stromnetz nur gemindert, nicht aufgehoben. Und die



SERIE

Elektromobilität

Teil 1: Mai 2018

Die Ökobilanz der E-Mobilität

Christopher Schrader

Energiespeicher für eine elektromobile Gesellschaft

Dominic Bresser

Teil 2: Juni 2018

Neue Antriebe für Elektroautos

Martin Doppelbauer

Teil 3: März 2018

Werden die Rohstoffe knapp?

Matthias Buchert



Christopher Schrader ist Diplomphysiker und Wissenschaftsjournalist in Hamburg. Er recherchiert seit zwei Jahrzehnten regelmäßig zu Themen aus der Mobilitätsbranche und hat für seine Arbeit unter anderem den Journalistenpreis PUNKT der Deutschen Akademie der Technikwissenschaften erhalten.

» spektrum.de/artikel/1555470

Fabriken, in denen die Autos gebaut werden, verbrauchen Energie. Was sie ausstoßen, muss den Fahrzeugen zugerechnet werden. »Mobilität mit dem Auto gibt es niemals zum ökologischen Nulltarif«, sagt der Umweltchemiker Eckard Helmers von der Hochschule Trier, der sich dort mit der Ökobilanz der E-Mobile beschäftigt. »Wenn Sie ein Gefährt von mindestens 800 Kilogramm Masse im Straßenverkehr bewegen wollen, führt das zu einem relevanten CO₂-Impact.«

Keine seriös aufgestellte Ökobilanz für Batteriemobile stützt daher die Illusion, die Gefährte seien klimaneutral. Im besten Fall sind ihre rechnerischen Emissionen, umgelegt auf den Kilometer Fahrstrecke, geringer als die Treibhausgase, die ein Vergleichsfahrzeug produziert, wenn es Benzin, Diesel oder Erdgas verbrennt. Dafür erfordert jedoch der Bau eines Elektroautos, besonders die Herstellung seiner Batterie, einen Aufwand, der bei keinem konventionellen Wagen anfällt. Ein E-Mobil hat also das Klima schon mehr belastet als ein Auto mit Verbrennungsmotor, wenn beide mit null Kilometern auf dem Tachometer beim Händler stehen. Die eigentlich interessante Frage ist daher, ob Elektroautos über ihren gesamten Lebenszyklus gerechnet einen ökologischen Vorteil gegenüber Dieseln oder Benzinern bieten.

Das ist gar nicht so einfach zu beantworten, weil sehr viele Faktoren eine Rolle spielen: der Stromverbrauch, die Herkunft der Elektrizität, das Klima am Einsatzort, die Herstellung der Batterie und anderer Zusatzkomponenten,

die Lebensdauer und Fahrleistung des Autos, die politischen Rahmenbedingungen. Wie so oft in solchen Fällen entscheiden grundlegende Annahmen über das Ergebnis der Ökobilanz-Studien. So kommt es, dass die Urteile der Fachleute von »der größte ökologische Fortschritt in 100 Jahren Autoentwicklung« (Helmers) bis zu »Elektroautos verschärfen die Klimaprobleme massiv« (Dieter Teufel, Leiter des Umwelt- und Prognose-Instituts in Heidelberg) reichen.

Immer mal wieder spült die Veröffentlichung einer neuen Studie den einen oder anderen Aspekt nach oben, und dann kann das Bild vom Elektroauto in der Öffentlichkeit schnell kippen. So trug im Sommer 2017 das schwedische Umweltforschungsinstitut IVL Daten über die Produktion der Batterien zusammen, und schon schrieb das Nachrichtenmagazin »Der Spiegel« von »Stromillusionen« und »Ökoschwindel«. Wenig später legte das deutsche

AUF EINEN BLICK TREIBHAUSGASEMISSIONEN DER ELEKTROMOBILITÄT

- 1** Bei der Produktion eines Elektroautos gelangen erhebliche Mengen Treibhausgase in die Luft – diese Hypothek muss jedes E-Mobil über Jahre abtragen.
- 2** Der Strom aus der Ladestation ist meist alles andere als CO₂-neutral. Extra dazugebaute Solar- und Windkraftanlagen könnten die Ökobilanz deutlich verbessern.
- 3** Viele seriöse Studien sehen deutsche Elektroautos zurzeit nur auf gleicher Höhe mit sparsamen Verbrennern. Langfristig könnten sie den Straßenverkehr aber deutlich umweltfreundlicher machen.

