

# Zukunft der Mobilität: Welche Optionen sind tragfähig?

Der Autoverkehr ist in vielen Städten zu einer hohen Belastung geworden: Lärm, überfüllte Innenstädte, Staus, Feinstaub- und Stickoxidemissionen sorgen für massive negative externe Effekte und haben eine heftige und kontroverse Diskussion um die Zukunft der Mobilität angeregt. Fahrverbote und City-Maut, Elektromobilität und Carsharing oder die Abkehr vom eigenen Auto: Wie soll der Verkehr in Zukunft aussehen? Welche Mobilitätskonzepte können den stetig wachsenden Anforderungen an Klimaschutz, Flexibilität und Kosten Rechnung tragen?

Christian Leßmann\* und  
Arne Steinkraus\*\*

## »Zero Emission«? CO<sub>2</sub>-Emissionen von Elektroautos

Aufgrund der stetig strikter werdenden Emissionsgrenzwerte im Automobilssektor verfolgen nahezu alle Automobilkonzerne derzeit eine mehr oder minder stark ausgeprägte Elektromobilitätsstrategie. Unterstützt werden diese Anstrengungen in Deutschland wie auch in vielen anderen Ländern durch Subventionsprogramme, die unter anderem Steuererleichterungen, Forschungsförderungen, Umweltboni und öffentliche Beschaffungsprogramme beinhalten. Dietrich et al. (2016) haben in ihrem Artikel im *ifo Schnelldienst* (11/2016) dargelegt, dass deren Effektivität und Effizienz durchaus fraglich ist. Inzwischen hat die Zeit gezeigt, dass das selbstgesteckte Ziel der Bundesregierung von einer Million Zulassungen an Elektroautos auf Deutschlands Straßen bis 2020 unerreichbar ist. Die Politik hat so reagiert, dass sie das Ziel erst zwei Jahre später, 2022, erreichen will. Ende 2018 waren jedoch nur rund 90 000 rein elektrisch fahrende Pkw zugelassen, so dass auch die Erreichung dieses Ziels fraglich erscheint.

In diesem Artikel wird diskutiert, ob das Ziel überhaupt aus umweltökonomischer Sicht gerechtfertigt ist. Unumstritten sind positive Wirkungen von Elektroautos auf die lokale Luftqualität in Städten. Rein elektrisch betriebene Fahrzeuge emittieren

keine gasförmigen Schadstoffe wie z.B. Stickoxide. Allein Feinstaubemissionen durch (Gummi-)Abrieb und Wiederaufwirbelungen sind auf vergleichbarem Niveau zu konventionellen Fahrzeugen. Bezogen auf das Treibhausgas CO<sub>2</sub> besteht hinsichtlich der Klimabilanz hingegen große Unsicherheit. Während beispielsweise Hawkins et al. (2013) und die Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V. (FFE 2018) einen positiven Klimaeffekt von Elektrofahrzeugen ab einer Laufleistung von etwa 50 000 km prognostizieren, stellen Autoren wie Ensslen et al. (2017) und Jochem et al. (2015) die positive Klimabilanz für Elektrofahrzeuge zumindest teilweise in Frage. Buchal, Karl und Sinn (2019) sehen gar keinen positiven Klimaeffekt über die Lebensdauer eines Fahrzeugs. In jüngster Zeit beobachten wir eine teils ideologisch getriebene Diskussion in den Medien, die auf Studien mit erheblichen Unterschieden in den Resultaten basiert und in manchen Fällen um fallspezifisches »Schönrechnen« angereichert wird (vgl. Hajek 2019). Wir wollen daher in einem wertfreien, positiven Ansatz der Frage nachgehen, wie die eklatanten Unterschiede zu Stande kommen. Dazu werden in einem ersten Schritt die unterschiedlichen Annahmen hinsichtlich der Emissionen bei der Stromerzeugung diskutiert, die zentral für die Klimabilanz von Elektrofahrzeugen sind. Anschließend führen wir auf Basis der kürzlich veröffentlichten Studie der Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V. (FFE 2018) eine Sensitivitätsanalyse der Schlüsselparameter durch.

### EMISSIONEN IM DEUTSCHEN STROMMIX

Um die Klimabilanz von Elektrofahrzeugen im Vergleich zu Fahrzeugen mit konventionellem Antrieb zu erfassen, ist eine sogenannte Cradle-to-grave-Ana-



Christian Leßmann



Arne Steinkraus

\* Prof. Dr. Christian Leßmann ist Leiter des Instituts für Volkswirtschaftslehre an der Technischen Universität Braunschweig und ifo Forschungsprofessor.

\*\* Dr. Arne Steinkraus ist Lehrbeauftragter an der Technischen Universität Braunschweig.

lyse vonnöten. Das heißt, es müssen sämtliche Emissionen in die Betrachtung einbezogen und bilanziert werden, die beim Bau der Fahrzeuge, in Betrieb und Entsorgung anfallen. Hierzu zählen nicht nur die Emissionen, die bei der Produktion, Stromerzeugung bzw. Verbrennung von Diesel oder Benzin entstehen, sondern ebenfalls sämtliche Vorkettenemissionen. Tatsächlich zeigt sich, dass die Vorkettenemissionen einen erheblichen Teil der Unterschiede zwischen den verschiedenen Studien erklären können.

Um ein Beispiel hierfür zu geben, betrachten wir die spezifischen Kohlendioxidemissionen der deutschen Stromproduktion, da diese Kennzahl entscheidend für die Klimaeffektivität der E-Mobilität ist. So heißt es im Bericht des Umweltbundesamtes (UBA 2018) »Die durchschnittlichen Kohlendioxidemissionen ohne Berücksichtigung des Stromhandelsaldos einer Kilowattstunde Strom [...] [beliefen sich im Jahr 2017 auf] 489 g CO<sub>2</sub> [...]«. An diese Zahl angelehnte Werte für die spezifischen Emissionen beim Betrieb eines Elektrofahrzeugs finden sich unter anderem in Finsterbusch (2019) oder ADAC (2018a). Bereits bei Betrachtung des tatsächlichen Strominlandsverbrauchs, der maßgeblich für die Bewertung sein sollte, resultiert im betrachteten Zeitraum ein um 48 g CO<sub>2</sub>/kWh höherer Wert. Grund für die Differenz ist laut UBA (2018) unter anderem der Handelsaldo. Weiterhin werden in den Zahlen nicht die Vorkettenemissionen, das heißt, die bei Extraktion und Transport der Brennstoffe entstehenden Emissionen berücksichtigt. Dieser Wert entspricht laut ecoinvent-Datenbank etwa 8–10% der geschätzten Stromproduktionsemissionen (vgl. FfE 2018). Fraglich ist ferner, wie die Stromproduktion aus erneuerbaren Energien und Kernenergie bewertet werden muss. Das UBA (2018) unterstellt Vorkettenemissionen von null und nimmt damit implizit an, dass Solarmodule und Windparks ohne Verbrauch von CO<sub>2</sub>-intensiver Energie hergestellt, unterhalten und recycelt werden können. Evans et al. (2009) berechnen Cradle-to-grave-Emissionen von erneuerbaren Energiequellen. Diese liegen bei etwa 25 g CO<sub>2</sub>/kWh für Windenergie, 100 g CO<sub>2</sub>/kWh für Solarenergie und 170 g CO<sub>2</sub>/kWh für Geothermie. Dies sind durchaus bewertungsrelevante Größenordnungen.

#### WEITERE UNSICHERHEITEN

Neben der Frage der spezifischen Emissionen des Energieverbrauchs bleibt in allen Studien unberücksichtigt, dass für die volkswirtschaftliche Bewertung nicht Durchschnittsgrößen, sondern Grenzeffekte relevant sind. Bei höheren Zulassungszahlen von Elektrofahrzeugen kommen zusätzliche Stromverbraucher hinzu. In der kurzen Frist ist unklar, ob die zusätzliche elektrische Energie mit dem Durchschnittswert angesetzt werden kann. Werden die Elektrofahrzeuge überwiegend nachts geladen

(vgl. Ensslen et al. 2017), dann steht ohne effektive Speicher keine Solarenergie zur Verfügung. Bei Windkraft hängt es von der Höhe der Anlage und weiteren Geländeeigenschaften ab, ob die Windausbeute eher tagsüber oder eher nachts höher ist. Leider liegen keine Berechnungen für die Grenzemissionen vor. Jedoch erzeugt dieses Problem eine weitere Unsicherheit bei der Bewertung von Elektrofahrzeugen.

Schließlich muss bei einer volkswirtschaftlichen Betrachtung auch berücksichtigt werden, wie die Verbraucher auf die neue Technologie reagieren. Die Nachhaltigkeitsliteratur diskutiert in diesem Zusammenhang sogenannte Rebound-Effekte, die positiven Umweltwirkungen entgegenlaufen. Die Nutzung grüner Technologien hat beispielsweise zur Folge, dass die variablen Betriebskosten aufgrund des geringeren Energieverbrauchs sinken. So liegen die variablen Kosten bei einem e-Golf bei etwa 5,6 Cent/km, während sie bei einem vergleichbaren Verbrenner mit etwa 9,4 Cent/km fast 70% höher sind (vgl. ADAC 2018c). Zudem führen steigende Skalenerträge in der Produktion zu niedrigeren Anschaffungskosten, was zu einer weiteren Verbreitung der Technologie beiträgt. Dies kann zwar zu einer ggf. gewünschten Substitution von Verbrennern führen, jedoch auch den Gesamtfahrzeugbestand erhöhen. Weiterhin können sinkende Kosten der Elektromobilität Konsumenten zur Anschaffung größerer und schwererer Fahrzeuge mit höherem Stromverbrauch veranlassen oder zu einer intensiveren Nutzung der Fahrzeuge beitragen. Solche Effekte können durchaus sehr groß sein. Für die Elektromobilität ermitteln Bjelle et al. (2018) Rebound-Effekte von durchschnittlich 48%. Das heißt, dass die durch die Elektromobilität zunächst eingesparten Emissionen nahezu zur Hälfte durch Verhaltensanpassungen wieder freigesetzt werden. Ein Teil davon ist auf intensivere Nutzung zurückzuführen.

#### SENSITIVITÄTSANALYSE

Im Folgenden wollen wir untersuchen, welche Auswirkungen die verschiedenen Annahmen auf die Klimabilanz von Elektrofahrzeugen hat. Da die beschriebenen Annahmen allein keine Aussage über die Klimabilanz von Elektrofahrzeugen gegenüber Verbrennern zulassen, erfolgt an dieser Stelle eine Sensitivitätsanalyse der Break-even-Laufleistung im Hinblick auf die Emissionsintensität des getankten Stroms und der Produktionsemissionen der Fahrzeuge. Die Break-even-Laufleistung beschreibt den Kilometerstand eines Fahrzeugs (seit Erstzulassung), ab dem ein Elektrofahrzeug eine bessere Klimabilanz aufweist als ein vergleichbarer Verbrenner. Als Ausgangsbasis werden hierzu die Daten der Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V. (FfE 2018) genutzt. Die Ergebnisse der Berechnungen fasst Tabelle 1 zusammen.

Tab. 1

**Klima-Break-even-Point E-Auto vs. Benziner**

Annahme Energiemix	Spezifische Emissionen im Betrieb g CO <sub>2</sub> /kWh	Klima-Break-Even-Point, E-Auto-Kompaktklasse	
		kleine Batteriekapazität (10 t CO <sub>2</sub> )	große Batteriekapazität (13,6 t CO <sub>2</sub> )
Jahr 2030 (UBA 2016)	320	29 000 km	61 000 km
Jahr 2017 (UBA 2018)	537	44 000 km	90 000 km
Jahr 2017 + Vorkette (UBA 2018, Berechnung der Autoren)	580	48 000 km	99 000 km
Jahr 2017 + Vorkette + realitätsnahen Ladezeitpunkten + erneuerbare Energien (UBA 2018; Ensslen et al. 2017, Berechnung der Autoren)	700	68 000 km	140 000 km

Im Basisszenario ergeben sich für das betrachtete Fahrzeug der Golf-Klasse Produktionsemissionen i.H.v. 10 t CO<sub>2</sub><sup>1</sup> für den Elektroantrieb (3,2 t CO<sub>2</sub> für die Batterie<sup>2</sup> und 6,8 t CO<sub>2</sub>-Äq für das Fahrzeug) beziehungsweise 6,6 t CO<sub>2</sub> für den Benziner. Ausgangspunkt für die Emissionen bei der Batterieproduktion ist die derzeit effizienteste verfügbare Technologie. Für den Betrieb werden die Energiebedarfe des VW Golf (1.5 TSI ACT DSG – 96 kW) und des eGolf (100 kW) gemäß ADAC EcoTests (ADAC 2018b) unterstellt. Diese belaufen sich auf 5,9 l Super Benzin beziehungsweise 17,3 kWh elektrische Energie. Zur Bewertung der Emissionsintensität des Elektrofahrzeugs wird der deutsche Strommix des Jahres 2017 inklusive Vorkette mit 580 g CO<sub>2</sub>/kWh angesetzt. Cradle-to-grave-Emissionen der erneuerbaren Energien und der Kernenergie bleiben zunächst unberücksichtigt. Für den Verbrenner werden Cradle-to-grave-Emissionen in Höhe von 330 g CO<sub>2</sub>/kWh bei einem näherungsweisen Energiegehalt des Benzins von 8,8 kWh/l angenommen. Daraus resultieren kilometerspezifische Emissionen von 100 g/km (Elektrofahrzeug) beziehungsweise 171 g/km (Benziner). Der klimatische Break-even-Point, an dem die Mehremissionen der Produktion des Elektroautos gerade ausgeglichen werden, ergibt sich somit nach einer Fahrleistung von knapp 50 000 km.

Im optimistischen Szenario wird die vom UBA (2016) für das Jahr 2030 prognostizierte Emissionsintensität des Stroms von etwa 320 g CO<sub>2</sub>/kWh unterstellt. Hieraus ergeben sich bei gleicher Batteriekapazität betriebsbedingte Emissionen von 55 g/km. Nehmen wir für den Benziner keinerlei technologische Änderungen an, reduziert sich der klimatische Break-even auf etwa 29 000 km. Wir unterstellen dabei weiterhin, dass Batterien mit der heute bestmöglichen Technologie produziert werden.

Im pessimistischen Szenario unterstellen wir heutige betriebsbedingte Emissionsintensitäten in Verbindung mit realitätsnäheren Ladezeitpunkten von insgesamt 700 g CO<sub>2</sub>/kWh<sup>3</sup>, einem um 50 kWh/

kWh<sup>4</sup> höheren Strombedarf in der Batterieherstellung, der einer heutigen durchschnittlichen Anlage entspricht, sowie eine mit 15 kWh größere Batterie, die die Reichweitennachteile zumindest teilweise ausgleichen kann. Daraus resultieren Produktionsemissionen von etwa 13,6 t CO<sub>2</sub> sowie kilometerspezifische Emissionen von 121 g/km (vgl. UBA 2018; FfE 2018). Der sich in diesem Szenario ergebende Break-even beläuft sich dann auf ca. 140 000 km.

Unsere Berechnungen konzentrieren sich allein auf die Break-even-Laufleistung in Kilometern, ab der Elektrofahrzeuge eine positive CO<sub>2</sub>-Bilanz aufweisen. Welche Lebenslaufleistung Elektrofahrzeuge erreichen können, ist hingegen schwer zu prognostizieren. Im Vergleich zu herkömmlichen Pkw mit Benzin- und Dieselantrieb gibt es keine langfristigen Erfahrungswerte. Jedoch ist davon auszugehen, dass die Fahrzeugbatterie nach etwa 120 000 km ausgetauscht werden muss (vgl. Vallée et al. 2018). Diese Laufleistung markiert folglich den spätesten Break-even, bei dem das Elektrofahrzeug wenigstens klimaneutral im Vergleich zum Verbrenner ist. Legt man diese Werte zugrunde, ist ersichtlich, dass eine positive Klimabilanz zumindest im pessimistischen Szenario durchaus unsicher ist. Insgesamt zeigen unsere Berechnungen, dass die Ergebnisse für den Fall Deutschlands sehr sensibel gegenüber den zu treffenden Annahmen sind. Andere Länder mit besserem Energimix können freilich stärker von der Elektromobilität profitieren.

**FAZIT**

Der Werbeslogan »Zero Emission« ist bei Elektroautos nur bezogen auf lokale Emissionen zutreffend. Die Klimabilanz ist hingegen fraglich und unsicher. Unsere Untersuchung zeigt, dass eigentlich jede gewünschte Aussage über die entsprechende Wahl der Annahmen belegt werden kann. Aufgrund der erheblichen Unsicherheiten bezüglich der Klimabilanz von Elektrofahrzeugen erscheint die direkte Förderung der speziellen Technologie kaum als ein probates Mittel zur Erreichung von Klimazielen sein. Hin-

<sup>1</sup> Sämtliche CO<sub>2</sub> Angaben sind als CO<sub>2</sub>-Äquivalente zu interpretieren.

<sup>2</sup> 105,6 kg CO<sub>2</sub>-Äq/kWh Batteriekapazität bei einer Gesamtkapazität von 30 kWh.

<sup>3</sup> In Anlehnung an Ensslen et al. (2017).

<sup>4</sup> »Kilowattstunde Energiebedarf für die Fertigung einer Kilowattstunde Batteriekapazität.«

gegen würde eine Umweltsteuer auf klimaschädliche Emissionen direkt zu einer Verringerung des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes beitragen, ohne dabei eine bestimmte Technologie zu favorisieren. Es bliebe dem Verbraucher überlassen, ob er auf kleinere, emissionsarme Verbrenner-Pkw umsteigt, den öffentlichen Personennahverkehr nutzt oder eben ein Elektroauto.

