

Klimaschutz

Zu viel CO₂ aus dem Verkehr: Ist Elektromobilität die Lösung?

Elektrifizierung gilt als Königsweg, um den Verkehrssektor klimaschonender zu gestalten. Doch die Stromerzeugung in Deutschland und die Herstellung von Batterien sind weit davon entfernt, emissionsfrei zu sein.

Der Weltklimarat hat im Herbst 2018¹⁾ einen Sonderbericht zu dem Ziel erstellt, die Erderwärmung bis zum Jahr 2100 von zuvor 2°C auf jetzt 1,5°C zu begrenzen. Ein solches Ziel ist notwendig, um größere und unumkehrbare Veränderungen unserer Umwelt zu vermeiden. Die Maßnahmen, um dieses Ziel zu erreichen, müssen drastischer ausfallen als bisher gedacht.

Deutschland hat sich zwar dem Klimaschutz verpflichtet. Allerdings sinken die CO₂-Emissionen seit dem Jahr 2005 kaum noch (Abbildung 1).²⁾ Deutschland wird sein Klimaziel von minus 40 Prozent bis zum Jahr 2020 mit hoher Wahrscheinlichkeit verfeh-

len. Das liegt an mehreren Sektoren: Energiewirtschaft, Landwirtschaft, Industrie, Haushalte, vor allem aber am Verkehr.

Verkehr und CO₂-Emissionen

Der Verkehrssektor trägt in Deutschland mit 170 Millionen Tonnen im Jahr 2017 etwa 19 Prozent zur Gesamtemission von CO₂ bei. Diese ist heute höher als im Jahr 1990 und allein seit 2010 um 11 Prozent gestiegen.²⁾ Eine ähnliche Entwicklung gilt für die EU insgesamt.³⁾

Fortschritte in der Motorentechnik haben in den letzten 20 Jahren

zu Einsparungen beim mittleren Kraftstoffverbrauch um 1,6 Liter pro 100 km geführt. Dies wurde allerdings kompensiert durch die steigende Zahl der Fahrzeuge (plus 11 Prozent bei Pkw, plus 24 Prozent bei Lkw seit 2008) sowie durch die Nachfrage nach größeren Fahrzeugen (SUVs) und leistungsstärkeren Motoren (Abbildung 2).

Die meisten Personenkilometer, 43 Prozent, entfallen in Deutschland auf Urlaubs- und Freizeitverkehr, gefolgt von Berufs- und Ausbildungsverkehr mit etwa 22 Prozent. Geschäfts- und Einkaufsfahrten liegen jeweils bei etwa 15 Prozent.

Anders als bei CO, Rest-Kohlenwasserstoffen, NO_x und Feinstaub, für die es Grenzwerte gibt, limitiert der Gesetzgeber die CO₂-Emissionen aus Autos allein über den Flottenverbrauch. Gemittelt über alle europäischen Hersteller liegt dieser derzeit bei 127 g·km⁻¹. Aufgrund des höheren Anteils schwererer Fahrzeuge ist Daimler das Schlusslicht. Der Zielwert für das Jahr 2021 nach EU-Regulierungen ist 95 g·km⁻¹. Dieser soll bis 2030 um 37,5% gesenkt werden.

Die Automobilhersteller können den Flottenverbrauch beispielsweise durch einen höheren Anteil an Kleinfahrzeugen und kleineren Motorvolumina senken sowie durch Elektroantriebe, also durch reine Batteriefahrzeuge oder Hybride. Für diese hat sich die europäische Autoindustrie ein Geschenk der

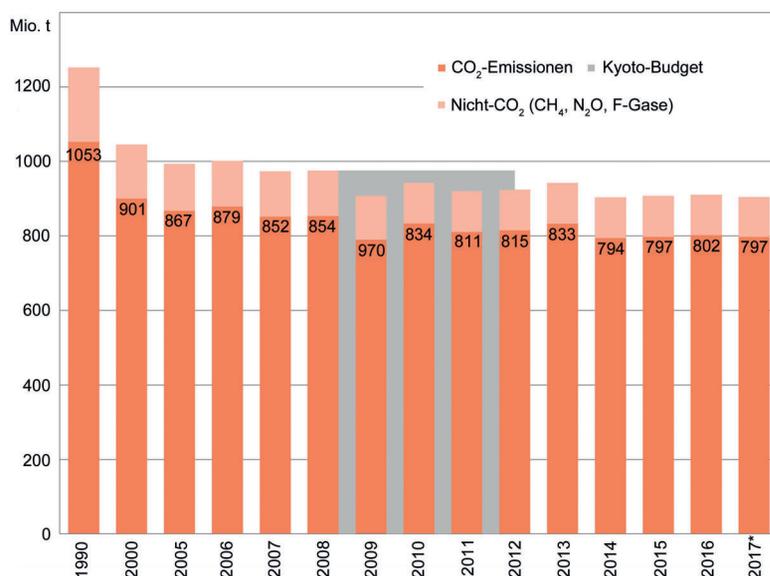


Abb. 1. Entwicklung der Treibhausgasemissionen in Deutschland seit dem Jahr 1990 in Millionen Tonnen CO₂-Äquivalent (*die Werte für 2017 sind geschätzt).²⁾