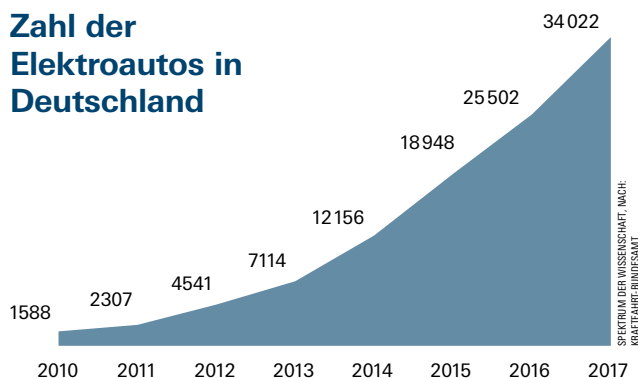
Öko-Institut einen Bericht darüber vor, wie man den Klimavorteil der Elektromobilität sichern könne – dass es an diesem Zweifel geben könnte, haben die Fachleute überhaupt nicht berücksichtigt. Eine Gruppe von 15 emeritierten Mobilitäts- und Infrastrukturprofessoren um Klaus J. Beckmann, bis 2013 Leiter des Deutschen Instituts für Urbanistik in Berlin, versuchte dann im November 2017, die vielen Aspekte in einem offenen Brief zu ordnen – schockiert von dem »Eindruck, dass bei dieser Diskussion die Gesetzmäßigkeiten der Physik außer Acht gelassen werden«.

Keine Frage, die Umweltbilanz von Elektroautos ist komplex. In der folgenden Betrachtung wird daher in erster Linie der Ausstoß von Treibhausgasen im Zentrum stehen – ein Thema, das bereits für sich genommen vielschichtiger ist als weithin angenommen. Andere ökologische Facetten, beispielsweise die Umweltverschmutzung bei Ölförderung oder Akkuentorgung, bleiben dagegen außen vor.

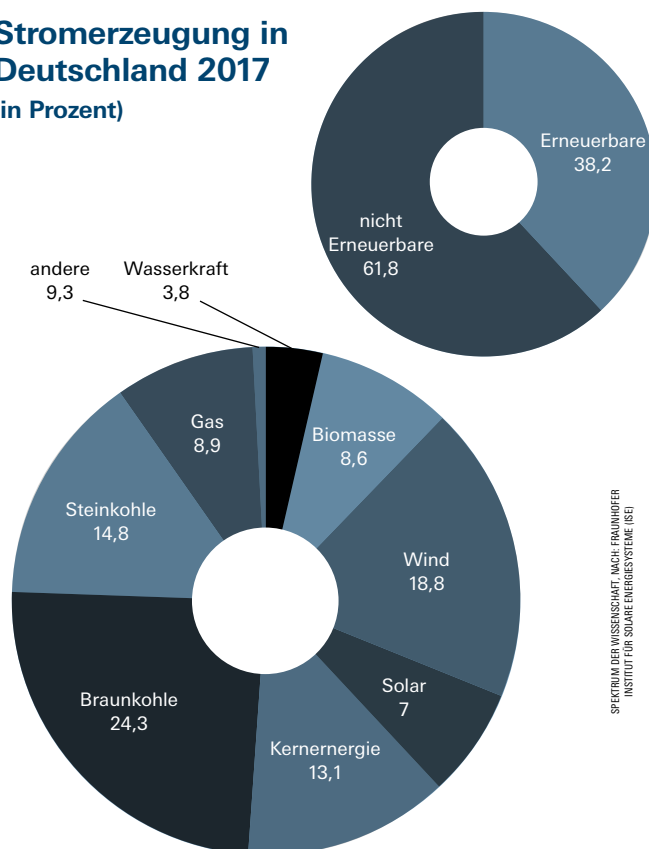
Alle E-Autos starten mit einer CO₂-Hypothek aus der Akkuproduktion in den Straßenverkehr

Am Anfang jeder Ökobilanz steht die Produktion, und Elektromobile sind viel aufwändiger zu konstruieren als herkömmliche Autos. Volkswagen und BMW zeigen das etwas verschämt in den knappen Umwelt-Broschüren ihrer Modelle e-Golf und i3: Bei der Herstellung wird etwa doppelt so viel Kohlendioxid wie bei einem konventionellen Vergleichsprodukt freigesetzt. Beim Wolfsburger Konzern sind es rund neun statt vier Tonnen Kohlendioxid. Dieser Unterschied geht vor allem auf den Bau der Batterien zurück. Die schwedische Übersichtsarbeit des IVL kalkulierte die zusätzliche Emission auf etwa 150 bis 200 Kilogramm CO₂-Äquivalente (bei diesem Maß werden andere, teilweise deutlich potentere Treibhausgase auf die Wirkung von Kohlendioxid umgerechnet) pro Kilowattstunde Speicherkapazität. Andere Forscher kommen auf ähnliche Werte. Ein Team um Jens Peters vom Karlsruher Institut für Technologie taxiert die Emissionen in einer im Januar 2017 erschienenen Studie auf 110 Kilogramm, das Heidelberger ifeu-Institut im Auftrag des Umweltbundesamts auf gut 140 und ein Team um die Industrieökologin Linda Ellingsen von der Norwegian University of Science and Technology auf etwas mehr als 170 Kilogramm CO₂ pro Kilowattstunde Kapazität.

Zahl der Elektroautos in Deutschland



Stromerzeugung in Deutschland 2017 (in Prozent)



Diese Maßzahlen bedeuten für den e-Golf, der zunächst eine Batterie von 24 Kilowattstunden hatte, etwa drei bis fünf Tonnen ausgestoßenes CO₂. Der Wert entspricht ungefähr den Angaben im Umweltprädikat, mit dem Volkswagen 2014 sein Auto bewarb. Inzwischen hat der Energiespeicher des Modells jedoch 36 Kilowattstunden Kapazität – damit dürfte auch die Menge der bei der Herstellung freigesetzten Treibhausgase um die Hälfte angewachsen sein.