## LITERATUR

- ADAC (2018a), »Elektro, Gas, Benzin, Diesel & Hybrid: Die Ökobilanz unserer Autos«, *adac.de*, 20. März, verfügbar unter: <https://www.adac.de/der-adac/motorwelt/reportagen-berichte/auto-innovation/studie-oekobilanz-pkw-antriebe-2018/>, aufgerufen am 4. Februar 2019.
- ADAC (2018b), »ADAC Ecotest – über Stinker und Saubermänner«, *adac.de*, verfügbar unter: [www.adac.de/infotest/tests/eco-test/](http://www.adac.de/infotest/tests/eco-test/), aufgerufen am 4. Februar 2019.
- ADAC (2018c), »ADAC – Autokosten Herbst/Winter 2018/2019«, *adac.de*, verfügbar unter: [https://www.adac.de/\\_mmm/pdf/autokostenuebersicht\\_47085.pdf](https://www.adac.de/_mmm/pdf/autokostenuebersicht_47085.pdf), aufgerufen am 7. März 2019.
- Bjelle, E. L., K. Steen-Olsen und R. Wood (2018), »Climate change mitigation potential of Norwegian households and the rebound effect«, *Journal of Cleaner Production* 172, 208–217.
- Buchal, Chr., H.-D. Karl und H.-W. Sinn (2019), »Kohlemotoren, Windmotoren und Dieselmotoren: Was zeigt die CO<sub>2</sub>-Bilanz?«, *ifo Schnelldienst* 72 (8), 40–54.
- Dietrich, A.-M., Chr. Leßmann und A. Steinkraus (2016), »Kaufprämien für Elektroautos: Politik auf dem Irrweg?«, *ifo Schnelldienst* 69(11), 21–26.
- Ensslen, A., M. Schücking, P. Jochem, H. Steffens, W. Fichtner, O. Wollersheim und K. Stella (2017), »Empirical carbon dioxide emissions of electric vehicles in a French-German commuter fleet test«, *Journal of Cleaner Production* 142, 263–278.
- Evans, A., V. Strezov und T. J. Evans (2009), »Assessment of sustainability indicators for renewable energy technologies«, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13, 1082–1088.
- FFE (2018), *Klima- und Ressourcenentwicklung von Elektrofahrzeugbatterien*, verfügbare unter: [https://www.ffe.de/attachments/article/698/Begleitdokument\\_Klimabilanz\\_Elektrofahrzeugbatterien\\_Ffe.pdf](https://www.ffe.de/attachments/article/698/Begleitdokument_Klimabilanz_Elektrofahrzeugbatterien_Ffe.pdf), aufgerufen am 1. Februar 2019.
- Finsterbusch, St. (2019), »Strom im Tank«, *Frankfurter Allgemeine Zeitung*, 29. Januar, verfügbar unter: <https://www.faz.net/aktuell/wissen/forschung-politik/neuste-klimabilanzen-elektroautos-im-aufwind-15996322.html>, aufgerufen am 4. Februar 2019.
- Hajek, St. (2019), »Die Mythen der E-Auto-Kritiker«, *WirtschaftsWoche*, 24. Januar, verfügbar unter: <https://www.wiwo.de/unternehmen/autos/falsche-zahlen-steile-thesen-die-mythen-der-e-auto-kritiker/23906014.html>, aufgerufen am 1. Februar 2019.
- Hawkins, T. R., B. Singh, G. Majeau-Bettez und A. H. Strømman (2013), »Comparative environmental life cycle assessment of conventional and electric vehicles«, *Journal of Industrial Ecology* 17(1), 53–64.
- Jochem, P., S. Babrowski und W. Fichtner (2015), »Assessing CO<sub>2</sub> emissions of electric vehicles in Germany in 2030«, *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 78, 68–83.
- KBA – Kraftfahrt-Bundesamt (2018), »Verkehr in Kilometern der deutschen Kraftfahrzeuge im Jahr 2017«, verfügbar unter: [https://www.kba.de/DE/Statistik/Kraftverkehr/VerkehrKilometer/verkehr\\_in\\_kilometern\\_node.html](https://www.kba.de/DE/Statistik/Kraftverkehr/VerkehrKilometer/verkehr_in_kilometern_node.html), aufgerufen am 2. Februar 2019.
- KBA – Kraftfahrt-Bundesamt (2019), »Verkehr in Kilometern der deutschen Kraftfahrzeuge im Jahr 2017«, verfügbar unter: [https://www.kba.de/DE/Statistik/Kraftverkehr/VerkehrKilometer/verkehr\\_in\\_kilometern\\_node.html](https://www.kba.de/DE/Statistik/Kraftverkehr/VerkehrKilometer/verkehr_in_kilometern_node.html), aufgerufen am 22. März 2019.
- Umweltbundesamt (2016), *Weiterentwicklung und vertiefte Analyse der Umweltbilanz von Elektrofahrzeugen*, verfügbar unter: [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte\\_27\\_2016\\_umweltbilanz\\_von\\_elektrofahrzeugen.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte_27_2016_umweltbilanz_von_elektrofahrzeugen.pdf), aufgerufen am 7. März 2019.
- Umweltbundesamt (2018), *Climate Change 11/2018. Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 bis 2017*, verfügbar unter: [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2018-05-04\\_climate-change\\_11-2018\\_strommix-2018\\_0.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2018-05-04_climate-change_11-2018_strommix-2018_0.pdf), aufgerufen am 1. Februar 2019.
- Vallée, D., W. Brost, A. Schnettler, R. Kampker und M. Bartsch (2018), »Infrastruktur«, *Elektromobilität*, 87–131.

Manuel Frondel\*

## Plädoyer für eine Städte-Maut

Der Autoverkehr ist in vielen Städten zu einer hohen Belastung geworden. Neben Lärm, durch parkende Autos überfüllte Innenstädte und durch Staus verstopfte Straßen sorgen Feinstaub- und Stickoxidemissionen für massive negative externe Effekte. Mit diesem Begriff beschreiben die Wirtschaftswissenschaften negative Auswirkungen auf Unbeteiligte, ohne dass der Verursacher dafür entsprechende Kosten tragen muss. Um die volkswirtschaftlichen Kosten der Autonutzung verursachergerecht zuzuordnen, wäre eine nutzungsabhängige Finanzierung der Verkehrsinfrastruktur sinnvoll.

So wäre eine entfernungs- und schadstoffabhängige Straßennutzungsgebühr, die zeitlich fein gestaffelt alle negativen externen Effekte wie Stau, Lärm und Luftschadstoffe berücksichtigt, das aus ökonomischer Sicht dazu am besten geeignete Instrument. Darüber hinaus ist eine adäquate Bepreisung öffentlicher Parkplätze die aus ökonomischer Perspektive beste Möglichkeit, um die Überlastung von Parkflächen zu reduzieren. Und eine Städte-Maut, das heißt eine Gebühr für eine Fahrt mit dem Auto in eine Stadt, würde dazu beitragen, dass der öffentliche Raum und die öffentliche Infrastruktur in Städten effizienter genutzt würden.

Aufgrund der Zunahme der Zahl der Autos in Deutschland, die allein zwischen 2007 und 2018 um über 14% anstieg, von 41,2 auf 47,1 Mio. Pkw (KBA 2019), nehmen die durch den Autoverkehr verursachten Probleme auch in Städten weiter zu. Mit der Einführung einer Städte-Maut können diese Probleme, insbesondere die verkehrsbedingten lokalen Schadstoffemissionen, in effizienter Weise bekämpft werden (vgl. Achtnicht, Kesternich und Sturm 2018). Will ein Autofahrer innerstädtische Straßen benutzen, ist bei jedem Mal die Maut zu entrichten. Der jeweilige Mautbetrag sollte dabei idealerweise streng nach dem Schadstoffausstoß des Pkws gestaffelt sein. Die negativen Auswirkungen des Autofahrens, unter denen die Stadtbewohner besonders zu leiden haben und deren Kosten bislang die Gesellschaft zu tragen hat, würden damit, so zeigt die vorhandene empirische Evidenz, verringert.

### EFFEKTE EINER STÄDTE-MAUT

In Städten wie Oslo, Trondheim, Bergen, Stockholm, Göteborg, Mailand, Palermo, Bologna, London oder Singapur wird teils seit Jahrzehnten auf eine Städte-Maut gesetzt. In Stockholm etwa, wo – zunächst für eine Probezeit von sieben Monaten – seit dem Jahr

\* Prof. Dr. Manuel Frondel ist Leiter des Kompetenzbereichs »Umwelt und Ressourcen« am RWI – Leibniz-Institut für Wirtschaftsforschung und außerplanmäßiger Professor für Energieökonomik und angewandte Ökonometrie an der Ruhr-Universität Bochum.

2006 je Einfahrt in die Innenstadt eine uhrzeitabhängige Maut erhoben wird, ging der Autoverkehr in den Jahren 2006–2011 um 18 bis 21% gegenüber dem Jahr 2005 zurück (vgl. Börjesson et al. 2012). Die Maut wird in Stockholm von Montag bis Freitag in der Zeit von 6:30 bis 18:29 erhoben, in den Stoßzeiten von 7:30 bis 8:30 und 16:00 bis 17:30 sind 35 Kronen (ca. 3,3 Euro) zu zahlen, in den übrigen Stunden ist die Maut günstiger, der geringste Mautbetrag liegt bei 15 Kronen (ca. 1,4 Euro). Die Maut wird in beiden Richtungen fällig, das heißt eine Fahrt in die Stadt und zurück kostet zu Stoßzeiten 70 Kronen (ca. 6,6 Euro); maximal sind jedoch nur 105 Kronen bzw. rund 9,9 Euro am Tag fällig. Die kumulierten Mautgebühren sind im Nachhinein zu bezahlen und werden dem Fahrzeughalter am Ende des Folgemonats in Rechnung gestellt. Zur Registrierung wird das Fahrzeugkennzeichen beim Passieren einer Kontrollstation im Innenstadtbereich fotografiert und der Fahrzeughalter ermittelt.

Die probeweise Einführung der Innenstadtmaut in Stockholm ab Januar 2006 ermöglichte der Wissenschaft nahezu ideale Bedingungen zur Evaluierung der Auswirkungen der Maut. Während der siebenmonatigen Testphase wurden von der Stadt Stockholm kontinuierlich die Verkehrsstärke, die Luftqualitätswerte, die Reisezeit, die Einflüsse auf den Parkplatzsuchverkehr sowie den Radverkehr gemessen. Es ließ sich dadurch feststellen, dass die verkehrslenkende Wirkung mit der Maut zusammenhing (vgl. Beser Hugosson, Sjöberg und Byström 2006; Abschlussbericht der Stadt Stockholm). Ein Indiz dafür ist, dass nach Ende der Testphase die Verkehrsmenge wieder auf den ursprünglichen Wert anstieg.

In einem Diagramm des Evaluationsberichts der Stadt Stockholm sind die Veränderungen der Verkehrsmengen gut zu erkennen. Die Reduzierung des Verkehrsaufkommens war je nach Uhrzeit verschieden und lag in der Mautzeit im Durchschnitt bei 22% (vgl. Beser Hugosson, Sjöberg und Byström 2006, S. 6). Die morgendliche Spitze wurde um 16% reduziert, die abendliche Spitze um 24%. Über die gesamten 24 Stunden eines Tages war das Verkehrsaufkommen im April 2006 um 19% geringer als vor Einführung der Maut im April 2005. Dies entspricht einem Rückgang von rund 100 000 Fahrten pro Tag.

Außerhalb der Mautzeiten blieb das Verkehrsaufkommen weitgehend unverändert. Dies zeigt, dass Fahrten nicht in die mautfreien Zeiten verlagert wurden. Dass viele Autofahrer auf die finanziellen Anreize, die durch die Maut gesetzt werden, reagieren, sieht man besonders gut am Ende der Mautzeit um 18:29. Danach steigt das Verkehrsaufkommen sprunghaft an. Offenbar warten Autofahrer bis 18:30, bis sie die Stadt verlassen und arbeiten bis dahin oder nutzen die Zeit anderweitig, etwa zum Einkaufen.

Der unterschiedliche Rückgang des Verkehrsaufkommens in Stockholm zu verschiedenen Tageszeiten zeigt, dass man mit einer auslastungsabhängi-

gen Maut Verkehrsströme in gewissem Maße steuern kann. Mit technisch bereits heute verfügbaren automatischen Bezahlssystemen wäre es möglich, einerseits Erfassungsaufwand und -kosten deutlich zu reduzieren, so dass die Nettoeinnahmen für die Städte höher ausfielen als mit den bestehenden Pkw-Kennzeichenerfassungssystemen. Andererseits würden es technisch versierte Systeme sogar erlauben, eine vom jeweiligen Fahrzeugtyp abhängige individuelle Maut zu erheben und so eine weitaus stärkere Differenzierung als bislang vorzunehmen, etwa nach Schadstoffklassen.

Ein nach Uhrzeiten gestaffeltes Mautsystem wie in Stockholm gibt es seit dem Jahr 2013 auch in Göteborg. Die Maut wird von Montag bis Freitag in der Zeit von 6:00–18:29 erhoben; mautfrei sind, ebenso wie in Stockholm, die Wochenenden, Feiertage, der Tag vor einem Feiertag sowie der Monat Juli. Zu den Hauptverkehrszeiten am Morgen und am Nachmittag wird ein höherer Betrag von 22 Kronen (ca. 2,1 Euro) erhoben. Der jeweils zu zahlende Betrag ist an den Mautstationen abgebildet. Der Höchstbetrag beim mehrmaligem Passieren von Mautstationen liegt bei 60 Kronen (ca. 5,7 Euro) pro Tag. Acht Monate nach Einführung der Maut pendelte sich die Reduktion des Pkw-Verkehrsaufkommens während der Mautzeiten bei 12% ein, wobei der Rückgang während der Stoßzeiten am Morgen leicht höher ausfiel (vgl. Börjesson und Kristoffersson 2015). Außerhalb der Mautzeiten blieb das Verkehrsaufkommen hingegen weitgehend unverändert.

In London wird seit Februar 2003 von Montag bis Freitag in den Zeiten von 7:00 bis 18:00 eine Maut erhoben. Anfänglich betrug sie 5 Pfund pro Tag, aktuell sind es 11,5 Pfund (vgl. Tfl 2019) bzw. rund 13 Euro. Wie in Göteborg und Stockholm werden die Kennzeichen der Autos an den Einfahrtstraßen registriert. Regelmäßige Nutzer bezahlen per Kontoabbuchung oder durch verbilligte Vorauszahlung mit Mengenrabatt. Bei Zahlungsverzug werden empfindliche Strafen in Höhe von 160 Pfund fällig. Diese Strafe reduziert sich auf die Hälfte, wenn man innerhalb einer bestimmten Frist bezahlt. Die Einnahmen aus der Londoner »Congestion Charge« mussten in den zehn Jahren nach ihrer Einführung von Gesetzes wegen in Verbesserungen der Nahverkehrsinfrastruktur investiert werden. Der Verkehrsgesellschaft Transport for London (Tfl) blieb nach Abzug der Betriebskosten regelmäßig ein dreistelliger Millionenbetrag übrig.

Bis Mitte 2005 sank die Zahl der Pkw-Fahrten um rund ein Drittel (vgl. Leape 2006). Im Gegenzug nahm die Zahl der Busfahrgäste um rund 38% zu, wobei die eine Hälfte dieses Anstieges auf die Maut und die andere Hälfte auf eine Verbesserung der Busverkehrsdienstleistungen zurückgeführt wird. Allerdings hat der Pkw-Verkehr in den vergangenen Jahren wieder sein Vor-Maut-Niveau erreicht und es ist die Frage, ob dies ein spezielles Phänomen für London darstellt



Manuel Frondel

oder ob damit auch in anderen Städten zu rechnen sein wird.

Aus einem anderen Motiv als in London wurde im Jahr 2008 eine Maut in Mailand eingeführt. Zwar lag dort auch ein Stauproblem vor, jedoch waren die Umweltprobleme ein größeres Übel, vor allem die hohe Luftverschmutzung. Daher wurde eine nach Abgasklassen gestaffelte Maut für die Zeit von 7:30 bis 19:30 eingeführt. Je schlechter die Abgaswerte, desto höher die Gebühr. Diese ist gestaffelt in fünf Klassen: von vollkommen freigestellten Fahrzeugen wie Biogas, Hybrid-, Elektroautos oder einigen Benzinern bis zu 10 Euro für einige Dieselfahrzeuge. Die Einführung des sogenannten Ecopass geschah vor dem Hintergrund, dass der größte Ballungsraum Italiens, in dem rund 8 Mio. Menschen wohnen, mit 0,4 Autos pro Einwohner und 1,17 Autos pro Familie die höchste Autodichte weltweit aufweist. Neun Monate nach Einführung der Maut befand sich die Zahl der Fahrzeuge, die täglich in die Mautzone fahren, 14,2% unter dem Niveau vor der Einführung (vgl. Rotaris et al. 2010). Die lokalen Schadstoffemissionen sanken beträchtlich: bei Stickoxiden um 17% und bei Feinstaub um 18%. Die Kohlendioxidemissionen verringerten sich um 14%.