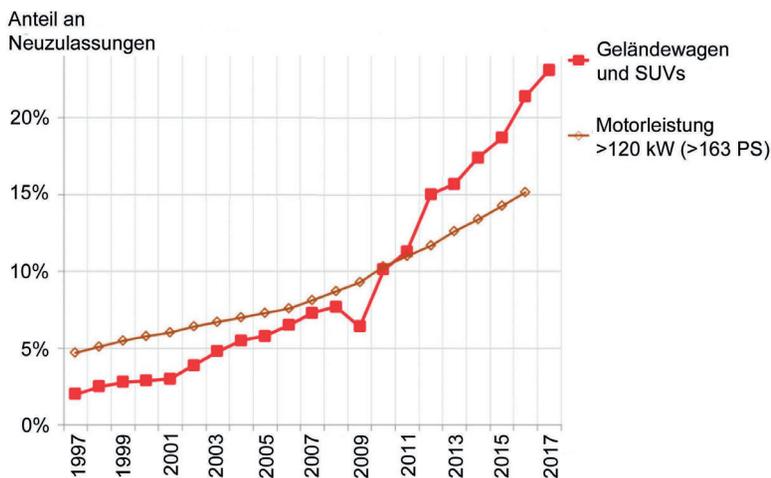


Abb. 2. Veränderung der Neuzulassungen von Pkw in Deutschland seit dem Jahr 1997: SUVs und Geländewagen sind das am stärksten wachsende Segment.⁴⁾

EU-Kommission gesichert: Alle Fahrzeuge, die teilweise oder vollständig elektrisch betrieben werden, gelten als frei von CO₂-Emissionen, auch wenn die Stromerzeugung nicht CO₂-frei ist. Mit jedem verkauften Elektroauto kommt der Hersteller also dem EU-Ziel näher.

Dieselfahrzeuge: Emissionswerte und die Wirklichkeit

Verrechnete und tatsächliche Emissionen liegen bei Kraftfahrzeugen weit auseinander. Der Neue Europäische Fahrzeugzyklus (NEFZ), der im Jahr 1996 eingeführt wurde, gilt wegen der unrealistischen Bedingungen mit zu geringer Geschwindigkeit und Beschleunigung seit langem als veraltet. Daher wurden Konformitätsfaktoren vorgeschrieben, die zwar zu besseren, aber immer noch nicht realistischen Ergebnissen führten. Als Ergebnis des Diesel-Skandals wurde im Jahr 2017 ein neuer Fahrzeugzyklus namens WLTP (Worldwide Harmonized Light Duty Vehicles Test Procedure) eingeführt, der diese Defizite vermeiden soll. Für Dieselfahrzeuge ist darüber hinaus eine besondere Testung im Straßenbetrieb vorgesehen (Real Driving Emissions, RDE), die NO₂- und Partikelemissionen bestimmen soll. Nach Einschätzung der Hersteller⁵⁾ müssen durch WLTP die CO₂-Emissionen

aus dem Automobilverkehr um mindestens 20 Prozent nach oben korrigiert werden.

Die vergangenen 20 Jahre waren im Verkehrssektor in Deutschland auch gekennzeichnet durch die Zunahme an Diesel-Pkw. Dies war durch Steuersubvention beim Kraftstoff und durch gesteigerte Motorleistung motiviert. Zwischen 1995 und 2016 sank deshalb der Benzinverbrauch um 36 Prozent, und der Dieserverbrauch stieg um 180 Prozent.

Diese Verschiebung hat die Klimabilanz des Verkehrssektors in Deutschland vermeintlich positiv beeinflusst, da Dieselfahrzeuge einen um 15 bis 20 Prozent geringeren spezifischen CO₂-Ausstoß haben. Diesel hat eine höhere volumetrische Energiedichte als Benzin, und Dieselmotoren arbeiten mit höherem Wirkungsgrad.

Wie Kritiker der Verdieselung des deutschen Automobilmarkts anmerken, sind aufgrund der Rußemissionen älterer Dieselmotoren die Einsparungen bei der CO₂-Emission durch die Klimawirkung des Rußes mehr als kompensiert.⁶⁾ Rußfilter haben das Rußproblem inzwischen gelöst. Dieselmotoren mit den Euro-Normen 5, 6 und jünger sind partikelbezogen extrem sauber. Die Einführung der grünen Plakette und von Umweltzonen hat den Ruß in den Innenstädten deutlich reduziert.

Stickoxide und steigende Emissionen

Durch den Diesel-Skandal im Jahr 2015 ist ein weiterer Schadstoff ins Rampenlicht geraten: NO₂. Stickstoffdioxid schädigt die Atemwege. Aufgrund einer WHO-Empfehlung sind seit 2009 in allen EU-Normen Emissionsgrenzwerte für NO_x und Immissionsgrenzwerte für NO₂ festgelegt.