Eine eher kleine Rolle beim Effekt für das Klima spielt dabei die genaue chemische Zusammensetzung der Batterie (siehe dazu auch den Artikel ab S. 20), eine deutlich größere die geografische Herkunft, weil die Fabriken bei der Aufbereitung der Rohstoffe und der Herstellung der Speicherzellen eine Menge Strom verbrauchen. Dass zurzeit viele Batterien aus China kommen, wo viel Elektrizität von ineffizienten Kohlekraftwerken stammt, belastet daher die Bilanz der Autos. »Es hängt allerdings auch in China vom genauen Standort der Fabrik ab«, sagt der Ingenieur Peter Kasten, der an der Berliner Zweigstelle des Öko-Instituts zu nachhaltiger Mobilität forscht. »Im Südosten stammt etwa ein Drittel des Stroms aus erneuerbaren Energien, im Norden vor allem aus Kohlekraftwerken.«

Die Batteriemobile starten also mit einem schweren ökologischen Rucksack. Nehmen wir als Durchschnittswert einen zusätzlichen Ausstoß von fünf Tonnen CO₂ an, vor allem für die Produktion des Stromspeichers, dann entspricht das der Verbrennung von 1900 Litern Benzin oder 1670 Litern Diesel. Damit kommen die sparsamsten Verbrenner ungefähr 40 000 Kilometer weit, bevor das

Elektroauto überhaupt vom Hof rollt. Dabei ist übrigens schon berücksichtigt, dass die beiden Kraftstoffe nicht auf Bäumen wachsen: Bis sie an der Tankstelle aus der Zapfsäule fließen, sind durch die Förderung und die Aufbereitung von Rohöl und den Transport bereits Treibhausgase freigesetzt worden – man spricht von der so genannten Vorkette. Unter anderem die Forschungsstelle für Energiewirtschaft in München hat hierzu genaue Zahlen veröffentlicht: Demnach bringt eine Kilowattstunde Energie aus Dieselverbrennung 299 Gramm CO₂ mit sich, wovon 33 Gramm auf die Vorkette entfallen. Bei Benzin lauten die entsprechenden Zahlen 295 und 61 Gramm. Bei der Verbrennung eines Liters Benzin werden dann knapp neun Kilowattstunden Energie frei, bei Diesel sind es fast zehn.

Auch der getankte Strom ist fast immer mit Emissionen behaftet

Wer annimmt, dass Elektroautos keine Emissionen produzieren, macht fast immer den gleichen Denkfehler: Er nimmt an, die Gefährte würden exklusiv mit Strom aus erneuerbaren Quellen betankt. Elektrizität im Netz lässt sich allerdings nicht nach Farben in grünen Ökostrom und braunen Kohlestrom sortieren; durch die Leitungen fließt immer eine Mischung. Im Mittel sind laut Umweltbundesamt 2016 für jede Kilowattstunde Strom 527 Gramm CO₂ ausgestoßen worden. Das Elektroauto Ioniq von Hyundai hat damit nach offiziellen Angaben eigentlich eine rechnerische Emission von 60 Gramm, ein Opel Ampera-e 76 Gramm, ein Citroën Berlingo zum Aufladen 93, ein Ford Focus Electric 81, und ein Model S von Tesla kommt auf bis zu 125 Gramm CO₂ pro Kilometer.

Mangels guter Daten zum Strombedarf im realen Verkehr muss diese Rechnung zunächst auf den offiziellen Verbrauchswerten beruhen. Es ist anzunehmen, dass die Hersteller die Werte ähnlich schönen wie bei Verbrennern – dort liegt der Verbrauch bisweilen um ein Drittel höher. Mit großer Vorsicht sollte man auch die Angaben zu Hybrid-Fahrzeugen betrachten. Hier steckt hinter der Herstellerangabe mitunter eine nie überprüfte Vermutung, wie häufig der Käufer tatsächlich auflädt.

Generell lässt sich aber wohl festhalten: Was die Stromer im Fahrbetrieb dem Klima zumuten, ist weniger, als vergleichbare herkömmliche Autos ausstoßen. Mit einem Verbrennungsmotor kommen die sparsamsten kleinen Fahrzeuge auf knapp unter 100 Gramm CO₂ pro Kilometer, alle anderen bewegen sich im deutlich dreistelligen Bereich, teilweise sogar im oberen. Die Batterie-mobile ersparen der Umwelt allerdings nicht diese

ganze Menge, sondern es sind nur 20 oder 30, maximal 40 Gramm Differenz gegenüber Sparmodellen mit Verbrennungsmotoren. Dreistellige Gramm-Einsparungen gibt es höchstens in der Luxusklasse, wo das Auto von Tesla fährt. Dieses hat zwar mit die schlechteste CO₂-Bilanz unter den E-Mobilen, aber es tritt gegen die besonders klimafeindlichen SUVs und Sportwagen unter den Verbrennern an. Womöglich kommen in Zukunft noch mehr solche elektrischen Großmobile auf den Markt. Das ist in Sachen Ökobilanz vermutlich keine gute Nachricht – die emeritierten Professoren erheben darum in ihrem Manifest bereits folgende Forderung: »Auch ohne die Elektrifizierung von Kfz, aber spätestens damit besteht ein dringender Anlass, Größe und Gewicht von Personenfahrzeugen zu begrenzen oder wenigstens zu besteuern.«