### STÄDTE-MAUT IST FAHRVERBOTEN ÜBERLEGEN

Die Erfahrungen aus Stockholm, Göteborg, Oslo und anderen Städten zeigen, dass mit einer Städte-Maut das Pkw-Aufkommen deutlich sinkt. Damit verringern sich sowohl die Emissionen als auch die Häufigkeit von Staus. Diese Wirkungen entfaltet eine Städte-Maut dadurch, dass die Kosten für eine Autofahrt in die Stadt im Vergleich zu den Alternativen steigen. Dies erhöht die Attraktivität der Nutzung anderer Verkehrsmittel und führt zu einem Umstieg auf Verkehrsmittel, mit denen weniger negative externe Effekte verbunden sind, etwa den öffentlichen Nahverkehr (ÖPNV) oder das Fahrrad. Eine Städte-Maut regt zudem zu einer effizienteren Nutzung von Pkws an, etwa durch die Bildung von Fahrgemeinschaften.

Eine Städte-Maut würde den Städten und Kommunen zusätzliche Einnahmen beschermen, die zweckgebunden in den Ausbau des ÖPNV und der Rad- und Fußwege sowie die Finanzierung von Sozialtickets fließen könnten. Den Menschen würden somit mehr, bessere und günstigere Optionen für ihre tägliche Mobilität geboten. Natürlich muss die Mobilität für alle gewährleistet bleiben. Niemand darf ausgeschlossen werden, weil er es sich nicht leisten kann, in die Stadt zu fahren. Wie bei allen Maßnahmen ist deswegen die Dosis entscheidend.

Würde sich die Kommunalpolitik bei der Höhe der Städte-Maut an jenen Beträgen orientieren, die andernorts in Europa erhoben werden, dann würde es sich für jeden Autofahrer um wenige Euro zusätzlich pro Tag handeln. Dies liegt in der Größenordnung der Parkgebühren, die man üblicherweise in städtischen

Parkhäusern zu entrichten hat. Eine Städte-Maut ist anderen Regulierungsinstrumenten, vor allem Fahrverboten, deutlich überlegen, nicht zuletzt, weil Menschen damit Wahlfreiheit genießen und selbst entscheiden können, ob ihnen die Fahrt ins Stadtzentrum mit dem eigenen Pkw so viel wert ist, wie sie an Betriebskosten, vor allem für Sprit sowie an Park- und Mautgebühren, zu zahlen haben.

Die in Deutschland diskutierten oder bereits erlassenen Fahrverbote lassen vielen Menschen hingegen nicht diese Wahlfreiheit. Vielmehr haben sie den Nachteil, dass sie bestimmte Fahrzeuge vom Verkehr ausschließen, ohne dabei die sozialen Folgen zu berücksichtigen oder Alternativen anzubieten. In der Tendenz würde eine Städte-Maut insbesondere Haushalten mit niedrigeren Einkommen, die allein über einen älteren Diesel-Pkw verfügen, einen größeren Handlungsspielraum erlauben als Fahrverbote.

### FAZIT

Die Einführung von Mautsystemen wurde in vielen Städten von großen Vorbehalten der Bürger begleitet. Eine hohe Akzeptanz einer Städte-Maut kann in deutschen Städten vor diesem Hintergrund voraussichtlich nur dann erreicht werden, wenn es gelingt zu vermitteln, dass eine Städte-Maut sowohl eine Antwort auf drohende Fahrverbote liefert als auch Wege aus dem Verkehrskollaps in den Städten aufzeigt. Einerseits werden damit finanzielle Mittel eingenommen, die Investitionen in den öffentlichen Verkehr und die Verkehrsinfrastruktur ermöglichen. Andererseits wird den Menschen ein Anreiz gegeben, diese auch verstärkt zu nutzen, indem die Auto-nutzung unattraktiver gemacht wird. Wie das Beispiel London zeigt, müssen diese finanziellen Mittel jedoch intelligent und nachhaltig eingesetzt werden, um den Erfolg und die Akzeptanz einer Maut langfristig zu gewährleisten.

Kurzfristig wäre es sinnvoll, Modellgebiete auszuweisen, in denen »regulative Experimente« mit Mautmodellen umgesetzt werden können, an deren Ausgestaltung die Bürger umfänglich und von Anfang an beteiligt sind. Gleichzeitig müssen Kommunen die für ambitionierte Modellversuche nötige Unterstützung und nicht zuletzt die notwendige Rechtssicherheit erhalten. Mit einer Erprobung in einzelnen Modellgebieten, etwa im Rahmen der Real-Labor-Initiative des Bundeswirtschaftsministeriums, würde sich die Politik auf den Pfad einer modernen Verkehrspolitik begeben und könnte zugleich sozial ungerechte und ökologisch wenig zielführende Fahrverbote umgehen.

### LITERATUR

Achtnicht, M., M. Kesternich und B. Sturm (2018), »Die »Diesel-Debatte«: Ökonomische Handlungsempfehlungen an die Politik«, *ZEW policy brief*, No. 3.

Beser Hugosson, M., A. Sjöberg und C. Byström (2006), *Facts and Results from the Stockholm Trial – Final version* – December 2006, Congestion Charge Secretariat, City of Stockholm, verfügbar unter: [http://www.stockholmsforsoket.se/upload/Sammanfattningar/English/Final%20Report\\_The%20Stockholm%20Trial.pdf](http://www.stockholmsforsoket.se/upload/Sammanfattningar/English/Final%20Report_The%20Stockholm%20Trial.pdf).

Börjesson, M., J. Eliasson, M.B. Hugosson und K. Brundell-Freij (2012), »The Stockholm congestion charges – 5 years on. Effects, acceptability and lessons learnt«, *Transport Policy* 20, 1–12.

Börjesson, M. und I. Kristoffersson (2015), »The Gothenburg congestion charge. Effects, design and politics«, *Transportation Research Part A* 75, 134–146.

Gehlert, T. (2009), *Straßenbenutzungsgebühren in Städten: Akzeptanz und Mobilitätsverhalten*, Verkehrspsychologie, VS Research, 1.Aufl., Wiesbaden.

KBA (2019), »Jahresbilanz des Fahrzeugbestandes am 1. Januar 2019«, Kraftfahrzeugbundesamt, verfügbar unter: [https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/bestand\\_node.html](https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/bestand_node.html).

Leape, J. (2006), »The London Congestion Charge«, *Journal of Economic Perspectives* 20(4), 157–176.

Rotaris, L., R. Danielis, E. Marcucci und J. Massiani (2010), »The urban road pricing scheme to curb pollution in Milan, Italy: Description, impacts and preliminary cost-benefit analysis assessment«, *Transportation Research Part A* 44, 359–375.

TfL (2019), »Transport for London«, verfügbar unter: <http://www.tfl.gov.uk/roadusers/congestioncharging/6723.aspx>.

## Martin R. Stuchtey\* und Manuel Braun\*\* Circular Mobility – Kreislaufwirtschaft als Wegbereiter der Mobilitätswende

*Als Gesellschaft und Industrie beginnen wir zu verstehen, dass ein tragfähiges Zukunftsmodell der Mobilität so schnell wie möglich, und schneller als von den heutigen Mobilitätslieferanten erwartet, ressourcenschonend und klimaneutral angeboten werden muss. Die derzeitige Diskussion fokussiert sich auf Antriebsart und -effizienz. Dabei ist eine umfangreiche Ressourcenentkopplung des Systems »Mobilität« erforderlich. Der Kerngedanke der Kreislaufwirtschaft – eine Ressourcenentkopplung in Verbindung mit maximaler wirtschaftlicher Nutzung aller Ressourcen – ist dabei ein essentieller, heute vernachlässigter Hebel und gleichzeitig ein attraktiver Weg, hochwertige Mobilitätsangebote tatsächlich nachhaltig anzubieten. Dies erfordert eine Neudefinition des Lösungsraums – vom Auto zum integrierten System.*



Martin R. Stuchtey



Manuel Braun

Spaziert man entlang herrschaftlicher Häuser in Essen, Birmingham oder Pittsburgh, dann spürt man den Hauch einer untergegangenen Epoche: dem Kohlezeitalter. Wie wird es sein, wenn wir heute in 20 Jahren durch München, Stuttgart oder Hannover spazieren. Bewundern wir den Wohlstand einer verflochtenen Epoche, oder befinden wir uns in einem vitalen Wirtschaftsraum, der eine radikale Wende gemeistert und den technologischen und ökologischen Wandel zum eigenen Vorteil genutzt hat. Um nichts weniger geht es beim Übergang der traditionellen Automobilindustrie in ein zukunftsfähiges Mobilitätssystem. Die deutsche Autoindustrie ist ein wesentlicher Treiber unseres gesamtwirtschaftlichen Wohlstands. Seit den 1970er Jahren übersetzt sich die kontinuierliche Innovationskraft in reales Wachstum und eine Technologieführerschaft im Bereich der konventionellen Antriebe. Mehr als 80% der motorisierten Personenkilometer werden durch Autos zurückgelegt, und ein typischer Haushalt gibt ca. 15% des Einkommens für den eigenen Pkw aus (vgl. Ellen MacArthur Foundation et al. 2015). Die Autoindustrie verarbeitet ca. 25% des Aluminiums, 12% des Stahls und 9% des Plastiks, das in Europa jährlich verbraucht wird (vgl. Material Economics 2018). Die zugrunde liegende Wertschöpfungskette beschäftigt allein in Deutschland ca. 820 000 Personen, fast jeder siebte Arbeitsplatz im Verarbeitenden Gewerbe (vgl. VDA 2018; Statistisches Bundesamt 2018). Diese Zahlen unterstreichen die Bedeutung und Verantwortung der umsatzstärksten deutschen Industriebranche, die Zukunft der Mobilität erfolgreich mitzugestalten. Derzeit verschieben

\* Prof. Dr. Martin R. Stuchtey ist Professor für Ressourcenstrategie und -management an der Universität Innsbruck.

\*\* Dr. Manuel Braun ist Experte für neue Kreislauf-, Energie- und Mobilitätssysteme.

technologische, gesellschaftliche und regulatorische Trends die traditionellen Branchengrenzen. Die Automobilindustrie verändert sich immer mehr in einen vernetzten Mobilitätssektor, und es zeichnet sich ein Wendepunkt ab (vgl. Dhawan et al. 2019).

Digitale Geschäftsmodelle etablieren sich, wie z.B. Sharing-Konzepte für Autos oder Fahrräder, Parkplatzmanagement oder intermodale Mobilitätsplattformen. Der Wechsel hin zur Elektromobilität beschleunigt sich und nimmt von Batteriebetrieb bis Brennstoffzelle unterschiedliche Formen an, was technologische Exzellenz in neuen Dimensionen erfordert. Durch die stärkere Vernetzung zwischen Fahrern, Autos und der Umgebung entsteht ein neues Ökosystem, bei dem der Kundennutzen an Bedeutung gewinnt und die Grenzen im Mobilitätsmix fließend werden. Autonomes Fahren wird mittelfristig Realität werden und Mobilität grundlegend verändern (vgl. MCFM 2019). Zudem zeichnet sich aus Konsumentensicht ein Generationenwandel ab, bei dem der Zugang zu Produkten und Services eine wichtigere Rolle spielt als Eigentum (vgl. Francis und Hoefel 2018). Nicht zuletzt ist an den Ergebnissen der Europawahl 2019 ersichtlich, dass der Klimawandel und ein entsprechender Handlungsbedarf die Breite der Bevölkerung bewegen.

Zusammen betrachtet haben diese Trends disruptiven Charakter und sind für Autohersteller (OEM), Technologieunternehmen und junge Start-ups fundamentale Herausforderungen, aber auch strategische Chancen. Natürlich werden Verbrennungsmotoren weiterhin eine Rolle spielen, doch sollte man einer inkrementellen Version der mobilen Zukunft eine radikalere gegenüberstellen: Was, wenn bis 2030 die großen IT-Dienstleister Mobilitätsplattformen dirigieren, so effektiv wie die Medienplattformen heute. Und was, wenn bis 2030 die chinesischen OEMs Elektrofahrzeuge in einer Stückzahl herstellen, die eine europäische Wettbewerbsfähigkeit unmöglich scheinen lassen. Keine gänzlich abzuweisenden Annahmen. Wer die deutsche Innovationsführerschaft im Mobilitätssektor tatsächlich schützen und ausbauen will, muss sich radikaler auf nachhaltige Antriebslösungen ausrichten sowie den hohen Ressourceneinsatz und strukturelle Schwächen im derzeitigen System reduzieren.

### STRUKTURELLE VERSCHWENDUNGEN IN DER AUTOMOBILINDUSTRIE

In der Automobilindustrie sind Ressourcenströme heute weitestgehend linear und geprägt von struktureller Verschwendung – vor allem im Sinne der Materialauslastung, Energieeffizienz, und Landnutzung. Basierend auf Analysen der Ellen MacArthur Foundation (2015), parkt ein typisches Fahrzeug 92% der Zeit und wird nur zu 8% aktiv genutzt, wovon wiederum ein substantieller Teil auf Parkplatzsuche oder im Stau verbracht wird. Pro Fahrt werden

nur ca. 1,5 Plätze besetzt. Aus Energieperspektive besteht zudem die Herausforderung, dass nur ein geringer Teil der kinetischen Energie aus dem Tank effektiv für den Transport von Personen eingesetzt wird, denn mehr als 85% entfallen auf Energieverluste des Motors, Aerodynamik, oder Rollwiderstand. Mit Blick auf die zugrunde liegende Flächennutzung muss zudem in Frage gestellt werden, ob bis zu 50% Straßen- und Parkplatzflächen in vielen Innenstädten mittelfristig tragfähig sind. Aus gesellschaftlicher Sicht repräsentiert der Straßenverkehr mit jährlich mehr als 25 000 Toten in Europa zudem ein nicht zu verachtendes Risiko (vgl. Europäische Kommission 2018). Dies wird nicht zuletzt aus ökologischer Sicht verstärkt, denn die Luftverschmutzungswerte des gesamten Transportsektors erreichen für viele Stadtbewohner Werte, die die WHO als kritisch einstuft, und verursachen ca. 27% der europäischen Treibhausgasemissionen (vgl. EEA 2018; 2019).

Am aktuellen Wendepunkt der Mobilität besteht nun die einmalige Chance, diese systeminhärente Ressourcenverschwendung nachhaltig zu optimieren. Zum einen zeigt allein die wirtschaftliche Größe des Mobilitätssektors, welches Potenzial die richtigen Weichenstellungen für eine nachhaltige Mobilität haben können. Zum anderen verdeutlichen die dargestellten Trends den zeitkritischen Handlungsbedarf. Im Gegensatz zur linearen Ressourcennutzung ermöglichen die Prinzipien der Kreislaufwirtschaft einen höheren ökonomischen Nutzen aus den Produkten und der Infrastruktur unserer größten Industriebranche zu ziehen – und so wichtige Impulse für ein langfristig tragfähiges Mobilitätssystem zu setzen.

### PRINZIPIEN DER KREISLAUFWIRTSCHAFT ALS WEGBEREITER NACHHALTIGER MOBILITÄT

*Circular Mobility* beschreibt die Idee einer Kreislaufwirtschaft (*Circular Economy*) im Mobilitätssektor und steht für einen Systemwandel, weg von einer linearen, hin zu einer zirkulären Wertschöpfung. Die Prinzipien der *Circular Mobility* sind vielseitig und lassen sich in drei Kategorien betrachten:

(1) **Optimierung von Materialeinsatz und Produktdesign** – um bei Herstellung und Nutzung weniger Ressourcen zu verbrauchen, diese länger im System zu halten und schließlich zu recyceln, so dass sie im nächsten Produktionszyklus bestmöglich wiederverwendet werden können und die Emissionsbilanz gesamthaft verbessern. Für ein nachhaltiges Mobilitätssystem sind hier vor allem vier Elemente hervorzuheben. Erstens, **Leichtbau-Werkstoffe und Design**, insbesondere hochqualitativer Stahl, Aluminium, Magnesium oder kohlefaserverstärkter Kunststoff (CFK). Diese Materialien finden in der Fahrzeugproduktion zunehmend Anwendung, um neben Gewichtersparnissen auch Vorteile in Aerodynamik, Lebensdauer und Energieverbrauch zu erzielen (z.B. CFK-Materialien im BMW i3 und i8).



Abb. 1

**Prinzipien der Kreislaufwirtschaft**

Optimierung von Materialeinsatz und Produktdesign	Erhöhung der Ressourceneffizienz durch zirkuläre Geschäftsmodelle	Verbesserung der System-basierten Integration
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Leichtbau-Werkstoffe und Design</li> <li>• Remanufacturing</li> <li>• Elektrifizierung</li> <li>• Circular Cars</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sharing- und Pooling-Modelle</li> <li>• Konnektivität und Autonomes Fahren</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Integration von öffentlichem Verkehr mit neuen Mobilitätslösungen</li> <li>• Smart Cities</li> </ul>

Quelle: Darstellung der Autoren.

Die relativ teuren Leichtbaumaterialien werden vor allem in einer zukünftigen Mobilitätswelt attraktiver, in der mit einer höheren Fahrzeugauslastung durch Sharing-Konzepte oder Autonomes Fahren zu rechnen ist. Durch den Einsatz hochwertiger Materialien wird zudem, als zweiter Hebel, auch die **Wiederaufbereitung und -verwertung (Remanufacturing)** von Bauteilen an Bedeutung gewinnen. Hierbei ist es für OEMs zunehmend relevant sich direkt zu engagieren, sowohl aus ökonomischer und umweltpolitischer Sicht, aber auch zur Absicherung der Wertschöpfungskette im aktuell komplexen Ersatzteilmarkt. Als Vorreiter betreibt Renault schon seit einigen Jahren einen hochprofitablen Produktionsstandort zur Zerlegung und Wiederaufbereitung von Motoren und Getriebegehäuse (vgl. Renault 2014). Auch Volvo achtet im Produktdesign verstärkt auf eine höhere Wiederverwertbarkeit (vgl. Volvo 2016).

