

Christoph Buchal, Hans-Dieter Karl und Hans-Werner Sinn*

Kohlemotoren, Windmotoren und Dieselmotoren: Was zeigt die CO₂-Bilanz?

Dieser Artikel vergleicht aufgrund offizieller Messdaten zwei Mittelklasseautos, den Mercedes C 220 d und den neuen Tesla Model 3, bezüglich ihres Verbrauchs an Diesel bzw. Strom. Dabei werden alternative marginale Energiequellen für den Strom sowie der tatsächliche Strommix Deutschlands aus dem Jahr 2018 zugrunde gelegt. Ferner wird eine Metastudie für den CO₂-Ausstoß bei der Batteriefertigung berücksichtigt. Es zeigt sich, dass der CO₂-Ausstoß des Elektromotors im günstigen Fall um etwa ein Zehntel und im ungünstigen Fall um ein gutes Viertel über dem Ausstoß des Dieselmotors liegt. Am günstigsten ist der mit Methan betriebene Verbrennungsmotor, der auch dann, wenn man die erhebliche Vorkettenverschmutzung beim Methan berücksichtigt, um ein knappes Drittel unter dem Dieselmotor liegt. Auf die Wasserstoff-Methan-Technologie zu setzen, hat zwei Vorteile. Zum einen ist sie langfristig der einzig funktionierende Weg zur Speicherung der überschießenden Stromspitzen des Wind- und Sonnenstroms, die erforderlich ist, wenn die Marktanteile dieser Form regenerativen Stroms ausgeweitet werden sollen. Zum anderen bietet sie schon aus dem Stand heraus die Möglichkeit einer erheblichen CO₂-Einsparung, selbst wenn dieses Methan aus fossilen Quellen stammt.

1. Die Fortschreibung der Energiewende und ihre vorprogrammierte Krise im Verkehrssektor
2. Die Struktur der deutschen Stromproduktion
3. Der CO₂-Ausstoß alternativer Motoren
 - 3.1 Der Dieselmotor
 - 3.2 Der batterieelektrische Motor
 - 3.3 Brennstoffzellen oder Batterien?
4. Zwei mögliche Szenarien für die Elektrifizierung des Verkehrs
5. Das Problem der Volatilität und die Notwendigkeit von Parallelstrukturen
6. Überschießende Stromspitzen und die Rolle des Wasserstoffs
7. Schlussbemerkungen

Post Scriptum
Anhang

* Christoph Buchal ist Professor für Physik an der Universität zu Köln und Wissenschaftler am Forschungszentrum Jülich, Hans-Dieter Karl war als Spezialist für die Energieforschung am ifo Institut beschäftigt, und Hans-Werner Sinn ist emeritierter Professor der Ludwig-Maximilians-Universität München sowie ehemaliger Präsident des ifo Instituts. Keiner der Autoren hat eine kommerzielle Beziehung zur Energiewirtschaft oder zu Autokonzernen. Die Autoren danken Thomas Grube, Institut für Energie und Klima (IEK3) des Forschungszentrums Jülich, und Karen Pittel vom ifo Institut für nützliche Hinweise sowie Daniel Weishaar für eine sorgfältige Forschungsassistenz.

1. DIE FORTSCHREIBUNG DER ENERGIEWENDE UND IHRE VORPROGRAMMIERTE KRISE IM VERKEHRSSSEKTOR

Eine Analyse der gegenwärtigen Situation der Energiewende zeigt, dass trotz hoher jährlicher Investitionen, vor allem sichtbar im Bereich der »Erneuerbaren Stromproduktion«, die gesamten deutschen CO₂-Emissionen nicht im erhofften Umfang sinken. Insbesondere im Verkehrssektor werden seit vielen Jahren praktisch unveränderte Emissionssummen beobachtet, obwohl für diesen Sektor von der Bundesregierung ein Reduktionsziel von mindestens 40% bis 2030 vorgegeben wurde (vgl. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit 2016, S. 8).

Deshalb wird der Verkehrssektor im Hinblick auf seinen unverminderten Kraftstoffbedarf derzeit heftig kritisiert. Obwohl eine wirksame Abkehr von Benzin und Diesel offensichtlich sehr schwierig ist, setzen Politik und mediale Öffentlichkeit dennoch große Hoffnungen auf eine forcierte Einführung von Elektroautos. Die Politik begründet diesen Schritt vor allem mit einem wirksamen Klimaschutz, der durch die Verringerung des Mineralölbedarfs für Benzin und Diesel erzielt werden soll. Damit würden auch die CO₂-Emissionen proportional sinken.

Nun kann man die Wende zum Elektroauto aus ingenieurtechnischer Sicht durchaus begrüßen, denn es ist elegant, robust, spurtstark, fährt geräuscharm und braucht kein kompliziertes Getriebe. Insbesondere für den innerstädtischen Verkehr bietet das Elektroauto großes Potenzial, weil die Emissionen von den Städten zu den Kraftwerken verlagert werden. China bemüht sich sehr konsequent, seine Riesenmetropolen mit Elektroautos wieder bewohnbarer zu machen. Vor allem die innerstädtischen Feinstaub- und Stickoxidemissionen des Verkehrs sind dort mitverantwortlich für den oft unerträglichen Smog. Elektrische Bahnen und Fahrzeuge bieten in dieser Hinsicht eine wesentliche Verbesserung. China entwickelt sich deshalb gegenwärtig zu dem global entscheidenden Markt für Elektro-Pkw und Busse. Hier darf die deutsche Industrie nicht den Anschluss verlieren.

Jedoch kann nicht die Rede davon sein, dass Elektroautos ohne CO₂-Emissionen bewegt werden können, wie es der europäische Gesetzgeber behauptet, wenn er die CO₂-Emissionen dieser Autos mit einem Wert von »null« in seine Berechnungen einfließen lässt. Ein solcher Wert stimmt nicht einmal für Norwegen, wo der Strom nahezu emissionsfrei mit Wasserkraft gewonnen wird, weil der CO₂-Ausstoß bei der Fertigung von Fahrzeug und Akku ignoriert wird. In allen anderen europäischen Ländern ergeben sich darüber hinaus hohe CO₂-Emissionen durch die Beladung der Akkus mit Hilfe des Stroms aus dem jeweiligen nationalen Produktionsmix aus grüner Energie und Kernenergie auf der einen und fossilen Brennstoffen auf der anderen Seite.

Im Folgenden bieten wir deshalb zuerst einen Überblick über die Situation der deutschen Stromproduktion, um im anschließenden Kapitel einen Vergleich von E-Autos mit Verbrennern, insbesondere dem Diesel, im Hinblick auf den CO₂-Ausstoß durchführen zu können. Dabei ist es natürlich für die CO₂-Bilanz und das Klimaproblem gleichgültig, wo die CO₂-Emissionen entstehen, ob verteilt bei den Fahrzeugen oder konzentriert im Kraftwerk.

Für den Vergleich betrachten wir den CO₂-Ausstoß eines modernen Dieselfahrzeugs mit jenem eines modernen Elektroautos anhand zweier konkreter Beispiele, für die uns die Messwerte vorliegen. Das ist zum einen der Mercedes C 220 d und zum anderen das neue Model 3 von Tesla. Beide Fahrzeuge haben eine ähnliche Größe und befinden sich in der gleichen Fahrzeugklasse. Wir benutzen die offiziellen NEFZ-Werte für den Energieverbrauch und den CO₂-Ausstoß. Soweit möglich, stellen wir auch weitergehende Überlegungen zu den vor- und nachgelagerten CO₂-Bilanzen an.

Wir erläutern die gegenwärtige Faktenlage so detailliert, weil wir in der postulierten vollständigen Emissionsfreiheit der E-Autos eine zielgerichtete industriepolitische Täuschung vermuten und in der Folge eine unvermeidliche Enttäuschung der Öffentlichkeit befürchten, wenn sich die erhofften techni-

schen CO₂-Minderungen nicht einstellen. Das wird in den Schlussbemerkungen ausführlicher erläutert.

Die Zahlen zeigen, dass der forcierte Ausbau der E-Autoflotte keineswegs direkt zu sinkenden technischen CO₂-Emissionen führen kann, obwohl zusätzlich flankierend auch die CO₂-Emissionsgrenzwerte für konventionelle Pkw drastisch abgesenkt wurden. So wurde der CO₂-Ausstoß pro Pkw-Kilometer von 2015 bis 2020 gesetzlich bereits von 130 auf 95 Gramm pro Kilometer gedrückt. Der zulässige Grenzwert für 2030 soll dann nur noch 59 Gramm pro Kilometer betragen. Das entspricht einem Verbrauch von 2,2 Liter Diesel pro 100 km oder 2,6 Liter Benzin pro 100 km.¹ Da diese Zahlen ingenieurtechnisch unrealistisch sind, können sie von den Herstellern in einen sogenannten fiktiven »Flottenverbrauch« umgerechnet werden. So würde es beispielsweise der Flottenverbrauch einem Pkw-Hersteller erlauben, im Jahr 2030 noch 29% konventionelle Autos mit einem Verbrauch von 7,5 Liter Diesel pro 100 km zu verkaufen, wenn 71% seiner Produktion aus Elektro-Pkw besteht. Auch eine Aufteilung von 50/50 wäre vorgabekonform, falls die konventionellen Pkw nur 4,4 Liter pro 100 km benötigen. Es bleibt bei dieser fiktiven Bilanz allerdings offen, ob die verkauften E-Autos nennenswert zur Transportleistung beitragen oder ob sie als Zweitwagen nur geringfügig genutzt werden.

Abschließend erörtern wir noch einmal die Frage, ob es Deutschland möglich sein wird, vor dem Hintergrund der Energiewende eine schnelle Reduktion des CO₂-Ausstoßes zu erreichen, wenn der Abschied vom Verbrennungsmotor forciert wird.

2. DIE STRUKTUR DER DEUTSCHEN STROMPRODUKTION

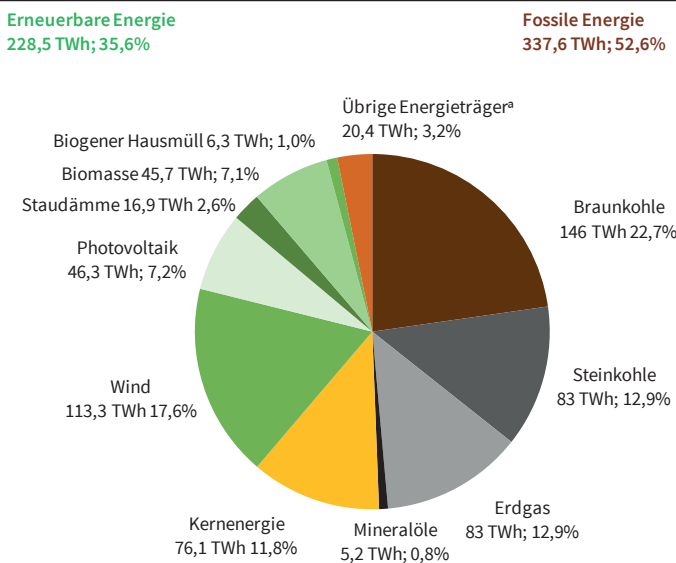
Für die Beurteilung des CO₂-Ausstoßes der Elektroautos kommt es entscheidend darauf an, sich dafür zunächst die Bedeutung alternativer Stromquellen vor Augen zu führen. Abbildung 1 illustriert die Struktur der Bruttostromproduktion des Jahres 2018 in Deutschland nach der Statistik der AG Energiebilanzen (2018). Die Bruttostromproduktion ohne den Ausstoß der Pumpspeicherwerke lag in diesem Jahr insgesamt² bei 642,4 TWh. Davon entfielen etwas mehr als die Hälfte (52,6%) auf fossile Quellen, 11,8% auf Kernkraftwerke und 35,6% auf erneuerbare Energien.