Die Zahlen zu den Emissionen pro Kilometer mit dem heutigen Strommix zeigen jedenfalls: Um mit den gängigen zweistelligen Differenzwerten von Gramm Kohlendioxid pro Kilometer zusätzliche fünf Tonnen Kohlendioxid aus der Batterieproduktion auszugleichen, müssten Elektroautos normaler Dimensionen schon in die Größenordnung von 150 000 Kilometern an Fahrleistung kommen. Ein durchschnittlicher deutscher Pkw-Nutzer hat diese Strecke erst nach zehn bis zwölf Jahren zusammen.

Anders sieht es aus, wenn man mit echtem Ökostrom rechnet. Dazu genügt es jedoch nicht, einen entsprechenden Tarif für den Privathaushalt zu bestellen und das Elektroauto in der eigenen Garage aufzuladen. Diese Elektrizität stammt oft aus konventionellen Kraftwerken und wird mit Zertifikaten etwa aus Norwegen umdeklariert. Damit trägt sie so oder so bereits zum Strommix bei: Würde man die klimaschonende Eigenschaft der Elektrizität exklusiv dem Auto zurechnen, verschlechterte sich die Bilanz für andere Anwendungen entsprechend – ein Nullsummenspiel.

Stattdessen müsste die nötige Strommenge von einem eigens für diesen Zweck neu errichteten Windrad oder Solarpark stammen, fordert die Nationale Plattform Elektromobilität, ein Beratungsgremium der Bundesregierung zur Elektromobilität. Eine strenge Bedingung: Die Anlage darf eigentlich nur dem elektrischen Verkehr dienen und keine öffentlichen Zuschüsse oder Einspeisevergütungen in Anspruch nehmen. Das schließt auch so manche Photovoltaikanlage auf dem

Wenn es nur wenige Ladestellen gibt, brauchen E-Autos große Akkus. Die sind allerdings schlecht für das Klima.



eigenen Dach aus, die schon vor dem Kauf des Elektroautos existierte.

Einige Autofirmen haben dies inzwischen verstanden und speisen für ihre Batteriemobile den Strom aus neuen Anlagen ins Netz. Daimler zum Beispiel, lobte das Öko-Institut in einem Bericht aus dem Mai 2017, habe ein Windrad finanziert und »ordnet die grüne Eigenschaft des Stroms kommunikativ dem Fahrstromverbrauch der Elektrofahrzeuge aller Kunden zu«. Damit stellte das Institut den Fahrern der ersten Generation von Elektro-Smarts eine Art entsprechendes Zertifikat aus. »Leider führt Daimler das wahrscheinlich nicht fort«, bedauert Öko-Institut-Ingenieur Peter Kasten heute. Erst wenn nämlich der Fahrstrom aus solchen Anlagen kommt, kann der Emissionsfaktor der regenerativ erzeugten Elektrizität in die Ökobilanz des Autos einfließen. Dann wird nicht mehr die so genannte CO₂-Intensität des Strommixes aus der Steckdose von 527 Gramm pro Kilowattstunde berechnet, sondern der Wert für die tatsächliche Quelle der Elektrizität.

Die Produktion von Solarzellen und Windrädern setzt Treibhausgase frei

Auf null fällt der Ausstoß trotzdem nicht ganz: Auch bei der Erzeugung von Windstrom an Land werden laut Umweltbundesamt elf Gramm CO₂ pro Kilowattstunde frei, bei Fotovoltaikanlagen sind es 68 Gramm. Das sind wiederum rechnerische Emissionen – auch die Solarzellen und ihre Ständer, die Flügel, Masten und Getriebe der Windräder müssen schließlich hergestellt, transportiert, aufgestellt, angeschlossen und gewartet werden. Der Aufwand dafür wird später auf die erzeugte Energiemenge umgelegt. Würde ein Tesla Model S tatsächlich exklusiv mit dem Strom aus einem eigens gebauten Windrad geladen, ergäbe sich ein Ausstoß von 3 statt 125 Gramm Kohlendioxid pro Kilometer auf der Straße. Und wer sich zum Opel Ampera-e noch Solarzellen auf dem Dach kauft, die die ganze Energie für das Auto liefern, ist später für Emissionen von 10 statt 76 Gramm pro Kilometer Fahrstrecke

verantwortlich – jeweils im Vergleich zum Aufladen mit dem deutschen Strom des Jahres 2016.