Als dritter Hebel befindet sich die **Elektrifizierung von Fahrzeugen** auf einem Wachstumspfad und verändert die Materialanforderungen und die Emissionsbilanz. Im Jahr 2017 wurden erstmals mehr als 1 Mio. Elektrofahrzeuge (EV) global verkauft, wobei China die Führungsposition einnimmt (vgl. Hertzke et al. 2018). Dies erstreckt sich über unterschiedliche Technologien, insbesondere batteriebetriebene Elektrofahrzeuge (BEV), reine Hybridfahrzeuge (HEV) und Plug-in-Hybride (PHEV), sowie Brennstoffzellen-basierte Fahrzeuge (FCEV). Trotz aktuell höheren Anschaffungskosten (im Vergleich zu konventionellen Antriebstechnologien) werden BEVs durch Skaleneffekte, Innovationen bei Batterietechnologien und niedrigere Betriebskosten zunehmend wettbewerbsfähig. Führende OEMs wie VW haben angekündigt bis 2030 den E-Anteil in der Flotte auf mehr als 40% zu steigern (vgl. Volkswagen 2019). Im laufenden Betrieb zeigen batterieelektrische Motoren eine bessere CO<sub>2</sub>-Bilanz und Energieeffizienz als Verbrenner. Unter Beachtung der gesamten Prozesskette inklusive Batterieproduktion und Energiebereitstellung werden diese Vorteile zwar relativiert und kritisch diskutiert – jedoch werden technologische Weiterentwicklungen und Infrastrukturausbau die Vorteile der Elektromobilität nachhaltig stärken: Die Struktur der Stromproduktion wird sich planmäßig weiter in Richtung erneuerbare Energien verschieben (vgl. Umweltbundesamt 2018). Des Weiteren können BEVs aus Sys-

temsicht einen Beitrag als Zwischenspeicher leisten oder gezielt dezentral erzeugten Ökostrom nutzen. Da Lithium-Ionen-Batterien aufgrund des Rohstoffeinsatzes und der energieintensiven Herstellung eine zentrale Rolle für die Klimabilanz spielen, wird es entscheidend sein, die Emissionen in der Batterieproduktion gezielt zu optimieren, das Akku-Recycling zu fördern und für nicht mehr im EV-Bereich nutzbare Batterien einen Sekundäreinsatz als stationäre Energiespeicher zu entwickeln (vgl. Engel et al. 2019). An diesem Punkt wird auch deutlich, dass regulatorische Hilfestellungen (z.B. Recycling- & Design-Standards) für eine nachhaltige Elektromobilität von ebenso entscheidender Bedeutung sind wie der Infrastrukturausbau oder effektive Anreizsysteme. Entsprechende Steuerungsmechanismen sollten dabei nicht nur auf reine BEVs ausgerichtet sein, sondern auch Hybride und FCEVs berücksichtigen.

Die Elektrifizierung ist kein Allheilmittel und muss immer mit der entsprechenden strategischen Differenzierung betrachtet werden (z.B. Energiemix-Entwicklungen). Jedoch spielen EVs eine zentrale Rolle als Wegbereiter des Wandels zur nachhaltigen Mobilität. Das gemeinsame Ziel der Optimierung von Materialeinsatz und Produktdesign sollten Fahrzeuge sein, die im Sinne von »**Circular Cars**« eine Emissionsneutralität anstreben und auf einen hohen Wiederverwertungsgrad und lange Lebensdauer ausgelegt sind. Dies wird vor allem im Kontext neuer Geschäftsmodelle und dem Autonomen Fahren relevant, die den Fokus auf die Gesamtbetriebskosten über Lebenszeit und eine serviceorientierte Nutzung lenken.

(2) **Erhöhung der Ressourceneffizienz durch zirkuläre Geschäftsmodelle.** Die Digitalisierung treibt zunehmend die Entstehung neuer Geschäftsmodelle, die eine wichtige Rolle im Rahmen des Circular-Mobility-Gedankens spielen (vgl. Stuchtey et al. 2016). Hier befinden sich vor allem Sharing-Modelle europaweit auf Wachstumskurs. Allein in Deutschland sind bereits ca. 2,5 Millionen Autofahrer Kunden von Sharing-Dienstleistern (vgl. Bundesverband CarSharing 2019) – und Beispiele für Innovationen im Markt sind vielseitig: (a) Flottenbetreiber wie Share Now (BMW/Daimler) oder Flinkster (Dt. Bahn) haben eigene Fuhrparks mit zusammen mehr als 10 000 Autos in den größten deutschen Städten. (b) Ride-Hailing Ser-

vices wie Uber oder Lyft bieten virtuelle Plattformen an, über die nach Bedarf Kurzfahrten in Privatfahrzeugen gebucht werden können. (c) Peer-to-Peer Car-Sharing-Netzwerke wie Drivy ermöglichen privaten Fahrzeugbesitzern ihr Auto in bestimmten Zeiträumen zu vermieten, in denen sie es selbst nicht benötigen. (d) Car-Pooling-Dienstleister wie BlaBlaCar vermitteln unkompliziert Mitfahrgelegenheiten auch über größere Entfernungen.

Aus Perspektive der *Circular Mobility* führen all diese Sharing-Modelle zu einem höheren Ressourcennutzungsgrad, sowohl im Sinne der aktiven Nutzungsdauer als auch der Platzbesetzung in den Fahrzeugen, und bieten dem Nutzer eine grundsätzliche Alternative zur privaten Anschaffung. Sharing-basierte Geschäftsmodelle erstrecken sich zudem erfolgreich auf weitere Mobilitätslösungen wie Fahrräder (z.B. Call-a-Bike, NextBike) oder Roller (z.B. Emmy, Coup) und in Zukunft auch Tretroller (z.B. Lime, Voi).

Technologischer Fortschritt rund um das autonome Fahren und eine verbesserte Konnektivität zwischen Fahrzeugen werden weitere zirkuläre Geschäftsmodellinnovationen ermöglichen. Zum Beispiel werden Robotaxis nach dem beschriebenen Prinzip die Ressourcenauslastung und Energieeffizienz im Fahrbetrieb deutlich erhöhen. Zudem wird erwartet, dass autonome Fahrzeuge das Staurisiko um 50% senken und sich Gesundheitsvorteile durch 90% weniger Unfälle ergeben werden (vgl. Ellen MacArthur Foundation et al. 2015; 2017).

**(3) Verbesserung der System-basierten Integration.** Das Szenario einer kreislaforientierten Mobilitätslandschaft geht über rein technologische und geschäftsmodellbasierte Verbesserungen hinaus und optimiert die Verflechtungen hin zu einem integrierten Mobilitätssystem, in dem öffentliche Verkehrsmittel mit neuen Mobilitätslösungen nahtlos ineinandergreifen (vgl. Ellen MacArthur Foundation et al. 2017). Vor allem in urbanen Regionen muss ein schneller und einfacher Wechsel zwischen Individualverkehr, öffentlichem Nahverkehr, und Sharing-Diensten ermöglicht werden und sich gegenseitig verstärken. Digitale Schnittstellen können die multimodale Reiseplanung gleichzeitig so steuern, dass z.B. Berufspendler schneller und einfacher als heute ihr Ziel erreichen. Städte nehmen hier eine Schlüsselrolle ein und müssen das Mobilitätssystem langfristig in ein vernetztes und intelligentes Stadtkonzept (Smart City) integrieren. Eine Kernherausforderung wird hier zusätzlich sein, negative Systemeffekte zu verhindern (z.B. eine ungleichmäßige Verschiebung von öffentlichem Verkehr auf Individualverkehr). Deswegen muss der Ausbau öffentlicher Verkehrsmittel in gleichem Maße vorangetrieben werden wie die Förderung neuer Mobilitätsformen, die multimodale Integration mit praktischen Lösungen für die letzte Meile, und eine intelligente Verkehrssteuerung (vgl. Stuchtey et al. 2016). In bestimmten Situationen können auch regu-

latorische Eingriffe sinnvoll sein. Der Kapitalbedarf für Innovationen und Infrastrukturausbau ist signifikant, jedoch bieten sich hier attraktive Investitionschancen für vielseitige Interessengruppen (vgl. Ellen MacArthur Foundation et al. 2017).

Der Grundbaustein der Mobilitätswende sind Städte – von München über Shanghai bis Accra. In allen wird der Mobilitätsbedarf weiterhin zunehmen, in einigen explosionsartig. In diesen Städten müssen sich neue Technologien und Geschäftsmodelle zu neuen Plattformen zusammenfügen. Diese mitzugestalten, ist das Wettbewerbsfeld der Zukunft. Daher wird es entscheidend sein, frühzeitig die richtigen Koalitionen und Konsortien zu formen, die ein konsequentes Umdenken nach den Prinzipien der *Circular Mobility* vorantreiben und beschleunigen. Die Politik kann helfen, indem sie diese neuen Partnerschaften fördert, Rahmenbedingungen setzt und denjenigen Anreize bietet, die viel Mobilität mit geringstem Ressourceneinsatz verfügbar machen. Denn diese Fähigkeit, nicht der Bau des besten Autos, zeichnet die Gewinner der neuen Mobilitätswelt aus.

## LITERATUR

Bundesverband CarSharing (2019), *CarSharing-Statistik 2019*, Pressemitteilung, 20. Februar, verfügbar unter: [https://carsharing.de/sites/default/files/uploads/pm\\_carsharing-statistik\\_2019\\_0.pdf](https://carsharing.de/sites/default/files/uploads/pm_carsharing-statistik_2019_0.pdf).

Dhawan, R., R. Hensley, A. Padhi und A. Tschiesner (2019), »Mobility's second great inflection point«, *McKinsey Quarterly* (1), verfügbar unter: <https://www.mckinsey.com/~media/McKinsey/Industries/Automotive%20and%20Assembly/Our%20Insights/Mobilitys%20second%20great%20inflection%20point/Mobilitys-second-great-inflection-point-vf.pdf>.

Ellen MacArthur Foundation, Stiftungsfonds für Umweltökonomie und Nachhaltigkeit (SUN) und McKinsey Center for Business and Environment (2015), *Growth within: A circular economy vision for a competitive Europe*, Juli, verfügbar unter: [https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/publications/EllenMacArthurFoundation\\_Growth-Within\\_July15.pdf](https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/publications/EllenMacArthurFoundation_Growth-Within_July15.pdf).

Ellen MacArthur Foundation, Stiftungsfonds für Umweltökonomie und Nachhaltigkeit (SUN) und SYSTEMIQ (2017), *Achieving Growth within: €320-billion circular economy investment opportunity available to Europe up to 2025*, Januar, verfügbar unter: <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/publications/Achieving-Growth-Within-20-01-17.pdf>.

Engel, H., P. Hertzke und G. Siccardo (2019), *Second-life EV batteries: The newest value pool in energy storage*, McKinsey Center for Future Mobility, April, verfügbar unter: <https://www.mckinsey.com/~media/McKinsey/Industries/Automotive%20and%20Assembly/Our%20Insights/Second%20life%20EV%20batteries%20The%20newest%20value%20pool%20in%20energy%20storage/Second-life-EV-batteries-The-newest-value-pool-in-energy-storage.pdf>.

Europäische Kommission (2018), *Sicherheit im Straßenverkehr*, Pressemitteilung, 10. April, verfügbar unter: [http://europa.eu/rapid/press-release\\_IP-18-2761\\_de.pdf](http://europa.eu/rapid/press-release_IP-18-2761_de.pdf).

EEA – European Environment Agency (2018), *Greenhouse gas emissions from transport*, verfügbar unter: <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/transport-emissions-of-greenhouse-gases/transport-emissions-of-greenhouse-gases-11>, aufgerufen am 30. Mai 2019.

EEA – European Environment Agency (2019), *Air quality in Europe – 2018 report*, Januar, verfügbar unter: <https://www.eea.europa.eu/publications/air-quality-in-europe-2018/download>.

Francis, T. und F. Hoefel (2018), *True Gen: Generation Z and its implications for companies*, McKinsey & Company Consumer Packaged Goods, November, verfügbar unter: <https://www.mckinsey.com/~media/McKinsey/Industries/Consumer%20Packaged%20Goods/Our%20Insights/True%20Gen%20Generation%20Z%20and%20its%20implications%20for%20companies/Generation-Z-and-its-implication-for-companies.pdf>.

Hertzke, P., N. Müller, S. Schenk und T. Wu (2018), *The global electric-vehicle market is amped up and on the rise*, McKinsey Center for Future

Mobility, April, verfügbar unter: <https://www.mckinsey.com/~media/McKinsey/Industries/Automotive%20and%20Assembly/Our%20Insights/The%20global%20electric%20vehicle%20market%20is%20amped%20up%20and%20on%20the%20rise/The-global-electric-vehicle-market-is-amped-up-and-on-the-rise-web-final.pdf>.

Material Economics (2018), *The circular economy – a powerful force for climate mitigation*, Juni, verfügbar unter: <https://media.sitra.fi/2018/06/12132041/the-circular-economy-a-powerful-force-for-climate-mitigation.pdf>.

MCFM – McKinsey Center for Future Mobility (2019), *Race 2050 – A vision for the European automotive industry*, Januar, verfügbar unter: <https://www.mckinsey.com/~media/mckinsey/industries/automotive%20and%20assembly/our%20insights/a%20long%20term%20vision%20for%20the%20european%20automotive%20industry/race-2050-a-vision-for-the-european-automotive-industry.pdf>.

Renault (2014), *Renault receives circular economy honor*, Pressemitteilung, 3. Juli, verfügbar unter: <https://media.group.renault.com/global/en-gb/groupe-renault/media/pressreleases/59603/renault-recoit-le-trophee-de-leconomie-circulaire>.

Statistisches Bundesamt (2018), *Beschäftigte im Verarbeitenden Gewerbe im Juli 2018*, Pressemitteilung Nr. 348, 17. September, verfügbar unter: [https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2018/09/PD18\\_348\\_421.html](https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2018/09/PD18_348_421.html).

Stuchtey, M. R., P.-A. Enkvist und K. Zumwinkel (2016), *A good disruption – Redefining growth in the twenty-first century*, Bloomsbury, London.

Umweltbundesamt (2018), *Erneuerbare Energien in Deutschland – Daten zur Entwicklung im Jahr 2017*, März, verfügbar unter: [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/180315\\_uba\\_hg\\_einzahlen\\_2018\\_bf.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/180315_uba_hg_einzahlen_2018_bf.pdf).

VDA (2018), *Verband der Automobilindustrie Jahresbericht 2018 – Die Automobilindustrie in Zahlen und Fakten*, November, verfügbar unter: [https://www.vda.de/dam/vda/publications/2018/VDA\\_JB\\_2018\\_DE.pdf](https://www.vda.de/dam/vda/publications/2018/VDA_JB_2018_DE.pdf).

Volkswagen (2019), *Jahrespressekonferenz 2019 – Reden*, März, verfügbar unter: [https://www.volkswagenag.com/presence/investorrelation/publications/annual-media-conference/2019/reden\\_pr%C3%A4sentationen/Jahrespressekonferenz\\_2019\\_Reden\\_deutsch.pdf](https://www.volkswagenag.com/presence/investorrelation/publications/annual-media-conference/2019/reden_pr%C3%A4sentationen/Jahrespressekonferenz_2019_Reden_deutsch.pdf).

Volvo (2016), *Reassessing reman*, *Volvo Group Magazine* (1), 34–41, verfügbar unter: <https://www.volvogroup.com/content/dam/volvo/volvo-group/markets/global/en-en/news-and-media/volvo-group-magazine/news-and-media-vgm-1-2016-operations.pdf>.

Thomas Hamacher\*

## Das Auto. Diagnose: Emotional auffällig

### Plädoyer für einen nüchternen Verkehr

Die Diskussion um die Zukunft der Mobilität ist in vollen Zügen entbrannt. Die Diskussion dreht sich dabei um neue Antriebskonzepte für Autos und dabei insbesondere über die Sinnhaftigkeit der Elektromobilität und der weiteren Anwendung des Dieselantriebs. Diese Diskussion ist von großer Bedeutung und sollte insbesondere durch saubere Lebenszyklusanalysen beider Technologien für heutige und zukünftige Anwendungen geführt werden. Sie muss aber von einer viel breiteren Diskussion um die Gesamtentwicklung der Mobilität begleitet werden. Insbesondere stellt sich die Frage, ob das eigene Auto langfristig durch die Leistungen von Mobilitätsdienstleistern ersetzt werden kann und ob der Flugverkehr in Europa weiter ausgebaut wird oder hier auch andere technische Lösungen denkbar sind. Die Diskussion kann aber nicht bei der Frage nach Technologien allein stehenbleiben, sondern muss die gesellschaftliche Bedeutung des Autos insgesamt betrachten. Aus langfristigen Visionen eines sehr nüchternen Mobilitätskonzepts lassen sich dann erste Schritte zu einer Transformation der Systeme ableiten bzw. sollte die Vision auch zur Triebkraft der Transformation werden.

Die folgende Betrachtung ist als eine Anregung zu verstehen, die gesellschaftlichen mit den technischen Fragen gemeinsam zu betrachten. Sie ist mehr auf einem essayistischen als einem wissenschaftlichen Niveau und sollte auch so gelesen werden. Der Güterverkehr wird hier nicht behandelt, muss aber in das Gesamtbild eingefügt werden.