In der Presse wurde in letzter Zeit des Öfteren ein deutlich höherer Grünstromanteil von bis zu 40% der Nettostromproduktion genannt (vgl. z.B. Hecking 2019). Bei der Berechnung dieser Zahl

¹ Vgl. Europäische Kommission (2018). Der Berechnung liegt der vom Kraftfahrtbundesamt (2018) verwendete kraftstoffspezifische Umrechnungsfaktor von 2,65 kg CO₂ pro Liter Dieseldieselkraftstoff zugrunde. Für Benzin liegt der hypothetische Verbrauch mit einem Umrechnungsfaktor von 2,32 kg CO₂ pro Liter bei 2,56 Liter auf 100 km.

² Inklusiv des Stroms für Exporte, für den Eigenverbrauch der Kraftwerke und für die Befüllung der Pumpspeicherwerke, jedoch ohne die Abflüsse aus den Pumpspeicherwerken (vgl. AG Energiebilanzen 2018).

Abb. 1
Die Struktur der Bruttostromproduktion (642,4 TWh) in Deutschland im Jahr 2018



^aStrom aus nicht-biogenem Anteil des Hausmülls (50%), sonstigen Gasen, Industrieabfall, sonstigen fossilen Energieträgern (nicht weiter differenzierbar). Zu den übrigen Energieträgern zählen wir nicht den Pumpspeicheroutput, den wir auf 6,5 TWh schätzen. Diese Zahl ergibt sich nach Abzug von Umwandlungsverlusten aus dem von der Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen (2018) veröffentlichten Input der Pumpspeicherwerke in Höhe von 8,5 TWh. Der Input der Pumpspeicherwerke ist in den in der Abbildung genannten, jeweiligen Bruttostromerzeugungswerten enthalten. Quelle: Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen (2018).

wurde die grüne Stromproduktion aber nicht durch die gesamte Stromproduktion, sondern nur durch die Endenergie an der Steckdose geteilt. Dieser Wert liegt um die Leitungsverluste, den Eigenverbrauch der Kraftwerke, die Verluste beim Durchfluss durch Pumpspeicherwerke und vor allem um die Nettoexporte in erheblichem Maße unter der Stromproduktion. Er übertreibt den grünen Stromanteil schon deshalb, weil der Nenner um die Nettoexporte (immerhin 50 TWh) verkürzt wird. Ähnliches gilt für den Strom aus Pumpspeicherkraftwerken, der häufig beim Strom aus erneuerbaren Quellen mit eingerechnet wird, obwohl es damit zu einer Doppelzählung und vielleicht sogar – falls es nicht nur grüner Strom ist, der durchgeschleust wird – zu einer Art »Grünwäsche« von Strom aus fossilen Quellen kommt.

Tabelle 1 gibt einen Überblick über den CO₂-Ausstoß, der bei verschiedenen Stromquellen je kWh an der Steckdose zu erwarten ist. Die genauen Berechnungen dazu erläutern wir im Anhang. Sie beinhalten den anteiligen CO₂-Ausstoß für die Leitungsverluste und den Eigenverbrauch der Kraftwerke sowie

Vorketteneffekte beim Gas, bei der Steinkohle und bei Strom aus Mineralölprodukten.

Man sieht, dass beim Braunkohlestrom mit einem Emissionsfaktor von 1,36 kg/kWh am meisten CO₂ anfällt. Beim Steinkohlestrom liegt der Faktor bei 1,06 und beim Erdgas wegen des hohen Wasserstoffanteils am Methan bei 0,55. Im Durchschnitt ergab sich beim deutschen Strommix des Jahres 2018 ein CO₂-Ausstoß von 0,55 kg je kWh (Strom für Endkunden aus der Steckdose).

3. DER CO₂-AUSSTOSS ALTERNATIVER MOTOREN

Im Folgenden vergleichen wir einen Diesel-Pkw mit einem batterieelektrisch betriebenen Auto, wobei wir unterschiedliche Herkunftsarten

der verwendeten elektrischen Energie unterstellen, um Anhaltspunkte für die Beurteilung verschiedener Szenarien für den erhöhten Bedarf für den Betrieb einer sehr großen Zahl neuer Elektrofahrzeuge zu gewinnen.

Wir vergleichen exemplarisch zwei Fahrzeuge einer ähnlichen Größenklasse, und zwar den Tesla Model 3 mit einer Batterie von 75 kWh mit einem C 220 d von Mercedes, wobei der bislang gültige

Tab. 1
Die CO₂-Emissionsfaktoren der deutschen Stromquellen

Energieträger	CO ₂ -Emission je kWh Nettostromverbrauch (Steckdosenstrom) (kg/kWh)
Braunkohle	1,36
Steinkohle	1,06
Erdgas	0,55
Mineralölprodukte	0,87
Kernenergie	
Erneuerbare Energie darunter:	
Windkraft	
Photovoltaik	
Staudämme ^a	
Biomasse	
Biog. Hausmüll	0,85
Übrige Energie ^b	
Durchschnitt deutscher Energiemix 2018	0,55

^aInklusive Laufwasserkraftwerke zur Erzeugung von Strom aus den Flüssen. Ohne Stromerzeugung der Pumpspeicherkraftwerke, es sei denn, die Pumpspeicher hätten einen natürlichen Zufluss und würden deshalb als normale Speicherwerke (wie Talsperren) angesehen. ^bNicht biogener Hausmüll etc., ohne Output der Pumpspeicherwerke. Vgl. die Erläuterungen zur Tabelle im Anhang. Hinweis: Die Tabelle zeigt die Emissionsfaktoren für den Nettostromverbrauch an der Steckdose nach Abzug des Eigenverbrauchs der Kraftwerke, der Leitungsverluste und der Vorketteneffekte. Es wird dabei angenommen, dass Nettoexporte aus dem durchschnittlichen Energiemix gespeist werden. Die Berechnungsdetails und die Quellenhinweise findet man im Anhang. Für alle erneuerbaren Energien wird hier das theoretische Optimum von 0 kg CO₂ pro kWh angesetzt.

Quelle: Siehe Anhang.

europäische Fahrzyklus NEFZ und die von den Herstellern dazu veröffentlichten Verbrauchswerte zugrunde gelegt werden. Angaben zum neuen Fahrzyklus WLTP wurden bislang nur für den Mercedes, nicht aber für den Tesla veröffentlicht. Der Vergleich auf der Basis des NEFZ ist vermutlich eher günstig für das E-Auto, denn die Testfahrzyklen sind stadt-affin ausgestaltet. Die niedrigen Geschwindigkeiten und die häufigen Bremsvorgänge gehen bei Verbrennungsmotoren, nicht aber bei Elektromotoren zu Lasten des Wirkungsgrades, weil sie häufig in suboptimalen Drehzahlen fahren, während der Elektromotor praktisch immer denselben Wirkungsgrad hat. Die Domäne des Verbrennungsmotors ist demgegenüber die Autobahnfahrt mit hoher Geschwindigkeit, weil der Motor auf eine entsprechend hohe Last ausgelegt ist und dann einen besseren Wirkungsgrad entfaltet. Der im Vergleich zum Verbrennungsmotor besonders drastische Schwund an Reichweite bei sehr schneller Fahrweise ist ein Charakteristikum aller E-Autos. Das berücksichtigen wir bei unserem Vergleich nicht.

Im Übrigen ist der Vergleich für den Elektromotor günstig, weil die Tesla-Batterie im Testzyklus bei niedrigen Geschwindigkeiten eine Reichweite von bis zu 500 km ermöglicht, während der Tank der C-Klasse auch im Normalbetrieb für das Doppelte reicht. Eigentlich müsste man deshalb mit einer doppelt so großen Batterie rechnen, was den CO₂-Ausstoß wegen des hohen Zusatzgewichts (mehr als 300 kg) nach oben schnellen ließe. Eine solche Batterie ist aber nicht verfügbar.

3.1 Der Dieselmotor

Wir beginnen mit dem Dieselmotor, weil er die Vergleichsbasis zur Beurteilung der Werte für den batteriebetriebenen Elektromotor darstellt. Der Dieselmotor des 220 d von Mercedes (OM 654) verbraucht im NEF-Zyklus 4,5 Liter Treibstoff pro 100 km und stößt dabei nach Herstellerangaben 11,7 kg CO₂, also 117 Gramm pro Kilometer aus. Es kommen in der Vorkette der Dieselerzeugung vom Bohrloch bis zur Zapfsäule allerdings für die Förderung, für den Transport und für die Raffinerie nach den Angaben der Gemeinsamen Forschungsstelle der Europäischen Kommission (2014a) noch 21% hinzu.³ Das impliziert für sich genommen, dass der C 220 d von Mercedes mit 141 Gramm pro Kilometer zu veranschlagen ist.

Zusätzliche Energie für die Innenraumerwärmung wird nicht benötigt, weil sie bereits beim Verbrennungsprozess anfällt.

³ Vgl. WTW, Appendix 1, Tabelle 1. Die EU Kommission berechnet für Diesel einen Well-to-Tank-Ausstoß von 25 Gramm pro Kilometer und einen Tank-to-Wheel-Ausstoß von 120 Gramm pro Kilometer. Das entspricht einem Aufschlag für die Vorkette um 20,83%. Auf die 117 g/m des Mercedes C 220 d aufgeschlagen, entspricht dies einem Gesamtausstoß von 141,37 Gramm pro Kilometer.

3.2 Der batterieelektrische Motor

Nach dem NEFZ-Verfahren der EU verbraucht ein Tesla Model 3 pro 100 km nur eine Energie von 15 kWh an der Ladesäule. Beim Laden, beim Entladen und im Motor sowie in den Aggregaten geht ein knappes Drittel der Energie verloren, bevor sie an den Rädern ankommt. Diese Verluste sind bei dieser Angabe aber bereits berücksichtigt.

Allenfalls ein geringer Schwund an der mit Transformatoren und Gleichrichtern bestückten Ladesäule selbst könnte noch zusätzlich berücksichtigt werden. Er bewegt sich im Bereich weiterer 5% bis 10% im Vergleich zu anderen Arten von Stromverbrauch an der Steckdose. Wir verzichten darauf, das hier in Ansatz zu bringen.

Der mit dem Energieverbrauch verbundene CO₂-Ausstoß hängt entscheidend von der Art der Stromproduktion ab. Bei einer Verwendung von Ökostrom und »Atomstrom« könnte man diesen Ausstoß bei unserer Vergleichsrechnung vernachlässigen, obwohl natürlich bei der Produktion von Wind- und Solaranlagen sowie Kernkraftwerken ein solcher Ausstoß stattfindet und es bei der Produktion von Biotreibstoffen zu einem beträchtlichen Methanausstoß kommt, der in CO₂-Äquivalente umzurechnen wäre.⁴ Von einer vollständig grünen Energieversorgung sind die meisten Stromsysteme aber noch weit entfernt.

Bisweilen wird argumentiert, dass man für den Betrieb der Elektroautos den vorhandenen regenerativ gewonnenen Strom verwenden könne, und insofern sei der CO₂-Ausstoß schon heute null. So darf man aber nicht rechnen, denn dann entziehen diese Autos den Ökostrom den anderen Sektoren der Wirtschaft und erzwingen dort mehr CO₂-Ausstoß, den man ihnen zurechnen müsste. Im Folgenden werden wir einige Überlegungen zu alternativen *marginalen* Energiequellen für die Elektroautos anstellen, und zwar in dem Sinne, dass wir fragen, welche Art von zusätzlicher elektrischer Energie für die neuen Stromverbraucher auf der Straße verwendet werden könnte, und berechnen, wieviel CO₂ pro km dabei jeweils anfällt.

Bei dieser Rechnung können wir uns nicht allein auf den Energieeinsatz für den Betrieb des Motors beschränken, sondern müssen auch berücksichtigen, dass die Batterie bei einem E-Auto ein energieintensiv produziertes Verschleißteil ist, das in gewissen Abständen zu ersetzen ist. In den Akkus stecken unter anderem Lithium, Kobalt und Mangan, die jeweils mit hohem Energieeinsatz gewonnen und verarbeitet werden. Für einen fairen Vergleich muss man deshalb in Rechnung stellen, dass bei der

⁴ Pro Gewichtseinheit absorbiert Methan 72-mal so viel Rückstrahlung von der Erde wie CO₂. Es oxidiert aber allmählich und wird dann zu Wasser und CO₂. Über 100 Jahre gerechnet hat es bei gleichem Gewicht eine 25-mal so starken Klimaeffekt wie das CO₂ selbst (vgl. z.B. Howarth, Santoro und Ingraffea 2011 oder Sinn 2008b, S. 28; 2012, S. 9).