Viele seriöse Ökobilanzen sehen Elektroautos, die normalen deutschen Strom tanken, zurzeit ungefähr auf gleicher Höhe mit sparsamen Verbrennern. Die Nationale Plattform Elektromobilität und das Umweltministerium bescheinigen dem Akkuantrieb einen 12- bis 16-prozentigen Vorteil, und auch der Trierer Umweltchemiker Eckard Helmers sieht die Stromer in einer aktuellen Studie vorne. Das gilt Helmers' Berechnungen zufolge bereits dann, wenn man mit dem deutschen Strommix von 2013 rechnet; seither ist die Emission pro Kilowattstunde noch um zirka zehn Prozent gesunken.

Das Team um Dieter Teufel vom Umwelt- und Prognose-Institut (UPI) in Heidelberg sieht in einem 2017 veröffentlichten Bericht ebenfalls einen leichten Vorteil für Batteriemobile, wenn man sie isoliert – also nur nach den bisher genannten Kriterien – betrachtet. Zuletzt sprachen lediglich die Heidelberger Kollegen vom ifeu-Institut dem sparsamen Diesel einen leichten Vorteil zu. Ihre Studie hatte das Umweltbundesamt erst 2016 veröffentlicht. Doch auch diese Forscher zeigen mit Ende August 2017 aktualisierten Zahlen in einem Onlinerechner, dass das Batteriemobil die Nase vorn haben kann, wenn man annimmt, dass die Energiewende weitergeht. Es kann allerdings bis zum neunten Fahrzeugjahr dauern, bis sich der Vorteil der Elektromobilität zeigt. Diese Studien berücksichtigen übrigens alle die genannte Vorkette, auch bei der Herstellung von konventionellen Kraftstoffen.

Der Unterschied zwischen vielen Untersuchungen steckt letztlich in Details: Werden Fahrzeuge ähnlicher Größe verglichen, kommt der Diesel, der mehr Feinstaub und Stickoxide, aber weniger CO₂ freisetzt als Benzin, dem Elektroauto nahe, insbesondere wenn dessen Batterie etwas üppiger bemessen ist. Geht es hingegen um den Durchschnitt der zugelassenen Autos, in den gerade bei den Selbstzündern viele deutlich übermotorisierte, schwere Wagen einfließen, haben die im Mittel kleineren Elektro-

Teslas Gigafactory soll den Preis für Batterien deutlich senken. Die Abbildung zeigt ein Computermodell – bisher sind nur Teile der Anlage im US-Bundesstaat Nevada fertig.





Zahlreiche Akkus werden in China hergestellt, wo – je nach Region – viel Strom aus Kohlekraftwerken kommt. Das verschlechtert die Ökobilanz der E-Mobile.

autos einen eingebauten Vorteil, zumindest bisher. Außerdem kommt es stark auf die Voraussetzungen und Bezugsjahre an. »Wenn eine Studie erscheint, sind die darin formulierten Annahmen wegen der Dynamik des Marktes oft schon wieder veraltet«, seufzt Peter Kasten vom Öko-Institut.

Die Rechnung sieht wie gesagt deutlich anders aus, wenn tatsächlich echter Ökostrom aus zusätzlich errichteten Anlagen in den Tank fließt. Dann sind die Elektroautos in allen Bilanzrechnungen unreichbar sauber. Laut der Heidelberger ifeu-Studie fallen für den Diesel über den ganzen Lebenszyklus gerechnet ungefähr 190 Gramm CO₂ pro Fahrkilometer an, wenn man alle Faktoren zusammenrechnet. Beim Elektromobil mit Windstrom sind es nur 60 Gramm.

In diesen Zahlen liegt übrigens eine nationale Versuchsung. Deutschland könnte mit den deutlichen Ersparnissen in der Nutzungsphase seine eigene Emissionsbilanz polieren und dabei galant übersehen, dass die großen Emissionen während der Batterieproduktion in asiatischen Ländern, vor allem in China zu Buche schlagen. Die Treibhausgase allerdings verändern das Klima völlig unabhängig davon, auf welcher Seite von irdischen Grenzen sie in die Atmosphäre gestiegen sind. Eine solche Betrachtungsweise wäre daher unseriös.

Unsere Zwischenbilanz lässt sich von etlichen Faktoren in beide Richtungen verschieben. Nachteile entstehen beispielsweise, wenn ein Elektroauto unbedingt eine Reichweite von 400 statt von 150 bis 200 Kilometern haben soll. Dann braucht es eine doppelt so große Batterie, und man müsste unrealistische 300 000 Kilometer fahren, um seinen ökologischen Rucksack abzutragen. Außerdem muss das E-Mobil seinen doppelt so schweren Stromspeicher auch noch herumschleppen und verbraucht darum mehr Energie als eigentlich nötig. Einen Einfluss hat zudem, dass es in Deutschland im Winterhalbjahr kalt und neblig ist. Heizung und Gebläse eines Elektromobils gehen zu Lasten der Batterie, während die nötige Wärme

beim herkömmlichen Auto ein Abfallprodukt ist. Das kann den Verbrauch eines Fahrzeugs mit Akkuantrieb im Extremfall um die Hälfte steigern. Entwickler an der Technischen Universität München haben darum beim Entwurf ihres Modells Visio.M ernsthaft überlegt, ein Heizsystem einzubauen, das Bioalkohol zur Wärmeproduktion verbrennt.