Während NO_x auf dem Prüfstand kontrolliert wurde, hat sich um die Umweltkonzentrationen von NO₂ kaum jemand gekümmert. Umweltforschern war allerdings seit Jahren aufgefallen, dass NO₂-Konzentrationen in der Luft unverändert oder gestiegen waren, obwohl NO_x-Emissionen gesunken waren. Diesen Widerspruch aufzuklären, war ihnen lange Zeit verwehrt, da die Kfz-Industrie beharrlich niedrigere NO₂-Emissionen verteidigte. Bis 2015 der Spuk durch die Messungen des gemeinnützigen US-amerikanischen International Council on Clean Transportation (ICCT) aufzog. Wie dabei deutlich wurde, emittieren Dieselmotoren überraschend hohe Konzentrationen an NO₂, wenn die Abgasreinigung nicht vollständig aktiviert ist. Die Automobilhersteller haben manipuliert sowie Käufer und Regulierer getäuscht.

Seither herrscht Ratlosigkeit darüber, wie die Gesundheit der Bevölkerung geschützt werden kann und gleichzeitig die Halter älterer Die-

QUERGELESEN

- » Der Verkehr in Deutschland trägt zu etwa einem Fünftel zur CO₂-Emission bei, das sind jährlich um die 170 Millionen Tonnen. Die CO₂-Emissionen aus dem Verkehr haben seit 1990 noch zugenommen.
- » Deutschland deckt zur Zeit etwa 45 Prozent seines Strombedarfs aus fossilen Quellen. Strom ist deshalb pro kWh mit 460 g CO₂ belastet.
- » Bei Elektrofahrzeugen ist die CO₂-Emission aus der Batterieherstellung hinzuzurechnen.
- » Antriebe mit Brennstoffzellen oder synthetischen Kraftstoffen aus Elektrolysewasserstoff sind Alternativen zum Batterieantrieb.

selffahrzeuge vor Fahrverboten in Städten verschont werden können.

Vorläufig liegen die Entscheidungen bei den Gerichten. Käufer von Neufahrzeugen meiden den Diesel und greifen verstärkt nach Benzinern, was sich bereits jetzt in weiter steigenden CO₂-Emissionen bemerkbar macht.

Energie- und Stromerzeugung in Deutschland

Aufgeschlüsselt nach Energieträgern (Abbildung 3) stammten in Deutschland im Jahr 2018 von den insgesamt erzeugten 541 TWh Stromenergie zirka 217 TWh, also 40,2 Prozent, aus regenerativen Quellen wie Windkraft, Biomasse, Photovoltaik und Wasserkraft. Letztgenannte ha-

ben sich seit 2002 in etwa verfünffacht.⁷⁾ Bezogen auf den gesamten Primärenergieeinsatz in Deutschland beträgt der Anteil des regenerativen Stroms aber nur 13 Prozent.

Als Folge ist der Anteil der fossilen Energieträger am Gesamtprimärenergieaufkommen zwischen 1990 und 2018 von 88 Prozent auf 81 Prozent gesunken. Dabei hat Energie aus regenerativen Quellen im Wesentlichen den Rückgang im Atomstrom ausgeglichen. Oder: Null-Emissionen sind durch Null-Emissionen ersetzt worden.

Solar- und Windkraft sind volatile Energiequellen (Abbildung 4).⁷⁾ Kohle, Gas und Atomkraft, aber auch Wasserkraft und Biomasse erzeugen quasi kontinuierlich Strom und können jederzeit mehr als die Hälfte des Strombedarfs abdecken.

Im Extremfall kann die Leistung von Solar- und Windkraft auf weniger als 1 Prozent ihrer installierten Leistung fallen, also unter 1 GW.⁸⁾ Besonders anfällig sind Windkraftanlagen, deren Leistung sich mit der dritten Potenz der Windgeschwindigkeit ändert.

Wenn man deshalb die regenerativen Stromquellen in größerem Ausmaß nutzen will, sind auch fossile Kraftwerke, insbesondere Gas-Kraftwerke vorzuhalten, zur Stabilisierung der Netze und als Reserve.

Zudem sind die regenerativen Stromquellen räumlich unterschiedlich verteilt; Stromerzeugung und -bedarf auszugleichen, erfordert deshalb ausreichend Stromtrassen. Diese fehlen in Deutschland. Ausbau und Ertüchtigung von Stromnetzen und -speichern (Smart Grids) bleiben daher die zukunftsweisenden Aufgaben.

Der Strommix in Deutschland beschert uns derzeit CO₂-Emissionen von 461 g·kWh⁻¹ (Tabelle). Kohlekraftwerke liefern mit 38 Prozent des Gesamtstroms die größte Leistung, aber auch die bei weitem höchste CO₂-Emission (410 g·kWh⁻¹).