#### KURZE GESCHICHTE DES AUTOS

Am 18. Mai 2019 titelte die *FAZ* einen Artikel mit »Krach zwischen BMW und FC-Bayern«. BMW hatte versucht den langjährigen Sponsor des FC-Bayern München, die Ingolstädter AUDI AG aus dem Rennen zu werfen und an ihre Stelle zu treten. Der Einkaufspreis beträgt laut *FAZ* 60 Mio. Euro im Jahr. Als Hochschullehrer rechnet man diese Summe gleich mal in Doktoranden um und kommt auf die stolze Zahl von etwa 800 Doktoranden. BMW und Audi könnten also, wenn sie zusammenlegen und auf das Sponsoring des Profifußballs verzichten, spielend gemeinsam ein Forschungszentrum mit 800 Doktoranden und anderen Wissenschaftlern gründen und hätte dann noch mal 60 Mio. für Investitionen, um die Zukunft der Mobilität zu erforschen. Ein Anliegen, das dringender denn je scheint. Aber sie geben die-

\* Prof. Dr. Thomas Hamacher Professor für Energiesystemforschung an der Technischen Universität München.



Thomas Hamacher

ses Geld lieber für einen Profisport aus, der gelinde gesagt, im Geld ertrinkt und darüber immer mehr seine Schönheit verliert. Warum?

Gehen wir dafür einmal zurück in die Geschichte der Automobilität, die in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts liegt. Bekanntlich ist das Auto mit Verbrennungsmotor eine deutsche Erfindung (vgl. König 1997) und hat bis heute das deutsche Wirtschaftsleben so stark dominiert (vgl. Statistisches Bundesamt 2019) wie kein anderes Produkt.

Seinen ersten Siegeszug feierte das Automobil aber in Frankreich (vgl. König 1997). Dies lag zum einen an der mondänen Hauptstadt Paris. Hier gab es genug Menschen mit der notwendigen Kaufkraft, aber auch dem Willen den Reichtum entsprechend zur Schau zu stellen. Dabei darf man davon ausgehen, dass die neu erworbenen Autos mehr am Sonntagnachmittag im Bois de Boulogne und den breiten Avenuen ausgefahren wurden als im alltäglichen Einsatz, um schnell Strecken zu überbrücken. Auch die industrielle Basis in und um die Hauptstadt half der Produktion und der weiteren Entwicklung der neuen Technologie. Die Eisenbahnen waren in Frankreich nur sternförmig auf die Hauptstadt ausgerichtet. Damit bot sich als eine erste praktische Anwendung die Überbrückung von Tangentialverbindungen an. In Frankreich gab es aber auch die bis heute lebendige Tradition des Radsportes, die jetzt auch schnell auf Autorennen erweitert wurde. Das erste Autorennen fand am 22. Juli 1894 statt und führte von Paris nach Rouen. Daran waren aber auch alle möglichen anderen Antriebstechniken beteiligt wie das siegreiche Dampffahrzeug. Daneben entstanden Autosalons, auf denen die neusten Modelle bewundert werden konnten, und Autozeitschriften unterhielten die interessierten Leser mit den neusten Entwicklungen, eben auch jene, die sich kein Auto leisten konnten. Damit war ein Produkt in der Welt, das für Reichtum und Sportlichkeit stand.

Wer zu diesem Zeitpunkt eine Reise antreten wollte, verließ sich lieber auf die Eisenbahn, die mit deutlich höherer Geschwindigkeit und Zuverlässigkeit auch weitere Strecken überwand. Das Auto war ein Freizeitprodukt.

Mit der Optimierung der Produktion und dem Bau des Ford T Modells ab 1908 (vgl. Braun 1999) wurde die Technik dann für eine breite Käuferschaft – erst nur in den USA, dann nach dem Zweiten Weltkrieg auch in Deutschland – erschwinglich. Die USA wurde in Ihrer Struktur noch mehr durch das Auto verändert, da es die Erschließung des weiten Landes noch einmal auf eine ganz andere Weise unterstützte. Dies kann man an der Entwicklung der Städte am besten verdeutlichen: Während Barcelona mit 1,6 Mio. Einwohnern eine Fläche von 101,1 km<sup>2</sup> hat, kommt Houston mit 2,3 Mio. Einwohnern auf eine Fläche von 1.733 km<sup>2</sup>. Neben diesen sehr praktischen Auswirkungen wurde das Auto auch Teil einer eigenen Kultur. Hierfür stehen Roadmovies, die quasi nur auf der Straße spielen, die Entwicklung von

Autokinos und Restaurants mit eigenem Autoschalter. In Deutschland entwickelten sich andere Rituale um das Auto wie z.B. das Autowaschen am Samstagnachmittag. Dabei ist bezeichnend, dass in den 1960er und 1970er Jahren Hausarbeiten vornehmlich von Frauen erledigt wurden. Nur die Pflege des Autos war eine Männerdomäne. In den letzten Jahrzehnten hat die Autoindustrie eigene Orte geschaffen, um z.B. den Käufer eines neuen Autos mit dem neuen Auto in einer besonderen Atmosphäre zusammenzuführen. Die BMW-Welt in München ist hier ein prominentes Beispiel. Diese ist zu einem Tourismusmagneten geworden mit Millionen von Besuchern im Jahr. All dies wurde natürlich von der Autoindustrie gerne unterstützt, da es insgesamt den Wert ihres Produktes deutlich gesteigert hat.

Darüber hinaus wurde mit dem rapiden Aufstieg Chinas gegen Anfang des neuen Jahrtausends ein ganz neuer Markt für die Produkte geschaffen. Die jährlichen Absatzzahlen für Pkw steigen von 2005 bis 2017 von 4 Mio. auf etwa 23 Mio. Fahrzeuge (vgl. OICA 2019). Deutsche Hersteller wie Audi, BMW und Daimler konnten jeweils im Jahr 2017 mehr als eine halbe Million Autos in China absetzen, was diesen Markt zu einem der bedeutendsten Märkte für deutsche Autos gemacht hat (vgl. Statista 2019a; 2019b; Statista 2019c). In Deutschland haben alle drei Hersteller deutlich weniger Fahrzeuge abgesetzt. In den Megastädten Asiens wurde aber auch schnell klar, dass das Auto nicht die geeignete Lösung für dicht besiedelte Metropolen ist. Der Musterknabe der Region – Singapur – erließ dann auch strenge Gesetze, um die Zahl der Autos zu begrenzen. Heute will das Inselreich vor der Küste Malaysias sogar langfristig den Autoverkehr noch mal deutlich reduzieren (vgl. *The Straits Times* 2018). Trotzdem, oder gerade deswegen, gibt es in Singapur ein Hochhaus mit einem Autoaufzug, das den Bewohnern erlaubt, ihr Auto direkt neben ihrem Wohnzimmer zu parken und sichtbar für die vorbeilaufenden Passanten zu präsentieren.

Die Vision eines Verkehrs ohne Emotionen mit elektrischen und autonomen Fahrzeugen – Ingenieure von BMW haben diese Technik einmal liebevoll »betreutes Fahren« genannt – scheint technisch denkbar. Fahrzeuge, die sich harmonisch in einen effizienten öffentlichen Verkehr einreihen und ein idealer Zubringer zu einem neuen schnellen Zugverkehr sind. Sie bedeuten aber den Abschied von einem Familienmitglied, das über fast ein Jahrhundert unseren ganzen Stolz ausgemacht und nicht zuletzt die Grundlage des Wohlstandes für viele Menschen geworden ist, weil die Autoindustrie ein Grundpfeiler unserer Wirtschaft ist.

## VISION DES ZUKÜNFTIGEN VERKEHRS

Die hier dargestellte Vision soll nicht mehr als eine schnelle Bleistiftzeichnung sein. Die Entwicklungen

können natürlich auch ganz anders verlaufen. Die Vision des zukünftigen Verkehrs hängt von der Entwicklung technischer Innovationen ab, aber eben auch vom Lebensstil und der Bedeutung des Produktes Auto. Die These hier ist, dass das Auto seine besondere Rolle als emotionales Produkt verliert und Mobilität von Dienstleistern bereitgestellt wird. Diese suchen aus einem Portfolio aus öffentlichen und individuellen Verkehrsmitteln einen optimalen Mix aus. Bei der Wahl der Verkehrsmittel wird eine Gewichtung aus Kosten, Reisezeit und Komfort durchgeführt. Die Beziehung des Nutzers zum Fahrzeug werden jetzt von anderen Kriterien geprägt, wie Pünktlichkeit und Sauberkeit. Eine solche Verkehrszukunft könnte zum Teil aus den folgenden Technologien aufgebaut werden:

- die Entwicklung von Informationsplattformen, die aus einem breiten Portfolio an Möglichkeiten eine unter Kosten, Zeitbudgets und Komfort optimale Mischung aus Verkehrsmitteln präsentieren. Zugangsberichtigungen und Tickets werden automatisch ausgestellt und auch die Bezahlung erfolgt automatisch.
- die Entwicklung von Magnetschwebbahnen mit einer Höchstgeschwindigkeit von (500–600) km/h
- die Entwicklung des autonomen Fahrens und
- die Entwicklung einer Kleidung, die schnell an- und ausgezogen werden kann, aber quasi bei jeder Wetterbedingung Schutz vor der Witterung bietet.

Die Entwicklung von entsprechenden Plattformen ist im vollen Gange und Mobilitätsdienstleister, wie die Bundesbahn, bieten heute schon entsprechende Elemente an. Andere Plattformbetreiber, allen voran Google, stellen einen Großteil der notwendigen Informationen schon heute bereit. Entsprechende Bemühungen für den ÖPNV werden z.B. vom Bund und vom Land Bayern vorangetrieben. Die Entwicklung entsprechender nationaler bzw. europäischer Mobilitätsplattformen ist auf alle Fälle notwendig.

Die Magnetschwebbahn wird zum Rückgrat der Personenbeförderung ab einer Distanz von 200–300 km. Die großen Vorteile dieser Technik sind die bessere Beschleunigung gegenüber der normalen Eisenbahn. Damit könnten a) höhere Steigungen befahren werden, was den Bau von Tunneln und Brücken vermeiden kann, und b) häufiger Haltestellen angefahren werden, ohne die mittlere Reisegeschwindigkeit drastisch zu reduzieren. Die Technik kann deutlich höhere Geschwindigkeiten als die klassische Eisenbahn erreichen, da das Rad-Schiene-System zu erheblichen Alterungserscheinungen führt. Und die Technik erlaubt den Bau auf Stelzen, da die Kraft viel gleichmäßiger auf die Schiene übertragen wird. Und das System ist schon elektrifiziert, erlaubt also die Integration erneuerbaren Stroms als Fahrstrom. Mit diesem System können durch die hohe Geschwindigkeit Zeitverluste auf dem Weg zum und vom Bahnhof mehr als ausgeglichen werden.

Dem stehen erhebliche wirtschaftliche Hindernisse gegenüber und die Notwendigkeit, eine ganz neue Infrastruktur aufzubauen. Trotzdem ist es das einzige System, das ganz Europa verbinden kann, aber auch die Anbindung von Mittelzentren erlaubt. Es ersetzt Straßenverkehr und Kurz- und Mittelstreckenflugverkehr. Dies ist sicherlich für die weitere Siedlungsentwicklung von erheblicher Bedeutung und kann die wirtschaftliche Konzentration an wenigen Orten zumindest dämpfen. Die prinzipielle Beherrschbarkeit dieser Technik hat schon der Transrapid unter Beweis gestellt. Die Forschung in diesem Bereich muss wiederaufgenommen werden.

Bei Strecken zwischen 20–200 km kommen je nach Siedlungsdichte verschiedene Technologien zur Anwendung. Autonome, meist elektrisch betriebene Fahrzeuge bilden hier aber eine zentrale Rolle, wobei sie in verschiedenen Versionen vorkommen, als Bus- und Sammeltaxi, aber auch als klassisches Auto im Besitz des Eigentümers. Die Einführung autonomer Fahrzeuge und die Elektrifizierung müssen zusammen gedacht und entwickelt werden. Die Ladeinfrastruktur kann dezidiert für Flottenbetriebe entwickelt werden. Dies erlaubt zum einen eine viel bessere Auslastung der Infrastruktur und zum anderen durch eine Einbindung des Ladevorgangs in die Fahrpläne der Fahrzeuge eine optimalere Nutzung von erneuerbaren Energien.

Bei Distanzen kleiner als 20 Kilometer hängt es wieder stark von der Siedlungsdichte ab. Klassische Medien des ÖPNV werden durch autonome Busse und Zubringer ergänzt, die schlecht angebundene Regionen erreichen können und insbesondere wegen ihrer Kostenstruktur, hohe Investitionskosten, niedrige variable Kosten auch in den frühen Morgen- und Nachtstunden eingesetzt werden. Daneben bildet sich aber mit elektrisch betriebenen Fahrrädern ein ganz neues Transportsegment aus. Heute zeigt sich schon, dass auch Menschen mit mittelmäßiger sportlicher Begabung Fahrstrecken von bis zu 20 km zurücklegen. Die Entkopplung von den Wettereinflüssen könnte dieser Technologie dann zu einem Durchbruch verhelfen. Die Entwicklung dieser Kleidung muss in unseren Breiten insbesondere Schutz gegen Nässe und Kälte bieten, in südlichen Regionen muss sie auch Schutz vor Sonne und Kühlung bieten. Neben der hohen Energieeffizienz beim Transport fördert diese Technologie auch die Gesundheit der Nutzer.

## DIE TRANSFORMATION

Die Transformation wird zum einen durch Veränderungen in anderen Weltteilen vorangetrieben. Elektrifizierung in China und Kalifornien und das Zurückdrängen der individuellen Mobilität in Singapur sind hier Beispiele. Insbesondere das Beispiel Singapurs könnte in ganz Asien Schule machen. Die Absatzzahlen der deutschen Autohersteller belegen die Bedeutung dieser Region für die deutsche Industrie.

Dann kommen die Herausforderungen von zunehmendem Verkehr bis zum Klimawandel, die nur durch neue Konzepte gelöst werden können.

Trotzdem sollte die Transformation zu einem nüchternen Verkehrssystem der Zukunft durch die positive Vision eines Verkehrs, der schneller, sicherer, umweltverträglicher und kostengünstiger ist als der heutige, vorangetrieben werden. Wenn man die Höhe der Steuern im Verkehrsbereich heute sieht, dann müssen hier ganz klar neue Treiber gefunden werden. Wenn man die Energiesteuer beim Auto als CO<sub>2</sub>-Steuer deuten würde, dann lägen wir heute schon bei einem Preis von 274 Euro/tCO<sub>2</sub>. Also ein Betrag, der massive Veränderungen in allen anderen Emissionssektoren hervorgerufen hätte, aber im Verkehrsbereich akzeptiert wird. Um diese positive Vision mit mehr Leben zu füllen sind vier Schritte notwendig.

Der erste Schritt ist eine viel intensivere Auseinandersetzung mit den positiven Visionen der Mobilität und den erheblichen Möglichkeiten neuer und insbesondere vernetzter Technologien. Viele Konzepte können hier erst nur in Simulationen intensiv untersucht werden. Werkzeuge und Methoden stehen heute in den entsprechenden Forschungseinrichtungen schon bereit, können aber noch erheblich ausgeweitet werden z.B. durch eine stärkere Kopplung von Simulationen auf verschiedenen Skalen oder auch der realistischen Abbildung von Extremsituationen wie ein Urlaubsbeginn. Die erhebliche Steigerung der Rechenleistung erlaubt es dabei immer mehr, auch auf Mikrosimulationen zurückzugreifen, die dann wiederum auch sehr unterschiedliche individuelle Bedürfnisse abbilden können.

Der zweite Schritt ist eine Ausweitung der industriellen und öffentlichen Forschung im Bereich der Mobilität. Die Autoindustrie hat ihre Aktivitäten in den Bereichen elektrisches und autonomes Fahren erheblich ausgeweitet. Dies muss durch entsprechende staatliche Forschung flankiert werden. Die Weiterentwicklung schneller schienengebundener Verkehrsmittel muss schnell auf eine ganz andere Ebene gehoben werden. Der Misserfolg der Magnetschwebetechnik im ersten Versuch muss noch einmal im Detail analysiert werden. Die bedeutende bayerische Sportartikelindustrie könnte z.B. das Thema Kleidung für das Elektrofahrrad voranbringen.

Der dritte Schritt besteht in einer deutlichen Ausweitung von Experimenten und Feldtests. Experimentierklauseln müssen auch die Entwicklung neuer Regulierungskonzepte unterstützen.

Der vierte Schritt besteht in der Analyse der Auswirkungen. Dabei muss die enorme Bedeutung der Autoindustrie für unsere Volkswirtschaft beachtet werden. Selbst für Bereiche wie die Versicherungswirtschaft könnte ein solcher Übergang erhebliche Auswirkungen haben. Die neuen Lösungen müssen darauf hin untersucht werden, welche gesamtwirtschaftliche Leistung sie langfristig spielen können.

All dies wird Geld kosten, und nicht jede Investition wird sich lohnen. Für Deutschland und Bayern gibt es aber keine Alternative. Wenn es Deutschland nicht gelingt, auch in Zukunft eine führende Rolle im Mobilitätsbereich einzunehmen, dann wäre dies für die deutsche Volkswirtschaft ein großer Rückschlag. Die Lösung muss aber nicht nur für Deutschland, sondern auch für anderen Weltregionen anwendbar sein.

## ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Das Auto hatte immer mehr Bedeutung als die bloße Funktion des Transports. Mit dem Auto ist Status, Sportlichkeit und Prestige verbunden. Ein optimiertes Verkehrssystem kann an diese Stelle nur die positive Vision eines Systems stellen, das in Bezug auf die Aufgabe einen Menschen oder ein Gut von A nach B zu bringen in den Aspekten, Kosten, Geschwindigkeit, Umweltauswirkungen, Komfort und Sicherheit überlegen ist.

Die Diskussion zerfasert heute in eine Vielzahl von Einzeldiskussionen über oftmals technische Details. Der Mut, ein neues Gesamtsystem zu entwickeln, fehlt. Die Komponenten dieses Systems müssen an vielen Stellen noch entwickelt und optimiert werden. Ihre Vorteile und Auswirkungen in einem großen Bild diskutieren können wir aber schon heute. Wie kann eine optimale Synthese aus autonomen und elektrischen Autos aussehen? Wie kann ein optimierter ÖPNV mit autonomen Fahrzeugen schnelle Zugverbindungen noch attraktiver machen?

Das Thema Mobilität ist von entscheidender Bedeutung für die gesamte deutsche Volkswirtschaft. Anstrengungen dieses System zu optimieren, sollten deutlich ausgeweitet werden.

## LITERATUR

Braun, H.-J. (1999), *Konstruktion, Destruktion und der Ausbau Technischer Systeme zwischen 1914 und 1945*, Propyläen Verlag, Berlin.

OICA – International Organization of Motor Vehicle Manufacturers (2019), Statista 2019, <http://www.oica.net/>.

König, W. (1997), *Massenproduktion und Technikkonsum, Entwicklung und Triebkräfte der Technik zwischen 1880 und 1914*, Propyläen Verlag, Berlin.

Statista (2019a), »Anzahl der von BMW verkauften Autos in China in den Jahren 2009 bis 2018«, verfügbar unter: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/254094/umfrage/autoabsatz-von-bmw-in-china/>.

Statista (2019b), »Anzahl der von Audi verkauften Autos in China in den Jahren 2009 bis 2018«, verfügbar unter: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/254094/umfrage/autoabsatz-von-audi-in-china/>.

Statista (2019c), »Anzahl der von Daimler verkauften Autos in China in den Jahren 2009 bis 2018«, verfügbar unter: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/254094/umfrage/autoabsatz-von-daimler-in-china/>.

Statistisches Bundesamt (2019), »Automobilindustrie: Deutschlands wichtigster Industriezweig mit Produktionsrückgang um 7,1% im 2. Halbjahr 2018«, Pressemitteilung Nr. 139, 9. April, verfügbar unter: [https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2019/04/PD19\\_139\\_811.html](https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2019/04/PD19_139_811.html).

*The Straitstimes* (2018), »LTA seeks ideas to realise Singapore's car-lite dream«, 20. September, verfügbar unter <https://www.straitstimes.com/singapore/transport/lta-seeks-ideas-to-realise-singapores-car-lite-dream>.

Barbara Lenz, Daniel Krajzewicz,  
Gernot Liedtke und Christian Winkler\*  
**Zukunft der Mobilität –  
was ist zu tun?**

Die Zukunft der Mobilität ist ein Feld, in dem fast täglich neue Optionen präsentiert werden, getrieben von technologischen Entwicklungen im Straßen- und Schienenverkehr, aber auch von den vielseitigen Möglichkeiten, die die Digitalisierung zum Aufsetzen neuer Dienstleistungen bietet. Verbunden ist damit meist die Erwartung, dass es mit Hilfe von neuen Technologien und Diensten möglich ist, das hohe individuelle Mobilitätsniveau, das wir in Deutschland erreicht haben, zu halten und gleichzeitig die zwingend anspruchsvollen Klima- und Umweltziele zu erreichen. Es ist wenig überraschend, dass es nicht einzelne Maßnahmen oder Technologien sein werden, die den Weg für eine gleichermaßen effektive und nachhaltige Mobilität für die Zukunft bereiten, sondern dass es ein Mix sein wird, der die facettenreiche und damit außerordentlich komplexe Aufgabe überhaupt realisierbar macht – die Bereitstellung bezahlbarer Mobilität hoher Qualität bei gleichzeitig deutlicher Verringerung des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes aus dem Verkehr, verbunden mit der Senkung der Luftschadstoff- und Lärmemissionen sowie der Verringerung des Flächenverbrauchs durch den motorisierten Verkehr vor allem in den Städten. Eine besondere Herausforderung besteht darin, politische, planerische und rechtliche Rahmenbedingungen zu schaffen, die es erlauben, diesen Mix so zu gestalten, dass Technologien und Dienste sich ergänzen und dabei den ganz unterschiedlichen Mobilitätsbedürfnissen der verschiedenen gesellschaftlichen Gruppen ebenso wie den Transportbedürfnissen der Wirtschaft Rechnung tragen.

Die Mobilitätsoptionen, die für die Zukunft zur Verfügung stehen, lassen sich im Wesentlichen zwei großen Bereichen zuordnen: Immer mehr Bedeutung gewinnen digitale Anwendungen, die zum einen zur Verkehrsinformation, -planung und -steuerung eingesetzt werden oder die in Form von Mobilitätsplattformen Dienstleistungen vermitteln. Dies ist mit neuen Organisations- und Kooperationsformen auf der Angebotsseite verknüpft. Zum zweiten befinden sich neue Fahrzeug- und Antriebskonzepte in der Entwicklung, die an konventionelle Mobilitätskonzepte andocken oder auch Komponenten neuer Konzepte werden können, so bspw. Lastenfahrräder, batterie-elektrische Fahrzeuge, Leichtfahrzeuge für Personen und Güter oder auch elektrische Kleinfahrzeuge wie E-Roller.

\* Prof. Dr. Barbara Lenz ist Leiterin des Instituts für Verkehrsfor- schung am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Berlin. Daniel Krajzewicz, Prof. Dr. Gernot Liedtke und Dr. Christian Winkler sind Abteilungsleiter am Institut für Verkehrsforschung am DLR.

Im Verbund mit diesen neuen Entwicklungen wird der Pkw – ob als Privat-Pkw oder als Teil von kommerziellen Sharing-Diensten – als individuelles Mobilitätskonzept sicher weiterbestehen. Das bedeutet, dass er nicht grundsätzlich infrage gestellt wird, jedoch Ort, Zeit und Umfang seiner Nutzungsmöglichkeiten und seiner Nutzung sich verändern dürften. Insbesondere im dicht besiedelten und verkehrlich stark genutzten städtischen Umfeld ist der Pkw nicht nur Quelle von Luftschadstoff-, CO<sub>2</sub>- und Lärmemissionen, vielmehr beeinträchtigt er auch die Lebensqualität in der Stadt durch den hohen Bedarf an öffentlichem Straßenraum – für den fließenden ebenso wie den ruhenden Verkehr. Viele Stadtbewohner haben aus der oft angespannten Parkplatzsituation in den großen Städten die Konsequenz gezogen, ohne eigenen Pkw zu leben: Die Pkw-Besitzquoten liegen in Städten wie Berlin, Hamburg oder München, aber auch Paris oder London deutlich unter dem jeweiligen nationalen Durchschnitt. Mobilität ohne Auto funktioniert dort nicht zuletzt angesichts der vielfältigen Mobilitätsalternativen, die den Bewohnerinnen und Bewohnern von suburbanen und eher ländlich geprägten Räumen in dieser Form und in diesem Umfang nicht zur Verfügung stehen.

Dessen ungeachtet gibt es derzeit wenig Zweifel daran, dass der Pkw auch künftig eine wichtige Komponente in Mobilitätsangeboten sein wird – vorausgesetzt, es wird möglich, durch technologische Fortschritte und Veränderungen in der Pkw-Nutzung seine negativen Wirkungen weitgehend zu reduzieren. Dafür gibt es auf technologischer Seite eine Reihe von Möglichkeiten: die Änderung der Antriebsform – vom Verbrennungsmotor hin zum Elektromotor (als rein batterie-elektrische oder Plug-in-Fahrzeuge, die Elektroantrieb und Verbrennungsmotor kombinieren) – oder in der Verwendung alternativer Kraftstoffe.

Grundsätzlich ist zu erwarten, dass künftig nicht mehr die Regel »ein Kraftstoff für alle Anwendungsbereiche« gilt, sondern dass es bei den Kraftstoffen – analog zu den Antrieben – zur Diversifizierung kommt. Dies wird besondere Herausforderungen hinsichtlich der Versorgungsinfrastruktur mit sich bringen. Bekannt ist diese Diskussion bereits im Zusammenhang mit dem von politischer Seite angestrebten Markthochlauf der Elektrofahrzeuge. Hierbei spielt die Verfügbarkeit von Ladeinfrastruktur eine wichtige Rolle, nicht zuletzt als »Signal« an die Nutzer, dass flächendeckend Energie zum Laden der Batterie zur Verfügung steht. Um den Ladeinfrastrukturbedarf für eine Million Elektrofahrzeuge in Deutschland zu decken, würden rund 33 000 öffentliche- und halböffentliche Ladepunkte für den Alltagsverkehr sowie ca. 2 600 öffentliche Ladepunkte für den Fernverkehr benötigt; sinnvoll wären darüber hinaus etwa 4 000 Schnellladepunkte. Aktuell sind knapp 20 000 öffentlich zugängliche Ladepunkte vorhanden, davon sind 12% Schnelllade-



Barbara Lenz



Daniel Krajzewicz



Gernot Liedtke



Christian Winkler

punkte. In der Debatte um die notwendige Anzahl an Ladepunkten darf nicht übersehen werden, dass Komfortüberlegungen bzgl. maximal akzeptabler Ladewartezeiten eine entscheidende Einflussgröße für Erwerb und Nutzung von Elektrofahrzeugen darstellen. Vor diesem Hintergrund ist es auch bezeichnend, dass über 90% der derzeitigen E-Fahrzeugbesitzer einen eigenen Stellplatz oder eine Garage für ihr Fahrzeug haben. Im nationalen Durchschnitt stehen 75% der Pkw auf einem eigenen Stellplatz oder in einer Garage; in ländlich geprägten Räumen steigt dieser Anteil auf 90%, in den großen Städten sinkt er auf 40%.

Längerfristig wird sich auch die Tankstelleninfrastruktur auf die Diversifizierung des Energie- und Kraftstoffbedarfs einstellen müssen, d.h. bestehende Tankstellen-Geschäftsmodelle werden eine Neukonzeptionierung erfahren, nicht nur hinsichtlich der Verbreiterung des Energie- und Kraftstoffangebotes (Strom, Wasserstoff, Gas, Flüssigkraftstoffe), sondern auch durch eine zusätzliche Ausweitung der Funktionen von Tankstellen, auch jenseits des heute schon vorhandenen Einzelhandels- und fahrzeugbezogenen Serviceangebotes. Ersten Überlegungen zufolge könnte die Tankstelle ein Ort mit Versorgungseinrichtungen und Dienstleistungsangeboten werden oder auch ein Mobilitäts-Hub, d.h. ein Umstiegspunkt in einem intermodalen Verkehrssystem, und damit auch zur Umsetzung neuer Mobilitätskonzepte beitragen.

Für die Mobilität der Menschen wird die Frage von zentraler Bedeutung sein, ob der Pkw weiterhin der »Alleskönner« bleibt, der für jeglichen Fahrtzweck geeignet und nutzbar ist. Diese Frage wird auch auf politisch-planerischer Ebene entschieden. Die universelle Nutzbarkeit des Pkw ergibt sich nicht zuletzt daraus, dass es kaum räumliche oder zeitliche Nutzungsbeschränkungen gibt. Emissionsspezifische Nutzungsbeschränkungen sind vergleichsweise neu und in ihrer Wirkung umstritten; allerdings ist davon auszugehen, dass künftig nur noch emissionsarme Fahrzeuge dicht besiedelte Bereiche wie Innenstädte befahren dürfen. Offen ist, inwieweit auch Aspekte wie Lärmemissionen oder die Inanspruchnahme von öffentlichem Straßenraum als Kriterien für Nutzungszulassungen und -beschränkungen von Fahrzeugen herangezogen werden könnten. Eine explizite Auseinandersetzung hierüber findet momentan [noch] nicht statt, wenngleich sie neben Fragen der Luftschadstoff- und CO<sub>2</sub>-Emissionen dringend vonnöten wäre.

Die notwendigen Veränderungen auf der Verhaltensseite lassen sich auf die Formel »Weniger und effizientere Nutzung des [privaten] Pkw« zuspitzen. Um Alltagsmobilität auch mit »weniger Pkw« im erforderlichen Umfang zu ermöglichen, braucht es alternative Optionen. Neben der »Wiederentdeckung« der sog. aktiven Modi – Zu-Fuß-Gehen und Fahrrad – vor allem für kürzere Wege unter 3 km, die

fast die Hälfte unserer Alltagswege ausmachen, geht es um den Ausbau des öffentlichen Verkehrs durch konventionelle Maßnahmen wie höhere Taktdichten oder Ausweitung der Bedienzeiten, aber auch um die Erweiterung des öffentlichen Verkehrs durch neue Formen von Mobilitätsdienstleistungen, die ein Mobilitätsangebot von Tür zu Tür realisieren und die Bindung an starre Fahrpläne auflösen. Große Verkehrsdienstleister wie bspw. die Berliner Verkehrsbetriebe mit dem BerlKönig oder die Stuttgarter Straßenbahnen mit SSB Flex haben solche Dienste gestartet und erkunden dabei im alltäglichen Betrieb die Nutzungsmuster und den Bedarf der Kundinnen und Kunden. Mittelfristiges Ziel ist die Etablierung eines deutlich breiter aufgestellten Angebotes im öffentlichen Verkehr, nicht zuletzt um die zu erwartende Kannibalisierung des eigenen konventionellen Angebotes durch neue Dienstleistungen innerhalb des eigenen Unternehmens anzusiedeln anstatt solche, zumindest auf längere Sicht lukrativen Dienstleistungen alleine den kommerziellen Anbietern zu überlassen.

Die Bewertung der vielfältigen, aktuell vorhandenen Optionen hinsichtlich ihrer Tragfähigkeit in der Zukunft ist momentan außerordentlich schwierig, denn einerseits befinden sich viele der neuen Dienstleistungen noch in einer Art »Experimentierphase«, andererseits gibt es oft nur wenige Kenntnisse, die eine fundierte Bewertung der zukünftigen Bedeutung von neuen Mobilitätskonzepten und -technologien zulassen. So zeigt sich bspw. bei Carsharing, dass zum aktuellen Zeitpunkt weniger als 1% aller Wege, die in Deutschland zurückgelegt werden, mit einem Carsharing-Fahrzeug erfolgen. Daraus den Schluss zu ziehen, dass Carsharing keine Rolle spielt, wäre allerdings nicht korrekt. Vielmehr lässt sich die geringe Zahl an Carsharing-Wegen auch dahingehend interpretieren, dass Carsharing-Nutzer ihre Alltagsmobilität überwiegend mit anderen Verkehrsmitteln zurücklegen, vor allem ÖPNV und Fahrrad. Die Option, bei Bedarf über ein Auto verfügen zu können, ist für die Carsharing-Nutzer aber wichtig. Ein eigenes Auto ist dafür nicht mehr nötig. So sind heute in den großen Städten mehr als 10% der Menschen über 18 Jahren Mitglied in einer Carsharing-Organisation, und aus Nachhaltigkeitsgesichtspunkten weisen Carsharing-Nutzer ein besseres Mobilitätsverhalten auf als die Nicht-Nutzer.

Für nahezu alle neuen Konzepte gilt, dass sie zwar eine ausreichende Zahl an Kundinnen und Kunden finden, um das System funktionsfähig zu machen und zu halten, dass aber Erkenntnisse und Erfahrungen dazu fehlen, wie die Angebote aussehen müssen, um für einen breiten Kundenkreis attraktiv und damit auch auf längere Sicht beständig zu sein. Vergleichbares gilt für die Einführung neuer Technologien. Auch hier entscheiden letztlich die Kundinnen und Kunden über die Umsetzbarkeit, indem sie die neuen Produkte kaufen und nutzen oder



aber ablehnen. Es bleibt zu hoffen, dass Erfahrungen, wie sie in jüngerer Zeit mit der Einführung des E10-Kraftstoffs oder auch mit Elektrofahrzeugen gemacht wurden, von der Industrie und der Politik, aber auch von den Städten und Kommunen aufgenommen werden.