Weitere Nachteile entstehen, wenn Elektroautos zum falschen Zeitpunkt geladen werden, sobald es Millionen solcher Fahrzeuge gibt. Eine erhöhte Energienachfrage zu einem Zeitpunkt, an dem gerade wenig erneuerbarer Strom zur Verfügung steht, kann den Strommix negativ beeinflussen. Die Autos sollten somit eine intelligente Ladesteuerung haben, die mit dem Netz zusammen bestimmen kann, wann es günstig ist, Energie zu tanken.

Die Ökobilanz der Gefährte profitiert hingegen davon, wenn sie in Dänemark, Österreich, der Schweiz oder einem anderen Land gefahren und betankt werden, das einen sehr hohen Anteil erneuerbarer Energie im Strommix hat. In Österreich werden zum Beispiel um die 150 Gramm CO₂ pro Kilowattstunde freigesetzt, gerade mal 28 Prozent des deutschen Werts aus dem Jahr 2016. Dadurch sinken die rechnerischen Emissionen eines BMW i3 von 66 auf 19 Gramm pro Kilometer Fahrstrecke.

Wichtig ist darüber hinaus der Blick auf die Handhabung der Batterien: Wenn sie nicht leer gefahren oder voll aufgeladen werden, verlängert das ihre Lebensdauer, da der Einsatz an den Kapazitätsgrenzen die Materialien belastet. Zudem erwärmt sich der Energiespeicher übermäßig, wenn er jenseits von 85 Prozent seiner Ladekapazität weiter Strom aufnehmen soll. Erste Erfahrungen bei Tesla-Modellen zeigen immerhin, dass die Akkus eher länger halten als anfangs befürchtet.

Sofern die Energiewende weitergeht, werden Elektroautos im Lauf der Zeit immer sauberer

Den Elektroautos kommt es ebenfalls zugute, wenn sie vor allem in der Stadt fahren. Beim häufigen Anfahren und Bremsen gewinnen sie viel Bewegungsenergie wieder zurück, während Verbrennungsmotoren hier besonders ineffizient arbeiten. Die Kehrseite ist, dass stromgetriebene Gefährte bei Überlandfahrten ihr höheres Gewicht mitschleppen müssen.

Elektroautos werden ohne eigenes Zutun mit der Zeit immer sauberer. Damit ist nicht nur gemeint, dass mit jedem Modellwechsel Effizienzgewinne zu erwarten sind, bessere Batterien, leistungsfähigere Elektronik, mehr Leichtbauteile. Auch ein 2017 angeschafftes Batteriemobil ist 2025 vermutlich für weniger rechnerische Emissionen verantwortlich, weil der Strommix in Deutschland kontinuierlich »grüner« wird. Das Bundesumweltministerium gibt an, dass sich die auf den Kilometer bezogene Umweltbilanz eines Elektroautos innerhalb einer zwölfjährigen Lebensdauer um etwa ein Drittel verbessern könnte. Dazu müsste der Emissionsfaktor der Elektrizität im Jahr 2029 auf rund 350 Gramm CO₂-Ausstoß pro Kilowattstunde fallen. Das ist nach verschiedenen Szenarien für die künftige Entwicklung immerhin denkbar. Eine Studie vom Öko-Institut und dem Fraunhofer Institut für System- und

Innovationsforschung (ISI) hat acht solche Ausblicke zusammengetragen, die Emissionsfaktoren liegen dabei zwischen 233 und 376 Gramm Kohlendioxid pro Kilowattstunde erzeugter Elektrizität.

Auch bei der Batterieproduktion sollte sich in den kommenden Jahren einiges tun. Sobald der Tesla-Gründer Elon Musk in Nevada seine Gigafactory für Batterien fertig stellt (siehe Bild S. 16), die Solarstrom vom eigenen Dach verbrauchen soll, dürften sich die Mengen der ausgestoßenen Treibhausgase für die Energiespeicher halbieren, erwarten Fachleute. Noch besser wäre eine Produktion in einem Land wie Norwegen oder Island, die sehr sauberen Strom aus Wasserkraft und Geothermie nutzen. Fabriken in Deutschland brächten hingegen nur einen geringen Vorteil gegenüber China.

Streng genommen spielt das bei der Bilanzrechnung für ein heute als Neuwagen zugelassenes Elektroauto allerdings keine Rolle mehr, denn seine Batterie ist ja schon hergestellt. Doch viele Hersteller verkaufen ihren Kunden die Energiespeicher gar nicht, sondern vermieten sie an sie, auch um die Sorgen der Autokäufer wegen der neuen Technologie zu dämpfen. Sollte die Komponente daher ausgetauscht werden müssen, würde der Ökobilanz zwar ein weiterer ökologischer Rucksack hinzugefügt, aber vermutlich auf Basis der dann aktuellen, verbesserten Produktionsbedingungen.