Wenn in den Jahren 2021 bis 2022 die restlichen Kernkraftwerke abgeschaltet werden, entsteht eine Versorgungslücke von 13 Prozent oder 72 TWh. Die Regenerativen werden diese Lücke kaum schließen. Konventionelle Kraftwerke

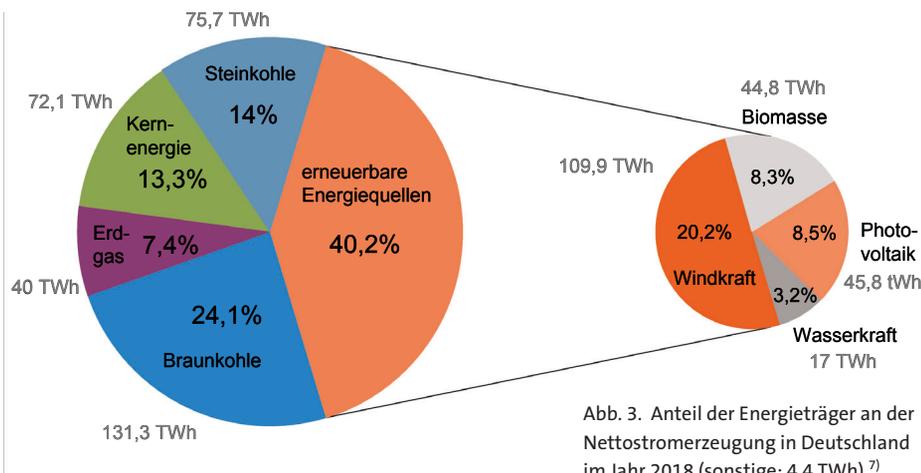


Abb. 3. Anteil der Energieträger an der Nettostromerzeugung in Deutschland im Jahr 2018 (sonstige: 4,4 TWh).⁷⁾

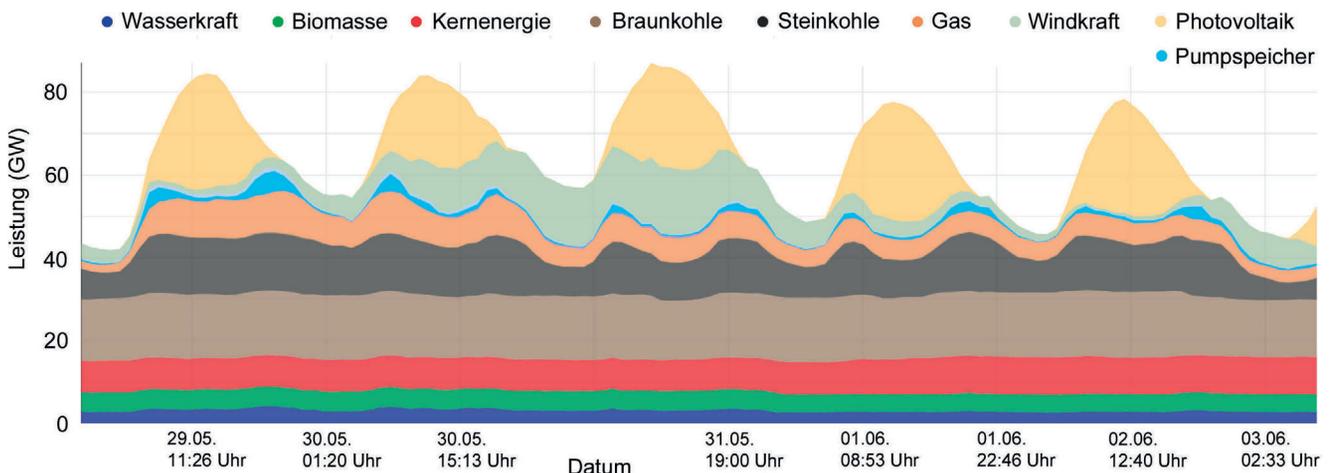


Abb. 4. Nettostromerzeugung aus verschiedenen Energieträgern im Zeitraum 29. Mai bis 3. Juni 2017.⁷⁾

einschließlich der Kohlekraftwerke werden hochfahren. In der Folge wird sich die leistungsspezifische CO₂-Emission erhöhen, und zwar auf etwa 530 g·kWh⁻¹.⁴⁾

Es ist leicht abzuschätzen, wie viel zusätzlicher Strom in Deutschland benötigt würde, wenn alle 45 Millionen Pkw mit Strom liefern: etwa 125 TWh, also 27 Prozent mehr als heute. Diese zusätzliche Menge bereitzustellen, ist nicht das eigentliche Problem. Das Problem liegt im erforderlichen ausreichend schnellen Ausbau der Regenerativen und bei der Ertüchtigung von Netzen, Transformatoren und Stromspeichern.

