

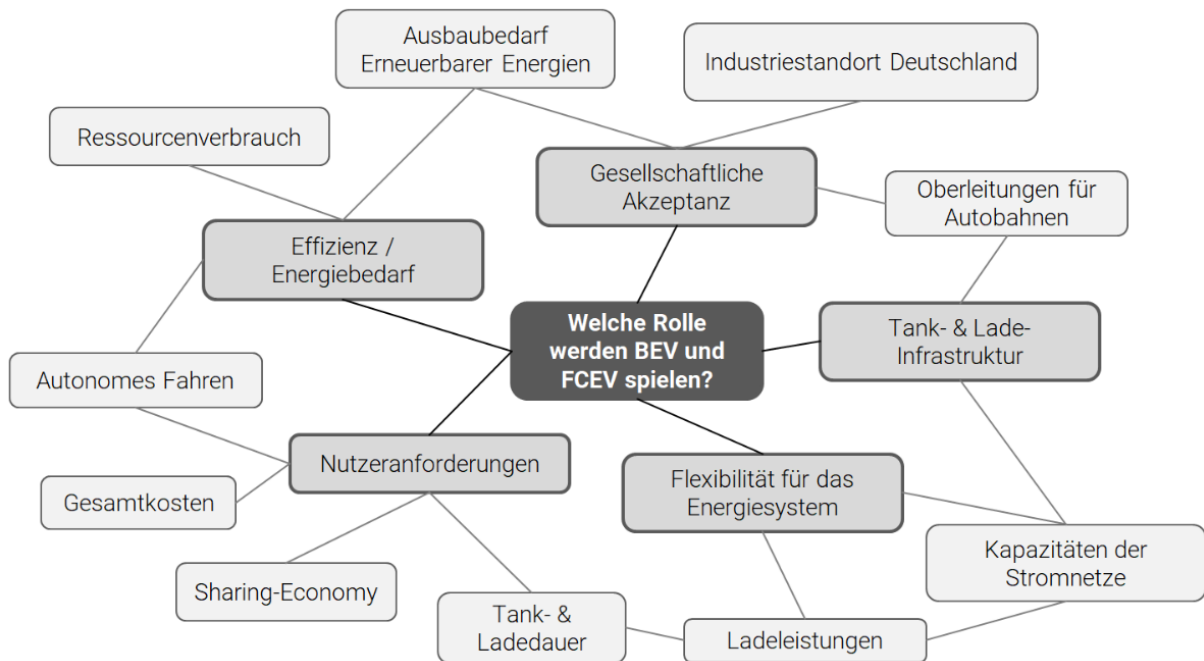
## **Welche Rolle werden Wasserstoff- und batterieelektrische Mobilität einnehmen? – Eine Debatte ohne einfache Antworten**

Pre-Print des Artikels „Debatte und Aufruf – Rolle von Wasserstoff- und batterieelektrischer Mobilität“, erschienen in ATZ elektronik 05|2017

*Das Reiner Lemoine Institut erforscht seit mehr als sieben Jahren die Möglichkeiten einer integrierten Energiewende im Strom- und Verkehrsbereich. In der Wissenschaft aber vor allem auch in Politik und Wirtschaft werden die Wasserstoffherzeugung aus Erneuerbaren Energien sowie die Wasserstoffverwendung im Verkehr kontrovers diskutiert – insbesondere in Abgrenzung zu batterieelektrischen Fahrzeugen, die aktuell im Zentrum der Debatte um die Verkehrswende stehen. In diesem Artikel geben wir einen Überblick über die häufigsten Argumentationsstränge dieser Debatte und ergänzen ausgewählte strittige Punkte um Daten und Fakten aus der Arbeit des RLI.*