Sowohl für die Umstellung auf neue Technologien als auch für die Realisierbarkeit neuer Mobilitätsdienste braucht es neben Anreizen auch einen steuernden Rahmen, um das Verharren in bekannten Mobilitätsroutinen aufzubrechen. Im Straßenverkehr können dies Straßenbenutzungsgebühren, Einfahrbeschränkungen oder auch an die Nachfrage angepasste Parkgebühren sein. In einer ganzen Reihe von europäischen Städten, so beispielsweise in Stockholm, Oslo oder Mailand, konnte in den letzten Jahren gezeigt werden, dass ein modernes Mautsystem einen ausgesprochen effizienten Beitrag zur Steuerung und Optimierung des Verkehrs leisten kann. Kernelement eines solchen Systems sind Streckengebühren, die nach Tageszeit oder auch nach Einhaltung von Euro-Normen gestaffelt werden. Dadurch werden Anreize geschaffen, auf den öffentlichen Verkehr umzusteigen oder aber auf weniger belasteten Straßen oder außerhalb der Hauptverkehrszeit zu fahren. Der zeitliche und finanzielle Aufwand, der für den Aufbau eines solchen Mautsystems für Kommunen oder private Betreiber erforderlich ist, ist jedoch nicht zu unterschätzen. Gleichzeitig hat sich dort, wo eine Maut eingeführt wurde, gezeigt, dass ein derartiges System in der Bevölkerung grundsätzlich Akzeptanz findet, wenn der Nutzen deutlich und eine als »fair« empfundene Behandlung aller Betroffenen umgesetzt wird. Im Zusammenhang mit der Einführung einer Maut kann dann auch ein kostenloser öffentlicher Verkehr eine sinnvolle Ergänzung darstellen, da eine solche Kompensationsleistung kurzfristig umsetzbar wäre. Allerdings würde dies den Ausbau des ÖPNV nur noch dringlicher machen, um die zu Stoßzeiten ohnehin schon hohe Auslastung des ÖPNV-Systems nicht weiter zu steigern. Mit den Erlösen aus der Maut könnte ein solcher Ausbau, der massive Investitionen erfordern würde, gelingen.

Schließlich kann bei der Frage nach der Bewertung der Optionen für die Mobilität der Zukunft nur nochmals auf die Komplexität der Mobilitätsbedürfnisse und des Verkehrsgeschehens hingewiesen werden. Neben den unterschiedlichen Bedürfnissen und Anforderungen und auch Möglichkeiten unterschiedlicher Bevölkerungsgruppen gibt es darüber hinaus starke Unterschiede im Mobilitätsangebot, insbesondere zwischen Stadt und Land, so dass die Tragfähigkeit neuer Optionen nicht gleichmäßig über das Verkehrssystem hinweg gegeben sein wird – die neuen Mobilitätsangebote sind nicht überall vorhanden, werden sich nicht überall gleichermaßen durchsetzen können und werden vermutlich auch nicht überall die gleichen Wirkungen erzielen.

Umwelt- und Klimaziele und Veränderungen in der weltweiten Automobilproduktion machen eine Transformation der Mobilität in Deutschland unausweichlich. Dies bedeutet einen gesellschaftlich gewollten Umwandlungsprozess bisheriger Markt- und Angebotsstrukturen mit neuen Rahmenbedingungen, neuen Marktanbietern und neuen Mobilitätsmustern.

## Karen Pittel\* CO<sub>2</sub>-Bepreisung im Straßenverkehr? Ein guter Anfang, aber leider nicht genug



Karen Pittel

In der Diskussion um die Erreichung der deutschen Klimaziele 2030 gewinnt der Verkehr zunehmend an Bedeutung. Entsprechend dem deutschen Klimaschutzplan 2050 sollen die Treibhausgasemissionen im Verkehrssektor bis 2030 um 40–42% (im Vergleich zu 1990) sinken. Die Wirkung von CO<sub>2</sub>-Preisen wird auch in diesem Kontext verstärkt thematisiert, wobei andere gesellschaftliche Kosten des Verkehrs häufig ausgeblendet bleiben. Am Beispiel des Straßenverkehrs werden Handlungsoptionen und damit verbundene Herausforderungen im Folgenden verdeutlicht.

### AUSGANGSLAGE

Welche Herausforderung eine Reduktion der Emissionen im Verkehrssektor um 40–42% bis 2030 darstellt, wird deutlich, wenn man sich vor Augen führt, dass die Emissionen seit 1990 sogar um 1% gestiegen sind (vgl. UBA 2019a). Das Grundproblem zeigt sich bei einem Blick auf die direkten CO<sub>2</sub>-Emissionen des Schwerverkehrs (Lkw): Während die Emissionen pro transportierter Tonne Güter um 30% gesunken sind, nahm die Zahl der Tonnenkilometer (also die zurückgelegte Strecke multipliziert mit der beförderten Gütermenge) um 70% zu (vgl. UBA 2019b). Im Pkw-Verkehr sieht die Situation grundsätzlich ähnlich aus.

Die gesellschaftlichen Kosten des Straßenverkehrs erschöpfen sich jedoch nicht nur in seinen CO<sub>2</sub>-Emissionen, wie die Diskussion der letzten Jahre gezeigt hat. Feinstaub, Stickoxidemissionen und Lärm, ebenso wie Staus und Unfälle, tragen nicht unerheblich zu den sozialen Kosten des Verkehrs bei.

Dabei wird der Straßenverkehr auch heute schon mit einer Reihe von Steuern und anderen Auflagen belegt, die die CO<sub>2</sub>-Emissionen und weitere Externalitäten des Verkehrs allerdings nicht systematisch erfassen. CO<sub>2</sub>-Emissionen sind zudem durch die Deckelung des Flottenverbrauchs auf europäischer Ebene reguliert. Es wird dabei geschätzt, dass die Verschärfung des Abgasgrenzwert, von 130 gCO<sub>2</sub>/km auf 95 gCO<sub>2</sub>/km im Jahr 2020 zu durchschnittlichen zusätzlichen Kosten von 260 Euro/tCO<sub>2</sub> führt (vgl. Paltsev et al. 2016).

Angesichts dieser Situation und der empirischen Evidenz für geringe langfristige Preiselastizitäten ins-

besondere im individuellen Straßenpersonenverkehr (vgl. Coglianesi et al. 2016) stellt sich die Frage, ob und wie die sektoralen Klimaziele 2030 überhaupt in den kommenden elf Jahren erreichbar sind. Darüber hinaus muss geklärt werden, wie im Falle der Einführung einer CO<sub>2</sub>-Bepreisung mit den weiteren gesellschaftlichen Kosten des Verkehrs umgegangen werden soll.

### EMISSIONSARMER VERKEHR UND CO<sub>2</sub>-PREISE

Alternativen zur heutigen Erfassung von CO<sub>2</sub>-Emissionen durch Steuern und Abgaben werden aktuell nicht nur in Bezug auf den Verkehr, sondern für alle Sektoren, die nicht vom europäischen Emissionshandel erfasst werden, diskutiert. Die Auswirkungen dieser verschiedenen Alternativen auf den Verkehr können allerdings sehr unterschiedlich ausfallen. Eine wichtige Ergänzung zu allen im Anschluss diskutierten Reformoptionen ist aber das Angebot von Alternativen zum individuellen Personen- und Güterstraßenverkehr.

Ohne Ausweichmöglichkeiten ist absehbar, dass auch substanzielle Preiserhöhungen nicht zum gewünschten Ergebnis führen werden. Dies schließt im Bereich des Individualverkehrs nicht nur den viel diskutierten Berufsverkehr ein, sondern vor allem auch Fahrten für nicht berufsbezogene Aktivitäten. Der Urlaubs-, Freizeit- und Einkaufsverkehr hatte im Jahr 2016 einen Anteil von 59% an den gefahrenen Kilometern (davon fast drei Viertel für Urlaub und Freizeit), während berufsbedingte Fahrten mit 37% (incl. Geschäftsreisen) für weniger als die Hälfte des Verkehrsaufkommens verantwortlich waren (vgl. UBA 2019b).

Als mögliche Alternativen kommen Fußgänger-, Rad-, Schienen- und öffentlicher Straßenpersonenverkehr ebenso wie alternative Antriebe für individuellen Personen- und Güterverkehr (z.B. Elektromobilität, Erdgas, Brennstoffzellen) in Frage. Einige der benötigten Technologien sind bereits seit langem am Markt etabliert, andere stehen erst am Anfang ihrer Markteinführung und Lernkurve. Um die langfristigen Klimaziele nicht zu verfehlen, muss hier rechtzeitig in Infrastruktur und Technologieentwicklung investiert werden. Der Fokus soll im Folgenden allerdings nicht auf der Diskussion alternativer Mobilitäts- und Antriebsformen und ihrer Förderung liegen. Ihre Erwähnung soll nur verdeutlichen, dass die Bepreisung der Verkehrsemissionen nur ein Bestandteil eines umfassenden, emissionsarmen Mobilitätskonzepts sein kann.

Nichtsdestotrotz spielen Steuern und Abgaben eine wichtige Rolle für den Anreiz, auf Alternativen umzusteigen bzw. zwischen verschiedenen Alternativen zu entscheiden. Für die Bepreisung der Emissionen von CO<sub>2</sub> werden aktuell vor allem zwei Optionen diskutiert: Die Einführung einer nationalen CO<sub>2</sub>-Steuer oder die Beschränkung der Emissionen durch einen Emissionshan-

\* Prof. Dr. Karen Pittel ist Leiterin des ifo Zentrums für Energie, Klima und Ressourcen und Professorin für Volkswirtschaftslehre, insbes. Energie, Klima und erschöpfbare natürliche Ressourcen, an der Ludwig-Maximilians-Universität München.

del – auf deutscher oder auf europäischer Ebene. CO<sub>2</sub>-Steuern setzen einen festen Preis für Emissionen pro Tonne CO<sub>2</sub>, sind allerdings hinsichtlich ihrer Mengenwirkung in Bezug auf die erreichte Emissionsreduktion unsicher. Ein Zertifikatehandel beschränkt die Menge der zugelassenen Emissionen, allerdings ist der zu zahlende Preis pro Tonne CO<sub>2</sub> unsicher.

### CO<sub>2</sub>-PREISE IM VERKEHR: EMISSIONSHANDEL

Steht bei der Reformdiskussion die Erreichung der *deutschen* Emissionsziele im Vordergrund, würde ein rein deutscher Emissionshandel, der auf den Verkehrssektor beschränkt ist, diese Ziele am sichersten erreichen. Ausgehend von der heutigen Situation müsste die Menge an ausgegebenen Zertifikaten bis 2030 um mindestens 40% reduziert werden, damit das Emissionsziel sicher erreicht würde. Allerdings ist angesichts der oben angesprochenen geringen Preiselastizität sowie der Kosten und Verfügbarkeit von Alternativen damit zu rechnen, dass die Preise für die Zertifikate weit über den Preisen für Emissionszertifikate im europäischen Emissionshandel und auch über den heute diskutierten Werten für eine potenzielle CO<sub>2</sub>-Steuer liegen würden. Der gesellschaftliche Widerstand dürfte entsprechend hoch sein und macht eine solche Lösung äußerst unwahrscheinlich. Zudem spiegeln die unterschiedlichen Preise für Zertifikate die unterschiedlichen Vermeidungskosten in den unterschiedlichen Sektoren wider. Nur zur Illustration: Bei einem Preis für ein »Verkehrszertifikat«, der beispielsweise dreimal so hoch wäre wie der Preis für ein Zertifikat im europäischen Emissionshandelssystem (EU EHS), könnten für die Kosten für die Vermeidung einer Tonne CO<sub>2</sub> deutscher Verkehrsemissionen alternativ drei Tonnen CO<sub>2</sub> im EU EHS vermieden werden. Auch unter Berücksichtigung der Signalwirkung nationaler Klimaziele im Verkehrsbereich sind die Nutzen und Kosten solcher Signale daher sorgfältig abzuwägen.

Bei einer Einbeziehung der Verkehrsemissionen in den europäischen Emissionshandel würde ein derartiger Effekt naturgemäß nicht auftreten. Aus Sicht der Verfechter der deutschen sektoralen Klimaziele wäre eine solche Lösung allerdings nicht befriedigend. Da sich Ort und Sektor der Emissionsminderung im europäischen Emissionshandel rein nach den Kosten der Vermeidung bestimmen, wäre eine solche Einbeziehung zwar volkswirtschaftlich effizient. Eine Erreichung des sektoralen Klimaziels im Bereich Verkehr wäre aber nicht garantiert. Aus Klimaschutzsicht ist dies naturgemäß kein Problem, solange die Menge der Emissionen insgesamt sinkt. Die deutschen Sektorziele müssten allerdings angepasst werden – eine Möglichkeit, die der Klimaschutzplan 2050 durchaus zulässt.

Eine unilaterale Einbeziehung zusätzlicher Emissionen in das EU EHS, wie sie zum Teil in Deutschland

gefordert wird, wäre nach Artikel 24 der Emissionshandelsrichtlinie zwar erlaubt. Sie ist aber laut BMU im Fall der Verkehrsemissionen nicht möglich, da der Emissionsbegriff des EU EHS nur die unmittelbare Freisetzung von Treibhausgasen aus Anlagen umfasst (vgl. *Tagesspiegel* 2019). Einer europaweiten Ausweitung des EU EHS würde die gleiche Regelung entgegenstehen. Während eine Anpassung der EU-Emissionshandelsrichtlinie zwar möglich wäre, wären die Hürden für eine Einbeziehung des Verkehrssektors oder auch aller bisher nicht durch das EU EHS erfassten Emissionen ungleich höher und kurzfristig kaum zu erwarten.

### CO<sub>2</sub>-PREISE IM VERKEHR: STEUER

Es bleibt die Option einer CO<sub>2</sub>-Steuer. Da die Einführung von EU-weiten Steuern dem Einstimmigkeitsprinzip unterliegt, wird diese Option auf EU-Ebene in der Regel nicht diskutiert. Einem deutschen Alleingang – oder einem mit einzelnen Mitgliedstaaten abgestimmten Vorgehen – stände allerdings nichts entgegen. Die Erreichung der Sektorziele wäre bei Festsetzung eines Emissionspreises allerdings wiederum unsicher.

Nichtsdestotrotz würde eine einheitliche Bepreisung der Emissionen außerhalb des EU EHS eine erhebliche Verbesserung gegenüber der heutigen Situation darstellen. Unterschiedliche Ökosteuerbestandteile der Energiesteuer führen heute zu erheblichen Verzerrungen. So beträgt der Ökosteueranteil der Energiesteuer auf Heizöl 8 Euro/tCO<sub>2</sub>, aber um die 60 Euro/tCO<sub>2</sub> auf Benzin und Diesel (vgl. Agora Energiewende 2017). Durch klimaschutzmotivierte Steuern und Umlagen wird Strom sogar mit ungefähr 200 Euro/tCO<sub>2</sub> belastet (u.a. Stromsteuer, Emissionshandel und EEG-Umlage), und dies, obwohl Strom in Zukunft vermehrt in Verkehr und Wärme eingesetzt werden muss, wenn die Klimaziele erreicht werden sollen. Ein einheitlicher CO<sub>2</sub>-Preis kann hier einen ersten wichtigen Schritt zu einer Steigerung der Effizienz der Klimaschutzbemühungen darstellen.

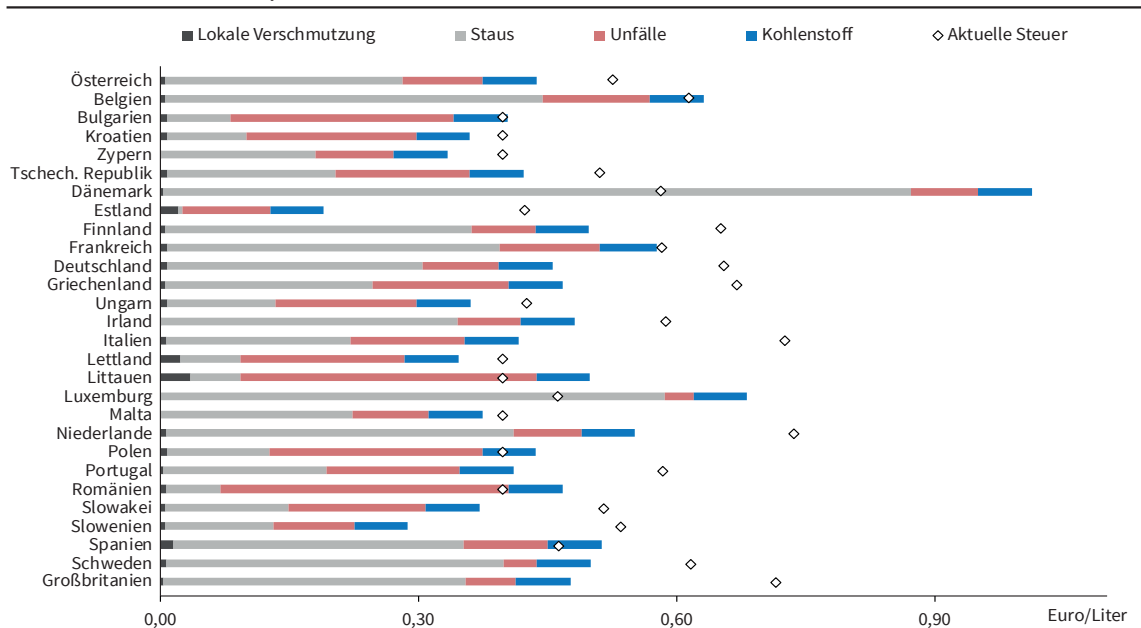
Diese Effizienzsteigerung setzt aber auch voraus, dass das bestehende System an Steuern, Abgaben und Umlagen parallel reformiert wird. Eine Abschaffung der Energiesteuer hätte allerdings im Jahr 2018 zu fast 41 Mrd. Euro Mindereinnahmen auf Bundesebene geführt (davon knapp 37 Mrd. Euro aus der Besteuerung von Diesel und Benzin).

### UMFASSENDE INTERNALISIERUNG DER EXTERNALITÄTEN DES STRASSENVERKEHRS

Hinsichtlich der Frage, welche Budgetwirkung ein Wegfall und Ersatz der Energiesteuer hätte, darf nicht vernachlässigt werden, dass die Energiesteuer nicht nur die Kosten aus CO<sub>2</sub>-Emissionen, sondern auch eine ganze Reihe weiterer sozialer Kos-

Abb. 1

Externe Kosten des Verkehrs pro Liter Benzin



Quelle: Parry und Vollebergh (2017).