Elektrische Antriebe

Verbrennungsmotoren auf der Basis von Benzin und Diesel beherrschen den deutschen Fahrzeugmarkt. Von den 45 Mio. Fahrzeugen sind etwa 54 000, also 0,1 Prozent Elektrofahrzeuge. Selbst unter den Neuzulassungen in Deutschland haben Elektrofahrzeuge nur einen Anteil von 1,9 Prozent (3. Quartal 2018). Von den einst von der Politik erwünschten 2 Millionen Fahrzeugen auf deutschen Straßen bis zum Jahr 2020 sind wir weit entfernt.

Im internationalen Vergleich nimmt Deutschland bei Elektrofahrzeugen einen hinteren Rang ein. Spitzenreiter sind China und Norwegen mit 3,5 Prozent beziehungsweise 46,7 Prozent unter den Neuzulassungen. In China liegt die absolute Zahl der Neuzulassungen in den ersten drei Quartalen 2018 bei 718 000. Selbst in den USA, in Sachen Klimaschutz eher defensiv, kamen 2018 mehr als 228 000 neue E-Fahrzeuge auf den Markt.⁹⁾ Anders als in den USA sind in China und Norwegen die Elektroautos staatlich subventioniert.

Elektroantriebe sind heute in mehreren Varianten verfügbar:

- als reine Batteriefahrzeuge (BEV) mit Stromverbrauch von 13 bis 24 kWh pro 100 km und Reichweiten von 200 bis 600 km,

Kraftwerkstyp	Spezifische CO ₂ -Emissionen [g · kWh ⁻¹]	Anteilige Stromerzeugung		Anteilige CO ₂ -Emissionen [g · kWh ⁻¹]
		[%]	[TWh · a ⁻¹]	
Braunkohle	1150	24,1	131	277
Steinkohle	950	14,0	76	133
Gas	430	7,4	40	31,8
Atomkraft	32	13,4	72	4,3
Wasser	40	3,2	17	1,3
Wind	24	20,2	110	4,8
Photovoltaik	101	8,6	46	8,7
Biomasse	0	8,3	45	
Sonstige	?	0,7	4	

CO₂-Bilanzen der Netto-Stromerzeugung in Deutschland im Jahr 2018. Gesamtstromerzeugung: 541 TWh, spezifische Emission von CO₂: 461 g·kWh⁻¹, Gesamtemission von CO₂: 249,6 Mio. Tonnen.

- als Hybrid-Fahrzeuge (HEV) mit einem Kraftstoffverbrauch von 4 bis 7 L pro 100 km; der Verbrennungsmotor oder die Energierückgewinnung beim Bremsen lädt die Batterien auf,
- als Plug-In-Hybride (PHEV) mit einem Kraftstoffverbrauch von 1,8 bis 3,0 L auf 100 km und einer Systemleistung bis 300 kW, Batterie wird über Steckdose geladen,
- als Brennstoffzellenfahrzeuge (FCEV) mit einem Brennstoffverbrauch von 0,8 bis 0,9 kg Wasserstoff auf 100 km und Reichweiten bis 600 km.

Von diesen dominieren in nahezu allen Ländern – auch in Deutschland – BEV und PHEV; die BEV eher bei Fahrzeugen mit geringeren Leistungen und kürzeren Reichweiten, die PHEV auch bei solchen mit stärkerer Leistung. Eine Ausnahme ist Tesla-Motors, die auch bei stärkeren Motoren ausschließlich auf BEV setzen.

Wie erwähnt dürfen in Deutschland wie in der gesamten EU die Hersteller von E-Mobilen die CO₂-Emission aus dem elektrisch betriebenen Anteil mit Null berechnen. So glänzen selbst schwerere Plug-In-Hybride mit der Emission eines Drei-Liter-Fahrzeugs, und die CO₂-Emission der gesamten Flotte sinkt dadurch leicht unter die Zielmarke von 95 g·km⁻¹.

Elektroautos sind nicht emissionsfrei

Elektromotoren tragen aufgrund des Strommixes zu CO₂-Emissionen bei. Auch jeder andere Stromverbraucher muss sich derzeit die CO₂-Last von 461 g·kWh⁻¹ zurechnen lassen.

Anders als die Kraftfahrzeughersteller berücksichtigen wissenschaftliche CO₂-Bilanzen die CO₂-Emissionen aus dem Strommix während der Betriebsphase. Hinzuzurechnen sind die CO₂-Emissionen aus Herstellung und Recycling eines Fahrzeugs. Elektrofahrzeuge sind in ihrer Herstellung aufgrund des Materialaufwands bei den Batterien CO₂-intensiver als Verbrennungsmotoren.

So kommt eine schwedische Studie zu dem Schluss, dass für die Produktion einer Lithiumionenbatterie mit einer Kapazität von 50 kWh je nach verfügbarem Ökostrom derzeit zwischen 7,5 und 10 t CO₂ frei werden.¹⁰⁾ Für die Herstellung eines Verbrennungsmotors fällt etwa die Hälfte an.