Der Verkehr ist der einzige Sektor in Deutschland, dessen Treibhausgasemissionen in den letzten Jahren nicht gesunken, sondern sogar gestiegen sind. Ein offensichtlicher Schritt zur Dekarbonisierung des Verkehrs besteht in der Substitution fossiler Energieträger und der Elektrifizierung der Antriebe. Hierzu zählt vor allem die Einführung des batterieelektrischen Antriebs, der voraussichtlich bereits Mitte der 2020er Jahre eine Gesamtbetriebskostenparität erreicht haben wird<sup>[1][2]</sup>. Während Deutschland mit der Aufbereitung des Abgasskandals beschäftigt ist und über drohende Fahrverbote in Städten diskutiert, haben Länder wie Norwegen, Frankreich und Großbritannien den Abschied vom Verbrennungsmotor zwischen 2030 und 2040 in Aussicht gestellt. Auch Österreich diskutiert ein Verbot für die Neuzulassung von Verbrennungsmotoren ab 2030. China wird eine „Elektroauto-Quote“ einführen. Dass einige junge Fahrzeughersteller aus den USA und dem asiatischen Raum ausschließlich batterieelektrische Fahrzeuge (Battery Electric Vehicles, BEV) anbieten, verwundert darum nicht. Die Elektrifizierungsstrategie etablierter OEMs war dagegen bisher deutlich verhaltener, schließlich muss die aufwendige Entwicklung von alternativen Antrieben aus den Erlösen konventioneller Fahrzeuge finanziert werden. Offen ist die Frage: Welche Fahrzeugkonzepte werden sich in dem weiterhin wachsenden globalen Fahrzeugmarkt etablieren – diejenigen mit Batterien oder diejenigen mit Wasserstoff als Kraftstoff?

In einer Argumentationsanalyse der Debatte um alternative Antriebe zeigen wir das komplexe Für und Wider von Brennstoffzellenfahrzeugen (Fuel Cell Electric Vehicles, FCEV) im Vergleich zu BEV. Grob lassen sich die einzelnen Streitfragen verschiedenen Themengebieten zuordnen, wie etwa Tank- und Ladeinfrastruktur, Nutzeranforderungen, gesellschaftliche Akzeptanz, Energiesystem, sowie Effizienz und Energiebedarf (Abbildung 1). Anhand ausgewählter Beispiele werden drei Argumentationsstränge erläutert.

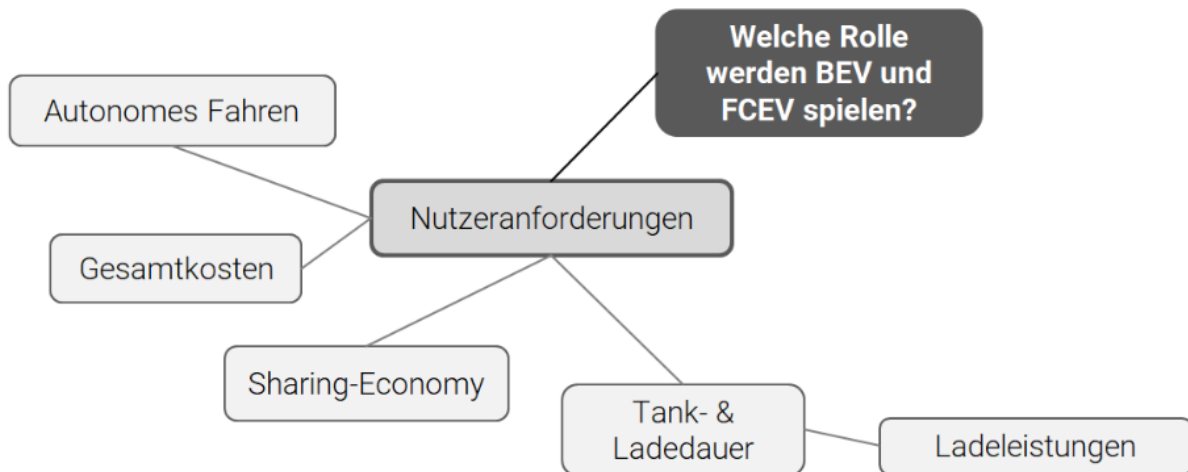


**Abbildung 1: Schematische Darstellung der Argumentationsanalyse zur Rolle von BEV und FCEV**

### Argumente aus Nutzersicht

Die Nutzungsprofile im Straßenverkehr sind sehr unterschiedlich – man denke nur an private und gewerbliche PKW sowie Nutzfahrzeuge. Noch vor wenigen Jahren wurden BEV meist als Zweitwagen für kleine Reichweiten im privaten Bereich sowie für den gewerblichen Einsatz im Stadtverkehr diskutiert. Fuhrparkanalysen bestätigten, dass in den meisten Anwendungen für 80 Prozent oder sogar 100 Prozent der geforderten Strecken eine Reichweite von 100 km ausreichend ist [3]. Die Standzeiten zum Aufladen der Fahrzeuge sind ebenso meist ausreichend und können über die Wahl der Ladeleistung allen Bedürfnissen angepasst werden [4][5]. Ein flächendeckendes Netz öffentlicher Ladeinfrastruktur ist bei meist regelmäßigen, planbaren Routen auch (noch) nicht erforderlich, wenn die benötigte Ladeinfrastruktur zu Hause, am Arbeitsplatz oder entlang gewerblicher Routen installiert wird.