© ifo Institut

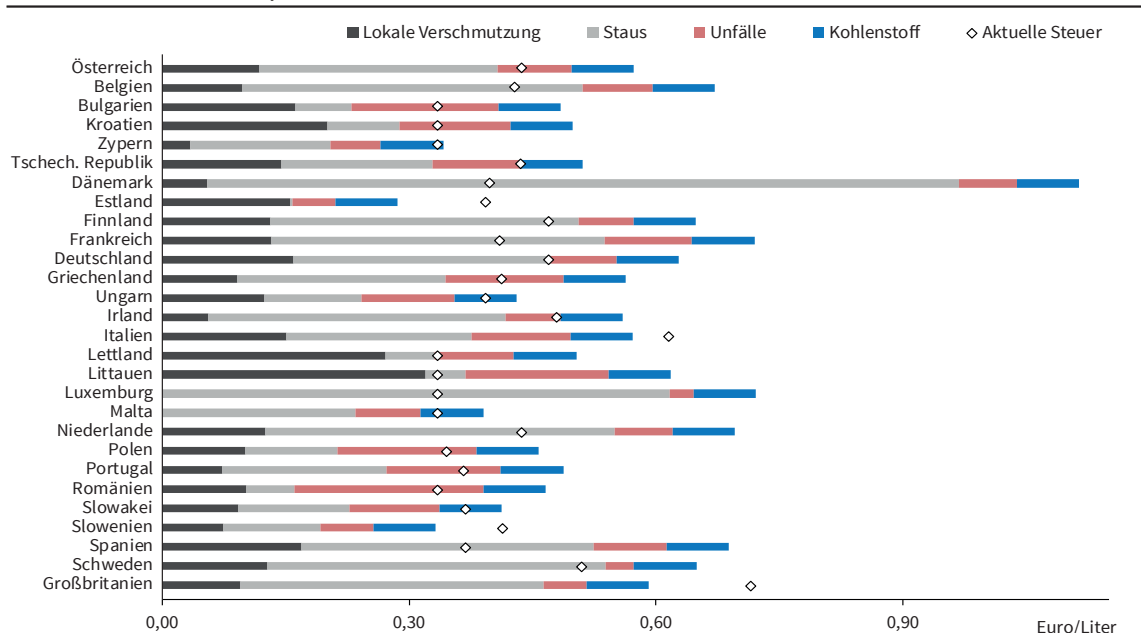
ten internalisieren soll. Ein Ersatz der Energiesteuer durch eine reine CO<sub>2</sub>-Bepreisung würde damit zu kurz greifen. Eine Studie aus dem Jahr 2017 (Parry und Vollebergh 2017) beziffert die volkswirtschaftlichen Schäden aus dem Straßenverkehr pro Liter Benzin und Diesel für verschiedene europäische Länder. Berücksichtigt wurden dabei sowohl Kohlenstoff als auch die Emissionen lokaler Verschmutzungsstoffe (wie Feinstaub und Stickoxide) sowie Staus und Unfälle. Die Emission einer Tonne CO<sub>2</sub> wurde dabei mit Kosten von 25 Euro/t

CO<sub>2</sub> angesetzt. Es wird deutlich, dass die deutsche Energiesteuer im Vergleich zu diesen Kosten zu hoch für Benzin und zu niedrig für Diesel ausfällt (vgl. Abb. 1 und 2).

Ein Ersatz der heutigen Energiesteuer durch die aus Parry und Vollebergh (2017) resultierenden Steuerersätze hätte nur relativ geringe Auswirkungen auf die staatlichen Budgets (und damit auch auf die Belastung der privaten Haushalte). Die zusätzliche Lenkungswirkung einer solchen Reform hinsichtlich eines Wechsels auf alternative Antriebe und Verkehrsmittel

Abb. 2

Externe Kosten des Verkehrs pro Liter Diesel

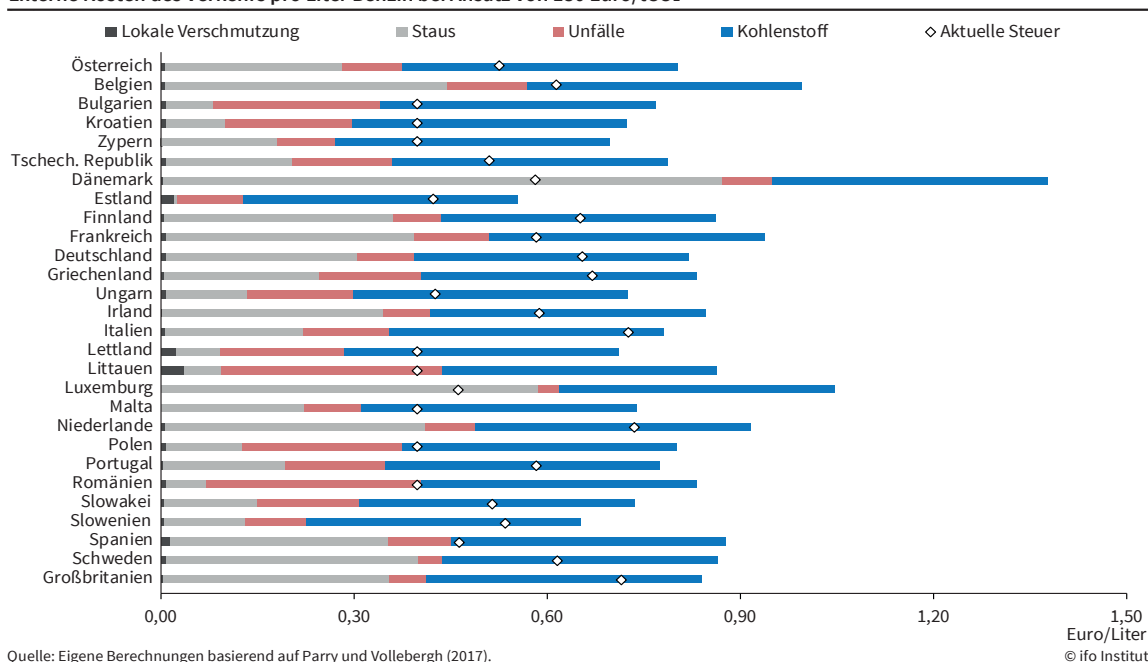


Quelle: Parry und Vollebergh (2017).

© ifo Institut

Abb. 3

Externe Kosten des Verkehrs pro Liter Benzin bei Ansatz von 180 Euro/tCO<sub>2</sub>



Quelle: Eigene Berechnungen basierend auf Parry und Vollebergh (2017).

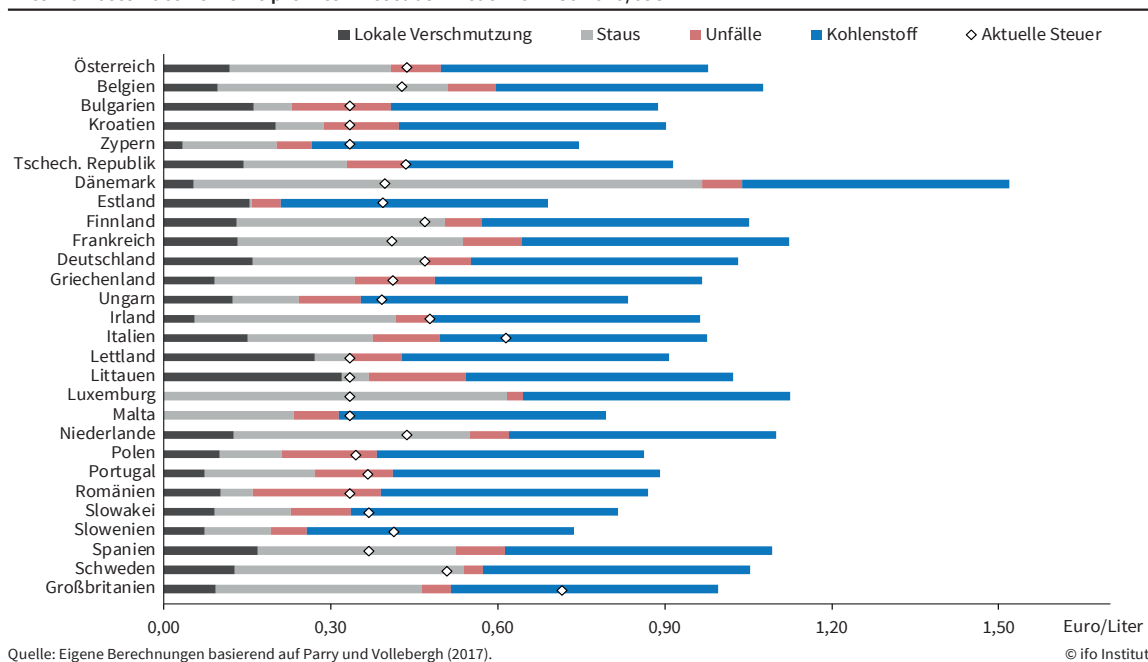
wäre allerdings auch beschränkt. Der explizite Ausweis einer CO<sub>2</sub>-Preiskomponente würde jedoch eine Erhöhung der Steuer über die Zeit vereinfachen, so dass sich die Lenkungswirkung eher langfristig entfalten würde.

Legt man, alternativ zu den gerade betrachteten 25 Euro/t CO<sub>2</sub>, einen Preis von 180 Euro/t CO<sub>2</sub> zugrunde, wird deutlich, welche Hebelwirkung der CO<sub>2</sub>-Preis auf die Höhe der optimalen Steuer hat. Ein solcher Preis wird vom Umweltbundesamt verwendet und auch von *Fridays For Future* gefordert (vgl. *Fri-*

*days For Future* 2019). Bei einem solchen Preis wären die heutigen Sätze der Energiesteuer im Verkehrsbereich bei weitem zu niedrig (vgl. Abb. 3 und 4, unter Verwendung der von DEKRA 2019 angegebenen Emissionsintensitäten). Zusätzliche Einnahmen aus der Steuer könnten entsprechend für Maßnahmen verwendet werden, um gezielt andere Steuern zu senken oder die Sozialverträglichkeit der Besteuerung zu erhöhen (z.B. durch eine Rückverteilung der Einnahmen pro Kopf, wie sie bereits heute in der Schweiz praktiziert wird).

Abb. 4

Externe Kosten des Verkehrs pro Liter Diesel bei Ansatz von 180 Euro/tCO<sub>2</sub>



Quelle: Eigene Berechnungen basierend auf Parry und Vollebergh (2017).

Es bleibt die Frage, ob die Externalitäten aus lokaler Verschmutzung, Staus und Unfällen mit einer allgemeinen Energiesteuer bisher adäquat adressiert wurden. Da insbesondere Staus, aber auch die Konzentration an lokaler Verschmutzung und zum Teil auch Unfälle, von der jeweiligen Verkehrssituation abhängig sind, wäre eine Bepreisung über verkehrsflussabhängige und gegebenenfalls lokale Systeme, wie zum Beispiel die von Frondel in diesem Heft diskutierte Städte-Maut, verursachungsgerechter und effektiver (Frondele 2019). Allerdings würde eine solche Lösung die Verteilung der Einnahmen aus der Bepreisung von Externalitäten zwischen den verschiedenen Ebenen staatlicher Budgets erheblich beeinflussen. Straßenschäden, die primär von Lkws verursacht werden, werden bereits heute über die Lkw-Maut bepreist (mit einem Aufkommen von ca. 5 Mrd. Euro im Jahr 2018, vgl. VIFG 2019).

Die häufig angeführte Finanzierungsfunktion der Energiesteuer für Infrastruktur- und Reparaturmaßnahmen im Verkehrsbereich wird hier ausgeblendet, da die Mittel aus der Energiesteuer seit 1989 nicht mehr zweckgebunden sind. Heute erfolgt die Finanzierung der Verkehrsinfrastruktur (nicht nur Straßen) aus verschiedenen Quellen. Der größte Teil der bereitgestellten Mittel kommt nach wie vor aus dem Steueraufkommen (rd. zwei Drittel), knapp ein Drittel beträgt der Anteil von Nutzungsgebühren (Lkw-Maut). Hinzu kommen weitere Mittel von der Europäischen Union (vgl. BMVI 2019).

## WIE WEITER?

Auch im Hinblick auf den Verkehrssektor sollte die Einführung von CO<sub>2</sub>-Preisen im Zentrum der klimapolitischen Reformbemühungen stehen. Verschiedene Gestaltungsoptionen gehen dabei mit Vor- und Nachteilen einher. Aus volkswirtschaftlicher Sicht bietet eine umfassende Einbeziehung des Verkehrssektors in das EU EHS das höchste Effizienzsteigerungspotenzial. Die Festlegung der Emissionsmenge anstatt des Emissionspreises würde auch der Tatsache Rechnung tragen, dass über die Schätzung der langfristigen Schäden aus CO<sub>2</sub>-Emissionen hohe Unsicherheit herrscht. Tol (2009) gibt in seiner Übersicht über die einschlägige Literatur Werte (je nach Diskontrate und Modell) zwischen weniger als 10 US-Dollar und mehr als 2 000 US-Dollar an (wobei beides Extremwerte sind).

Da eine Einbeziehung der bisher nicht durch das EU EHS erfassten Emissionen auf EU-Ebene allerdings eher mittelfristig realisierbar erscheint, sind nationale Lösungen zumindest in der kurzen Frist realistischer.

Wie auch immer eine CO<sub>2</sub>-Bepreisung realisiert wird, wird sie ihre volle Lenkungswirkung nur dann entfalten, wenn das existierende System an Energiesteuern, -abgaben und -umlagen

ebenfalls reformiert wird. Dabei spielt der Ersatz des gegenwärtigen Systems durch eine umfassende und systematische Internalisierung der über die CO<sub>2</sub>-Emissionen hinausgehenden gesellschaftlichen Kosten des Straßenverkehrs eine zentrale Rolle.

Schlussendlich hängen die Wirkungen klima- und umweltpolitischer Maßnahmen im Verkehrssektor aber auch immer von verfügbaren Substituten ab. Während die Einpreisung der gesellschaftlichen Kosten des Straßenverkehrs hier wichtige Anreize zu Entwicklung und Einsatz alternativer Mobilitäts- und Antriebsformen setzt, wird auf ergänzende Maßnahmen in den Bereichen Infrastruktur und Forschungsförderung kaum zu verzichten sein. Nicht diskutiert wurden in diesem Beitrag die Kfz-Steuer und die Belastung des Stroms insbesondere durch die EEG-Umlage. Beide sollten in ihrer jetzigen Form allerdings ebenfalls einer kritischen Prüfung unterzogen werden.

## LITERATUR

- Agora Energiewende (2017), *Neue Preismodelle für Energie. Grundlagen einer Reform der Entgelte, Steuern, Abgaben und Umlagen auf Strom und fossile Energieträger. Hintergrund*, Berlin.
- Anthoff, D. und R. Tol (2013), »The uncertainty about the social cost of carbon: A decomposition analysis using fund«, *Climatic Change* 117, 515–530.
- BMVI – Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (2019), *Finanzierung*, verfügbar unter: <https://www.bmvi.de/DE/Themen/Mobilitaet/Infrastrukturplanung-Investitionen/Finanzierung/finanzierung.html>, aufgerufen am 20. Juni 2019.
- Coglianesi, J., L. W. Davis, L. Kilian und J. H. Stock (2017), »Anticipation, Tax Avoidance, and the Price Elasticity of Gasoline Demand«, *Journal of Applied Econometrics* 32, 1–14.
- DEKRA (2019), »CO<sub>2</sub> spielt eine entscheidende Rolle, Im Blickfeld: Emissionen durch Straßenverkehr«, verfügbar unter: <https://www.dekra.de/de/umwelt-und-co2>, aufgerufen am 20. Juni 2019.
- Fridays For Future (2019), »Unsere Forderungen an die Politik«, verfügbar unter: <https://fridaysforfuture.de/forderungen>, aufgerufen am 20. Juni 2019.
- Frondele, M. (2019), »Plädoyer für eine Städte-Maut«, *ifo Schnelldienst* 72(12), 6–9.
- Paltsev, S., Y.-H. H. Chen, V. Karplus, P. Kishimoto, J. Reilly, A. Löschel, K. v. Graevenitz und S. Koesler (2016), »Reducing CO<sub>2</sub> from Cars in the European Union«, *Transportation*, online.
- Parry, I. und H. Vollebergh (2017), »Reforming the EU Energy Tax Directive: Assessing the Options«, in: Parry I., K. Pittel und H. Vollebergh (eds.), *Energy Tax and Regulatory Policy in Europe*, MIT Press.
- Tagesspiegel (2019), »Background Energie und Klima«, 26. April.
- Tol, R.S.J. (2009), »The Economic Effects of Climate Change«, *Journal of Economic Perspectives* 23 (2), 29–51.
- Umweltbundesamt (2019a), »Emissionen des Verkehrs«, verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/verkehr/emissionen-des-verkehrs>, aufgerufen am 20. Juni 2019.
- Umweltbundesamt (2019b), »Fahrleistungen, Verkehrsaufwand und »Modal Split«, verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/verkehr/fahrleistungen-verkehrsaufwand-modal-split#textpart-3>, aufgerufen am 20. Juni 2019.
- VIFG – Verkehrsinfrastrukturfinanzierungsgesellschaft (2019), »Mauteinnahmen und Mautverwendung«, verfügbar unter: <https://www.vifg.de/de/finanzmanagement-bfst-maut/mauteinnahme-und-mautverwendung>, aufgerufen am 20. Juni 2019.