Der zusätzliche CO₂-Rucksack bei der Herstellung der BEV bewirkt gemeinsam mit der CO₂-Emission aus dem derzeitigen Strommix, dass BEVs zwar nicht einem Benzinler, aber einem Diesel während der ersten 150 000 Kilometer ökologisch unterlegen sind (Abbildung 5, S. 30). Wenn das Fahrzeug ausschließlich mit Ökostrom betrieben würde, wäre dies nicht der Fall.¹¹⁾ Ebenso fällt die Bilanz bei

Klein- und Mittelklassewagen eher zu Gunsten der BEV aus.

Das Problem des CO₂-Rucksacks bei der Batterieproduktion ist den Herstellern bekannt, aber nicht gelöst. Die gesamte Produktion der Lithiumionenzellen liegt in China, Korea und Japan. Zwar werden Lithiumionenbatterien auch in Deutschland mit Managementsystemen und Leistungselektronik ausgestattet (zum Beispiel bei Bosch), die Zellen dafür sind aber importiert. Den CO₂-Rucksack können wir also derzeit nicht beeinflussen.

Allein Tesla hat in Kalifornien eine Zellenfabrik auf den Weg gebracht, die selbsterzeugten Solarstrom nutzt. Eine ähnliche Investition plant das Unternehmen in Europa.

Alternative Kraftstoffe

Benzin und Diesel aus Erdöl bestimmen heute den Kraftstoffmarkt in Deutschland und Europa. Die klassischen Biokraftstoffe Bioethanol und Biodiesel sind lediglich Zusätze. Gasförmige Kraftstoffe wie verdichtetes oder verflüssigtes Erdgas (CNG beziehungsweise LPG) wer-

den ebenfalls nur in geringem Umfang genutzt. In Deutschland werden jährlich fast 47 Millionen Tonnen Benzin und Diesel verkauft.¹³⁾

Kraftstoffe wie Benzin und Diesel sind außergewöhnlich gute chemische Energiespeicher: Ihre massebezogenen Energiedichten sind mit 12 kW·kg⁻¹ Feststoffspeichern wie Lithiumionenbatterien um mindestens den Faktor zehn überlegen. Während die Batterie eines BEV zwischen 400 und 700 kg wiegt, reicht bei den Kraftstoffen eine Tankfüllung mit etwa 50 kg für eine Fahrstrecke von vielen 100 km. Ein weiterer Vorteil der Flüssigkraftstoffe ist die gute vorhandene Verteilungsinfrastruktur. Allein wegen dieser Eigenschaften gebührt Flüssigkraftstoffen auch unter erhöhten ökologischen Anforderungen eine Zukunft.

Allerdings dürfen die Kraftstoffe dann nicht länger aus fossilen Quellen stammen, sondern sie müssen mit Elektrolysewasserstoff aus CO₂ synthetisiert werden. Das Ziel bei den Kraftstoffen muss Defossilierung sein – nicht Decarbonisierung, wie manchmal fälschlicherweise gefordert wird.

Die Synthese von E-Fuels entspricht der konventionellen Kraftstoffsynthese nach Fischer-Tropsch mit dem Unterschied, dass Wasserstoff nicht durch Kohlevergasung oder Dampfreformierung, sondern elektrochemisch erzeugt wird. CO₂ stammt aus industriellen Quellen, etwa aus Kraftwerken, Zementwerken oder auch aus der Luft. Die Machbarkeit und Wirtschaftlichkeit der Synthese solcher E-Fuels ist Gegenstand des Kopernikus-Forschungsverbands des Bundesforschungsministeriums.¹⁴⁾

Vielversprechende Synthesekraftstoffe sind die OME (Oxymethylenether) (Abbildung 6), in denen die C-Atome über Sauerstoffatome verknüpft sind. Sie zerfallen bei der Verbrennung im wesentlichen in C₁-Fragmente und bilden daher keinen oder wenig Ruß. Somit sind sie idealer Ersatz für Dieselmotorkraftstoffe; allerdings sind sie derzeit nicht wirtschaftlich herstellbar.

Die Basis aller zukünftigen Power-to-X-Synthesen^{14,15)} ist die Verfügbarkeit von Elektrolysewasserstoff und damit Strom zu einem wirtschaftlichen Preis und möglichst vollständig aus erneuerbaren Quellen. Allerdings muss es sich um Überschussstrom handeln, um nicht gleichzeitig in Konkurrenz zu anderen Verbrauchern zu stehen. Dies kann grundsätzlich über speziell dazu installierte Wind- oder Solaranlagen geschehen, wie es einst im Desertec-Projekt zur Erzeugung und Weiterleitung von Wüstenstrom nach Zentraleuropa gedacht war.¹⁶⁾ Das Projekt scheiterte allerdings, weil die deutschen Energieversorger sich damals keine Konkurrenz zum heimischen Kohle- und Atomstrom ins Land holen wollten.

Aber selbst in Deutschland erzeugen wir aufgrund des stark ausgebauten Wind- und Photovoltaikangebots gelegentlich Überschussstrom, der keine Abnehmer findet und deshalb abgeregelt werden muss. Im Jahr 2017 waren dies etwa 4,7 TWh. Diese Zahl sollte sich künftig deutlich weiter erhöhen.