Lithium-Ionen-Batterie für Produktion und Recycling ein erheblicher CO₂-Ausstoß hinzutritt. Wegen der begrenzten Lebensdauer dieser Batterie ist dieser Posten zu den Verbrauchswerten hinzuzurechnen. In einer Metastudie, die eine Vielzahl von anderen wissenschaftlichen Arbeiten zusammenfasst, schätzen Romare und Dahllöf (2017), dass pro kWh Batteriekapazität zwischen 145 kg und 195 kg an CO₂-Äquivalenten ausgestoßen werden. Für eine Tesla-Batterie von 75 kWh bedeutet das einen zusätzlichen CO₂-Ausstoß von 10 875 kg bis 14 625 kg CO₂. Bei einer Haltbarkeit der Batterie von zehn Jahren und einer Fahrstrecke von 15 000 km pro Jahr impliziert diese Angabe, dass für die Produktion und das Recycling der Batterie pro Kilometer Fahrstrecke zwischen 73 Gramm und 98 Gramm an CO₂-Ausstoß anzusetzen sind.

Nun könnte man dagegenhalten, dass die Produktion eines Elektromotors technisch einfacher ist als die Produktion eines Dieselmotors samt Getriebe und deshalb deutlich weniger Energieeinsatz als die Produktion der elektrischen Antriebskomponenten des Elektromotors verlange. Dieser Vorteil bezieht sich allerdings, wenn überhaupt, auf den Aufwand vor Ort und nicht auf den hohen Energieeinsatz bei der Herstellung vieler Zusatzbauteile, die weltweit bezogen werden. Sie könnten den vermeintlichen Vorteil weitgehend kompensieren. Und selbst wenn es nicht so wäre, käme man nur auf geringfügig höhere Werte für den CO₂-Ausstoß von ein paar Gramm pro 100 km.⁵

Man könnte noch berücksichtigen, dass einerseits ein Teil der Bremsenergie zurückgewonnen werden kann und andererseits für das Heizen im Winter Batteriestrom verbraucht wird. Wir gehen darauf nicht ein, weil uns verlässliche Messergebnisse fehlen. Bei einer schonenden Fahrweise und insbesondere auf langen Strecken dürfte sich der Vorteil der Rekuperation in Grenzen halten und den Heizenergiebedarf keinesfalls ausgleichen.

Strom aus Kohle

Elektromotoren, die mit Kohlestrom betrieben werden, verlagern den CO₂-Ausstoß vom Auspuff des Autos zum Schornstein des Kraftwerks. Wird der betrachtete Tesla mit Strom aus Steinkohle betrieben, entsprechen die genannten 15 kWh für eine Fahrstrecke von 100 km gemäß Tabelle 1 einem CO₂-Ausstoß

⁵ Ohne die Einbeziehung der Batterie im Elektroauto liegt der Ausstoß von CO₂-Äquivalenten bei der Herstellung eines großen Pkw sowohl für ein Dieselfahrzeug als auch für ein Elektroauto bei etwa 8 Tonnen. Davon entfallen 4,9 Tonnen auf den Fahrzeugumpf und 1,5 Tonnen auf die Fahrzeugfertigung. Während die Motorherstellung mit 0,8 Tonnen für den Diesel und 0,3 Tonnen für das Elektrofahrzeug zu Buche schlägt, benötigt die Herstellung der Zusatzkomponenten für das Dieselfahrzeug 1 Tonne und für das Elektrofahrzeug 1,5 Tonnen (vgl. Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg 2011, Abb. 5, S. 18, und Abb. 16, S. 30). Selbst wenn der CO₂-Ausstoß bei der Produktion eines Diesel-Pkw um ein Drittel, also 2 Tonnen, über dem eines Elektro-Pkw läge (ohne Batterien), wären dem Diesel bei einer Laufleistung von 300 000 km zusätzlich zum Elektromotor nur ca. 7 Gramm CO₂ pro km hinzuzurechnen.

von 15,9 kg, also 159 Gramm pro Kilometer. Hinzu kommen allerdings noch die erwähnten Zuschläge für den Energieeinsatz bei der Herstellung und beim Recycling der Batterien von 73 Gramm bis 98 Gramm. Dann liegt dieser Motor rechnerisch in einem Bereich von 232 Gramm pro Kilometer bis 257 Gramm pro Kilometer. Das sind 65% bis 82% mehr als beim Dieselmotor.

Noch ungünstiger wird die Rechnung, wenn man unterstellt, dass der Strom aus Braunkohle hergestellt wird. Hier ergibt sich unter Verwendung der Angaben von Tabelle 1 ein CO₂-Ausstoß von 204 Gramm pro Kilometer, bzw. nach den Zuschlägen für die Batterie zwischen 277 Gramm pro Kilometer und 302 Gramm pro Kilometer, was um 96% bzw. 114% mehr als beim Diesel ist. Diese Rechnungen sind natürlich nicht realistisch im Sinne eines durchschnittlichen Strommixes, wie wir ihn weiter unten betrachten. Sie könnten aber bei einer Marginalbetrachtung von Bedeutung sein, wenn es, wie wir weiter unten erläutern werden, nötig sein sollte, temporär mehr Strom aus fossilen Quellen zu erzeugen.

Gasstrom

Viele Politiker gehen davon aus, dass die absehbaren Versorgungsgpässe nach der Abschaltung der Kernkraftwerke durch eine Erhöhung der Stromproduktion der Gaskraftwerke vermieden werden. Auch deshalb verteidigt Deutschland das Nord-Stream-2-Projekt gegen die Widerstände anderer Länder. Mit den genannten 15 kWh für den Tesla bei einer Fahrstrecke von 100 km ist im Falle einer Stromerzeugung aus Erdgas nach den Angaben von Tabelle 1 ein CO₂-Ausstoß von nur 83 Gramm pro Kilometer verbunden. Addiert man die Aufschläge für die Batterie, kommt man auf Werte im Bereich von 156 Gramm bis 181 Gramm. Das sind Werte, die deutlich schlechter als beim Dieselmotor sind, der ja rechnerisch bei 141 Gramm liegt.

Direkter Gasbetrieb eines Verbrennungsmotors

Statt das Erdgas in den Kraftwerken einzusetzen, kann man es auch in komprimierter Form im Auto mitnehmen und direkt in einem konventionellen Verbrennungsmotor (»Benziner«) nutzen. Da bei der Verbrennung von Erdgas um ein Drittel weniger CO₂ ausgestoßen wird als bei der Verbrennung von Dieselöl, dürfte dies im NEFZ-Test auf einen direkten CO₂-Ausstoß einer entsprechend motorisierten C-Klasse von knapp 76 Gramm pro Kilometer (statt der beim Diesel vorliegenden 117 Gramm pro Kilometer) hinauslaufen, jedenfalls dann, wenn der Motor im Hinblick auf seinen Wirkungsgrad optimiert ist. Hinzu kommen aber CO₂-äquivalente Vorketteneffekte beim Erdgas, die aufgrund eines hohen Schwunds an Methan bei Förderung und Transport durch tausende von Kilo-

metern lange Rohrsysteme einen Aufschlag von 30% bedingen.⁶ Man wird dann mit 99 Gramm pro km rechnen müssen.

Der Elektromotor mit dem deutschen Energiemix

Betrachten wir nun den Elektromotor, der mit dem derzeitigen deutschen Energiemix gemäß Abbildung 1 betrieben wird. Nach dem in Tabelle 1 gelisteten durchschnittlichen Emissionsfaktor von 0,55 kg/kWh steht dem Energiebedarf in Höhe von 15 kWh pro 100 km beim deutschen Energiemix ein CO₂-Ausstoß von nur noch 83 Gramm pro Kilometer gegenüber. Rechnet man für die Batterien die erwähnten Zusatzmengen von 73 Gramm bis 98 Gramm hinzu, kommt man auf Werte von 156 Gramm bis 181 Gramm. Damit verursacht dieser Elektromotor im günstigen Fall 11% mehr Emissionen als der betrachtete Dieselmotor (141 Gramm), im ungünstigen Fall liegt der Ausstoß jedoch um mehr als ein Viertel (28%) darüber.

An den Gasmotor, der ja nur einen CO₂-Ausstoß von 99 Gramm pro Kilometer hat, kommt der Elektromotor beim heutigen Energiemix der Bundesrepublik nicht im Entferntesten heran. Selbst im günstigeren Fall des niedrigen CO₂-Ausstoßes bei der Batterieproduktion liegt sein Ausstoß um 58% höher. Trotz des hohen Aufschlags für die Vorkette beim Gas ist somit offenbar der Erdgas-Verbrennungsmotor im Hinblick auf den CO₂-Ausstoß eine konkurrenzlos günstige Antriebsquelle im Verkehr, die alle anderen Alternativen schlägt.

Wenn nun freilich, wie beschlossen, der Atomstrom abgeschaltet wird und zunächst durch Steinkohlestrom ersetzt würde, dann sieht die Rechnung für den Elektromotor noch schlechter aus, weil der Energiemix wieder CO₂-intensiver wird. Durch Hochrechnung der Angaben zum Steinkohlestrom aus der Tabelle im Anhang ergibt sich nun ein Anstieg des Emissionsfaktors auf 0,68 kg/kWh.⁷ Für den Tesla Model 3 bedeutet das unter den getroffenen Annahmen einen Ausstoß von 102 Gramm pro Kilometer ohne die Batterien und im Bereich von 175 Gramm bis 200 Gramm mit den Batterien. Das ist im günstigen Fall knapp ein Viertel und im ungünstigen Fall 42% mehr als beim Dieselmotor des C 220 d nach dem NEF-Zyklus (141 Gramm = 117 Gramm gemäß NEFZ + 24 Gramm für die Vorkette).⁸ Entsprechend läge in diesem Fall der CO₂-Ausstoß des Elek-

tromotors fast schon beim Doppelten des mit Gas betriebenen Verbrennungsmotors (Aufschlag 77% bis 102%).

3.3 Brennstoffzellen oder Batterien?

Brennstoffzellenfahrzeugen (FCV, Fuel Cell Vehicles) wird eine wichtige Rolle für die Zukunft zugeschrieben, weil sie Wasserstoff als emissionsfreien, umweltneutralen Kraftstoff verwenden. Er wird in der Fahrzeugbrennstoffzelle zu Strom verwandelt. Damit zählen FCV zu den vor Ort emissionsfreien Elektrofahrzeugen. Der Wasserstoff kann in Elektrolyseuren aus Wasser hergestellt werden. Die FCV sind deutlich komplizierter als ein batterieelektrisches Auto, bieten aber große Vorteile. Der Wasserstoff selbst ist in der Handhabung vergleichbar mit Erdgas und kann dementsprechend problemlos in großen Kavernen gespeichert werden. Der Betankungsvorgang an einer Wasserstofftankstelle ist ähnlich schnell wie das Betanken mit Benzin und Diesel. Ein voller Fahrzeugtank reicht für ca. 500 km.

Wasserstoff ist ein Energieträger, der erst noch gewonnen werden muss, weil er in der Natur so nicht vorkommt. Er ist grundsätzlich vergleichbar mit einer Batterie, die den aus anderen Quellen eingespeisten Strom speichern kann. Insofern stellt sich auch bei den Wasserstoffautos die Frage nach dem CO₂-Ausstoß. Dafür ist auch hier ein Blick auf den Wirkungsgrad nötig.

Der energetische Wirkungsgrad von der Stromerzeugung (z.B. Windenergieanlage) über die Elektrolyse und die Wasserstoffverteilung bis hin zum Fahrzeug und über die Brennstoffzelle bis zum elektrischen Antriebsmotor ist nur etwa halb so groß wie der eines Akkufahrzeugs. Bei der Elektrolyse von Wasser zu Wasserstoff liegt der energetische Wirkungsgrad bei 70%. Kompression und Transport des Wasserstoffes schlagen mit 80% zu Buche. Die Brennstoffzelle für die Rückumwandlung des Wasserstoffs zu Strom hat einen Wirkungsgrad von bis zu 60%. In der Kette ergibt sich daraus ein Wirkungsgrad von rechnerisch nur noch 34%.