Damit wäre der alte, ausgetauschte Akku nicht unbedingt bloß ein ökologischer Klotz am Bein. Viele Fachleute denken schon darüber nach, den Autobatterien ein zweites Leben zu ermöglichen. Wenn die Energiespeicher deutlich gealtert wirken, liegt es vielleicht nur an einigen Dutzend der Tausenden von Einzelzellen. Tüftler könnten sie austauschen, um den Akku danach als »generalüberholt« zu vermarkten. Oder das Aggregat wird noch einige Jahre lang in irgendeinem Keller installiert, um tagsüber den Solarstrom vom Dach aufzunehmen und abends wieder abzugeben. Das ist eine einfachere Aufgabe, als an jeder Ampel die Energie fürs beherzte Anfahren bereitzustellen und wenig später beim scharfen Bremsen wieder Strom einzuspeichern.

Die Käufer von E-Autos nutzen ihr Gefährt besonders eifrig – ein Beispiel für den Rebound-Effekt

Ähnliche Projekte hat Daimler mit gebrauchten Smart-Batterien in Lünen bei Dortmund sowie mit einem Ersatzteillager für die Energiespeicher in Herrenhaus bei Hannover begonnen. Außerdem gibt es viele Ideen dazu, die Batterien von Elektroautos, die tagsüber zum Beispiel auf dem Firmenparkplatz stehen oder sich nachts in der heimischen Garage aufladen, als Puffer für Netzschwankungen zu verwenden. In Kopenhagen wird das Verfahren bereits erprobt. In jedem dieser Fälle müsste man den ökologischen Rucksack der Batterieproduktion auf das Auto und die Mit- oder Nachnutzer verteilen. Wie genau man das berechnen soll und ob das alles überhaupt wirtschaftlich funktioniert, ist indes noch offen.

Die Käufer von Batteriemobilen ändern anscheinend ihre Verkehrsgewohnheiten und sind viel mit ihren Gefährten unterwegs, das ermittelte 2013 eine Studie des ISI im



In einem Pilotprojekt im westfälischen Lünen hat Daimler Batteriesysteme aus Elektromobilen zu einem 13-Megawattstunden-Energiespeicher für das Stromnetz zusammengeschaltet.

Auftrag der Deutschen Akademie der Technikwissenschaften. Vielleicht leitet sie dabei die Überzeugung, damit der Umwelt etwas Gutes zu tun, vielleicht wollen sie auch den hohen Anschaffungspreis möglichst schnell durch die geringeren laufenden Kosten ausgleichen. Zudem – das zeigt zumindest eine Studie der norwegischen Ökonomen Bjart Holtmark und Anders Skonhoft – fahren etwa 85 Prozent von ihnen mit dem Auto zur Arbeit, während das weniger als die Hälfte der Besitzer normaler Wagen tun. Entsprechend verschmähen die Elektromobil-Nutzer weitgehend Fahrräder und den öffentlichen Nahverkehr.

In der Umweltforschung nennt man das Rebound-Effekt: Wer ein umweltfreundliches Produkt kauft, neigt oft dazu, es häufiger zu benutzen als ein reguläres, ob nun LED-Lampe oder Elektroauto. Das frisst einen Teil der möglichen Einsparungen gleich wieder auf oder verkehrt die Wirkung sogar ins Gegenteil. Zudem werden die heutigen Elektroautos oft stillschweigend als Zweitwagen vermarktet und genutzt, fand 2017 ein Team um Dieter Teufel, den Leiter des UPI, heraus. Nur eine Minderheit der Käufer ersetzt ihr bisheriges Auto mit einem Batteriemobil. Die elektrisch betriebenen Fahrzeuge könnten also den Verkehr sogar noch steigern, fassen die Heidelberger Experten die Situation in ihrer detaillierten Studie zusammen. Die Untersuchung gehe über die Ökobilanz hinaus in Richtung Technologiefolgenabschätzung, so Institutsleiter Teufel.

Und nicht nur das geänderte Verhalten ihrer Besitzer spielt eine Rolle, sondern auch die Entscheidungen anderer Käufer. Dazu trägt die Fiktion bei, Elektroautos erzeugten keine Emissionen. Wenn das Auto mit einem Ausstoß von null in der Verkaufsstatistik seines Herstellers steht, kann dieser beruhigt ebenfalls ein konventionelles Fahrzeug anbieten, dessen Verbrauch den so genannten Flottengrenzwert seiner Produkte weit überschreitet – im Mittel passt's dann wieder. Diese Verrechnung beruht auf

einem Beschluss der Europäischen Union. Die CO₂-freie Einstufung der Elektromobile sollte Autokonzerne dazu anregen, den elektrischen Antrieb zu entwickeln, was etliche Experten als Anreiz vergleichbar zu den Subventionen für Windräder begrüßen oder zumindest akzeptieren. »Diese Regelung hat aber kein Auslaufdatum«, beschwert sich Dieter Teufel. Sie erlaube es den Herstellern, praktisch unbegrenzt weiterhin große, Sprit fressende Geländewagen zu verkaufen. »Deren übermäßiger Ausstoß von CO₂ wird dann durch die Fiktion vom Nullemissions-elektromobil ausgeglichen, ohne dass die Konzerne Straßen zahlen müssten, weil der Flottenverbrauch zu hoch ist.« So könnten die Hersteller für jedes Elektromobil fünf SUVs verkaufen und dabei 10 000 Euro an Geldbußen einsparen, spitzt Teufels Team den Vorwurf zu.