Aus 1 TWh Elektrolysestrom lassen sich zirka 20 000 Tonnen Wasser-

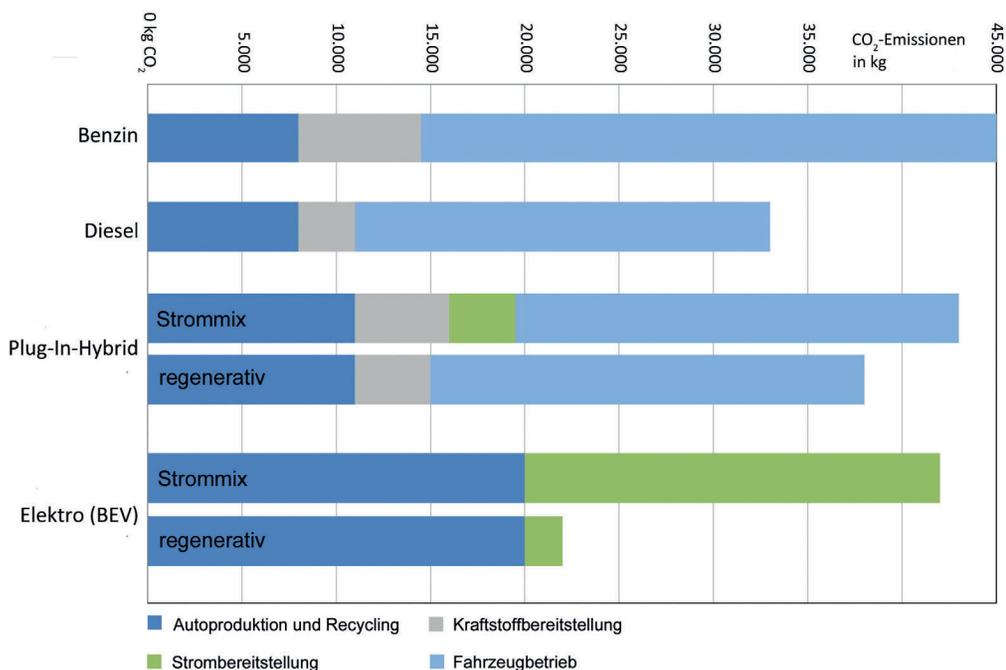


Abb. 5. Vergleich der Klimabilanz für konventionelle und elektrifizierte Fahrzeuge der oberen Mittelklasse.¹²⁾ Die CO₂-Emissionen aus der Betriebsphase gelten für eine Fahrstrecke von 150 000 km.

stoff herstellen, aus diesem wiederum etwa 100 000 Tonnen Methanol oder 50 000 Tonnen Kohlenwasserstoffe.¹⁵⁾ Wenn man für das Jahr 2030 einen Überschussstrom von 30 TWh unterstellt, bedeutet dies eine Jahresproduktion an E-Fuels in der Dimension von 1,25 Millionen Tonnen.

Brennstoffzellen

Elektrolyse-Wasserstoff oder Synthese-Methanol sind auch Kraftstoffe für die Brennstoffzelle. Der Wasserstoff kommt dabei aus einem Hochdrucktank (350 bis 700 bar) oder wird flüssig bei -253°C mitgeführt. Die Leistungen liegen je nach Anforderung bei den Kfz zwischen 50 und 150 kW.

Die Energiedichte von Wasserstoff ist nochmals um den Faktor 2,8 höher als die von Benzin. Daher liegt der Kraftstoffverbrauch nur bei 0,8 bis 0,9 kg H_2 auf 100 km. Derzeit bieten nur Hyundai und Toyota Brennstoffzellenfahrzeuge (FCEV) auf dem deutschen Markt an. Allein Daimler will in diesem Jahr ein nach gut 25 Jahren der Nocar-Erprobung ein marktreifes Serien-FCEV-Fahrzeug präsentieren (GLC). Das enthält allerdings neben der Brennstoffzelle eine Plug-in-Lithiumionenbatterie, um die Strecken zwischen den noch wenigen Wasserstoff-Ladestationen zu überbrücken. Seit Kurzem wird der Brennstoffzellenantrieb auch im Schienennahverkehr in Niedersachsen und Hessen erprobt, wo er die Dieselantriebe ersetzen soll.

Brennstoffzellen-Fahrzeuge gelten schon heute als sinnvolle Alternative zu BEVs, zumal der Aufbau eines Tankstellennetzes für H_2 trotz der Anforderungen an Druck und Temperaturen weniger aufwendig ist als das für die Batterieladung.

Einen Nachteil gegenüber den Batterien hat die Brennstoffzelle allerdings aufgrund ihres geringeren Wirkungsgrads. FCEV benötigen zusätzliche elektrische Energie für die Wasserstoffherstellung durch Elektrolyse. Diese ist jedoch hinsichtlich Standort und Lastverlauf flexibler als das Auf-

laden einer Batterie, woraus eine bessere Netzverträglichkeit resultiert.