Geht man davon aus, dass ein Elektrofahrzeug von der Leistung des Tesla Model 3 mit Wasserstoff betrieben wird und dass für das Be- und Entladen der Batterie ein Wirkungsgrad von 81% erzielt wird, so entsprechen die 15 kWh an Stromverbrauch für 100 km Fahrstrecke, die beim Tesla nach dem NEFZ-Verfahren gemessen wurden, einem Verbrauch des Tesla-Elektromotors selbst von nur noch 12,2 kWh. Bei dem genannten Gesamtwirkungsgrad der Brennstoffzelle von 34% bedeutet das, dass primär 35,9 kWh Strom benötigt werden. Nach dem deutschen Energiemix des Jahres 2018 gemäß Tabelle 1 entspräche dies einem CO₂-Ausstoß von 197 Gramm pro Kilometer. Wie im Abschnitt 6 gezeigt wird, ergibt sich jedoch ein Vorteil der Wasserstofftechnologie vor allem aus der Verwandlung über-

⁶ Man vergleiche dazu die Angaben zu der Tabelle im Anhang.

⁷ Werden 76,1 TWh Atomstrom durch Kohlestrom ersetzt, steigt der CO₂-Ausstoß um (76,1 TWh/83 TWh) mal 79 Mio. Tonnen = 72,4 Mio. Tonnen. Addiert man diese Zahl zum bisherigen Gesamtausstoß an CO₂ in Höhe von 317,2 Mio. Tonnen gemäß Spalte G der Tabelle im Anhang, ergibt sich ein neuer Gesamtausstoß in Höhe von 389,6 Mio. Tonnen, der nach Division durch den Nettostromverbrauch aus Spalte H zu einem neuen Emissionskoeffizienten von 0,68 kg/kWh in Spalte I führt.

⁸ Dieses Ergebnis bestätigt und verstärkt das Ergebnis einer Studie des Umweltbundesamtes (2016a, S. 20), wo es heißt, dass sich beim heutigen Strommix »noch keine Verbesserung« gegenüber dem konventionellen Diesel ergibt.

schießender Ökostromproduktion in einen speicherbaren Energieträger.

4. ZWEI MÖGLICHE SZENARIEN FÜR DIE ELEKTRIFIZIERUNG DES VERKEHRS

Woher wird der Strom kommen, der die vielen Elektroautos antreiben soll, die durch die CO₂-Richtlinie der EU erzwungen werden, und nach der der Flottenverbrauch auf 59 Gramm pro Kilometer gedrückt werden soll? Die Befürworter der deutschen Energiewende verweisen darauf, dass das selbstverständlich regenerativ gewonnener, also grüner Strom sein sollte. Wann sich dieser Wunsch erfüllen wird, bleibt offen.

Vielmehr steht zu befürchten, dass eine gewaltige Ausweitung der Elektroflotten, die die neuen EU-Regeln erzwingt, vorläufig auch noch auf Kohlestrom angewiesen sein wird – falls es sich dann um intensiv eingesetzte E-Autos und nicht nur um Vorzeigobjekte handelt. Auf welchem Wege die benötigte bedarfsgerechte Steigerung der Stromerzeugung in den kommenden Jahren wird stattfinden können, ist derzeit noch nicht absehbar. Das gilt umso mehr, als allein schon der Grünstromersatz für die verbliebenen Kernkraftwerke, die bis spätestens 2022 abzuschalten sind, eine große Herausforderung bildet. Der Ersatz selbst leistet offensichtlich noch keinen Beitrag zur Senkung der nationalen CO₂-Emissionen.

Von grünen Politikern und von vielen NGOs wird das krachende Scheitern der deutschen Klimapolitik gegeißelt, obwohl es dieselben politischen Kräfte waren, die die Kanzlerin seinerzeit zur Abschaltung der Kernreaktoren drängten. Es sei daran erinnert, dass noch im Jahr 2000 etwa 170 TWh Strom aus den deutschen Kernkraftwerken in das Netz eingespeist wurden. Das war mehr, als alle Wind- und Photovoltaikanlagen im Jahr 2018 zusammen produzierten (160 TWh) (vgl. Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen 2018). Mit dem Atomstrom konnten jährlich über 170 Mio. t CO₂-Emissionen aus konventionellen Kraftwerken vermieden werden. Indem man diese Anlagen sukzessive abschaltete, beschädigte Deutschland nicht nur seine Emissionsbilanz, sondern hat sich auch die gegenwärtigen Probleme beim Kohleausstieg, beim Netzausbau und bei der Netzstabilität eingekauft.

Bis zum Jahr 2018 wurde schon der größte Teil der Kernkraftwerke abgeschaltet. Die restliche Produktion von Nuklearstrom lag in diesem Jahr nur noch bei etwa 76 TWh pro Jahr oder 11,8% der Stromerzeugung. Auch dieser Rest soll bis zum Jahr 2022 verschwinden. Demgegenüber lag der Anteil des Wind- und Sonnenstroms im Jahr 2018 bei 25,2%. Der geplante Ersatz der restlichen Kernkraftwerke durch Wind- und Sonnenstrom verlangt also eine nochmalige Ausweitung der Windkraftwerke und der Photovoltaikanlagen um knapp die Hälfte. Beim Ausbautempo der letzten fünf Jahre (2013 bis 2018), das im Schnitt bei etwa 15 TWh pro Jahr lag, wäre der Ersatz der schon 2022 abzu-

schaltenden Atomkraftwerke mit dem Ablauf des Jahres 2023 zu vermehren. Beim Durchschnittstempo der letzten zehn Jahre (2008–2018, gut 11 TWh) wäre er jedoch erst im Verlauf des Jahres 2025 zu erwarten. Bis mindestens 2023 wird so gesehen zusätzlicher Strom aus emissionsfreien Quellen für die Elektroautos kaum verfügbar sein.

Der Versuch, darüber hinaus auch noch weite Teile des Pkw-Verkehrs überwiegend mit grüner Energie zu betreiben, kann erst in den nachfolgenden Jahren angegangen werden, aber auch dabei wird es die Grünstromproduktion schwer haben, mitzuhalten.

Eine kleine Rechnung verdeutlicht die Größenordnung der Ersatzaufgabe.⁹ Im deutschen Straßenverkehr wurden im Jahr 2016 etwa 50 Mio. Tonnen Kraftstoffe (Benzin und Diesel) eingesetzt. Davon entfielen auf Pkw ca. 34 Mio. Tonnen. Die Gesamtmenge dieser Kraftstoffe entspricht einer CO₂-Emission von 159 Mio. Tonnen CO₂ sowie rund 590 TWh an Wärmeenergie, die bei einem mittleren Wirkungsgrad von einem Drittel am Antriebsstrang der vorhandenen Altflotte (Pkw, Lkw) eine Antriebsarbeit von ca. 200 TWh leistet.

Würde man zukünftig alle bislang mit fossilen Brennstoffen fahrenden Pkw und Lkw auf elektrischen Antrieb umstellen wollen, entstünde ein zusätzlicher Bedarf an elektrischer Bruttoenergie von mindestens 300 TWh pro Jahr, weil für Leitungs- und Ladeverluste etwa ein Drittel der Energie verloren geht. Allein auf die Pkw würden dabei gut 200 TWh entfallen. Nimmt man den durchschnittlichen Zuwachs der Produktion von Wind- und Sonnenstrom der letzten fünf Jahre (2013–2018) als Vergleichsbasis, so würde der Ersatz der Pkw- und Lkw-Flotten weitere 20 Jahre (also bis zum Jahr 2043) und der Ersatz allein der Pkw-Flotte weitere 13 Jahre (also bis 2036) dauern.¹⁰

Allein nur die Hälfte des Straßenverkehrs mit Wind- und Sonnenstrom zu bewegen und die verbleibenden Kernkraftwerke zu ersetzen, würde eine Ausweitung der Wind- und Sonnenstromproduktion, die heute bei etwa 160 TWh liegt (vgl. Tabelle im Anhang), um 226 TWh auf 386 TWh verlangen. Technisch möglich ist das, z.B. durch einen weiteren forcierten Ausbau der Windkraft. Geht man davon aus, dass Windkraftanlagen auch in Zukunft den gleichen Auslastungsgrad (Anteil der rechnerischen Volllaststunden an der Jahresstundenzahl) wie im Jahr 2017 aufweisen, nämlich 22,9%,¹¹ ferner die gleiche Größenstruktur haben wie die in diesem Jahr durchschnittlich vorhandenen 29 605 Windkraftanlagen, dann bräuhete

⁹ Die dazu verwendeten Daten beziehen sich auf das Berichtsjahr 2016 und sind der Statistik des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (2018) und der Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen (2018), Energiebilanz 2016, entnommen.

¹⁰ Bei einer Ausbaugeschwindigkeit wie im Durchschnitt der letzten zehn Jahre würde die Elektrifizierung des gesamten Verkehrs weitere 27 Jahre und des Pkw-Verkehrs fast weitere 18 Jahre, also bis zum Jahr 2043 dauern.

¹¹ Aus der Division der Windstromerzeugung von 105 693 TWh im Jahr 2017 und der durchschnittlich installierten Kapazität in Höhe von 52 730 MW ergeben sich 2004 Volllaststunden. Das entspricht einem Auslastungsgrad von 22,9% oder einer durchschnittlich verfügbaren Leistung von 12,075 MW (vgl. BMWi, 2018, S. 12, S. 14).

man 63 303 weitere solche Anlagen.¹² Bei einer Erhöhung des Anteils der Anlagen im Meer und einer Verwendung größerer Masten und Rotoren könnte man die Zahl der benötigten Anlagen natürlich deutlich verringern. So oder so stehen beachtliche Aufgaben an.

Daraus ergeben sich nach unserer Einschätzung zwei mögliche Szenarien für die Zeit bis 2030. Sie richten sich danach, wie das Instrument des Emissionshandels für Strom in dieser Zeit von der Politik eingesetzt werden wird.

Das eine Szenarium unterstellt eine rigide Politik bei der Vergabe der Lizenzen für den europäischen Emissionshandel. Der avisierte Zeitpfad für die jeweils zulässige Menge an Emissionsrechten ist in Stein gemeißelt und unabhängig von der zusätzlichen Stromnachfrage, die aufgrund der Elektrifizierung des Verkehrs nun politisch erzwungen wird. In diesem Fall kann Kohlenstoff prima facie nicht der marginale Brennstoff für die neuen Elektroautos sein, und in der Tat könnte man dann geneigt sein, die neuen elektrisch betriebenen Autos, seien es Autos, die aus Batterien oder Wasserstofftanks versorgt werden, mit einem CO₂-Ausstoß von null anzusetzen.

Diese Logik gilt dann aber für jeden Stromverbraucher, den man eigentlich vermeiden möchte. Dann kann man auch die verpönte Elektroheizung und die alten Glühbirnen wieder guten Gewissens installieren und sein Haus mit überdimensionierten Staubsaugern reinigen, weil damit ja ohnehin kein zusätzlicher Verbrauch von fossilen Brennstoffen verbunden sein kann.

Es ist im Übrigen zu bedenken, dass der sehr hohe CO₂-Ausstoß bei der Batteriefertigung durch den Emissionshandel nicht erfasst wird. Trotz anders lautender Bestrebungen des Wirtschaftsministeriums wird die Zellfertigung und insbesondere der Energieeinsatz bei der Gewinnung der entsprechenden Materialien bis 2030 wohl größtenteils im nicht europäischen Ausland stattfinden.

Das ist insbesondere auch deshalb zu erwarten, weil es bei diesem Szenarium voraussichtlich zu einem erheblichen Anstieg der CO₂-Preise beim Emissionshandel und damit auch der Strompreise kommen würde, denn die aufgrund der Elektroautos rapide wachsende Stromnachfrage würde auf ein wegen des Atomausstiegs vermindertes Stromangebot stoßen.