Bisher ist es nur um den Ausstoß von Treibhausgasen gegangen. Eine Rechnung für andere Schadstoffe oder Umwelteffekte wie Feinstaub oder Flächenverbrauch sähe ganz anders aus. Nur ein Aspekt: Weil Elektroautos aus dem Stand mit vollem Drehmoment beschleunigen können, belasten sie ihre Reifen womöglich stärker als herkömmliche Fahrzeuge. Der Abrieb der Pneu ist jedoch eine erhebliche Komponente beim Feinstaub, der an vielen stark befahrenen Kreuzungen zum Problem wird. Die 15 Verkehrsprofessoren um Klaus Beckmann regen in ihrem Manifest darum eine Abregelung des Motors an, um die Beschleunigung zu begrenzen.

Außerdem sind batterieelektrische Fahrzeuge nicht die einzigen mit einer Antriebstechnik, die auf Strom basiert. Autos mit einer Brennstoffzelle tanken Wasserstoff, der in Zukunft durch Elektrolyse aus überschüssigem Windstrom hergestellt werden könnte – im Augenblick entsteht er freilich vor allem aus Erdgas. Im Fahrzeug macht die Brennstoffzelle daraus Strom und treibt so einen Elektromotor an. Der Vorteil ist, dass sich ein solches Fahrzeug sehr schnell betanken ließe. Aber man bräuchte dafür erhebliche Investitionen in eine flächendeckende Tankinfrastruktur.

Eine andere Möglichkeit ist, den Wasserstoff nach der Elektrolyse mit CO₂ zu Methan zu veredeln, das im norma-

Mehr Wissen auf Spektrum.de

Unser Online-Dossier zum Thema finden Sie unter

www.spektrum.de/t/elektromobilitaet



ISTOCK / BJDLZX

len Erdgasnetz gespeichert wird. Erdgasautos können es tanken und fahren damit trotz Verbrennungsmotor gewissermaßen mit Strom; einen solchen Versuch gibt es von Audi. Ähnliche Ansätze probieren, unter Stromeinsatz flüssige, künstliche Kraftstoffe herzustellen. Als im November 2017 CDU/CSU, FDP und Grüne über eine Jamaika-Koalition berieten, verwies der Präsident des Club of Rome, Ernst Ulrich von Weizsäcker, auf diese beiden Möglichkeiten und warnte davor, sich voreilig auf einen Antrieb mit Batterie und Elektromotor festzulegen.

Kommen wir zum Fazit: Elektroautos sind nicht automatisch der Klimaretter, als der sie seitens der Politik und Industrie gerne verkauft werden. Aber sie könnten künftig einen erheblichen Beitrag dazu leisten, den Straßenverkehr umweltfreundlicher zu gestalten – manche glauben, es sei die einzige realistische Strategie. Dazu müssen allerdings heute die Weichen richtig gestellt werden: Herstellung und Gebrauch der Batteriemobile müssen effizienter werden, der Strom zum Fahren sollte aus zusätzlich errichteten regenerativen Energiequellen stammen, und Luxuswagen mit besonders großen Motoren und Stromspeichern sollten durch ordnungspolitische Eingriffe begrenzt werden. Auf die Dauer muss sich ebenfalls die Einstellung der Kunden ändern, mit dem Auto jederzeit komfortabel überall hinfahren zu wollen, also sowohl täglich zur Arbeit als auch mit Kindern, Hund und Gepäck in den Camping-Urlaub. Vor allem sollte die Zahl der gefahrenen Kilometer nicht steigen. Wer auf all das achtet, kann mit einem Elektroauto schon heute die Umwelt schonen. ◀

Die Deutsche Post entwickelte einen eigenen Elektrolaster, weil es auf dem Markt noch kein geeignetes Modell gab.



KARL-FRIEDRICH HÖHL / GETTY IMAGES / ISTOCK

QUELLEN

Helmers, E., Weiss, M.: Advances and Critical Aspects in the Life-Cycle Assessment of Battery Electric Cars. In: Energy and Emission Control Technologies 5, S. 1–18, 2017

Helms, H. et al: Weiterentwicklung und vertiefte Analyse der Umweltbilanz von Elektrofahrzeugen. Umweltbundesamt, Texte 27/2016

Peters, J.F. et al.: The Environmental Impact of Li-Ion Batteries and the Role of Key Parameters – A Review. In: Renewable and Sustainable Energy Reviews 67, S. 491–506, 2017

Teufel, D. et al.: Ökologische Folgen von Elektroautos. Ist die staatliche Förderung von Elektro- und Hybridautos sinnvoll? Umwelt- und Prognose-Institut Heidelberg, UPI-Bericht Nr. 79, 2. Auflage 2017

Timpe, C. et al.: Handlungsbedarf und -optionen zur Sicherstellung des Klimavorteils der Elektromobilität. Endbericht zum »Wissenschaftlichen Analyse- und Dialogvorhaben zur Sicherstellung des Klimavorteils der Elektromobilität« (Vergabenummer 16EM2111) im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. Ökoinstitut, Freiburg 2017