Fazit und Empfehlungen

Für den Klimaschutz ist es unerlässlich, die Stromerzeugung aus regenerativen Quellen zu steigern sowie die Ladeinfrastruktur um- und auszubauen. In den Klimabilanzen von E-Fahrzeugen sollten die realen CO_2 -Emissionen aus Strommix und Herstellung benannt und nicht mit Null-Emissionen geworben werden. Die Umweltauswirkungen der Mobilität zu benennen, ist ein Gebot für den ehrlichen und transparenten Umgang von Herstellern mit Politik und Verbrauchern.

Seriöse Ökobilanzen sehen E-Autos in Deutschland in etwa auf gleicher Höhe mit sparsamen Verbrennungsmotoren und nicht besser. Dies wird sich nur dann ändern, wenn die Batteriestoffzellenproduktion und das Stromangebot ökologisch verträglicher werden.

Mobilität mit Elektroautos darf den öffentlichen Nahverkehr nicht verdrängen, wie es in Norwegen zu beobachten ist. Erfahrungsgemäß werden E-Fahrzeuge wegen der vermeintlich höheren Umweltfreundlichkeit intensiver genutzt als andere (Rebound-Effekt). Zudem sollten E-Fahrzeuge Alternativen zu Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor sein, sie ersetzen und nicht nur zusätzlich beschafft werden.

Synthetische Kraftstoffe auf der Basis von H_2 und CO_2 sowie weitere Optimierungen der Motorentechnik können zur längerfristigen Akzeptanz des Verbrennungsmotors führen. Vorteile sind hohe Energiedichten, geringe Rußbildung durch gezielte Synthese sowie die vorhandene Verteilungsinfrastruktur.

Die Zukunft der Mobilität in Deutschland wird auch auf längere Sicht vermutlich ein Gemisch aus verschiedenen Antrieben sein, die auf die jeweiligen Bedürfnisse und lokalen Herausforderungen angepasst sind. Antriebstechniken müssen schließlich auch in Verkehrskonzepten

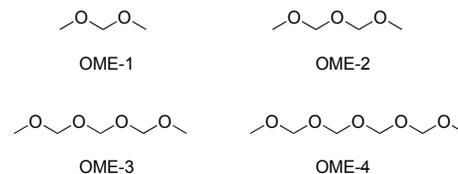


Abb. 6. Oxymethylenether (OME) aus Elektrolysewasserstoff und CO_2 , geeignet als Synthesekraftstoffe für Verbrennungsmotoren.

eingebunden werden, die Nachfrage- und Verhaltensänderungen der Bürger sowie eine verkehrspolitische Steuerung berücksichtigt. <<

- 1) www.de-ipcc.de/256.php
- 2) Umweltbundesamt Pressemitteilung 09/2018
- 3) European Environmental Agency, 2018
- 4) Umwelt- und Prognose-Institut Heidelberg e.V., 2017
- 5) Werksangaben von Audi für neue Motoren der Euro-6d-Temp-Norm
- 6) E. Helmers, J. Leitao, U. Tietge, T. Butler, *Atm. Environ.* 2019, 198, 122–132
- 7) B. Burger, B. Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme ISE, 2018, www.energy-charts.de
- 8) Agora Energiewende, 2018
- 9) Center for Automotive Management (CAM), Branchenstudie Elektromobilität, Bergisch Gladbach, 2019
- 10) IVL Swedish Environmental Research Institute, 2017
- 11) E. Helmers, M. Weiss, *Energy and Emission Control Technologies* 2017, 5, 1–18
- 12) ADAC, 2018
- 13) MWV, *Minerölwirtschaftsverband e.V. Berlin*, 2018,
- 14) www.kopernikusprojekte.de
- 15) K. Wagemann, F. Ausfelder, E-Fuels: Mehr als eine Option, *Dechema, White-Paper*, 2017
- 16) Desertec, 2009

Reinhard Zellner war von 1991 bis 2011 Professor für physikalische Chemie an der Universität Duisburg-Essen und bis 2018 dort als Senior-Professor tätig. Schwerpunkt seiner wissenschaftlichen Arbeiten war die Atmosphärenchemie. Er war Mitglied der Enquete-Kommissionen des Deutschen Bundestags „Schutz der Erdatmosphäre“ und „Schutz des Menschen und Umwelt“, koordinierte das deutsche Ozon-Forschungsprogramm und war Vorsitzender des Sachverständigenkreises des Bundesforschungsministeriums „Globale Umweltaspekte“. Bis 2018 war er auch verantwortlich für die Arbeitsausschüsse „Chemie, Luftqualität und Klima“ und „Feinstäube“ von GDCh, Processnet, Deutscher Bunsengesellschaft für Physikalische Chemie und der Kommission zur Reinhaltung der Luft.