Im zweiten Szenarium ist der Zeitpfad der vergebenen Emissionszertifikate nicht rigide, sondern reagiert auf die beschriebenen Schwierigkeiten beim Versuch, den Verkehr weitgehend zu elektrifizieren. Die starken Preissteigerungen der Emissionszertifi-

kate und des Strompreises, die dieser Versuch auslösen wird, würde nun die Politik veranlassen, den ursprünglich beschlossenen Zeitpfad bei der Drosselung der Zertifikatmengen zu verlassen und die Zügel lockerer zu lassen, um den Widerstand der Bevölkerung in Grenzen zu halten. Allein schon die riesige Stabilitätsreserve, die beim Emissionshandel besteht und die zur Preisdämpfung verfügbar ist, gewährt systemimmanent erhebliche Spielräume für eine Lockerung der Einsparvorgaben.

In diesem Fall könnte der forcierte Ausbau der E-Mobilität im Verein mit der Abschaltung der Kernkraftwerke bedeuten, dass die marginale Stromquelle für die vielen neuen Elektroautos zumindest zeitweilig nicht etwa grüner Strom, sondern Kohlestrom ist. Dann würde, wie wir gezeigt haben, der Wechsel vom Dieselmotor zum Elektromotor je nach Art der Batterieproduktion eine Erhöhung des CO₂-Ausstoßes um zwei Drittel, wenn nicht gar auf mehr als das Doppelte bedeuten.

Als Nebenbemerkung sei noch angefügt, dass die Verschiebung des CO₂-Ausstoßes vom Auspuff des Autos zum Schlot des Kraftwerks auch eine dramatische Verschiebung des CO₂-Ausstoßes zwischen den Ressorts der Bundesregierung impliziert. Bundesumweltministerin Svenja Schulze will ja allen Ressorts zwingend für die von ihnen vertretenen Wirtschaftsbereiche gesonderte CO₂-Reduktionsziele vorschreiben (vgl. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit 2019). Uns ist nicht bekannt, ob sie dabei die automatische Entlastung des Verkehrsressorts und die entsprechende Mehrbelastung des Wirtschaftsressorts, das ja für die Kraftwerke zuständig ist, überhaupt im Auge hat. Die Vorgabe separater Sektorziele ist aus ökonomischer Sicht in jedem Fall abzulehnen, weil damit in aller Regel viel zu hohe Gesamtkosten bei der wünschenswerten Verlangsamung des Klimawandels verbunden sind.

5. DAS PROBLEM DER VOLATILITÄT UND DIE NOTWENDIGKEIT VON PARALLELSTRUKTUREN

So wichtig das Thema der Synchronität beim Ausbau der E-Autoflotte und der Erhöhung der Produktion von grünem Strom ist: Das Hauptproblem des grünen Stroms ist seine enorme Volatilität, also die Schwankung der Produktion im Zeitablauf. Die Volatilität ist nicht nur im Tag-Nacht-Wechsel oder im Wochenrhythmus begründet. Wäre es so, könnte man sie leicht durch eine Anpassung der Verbrauchsgewohnheiten oder Kurzfristspeicher puffern. Tatsächlich geht es dabei vor allem um den Wechsel der Jahreszeiten. Dieser Wechsel betrifft den Wind- und den Sonnenstrom gleichermaßen, weil Wind aus Sonnenenergie entsteht. Der Wind ist reichlich in der Zeit nach Weihnachten bis zum Frühjahr vorhanden, und wenn er dann ab März nachlässt, kommt zum Glück die Sonne. Im Herbst jedoch, vom September bis Weihnachten, dreht sich der Spieß um, und bei nachlas-

¹² Im Jahr 2017 lag die jahresdurchschnittliche Kapazität der 29 605 jahresdurchschnittlich installierten Windkraftanlagen bei 1,78 MW pro Anlage. (vgl. Fraunhofer IEE 2019; Bundesministerium für Wirtschaft und Energie 2018, S. 14, jahresdurchschnittliche Leistung 52,730 MW dividiert durch 29 605 Anlagen). Diese Windkraftanlagen erzeugten, wie schon in der vorigen Fußnote erwähnt, 105 693 TWh an Strom. Die Ausweitung der Produktion um 226 TWh würde also bei einer unveränderten Größenstruktur um weitere 63 303 Anlagen verlangen.

sender Stärke von Sonne und Wind entsteht ein hohes Energiedefizit, das anderweitig gedeckt werden muss (vgl. Sinn 2017, Abb. 3). Es kommt hinzu, dass es beim Windstrom das ganze Jahr über immer mal wieder Flaute von einigen Tagen und Wochen gibt, und manchmal ist dann auch noch der Himmel bedeckt. Das sind die viel zitierten Dunkelflaute. Während der temporären Dunkelflaute und der saisonalen Flaute muss die Stromversorgung mittels konventioneller Anlagen aufrechterhalten werden.

Nach einer in der Öffentlichkeit weit verbreiteten Meinung sind Wind- und Sonnenstromanlagen Substitute konventioneller Anlagen, die den Abbau von konventionellen Kraftwerken in dem Maße erlauben, wie Wind- und Solaranlagen verfügbar werden. Davon kann aber nicht im Entferntesten die Rede sein. Wind- und Solaranlagen benötigen ganz im Gegenteil die konventionellen Anlagen als Komplemente, die immer bereitstehen müssen, um die Stromversorgung während der Flaute zu decken. Man kann, wenn man Wind- und Sonnenstrom einspeist, zwar Kohle sparen, jedoch nicht die Kohlekraftwerke – ein Aspekt, der der Kohlekommission entgangen zu sein scheint, die kürzlich ein Gutachten vorlegte, in dem sie den Abbau der Kohlekraftwerke bis zum Jahr 2038 empfahl. Außer ein paar beschwichtigenden Worten zur Sicherstellung von Reservekraftwerken findet man in dem langen Gutachten zu dieser Frage wenig bis nichts, das zum Kern des Problems vordringt (vgl. Kohlekommission 2019). Tatsächlich ist es ohne die Kohlekraftwerke – oder ersatzweise Gaskraftwerke – kaum möglich, den Wind- und Sonnenstrom ins Netz einzuspeisen und gleichzeitig die Versorgungssicherheit zu gewährleisten. Die konventionellen Anlagen müssen gedrosselt werden, wenn der Wind- und Solarstrom eingespeist wird, dann aber wieder hochgefahren werden, wenn dieser Strom versiegt. Die deutschen Pumpspeicherwerke leisten in dem Zusammenhang wegen ihrer geringen Größe einen vernachlässigbaren Stabilisierungsbeitrag.

Die Pufferung des grünen Stroms geschieht in Deutschland praktisch ausschließlich durch Parallelstrukturen. Die alten Anlagen bleiben bei stetig verringertem Auslastungsgrad erhalten, und immer mehr grüne Anlagen treten additiv hinzu. Das spart zwar Brennstoffe und reduziert den CO₂-Ausstoß, doch impliziert es doppelte Fixkosten, die von den Verbrauchern (oder den Steuerzahlern) zu tragen sind. Kein Wunder, dass Deutschland schon heute die höchsten Haushaltsstrompreise aller europäischen Länder hat und Dänemark, das auch sehr stark auf Windstrom setzt und lange Zeit die Spitzenposition innehatte, inzwischen überholt hat (vgl. Kohlekommission 2019, S. 31, Abb. 11).

Wir vermuten, dass der Ersatz der Kohle durch Windenergie schneller an Grenzen stoßen wird, als es die heute regierenden Politiker und für die öffentliche Meinung maßgeblichen Stimmen in der Presse wahrhaben wollen. Zum einen folgt aus der Puffer-

ung durch Parallelstrukturen, dass eine Ausweitung der Produktion von Strom aus Wind- und Sonnenkraft zum Zweck der Abdeckung des Verkehrs parallel auch zu einer Erhöhung der Zahl der konventionellen Kraftwerke mit fossilen Brennstoffen führen muss, um die Flaute bei einem höheren Stromverbrauch zu überbrücken. Deshalb werden traditionelle Kraftwerke ungeachtet der Ausstiegswünsche der Kohlekommission aus technischen Gründen noch sehr lange benötigt werden und müssen sogar neu errichtet werden.

Das müssen keine Kohlekraftwerke sein. Natürlich können auch Gaskraftwerke an ihre Stelle treten. Nur bedeutet der Ersatz der Kohlekraftwerke durch Gaskraftwerke neue Baukosten und höhere variable Kosten der Stromproduktion. Deutschlands Energiewende impliziert dann dreifache Fixkosten für die Anlagen: Erstens die verlorenen Kosten der alten Kohlekraftwerke, die abgeschaltet werden, obwohl sie noch funktionstüchtig sind, zweitens die Kosten der Wind- und Solaranlagen, die nur produzieren, wenn der Wind weht und die Sonne scheint, und drittens die Kosten der neuen Gaskraftwerke, die die Kohlekraftwerke in ihrer Funktion als Komplemente der Wind- und Solaranlagen im Sinne von Lückenbüßern zur Abdeckung der Dunkelflaute ersetzen. Teurer kann man elektrische Energie kaum produzieren.

Ob aber neue Gaskraftwerke tatsächlich im benötigten Umfang gebaut werden, steht in den Sternen. Nachdem Frankreich Deutschland trotz des erneuerten Freundschaftsvertrages den Beistand verweigert hat und erreichen konnte, dass auch solche Pipelines, die keine Grenzen zwischen EU-Ländern kreuzen, von nun an unter der Kontrolle des EU-Parlaments stehen, wo die Gegner einer Ostsee-Pipeline die Mehrheit haben, ist der großflächige Ausbau der Gaskraftwerke inzwischen mit einem weiteren Fragezeichen versehen worden.

Zumindest ist zu befürchten, dass der Gasstrom durch die französische Kehrtwende viel teurer wird, denn die Folge dieser Kehrtwende ist, dass die Netz- und Betreibergesellschaften getrennt werden, was aufgrund der linearen Verkettung zweier Monopolisten einen höheren Gaspreis impliziert (*double marginalisation*). »Was ist schlimmer als ein Monopol?« fragte einmal der französische Ökonomenobelpreisträger Jean Tirole (1988, S. 175). Seine Antwort, die er auch sogleich bewies, lautete: »Eine Kette von Monopolen.«

Der Protest der Bevölkerung gegenüber einer weiteren »Verspargelung« der Landschaft (siehe Vernunftkraft e.V.), die wachsenden Strompreise und der Widerstand der in der Automobilindustrie beschäftigten Menschen werden ein Übriges tun, um den Doppelausstieg aus Kohle und Kernkraft zu verschieben. Erste »Gilet-jaune«-Proteste haben bereits in Stuttgart stattgefunden und die Politiker beim Thema Feinstaub zum Umdenken veranlasst. Wenn es ums Geld geht, ist die Leidensbereitschaft der Bevölkerung bei der Energiewende begrenzt. Neue Generationen

von Politikern und Wählern werden neu optimieren und sich nicht durch die Beschlüsse der heute regierenden Kräfte gebunden fühlen. Schweden, das nach dem Unglück des Kernkraftwerks Three Mile Island in der Nähe von Harrisburg im Jahr 1979 das erste Land war, das aus der Kernkraft aussteigen wollte, hat ja inzwischen eine Kehrtwende um 180 Grad gemacht, indem schon im Jahr 2016 ein parteiübergreifender Kompromiss gefunden wurde, nach dem man alle zehn Kernkraftwerke erhalten, bei Bedarf reparieren und notfalls sogar durch neue ersetzen möchte.

6. ÜBERSCHIESSENDE STROMSPITZEN UND DIE ROLLE DES WASSERSTOFFS

Neben den unvermeidlichen Parallelstrukturen zur Kompensation der Flauten werden inzwischen auch die Spitzen des regenerativ gewonnenen Stroms zu einem Problem, denn das Pufferpotenzial der konventionellen Anlagen stößt an seine Grenze, wenn die grünen Stromspitzen den Bedarf übersteigen. Die überschießenden Spitzen kann man prinzipiell nicht mehr durch Abschaltung konventioneller Anlagen abfedern, denn man kann Kohlekraftwerke nicht im negativen Betrieb laufen lassen und sie veranlassen, aus Strom wieder Kohle zu erzeugen. Tatsächlich liegt der kritische Marktanteil, bei dem die grünen Stromspitzen den Bedarf zu überschreiten beginnen, bereits bei etwa 30% (vgl. Sinn 2017, Abb. 8). Mit seinem tatsächlichen Marktanteil von 25,2% befindet sich der deutsche Wind- und Sonnenstrom noch unter diesem Wert, doch ist absehbar, dass hier ein größeres Problem entstehen wird.

Die überschießenden Spitzen verkörpern anfänglich nur wenig Energie, doch wächst ihr Energieanteil bei wachsenden Marktanteilen des Wind- und Sonnenstroms immer weiter an. Insofern stellt sich die Frage, was man mit den überschießenden grünen Stromspitzen tun sollte.

Eine Möglichkeit ist, die Überschussenergie zumindest teilweise nicht zu nutzen, indem man die Solarmodule und Windflügel abschaltet oder den Strom inferiorer Verwendungen zuführt und praktisch verklappt. Bei dieser Strategie wächst jedoch der ungenutzte Stromanteil bei wachsendem Marktanteil des nutzbaren Wind- und Sonnenstroms progressiv an und strebt gegen 100%, wenn der Marktanteil ebenfalls gegen 100% geht (vgl. Sinn 2017). Schon früh auf diesem Wege würde sich in der Bevölkerung die Frage stellen, warum man die vielen Windanlagen bauen muss, wenn man den Strom bei starkem Wind zunehmend abschalten muss, weil man nicht weiß wohin damit.

Eine weitere Möglichkeit besteht darin, die überschießende Energie in Pumpspeicherwerken zu lagern, bis wieder weniger Wind weht und die Sonne schwächer scheint, so dass man die Energie wieder einspeisen kann. Der dafür benötigte Speicherbedarf ist riesig, weil man die Energie nicht etwa nur tage-

weise, sondern zwischen den Jahreszeiten, also über viele Monate verschieben muss.

Einen gewissen Ausgleich könnte ein europäischer Stromverbund schaffen, der die Stochastik teilweise ausgleichen kann und Länder einschließt, die aus geologischen Gründen über bessere Möglichkeiten für Pumpspeicher verfügen als Deutschland. Aber selbst wenn man einen perfekten Stromverbund von den Alpenländern über Dänemark bis nach Norwegen herstellen und in den beteiligten Ländern alle Pumpspeicherwerke bauen würde, die nach dem großen EU-eStorage-Projekt geologisch möglich sind, so käme man ohne eine Verklappung wenigstens eines Teils der überschießenden Stromspitzen nicht über einen Marktanteil des Wind- und Sonnenstroms von 50% hinaus.¹³ Man kann also die überschießenden Spitzen nicht allesamt in Pumpspeicherwerken speichern, sondern muss zunehmend größere Anteile von ihnen abregeln, wenn man über einen Marktanteil von 50% hinausgehen will.

Eine dritte Möglichkeit bestünde darin, die überschüssige Energie direkt in den Fahrzeugbatterien zu speichern. So wird ja gelegentlich argumentiert (vgl. Lund und Kempton 2008). Das Argument zieht aber nicht. Natürlich könnten viele E-Autobesitzer ihre Pkw tagsüber mit (möglichst sogar selbst produziertem) Solarstrom aufladen, falls die Fahrzeuge während dieser Zeit an einer Ladestation stehen und nicht gefahren werden. Allerdings ergibt sich dadurch noch keine nennenswerte »Netzdienlichkeit« für saisonale Speicherperioden. Wegen ihrer begrenzten Kapazität speichern Autoakkus bekanntlich nur genug Energie für geringe Reichweiten. Bei Langstrecken wird nicht einmal der Tagesbedarf gedeckt. Auch bei kürzeren Strecken gilt allnächtliches Nachladen der E-Autos als unverzichtbar für eine akzeptable Verfügbarkeit der Fahrzeuge.

Die Akkus der E-Autos stehen definitiv nicht als externe Stromspeicher von Belang zur Verfügung, wenn eine Speicherung über Monate hinweg erforderlich ist. Man müsste beim heutigen Grünstrommix bezüglich Solar- und Windenergie den Strom für die winterlichen Dunkelflauten im Dezember schon in den noch hellen und windreichen Spätsommermonaten tanken. Und wollte man sich gar auf den Windstrom allein konzentrieren, müsste man den Strom vom windreichen März bis in die Vorweihnachtszeit in Batterien speichern, was natürlich eine völlig irrealer Vorstellung ist (vgl. Sinn 2017, Abb. 3). Aus Sicht der Stromversorger und Netzbetreiber sind E-Autos deshalb auch nur neue Kunden und Verbraucher, die zusätzlich täglich ausreichend mit elektrischer Energie versorgt werden müssen, nicht aber Lieferanten einer saisonalen Speicherleistung. Allenfalls für einen Ausgleich innerhalb eines Tages stehen diese

¹³ Vgl. Sinn (2017, Abschnitt 8, insb. auch Tab. 2). Zerrahn, Schill und Kemfert (2018), die freilich keinen Stromverbund modellieren, schlagen eine nur partielle Speicherung der überschießenden Stromspitzen vor, um die Speicherkosten im Griff zu behalten. Die nicht verwertbaren Teile der Stromspitzen wollen sie abregeln.

Speicher zur Verfügung, aber das ist nicht das Problem.¹⁴

Eine vierte Möglichkeit würde darin bestehen, den überschießenden Strom chemisch zu speichern, indem man mittels Elektrolyse Wasserstoff herstellt, lagert und später für die Stromerzeugung in Kraftwerken oder besser noch direkt im Auto einsetzt. Die dafür nötigen Speichervolumina wären relativ leicht beherrschbar, weil Wasserstoff eine hohe Energiedichte hat. Als Langzeitspeicher eignen sich z.B. Salzkavernen, doch existiert eine Vielzahl anderer technischer Möglichkeiten, die von Metall-Hybrid-Speichern über Druckspeicher bis hin zur Speicherung von Ölen reicht, an die der Wasserstoff angelagert wird und die eine Behandlung ähnlich wie bei fossilen Treibstoffen ermöglichen (vgl. Klell, Eichlender und Trattner 2018). Die Forschung zu Autos, die mit Brennstoffzellen fahren, ist international und auch in Deutschland bereits weit gediehen und kann überzeugende Lösungen anbieten. Es gibt bereits drei Serien-Pkw ausländischer Hersteller am Markt, die mit Brennstoffzellen arbeiten: Toyota Mirai, Hyundai Nexo und Honda Clarity. Daimler, VW und BMW haben zumindest Versuchsfahrzeuge produziert.

Wie die batterieelektrischen Autos leiden auch Wasserstoffautos unter dem Problem, dass der deutsche Energiemix vorläufig noch mit sehr viel CO₂-Ausstoß verbunden ist. Wie wir gezeigt haben, ist der CO₂-Ausstoß bei gegebenem Anteil fossiler Brennstoffe sogar noch deutlich höher als bei den Batterieautos, selbst wenn man den CO₂-Ausstoß bei Herstellung und Recycling der Batterien mitberücksichtigt. Das Problem dieses Weges ist nämlich, dass bei der chemischen Speicherung hochwertige Bewegungs- bzw. elektrische Energie in niederwertige chemische bzw. thermische Energie umgewandelt werden muss, die eine andere Entropiestufe bedeutet. Der Weg zurück auf die Stufe der Bewegungs- und Elektroenergie bedeutet einen erheblichen Verlust des Wirkungsgrads, der ingenieurtechnisch nicht vermieden werden kann und deswegen, aber auch wegen der komplexen technischen Anlagen, die benötigt werden, recht hohe Umwandlungskosten impliziert.

Der unschätzbare Vorteil gegenüber den Batterien liegt aber in der unkomplizierten und preisgünstigen Speicherung der Energie über längere Zeiträume, zu dem sich die Möglichkeit einer raschen Betankung der Autos und hoher Reichweiten hinzugesellt. Der Wasserstoff, und nur er, ist die ideale Ergänzung des Wind- und Sonnenstroms, wenn dieser Strom einen Marktanteil von deutlich über 30% erreicht hat und dann zu energiehaltigen, auch saisonalen Stromspitzen führt, die sich sonst nicht verwerten ließen.

Die Methanisierung des Wasserstoffs schließen wir in diese Bewertung ein. Dem weiteren Verlust an Wirkungsgrad steht dort der Vorteil in Form einer noch leichteren Speicherung und eines einfachen Transports im vorhandenen Erdgassystem gegenüber.

Methan hat, wie wir gezeigt haben, selbst dann, wenn es fossilen Ursprungs ist und in Verbrennungsmotoren verwertet wird, einen vorläufig unschlagbar geringen CO₂-Ausstoß, der beim heutigen Energiemix um ein gutes Drittel bis etwa der Hälfte niedriger als beim Elektromotor ist und um ein knappes Drittel unter dem Dieselmotor liegt. Insofern böte es sich an, derweil schon einmal auf gasbetriebene Verbrennungsmotoren zu setzen und im Zuge des weiteren Ausbaus der Grünstromproduktion dann allmählich das fossile Gas durch regeneratives Gas zu ersetzen.

7. SCHLUSSBEMERKUNGEN

Es folgt aus unseren Vergleichsrechnungen für den neuen Tesla Model 3 und den Mercedes C 220 d, dass auch moderne Elektroautos in den nächsten Jahren schwerlich in der Lage sein werden, einen Beitrag zur Minderung der deutschen CO₂-Emissionen zu leisten. Für dieses strategische Ziel im Sinne der deutschen Klimaschutzbemühungen sind die Elektroautos aufgrund unserer Netzsituation leider noch verfrüht. Es kann nicht die Rede davon sein, dass die Einführung der Elektroautos bereits für sich genommen zu einer Reduktion des CO₂-Ausstoßes im Verkehr führen wird, wie es die EU-Richtlinie für die Berechnung des Flottenverbrauchs nahelegt, die ja die Elektroautos mit einem CO₂-Ausstoß von null annimmt. Das Gegenteil ist der Fall. Der CO₂-Ausstoß der batterieelektrischen Autos liegt beim heutigen Energiemix Deutschlands und unter Berücksichtigung des Energieaufwands bei der Batterieproduktion nur im günstigsten Fall auf einem mit dem Dieselmotor vergleichbaren Wert.

Modifikationen dieser Aussage ergeben sich nur, wenn es gelingen sollte, die Elektroautos zu einem größeren Anteil mit emissionsarmer Energie zu betreiben, als es dem heutigen Durchschnitt entspricht. Geht man von einer rigiden Handhabung des Emissionshandels aus, dann mag das so sein. Dann werden die elektrischen Autos aber dazu führen, dass andere Stromverbraucher über drastische Preissteigerungen bei den Emissionszertifikaten und beim Strom aus dem Markt verdrängt werden. Der Rückzug energieintensiv produzierender Industrien wird nicht zu vermeiden sein. Widerstände der Verbraucher und/oder Steuerzahler sind vorprogrammiert. Da Deutschland schon heute die höchsten Stromkosten in Europa hat, halten wir den Fall der rigiden Handhabung des Emissionshandels nicht für sonderlich plausibel, zumal ja auch noch die Kernkraftwerke abgeschaltet werden sollen. Vermutlich wird man den Emissionshandel flexibler handhaben und den konventionellen, aus fossilen Quellen fließenden Strom in einer Übergangszeit stärker einsetzen, als

¹⁴ Leopoldina, Acatech und Union der deutschen Akademien der Wissenschaften (2017, S. 48): „Es ist .. völlig unrealistisch, und selbst bei stark sinkenden Kosten für Batteriespeicher nicht bezahlbar, so große Mengen Kurzzeitspeicher zu installieren, dass auch längere Phasen einer hohen Stromproduktion aus Sonne und Wind gespeichert werden können.“

ursprünglich geplant war. Dann könnten die Elektroautos zeitweilig versteckte Kohle- oder Erdgasautos werden. Der CO₂-Ausstoß an den Schloten der Kraftwerke, den auch die Elektroautos bedingen, taucht in der EU-Formel für den Flottenverbrauch der Hersteller nicht auf, denn dort wird der CO₂-Ausstoß der Elektroautos mit null angesetzt, so als käme speziell dieser Strom stets aus grünen Quellen. Diese Formel führt die Bevölkerung in die Irre, auch wenn ihre Urheber vermutlich keine Illusionen bezüglich des CO₂-Ausstoßes bei der Stromproduktion hatten.

Eine Public-Choice-Analyse des Geschehens lässt nach unserer Ansicht nur den Schluss zu, dass hinter den Beschlüssen der EU auch industriepolitische Absichten stehen. Die Entrüstung der Öffentlichkeit über die Manipulationen der Automobilindustrie bot die historische Gelegenheit, bei der Manipulation der Formel für die Flottenverbrauchswerte so kräftig zuzulangen, dass sich die Wettbewerbspositionen der europäischen Automobilhersteller mit einem Schlage dramatisch verändert haben. Die bei der Herstellung von Verbrennungsmotoren für Pkw führenden deutschen Hersteller müssen jetzt auf Elektromobilität umrüsten und sich wieder hinten anstellen.

Die Verzerrungen könnten mit nationalen Unterschieden bei der Stromproduktion zu tun haben. In Norwegen wird Strom wegen der vielen Talsperren praktisch CO₂-frei produziert. In Frankreich liegt nach den Angaben der Europäischen Umweltagentur (2019) wegen des Atomstroms die Intensität des CO₂-Ausstoßes unter 100 g/kWh, in Deutschland (siehe auch Anhang) bei ca. 500 g/kWh und in Polen bei ca. 700 g/kWh. Frankreich hat sich deshalb auf die Produktion von Elektroautos spezialisiert und sich in Brüssel mit den Grünen verbündet und darum gerungen, dass die Standards enorm anspruchsvoll gesetzt wurden. Dabei wird nun freilich der deutschen Automobilindustrie mit ihren eher großvolumigen Fahrzeugen die Luft abgeschnürt.

Die deutsche Diskussion um die Elektroautos konzentriert sich auf batteriebetriebene Fahrzeuge. Am Markt spielen indes auch die Plug-in-Hybride eine zunehmend wichtigere Rolle. Sie werden an der Steckdose geladen und können zumindest eine kurze Fahrstrecke, oft nur sehr wenige Kilometer, rein elektrisch zurücklegen. Sie sind außerdem in der Lage, genau wie die batterieelektrischen Fahrzeuge die Bremsenergie bei angemessenem Betrieb zurückzugewinnen (rekuperieren). Es ist praktisch unmöglich, für diese Fahrzeuge eine allgemein gültige, realistische CO₂-Emissionsbilanz anzugeben. Wer einen Plug-in-Hybrid benutzt, um die wenigen Kilometer in der Innenstadt emissionsfrei fahren zu dürfen und ansonsten überwiegend im Fernverkehr unterwegs ist, wird damit vermutlich höhere Emissionen erzeugen als mit einem sparsamen Diesel, weil er ständig das Gewicht der E-Maschine und den größeren Akku mit sich herumschleppt, während der Verbrennungs-

motor meistens in Betrieb ist. Plug-in-Hybride gelten deshalb nur als eine populäre Brückentechnologie hin zur E-Mobilität. Primär vermeiden sie bei Fernfahrten die Ängste vor der begrenzten Reichweite der batteriebetriebenen Elektroautos, bieten aber keine nennenswerten CO₂-Einsparungen.

Eine andere Alternative zu den batterieelektrisch betriebenen Elektroautos bieten mit Wasserstoff oder Methan betriebene Autos, die Elektro- oder Verbrennungsmotoren haben. In solchen Autos sehen wir die wirkliche Zukunft, wenn man die durch politische Dekrete verfügte Verdrängung der fossilen Brennstoffe als gegeben annimmt. Wie wir gezeigt haben, führen wasserstoff- oder methanbetriebene Elektroautos beim heutigen Energiemix zwar noch zu einem etwas höheren CO₂-Ausstoß als die batterieelektrisch betriebenen Autos, doch wird dieser Nachteil in einen Vorteil umschlagen, wenn sich der deutsche Strommix deutlich in Richtung grüner Energie verbessert, weil dann der niedrigere energetische Wirkungsgrad immer weniger ins Gewicht fällt. Mit fossilem Methan betriebene Verbrennungsmotoren haben schon heute einen sehr niedrigen Ausstoß an CO₂. Sie sind eine ideale Brückentechnologie für Autos, die später einmal mit »grünem« Methan fahren können. Der große Vorteil des Wasserstoffs und des daraus gewonnenen Methans liegt in der Möglichkeit, die überschießenden Stromspitzen über Monate hinweg aufzubewahren, die bei wachsenden Marktanteilen des Wind- und Sonnenstroms im Bereich über 30% immer mehr ins Gewicht fallen werden, sowie in der Möglichkeit der raschen Betankung der Fahrzeuge. Die Vorstellung, die notwendige Speicherung des Wind- und Sonnenstroms mit Batterien leisten zu wollen, ist utopisch, wie auch die Leopoldina, Acatech und die Union der Akademien der Wissenschaften betont haben. Darauf haben wir hingewiesen. Insofern kann man der Bundesregierung nur raten, im Sinn einer Technologieoffenheit auch die Wasserstoff- und Methantechnologie zu fördern.

Methan lässt sich auch heute schon mit wenig Aufwand in leicht modifizierten Benzinmotoren einsetzen. Solche Motoren, für die die Infrastruktur in Form von Gasleitungen und -speichern bereits weitgehend existiert, einzusetzen und weiter zu entwickeln bietet sich aus zweierlei Gründen an. Zum einen bedeuten sie beim heutigen Energiemix aus dem Stand heraus eine Einsparung von CO₂ gegenüber batterieelektrischen Motoren von etwa einem Drittel. Zum anderen sind sie in längerfristiger Hinsicht ideale Komplemente für den Wind- und Sonnenstrom, weil bei einem Marktanteil, der deutlich über 30% hinauswächst, progressiv wachsende Anteile der überschießenden Stromspitzen weggespeichert werden müssen, wenn man sie nicht verklappen will. Nur das Methan oder der Wasserstoff, aus dem künstliches Methan gewonnen wird, bietet dafür hinreichend große Speicherkapazitäten.

POST SCRIPTUM

Wir wollen unsere Untersuchung nicht ohne ein wichtiges Post Scriptum zur Sinnhaftigkeit der gesamten Energiewende beenden, derer sich der Leser stets bewusst bleiben möge, auch wenn unser Aufsatz einen etwas engeren Fokus hat.

Ob sich all die europäischen Anstrengungen überhaupt für das Klima auszahlen werden, steht nämlich insofern in den Sternen, als nicht auszuschließen ist, dass das in Europa nicht mehr verbrannte Öl in andere Länder fließt und dort verbrannt wird. Das Pariser Klimaabkommen (2015) sieht für die CO₂-Reduktion nur ein System von Selbstverpflichtungen ohne Sanktionen vor, und die USA haben bereits angekündigt, dass sie aus dem Abkommen wieder aussteigen werden. Daraus erwächst die Gefahr, dass auch andere Länder den USA folgen werden. Das könnte für Europa nicht nur den Nachteil bringen, dass es mit seinen Anstrengungen allein bleibt, sondern dass diese Anstrengungen im Hinblick auf das Klimaziel vollständig konterkariert werden. Wenn man nämlich die Erdölbesitzer nicht überzeugen kann, das Öl, das die Europäer nicht mehr verbrauchen, im Boden zu lassen, werden die Tanker einfach nur anderswo anlanden und ihr Öl dort verkaufen. Es wird dann zu einer Senkung der Weltmarktpreise kommen, durch die der Verbrauch in jenen Ländern subventioniert und stimuliert wird, die sich nicht an den Sparanstrengungen beteiligen. Insofern kommt es möglicherweise nicht nur zu einer geringen, sondern zu keiner Reduktion des CO₂-Ausstoßes, weil andere Länder so viel mehr CO₂ ausstoßen, wie Europa einspart. Man könnte einwenden, dass die Ölscheichs aufgrund niedrigerer Weltmarktpreise nun weniger produzieren und somit einen doppelten Einnahmeausfall akzeptieren werden. Das ist angesichts der geringen Bedeutung der Förderkosten für die Höhe der Ölpreise nicht sonderlich wahrscheinlich. Eher ist zu erwarten, dass sie für einige Zeit mehr produzieren werden, weil sie die niedrigeren Preise durch eine Mengenausweitung wettmachen oder ihre Ressourcen vorzeitig verkaufen, bevor die grüne Politik ihnen die Absatzchancen total verdirbt (vgl. Sinn 2008a; 2008b; 2012). Dann haben die Länder, die beim Energiesparen nicht mitmachen, den doppelten Vorteil, dass ihnen das Öl verbilligt zur Verfügung steht, das die Europäer freigeben, und zusätzlich noch jenes Öl, das die Ölförderländer zusätzlich auf den Markt werfen.

Uns ist bewusst, dass sich Deutschland trotz dieser Zusammenhänge international verpflichtet hat, seinen CO₂-Ausstoß zu verringern, weil es der Welt etwas Gutes tun will. Es wäre uns aber wohler, wenn der Bevölkerung klar wäre, dass diese Wohltaten womöglich nicht in Form einer Verlangsamung des Klimawandels, sondern als Verringerung der Kosten der fossilen Energie für die Großverbraucher der Welt zustande kommen, dass also unsere Opfer mögli-

cherweise ganz anderen Bevölkerungsschichten helfen als jenen, die unter dem Klimawandel zu leiden haben. Da sich Europa auf die Produktion von Kleinwagen verlegt, können in den USA noch mehr Riesen-SUVs gefahren werden als ohnehin schon.

Leider kann man diese Gefahr so lange nicht ausschließen, wie die Pariser Vereinbarungen nicht in sanktionsbewehrte Verpflichtungen umgewandelt werden und im Übrigen (fast) alle Länder mitmachen.

Wenn man Gutes tun will, muss man sich auch fragen, ob die realisierten Maßnahmen überhaupt wirken. Diese Diskussion hat in Deutschland noch nicht stattgefunden, weil die gesamte Klimaproblematik im Hinblick auf die Möglichkeiten diskutiert wird, den Verbrauch durch technische Möglichkeiten einzuschränken, anstatt zu fragen, wie man das Verhalten der Anbieter der fossilen Brennstoffe auf den Weltmärkten verändern kann, ohne das leider nichts erreicht werden kann.

LITERATUR

Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen (2018), *Bruttostromerzeugung in Deutschland ab 1990 nach Energieträgern*, vorläufige Angaben, Stand: 14. Dezember 2018, verfügbar unter: https://ag-energiebilanzen.de/index.php?article_id=29&fileName=20181214_brd_stromerzeugung1990-2018.pdf.

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (2016), *Klimaschutzplan 2050, Klimaschutzpolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung*, November, verfügbar unter: https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Klimaschutz/klimaschutzplan_2050_bf.pdf.

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (2019), *Referentenentwurf zum Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG)*, 18. Februar, verfügbar unter: <https://www.klimareporter.de/images/dokumente/2019/02/ksg.pdf>.

Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (2018), *Verkehr in Zahlen 2018/2019*, 47. Jahrgang, verfügbar unter: https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Publikationen/G/verkehr-in-zahlen_2019-pdf.

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2018), *Erneuerbare Energien in Zahlen, Nationale und internationale Entwicklung im Jahr 2017*, verfügbar unter: <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/erneuerbare-energien-in-zahlen-2017.pdf>.

Europäische Kommission (2018), »Saubere Mobilität: Parlament und EU-Staaten einig über neue CO₂-Grenzwerte für Autos«, Pressemitteilung der Europäischen Kommission, 18. Dezember, verfügbar unter: https://ec.europa.eu/germany/news/20181218-co2-grenzwerte-autos_de.

Europäische Umweltagentur (2019), *CO₂-Emission Intensity from Electricity Generation*, Stand: 17. Januar 2019, verfügbar unter: <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/daviz/sds/co2-emission-intensity-from-electricity-generation-2>.

Fraunhofer IEE (2019), »Entwicklung der installierten Windleistung (on- und offshore)«, verfügbar unter: http://www.windmonitor.de/windmonitor_de/bilder_javascript.html?db_communicate=%27Windenergieeinspeisung.daten%27&p_lang=ger&img_id=428.

Gemeinsame Forschungsstelle der Europäischen Kommission (2014a), *Well-to-Wheels Analysis of Future Automotive Fuels and Powertrains in the European Context, Well-to-Wheels Appendix 1*, Version 4. a, März, verfügbar unter: https://ec.europa.eu/jrc/sites/jrcsh/files/wtt_app_1_v4a_march_2014_final.pdf.

Gemeinsame Forschungsstelle der Europäischen Kommission (2014b), *Well-to-Wheels Analysis of Future Automotive Fuels and Powertrains in the European Context, Well-to-Tank Appendix 2*, Version 4. a, April, verfügbar unter: https://ec.europa.eu/jrc/sites/jrcsh/files/wtt_appendix_2_v4a.pdf.

Hecking, C. (2019), »Rekord. 40 Prozent des deutschen Stroms waren 2018 öko.«, *Spiegel online*, 2. Januar, verfügbar unter: <http://www.spiegel.de/wirtschaft/unternehmen/strom-2018-gab-es-erstmal-mehr-als-40-prozent-oekostrom-a-1246124.html>.

Howarth, R. W., R. Santoro und A. Ingraffea (2011), »Methane and the Greenhouse-gas Footprint of Natural Gas from Shale Formations«, *Climatic Change* 106(4), 679–690.

Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg (2011), *UMBReLA – Umweltbilanzen Elektromobilität, Wissenschaftlicher Grundlagenbericht*, verfügbar unter: https://www.erneuerbar-mobil.de/sites/default/files/publications/grundlagenbericht-umbrella_1.pdf.

Kohlekommission (2019), *Abschlussbericht Kommission »Wachstum, Strukturwandel und Beschäftigung«*, verfügbar unter: <https://www.kommission-wsb.de/WSB/Redaktion/DE/Downloads/abschlussbericht-kommission-wachstum-strukturwandel-und-beschaeftigung-2019.pdf>.

Klell, M., H. Eichseder und A. Trattner (2018), *Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik: Erzeugung, Speicherung, Anwendung*. Springer Vieweg, Wiesbaden.

Leopoldina, Acatech und Union der deutschen Akademien der Wissenschaften (2017), *Sektorkopplung – Optionen für die nächste Phase der Energiewende. Stellungnahme*, November, verfügbar unter: http://www.leopoldina.org/uploads/tx_leopublication/2017_11_14_ESYS_Sektorkopplung.pdf.

Lund, H. und W. Kempton (2008), »Integration of Renewable Energy into the Transport and Electricity Sectors through V2G«, *Energy Policy* 36(9), 3578–3587.

Pariser Klimaabkommen (2015), *Übereinkommen von Paris*, Dezember, verfügbar unter: https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Klimaschutz/paris_abkommen_bf.pdf.

Rischaneck, U. (2019), »Grün oder nicht grün – die Tricks beim Ökostrom«, *Wirtschaftsnachrichten Donauraum* (1–2), 8–9.

Romare, M. und L. Dahllöf (2017), *The Life Cycle Energy Consumption and Greenhouse Gas Emissions from Lithium-Ion Batteries: A Study with Focus on Current Technology and Batteries for Light-duty Vehicles*, Swedish Environmental Research Institute, Stockholm.

Sinn, H.-W. (2008a), »Public Policies against Global Warming: A Supply Side Approach«, *International Tax and Public Finance* 15, 360–394.

Sinn, H.-W. (2008b), *Das Grüne Paradoxon. Plädoyer für eine illusionsfreie Klimapolitik*, Econ, Berlin.

Sinn, H.-W. (2012), *The Green Paradox. A Supply Side Approach to Global Warming*, MIT Press, Cambridge, USA.

Sinn, H.-W. (2017), »Buffering Volatility: A Study on the Limits of Germany's Energy Revolution«, *European Economic Review* 99, 130–150.

Stanka, D. (2018), *Der neue Erdgasmotor von Volkswagen*, 25. Mai, verfügbar unter: <https://auto360.de/der-neue-erdgas-motor-von-volkswagen>.

Tirole, J. (1988), *The Theory of Industrial Organization*, MIT Press, Cambridge USA.

Umweltbundesamt (2016a), *Weiterentwicklung und vertiefte Analyse der Umweltbilanz von Elektrofahrzeugen, 27/216*, verfügbar unter: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte_27_2016_umweltbilanz_von_elektrofahrzeugen.pdf.

Umweltbundesamt (2016b), *CO₂-Emissionsfaktoren für fossile Brennstoffe*, Juni, verfügbar unter: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1968/publikationen/co2-emissionsfaktoren_fur_fossile_brennstoffe_korrektur.pdf.

Umweltbundesamt (2018), *Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990–2017*, Mai, verfügbar unter: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2018-05-04_climate-change_11-2018_strommix-2018_0.pdf.

Zerrahn, A., W. P. Schill und C. Kemfert (2018), »On the Economics of Electrical Storage for Variable Renewable Energy Sources«, *European Economic Review* 108, 259–279.

ANHANG

Die nachfolgende Tabelle zeigt, wie wir aus den offiziellen Angaben zur deutschen Bruttostromproduktion des Jahres 2018 und den Angaben zum Nettostrom-

Tab. A1

Der CO₂-Ausstoß der Energieträger im Jahr 2018

	A	B	C	D = B/C	E = A · D	F	G = F · E	H	I = G/H
	Bruttostromerzeugung nach Energieträgern (TWh)	therm. Emissionsfaktor (kg CO ₂ /kWh)	elektr. Wirkungsgrad	elektrischer Emissionsfaktor (kg CO ₂ /kWh)	CO ₂ -Emissionen (Mio. t)	Aufschlag für Vorkette	CO ₂ -Emissionen inkl. Vorkette (Mio. t)	Nettostromverbrauch (inkl. Nettoexporte) (TWh) ^a	CO ₂ -Emission je kWh Nettostromverbrauch (kg/KWh)
Energieträger									
Braunkohle	146,0	0,400	0,38	1,05	153,3	1,16	177,8	130,9	1,36
Steinkohle	83,0	0,337	0,41	0,82	68,1	1,16	79,0	74,4	1,06
Erdgas	83,0	0,201	0,53	0,38	31,5	1,3 ^b	41,0	74,4	0,55
Mineralölpr.	5,2	0,280	0,43	0,65	3,4	1,21	4,1	4,7	0,87
Kernenergie	76,1							68,2	
Erneuerbare	228,7							205,1	
darunter:									
Windkraft	113,3							101,6	
Photovoltaik	46,3							41,5	
Staudämme ^c	16,9							15,2	
Biomasse	45,7							41,0	
Biog. Hausmüll	6,3							5,6	
Übrige Energie ^d	20,4	0,300	0,40	0,75	15,3	1,0	15,3	18	0,85
Insgesamt	642,4				271,6		317,2	576,0	0,55

^a Bruttostromproduktion abzüglich des geschätzten Eigenverbrauchs der Kraftwerke und der geschätzten Leitungsverluste, aber einschließlich der Nettoexporte unter der Annahme, dass die Leitungsverluste überall den gleichen Anteil ausmachen und der Eigenverbrauch sowie die Nettoexporte aus dem durchschnittlichen Energiemix gespeist werden. Vgl. die Erläuterungen im Text zu Abbildung 1. ^b Inklusive der CO₂-äquivalenten Methanverluste. Siehe Gemeinsame Forschungsstelle der Europäischen Kommission (2014b, Tab. 1.6). ^c Inklusive Laufwasserkraftwerke zur Erzeugung von Strom aus den Flüssen. Ohne Stromerzeugung der Pumpspeicherkraftwerke, es sei denn, die Pumpspeicher hätten einen natürlichen Zufluss und würden deshalb als normale Speicherwerke (wie Talsperren) angesehen. ^d Nicht-biogener Hausmüll etc., ohne Output der Pumpspeicherwerke. Vgl. die Erläuterungen zu Abbildung 1.

Hinweis: Die vorläufige Bruttostromerzeugung stammt von der Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen (2018), der Nettostromverbrauch wurde daraus anhand der Relationen im Vorjahr bestimmt. Die Wirkungsgrade der Kraftwerke wurden auf der Grundlage von Angaben des Umweltbundesamts (2018) geschätzt. Dabei wurde berücksichtigt, dass die Kraftwerke wegen der volatilen Erzeugung der erneuerbaren Anlagen häufiger in Teillast betrieben werden müssen, was deren Effizienz beeinträchtigt. Bei den Emissionsfaktoren handelt es sich um offizielle Angaben des Umweltbundesamtes (2016b): Für Braunkohle wurde ein Durchschnittswert der verschiedenen Braunkohlearten, die zur Stromerzeugung eingesetzt werden, verwendet. Bei Steinkohle und Erdgas sind Emissionswerte für den Einsatz in Kraftwerken ausgewiesen. Für Mineralölprodukte wurde ein gewichteter Durchschnitt aus leichtem und schwerem Heizöl zugrunde gelegt. Der Faktor für die übrigen Energieträger wurde geschätzt, wobei die sonstigen Gase, darunter vor allem Kokereigas, Anhaltswerte lieferten. Beim Aufschlag für die Vorkette beziehen wir uns auf Werte der Gemeinsamen Forschungsstelle der Europäischen Kommission (2014b, Tab. 1.1 und 1.6). Die Werte für Kohle beziehen sich auf den EU-Mix für konventionelle Kohlekraftwerke. Für Mineralölprodukte wurde der Wert für Dieselkraftstoff zugrunde gelegt. Die Werte für Erdgas beziehen sich auf den Durchschnittswert über verschiedene Arten von Erdgas und Erdgasvorräten aus unterschiedlichen Entfernungen vom Abbauort. Für die übrige Energie nehmen wir an, dass es keine Vorketteneffekte gibt.

Quelle: Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen (2018); Umweltbundesamt (2016b, S. 45 ff.); Umweltbundesamt (2018, S. 17); Berechnungen der Autoren.

verbrauch sowie den vorhandenen Informationen zu den Wirkungsgraden bei der Stromproduktion sowie den physikalischen Emissionsfaktoren den CO₂-Ausstoß in Relation zu dem jeweils an der Steckdose entnommenen Strom aus unterschiedlichen Quellen berechnen. Wir benötigen diese Angaben, weil wir im Text auf Überlegungen zu alternativen marginalen Stromquellen für die Elektroautos anstellen.

Die Rechnungen der Tabelle wurden auf der Basis der Angaben zu den tatsächlichen Produktionswerten gemäß Abbildung 1 sowie des Umweltbundesamtes über die Emissionsfaktoren und die thermischen Wirkungsgrade der Kraftwerke, die fossile Kohlenstoffe verwenden, erstellt. Der Emissionsfaktor gibt an, wieviel kg CO₂ pro kWh thermischer Energie anfallen, wobei sich die Unterschiede im Wesentlichen aufgrund der unterschiedlichen Wasserstoffanteile der Energieträger im Verhältnis zu den Kohlenstoffanteilen ergeben. Der Wirkungsgrad gibt an, welcher

Anteil der bei der Verbrennung entstehenden thermischen Energie aufgrund der verwendeten Maschinen und Anlagen in Bruttostrom umgesetzt werden kann. Der Nettostromverbrauch ist die an der Steckdose entnommene Energie der verschiedenen Energieträger zuzüglich der Nettoexporte. Der Nettostromverbrauch liegt um den Eigenverbrauch der Kraftwerke, um die Verluste der Pumpspeicherwerke und um die Leitungsverluste unter der Bruttostromerzeugung. Mangels besserer Informationen wurde angenommen, dass diese Verlustquellen bei allen Stromarten zum gleichen Prozentanteil anfallen.

Man sieht, dass beim Braunkohlestrom mit einem Wert von 1,36 kg/kWh am meisten CO₂ anfällt. Beim Steinkohlestrom liegt der Wert bei 1,06 und beim Erdgas wegen des hohen Wasserstoffanteils am Methan bei 0,55. Im Durchschnitt ergab sich beim deutschen Strommix des Jahres 2018 ein CO₂-Ausstoß von 0,55 kg je kWh Strom, der aus der Steckdose kam.