Kürzlich angekündigte BEV-Modelle zeigen außerdem, dass auch Langstreckenfahrten bewältigt werden können. Reichweiten von mehr als 350 km bis 400 km im Praxisbetrieb und Schnellladeoptionen werden als langstreckentauglich empfunden[6][7]. Brennstoffzellenfahrzeuge lassen sich innerhalb von Minuten auftanken und wieder auf diese Reichweiten bringen. Bei BEV ist das anders: Sie brauchen eine flächendeckend verfügbare Ladeinfrastruktur und bei steigendem Anteil von BEV auch ein leistungsfähiges Schnellladesystem zum gleichzeitigen Laden mehrerer Fahrzeuge[8][9]. Neben dem Einfluss der Tank- und Ladedauer auf die Nutzeranforderungen ist für Nutzerinnen und Nutzer hauptsächlich das Argument der Gesamtkosten für Kauf und Betrieb von Fahrzeugen (Total Cost of Ownership, TCO) entscheidend (Abbildung 2). Dieser Punkt bestimmt im privaten aber vor allem im gewerblichen Bereich, wie groß der Anteil alternativer Antriebe in großen Flotten sein wird[10].

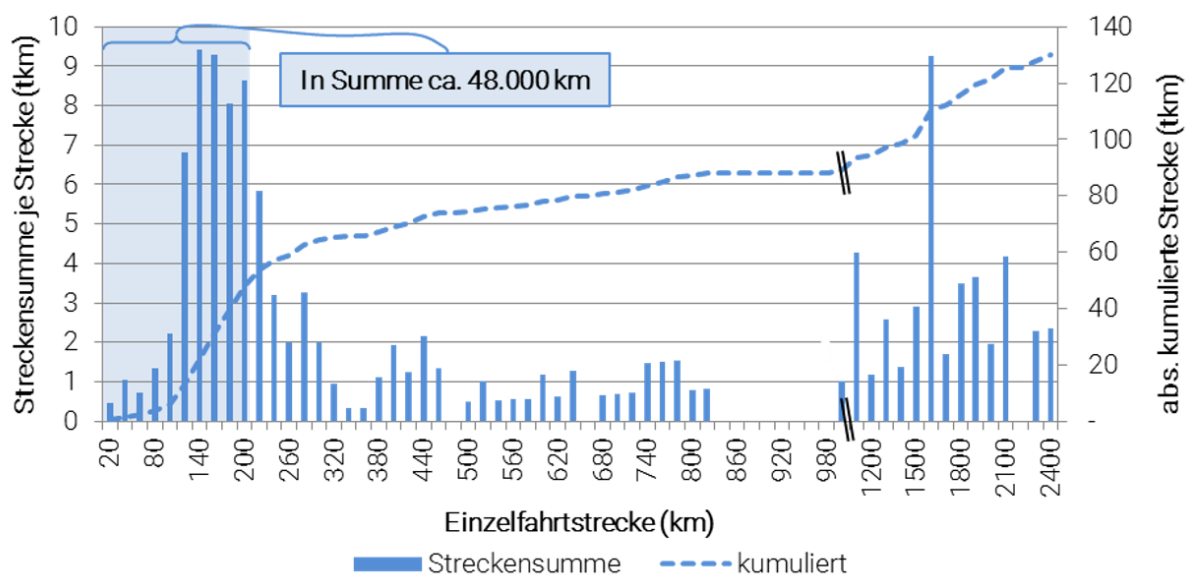


**Abbildung 2: Ausgewählte Aspekte aus Nutzersicht**

Je nachdem, wie sich Nutzungsmuster zukünftig verändern, etwa durch mehr Carsharing-Fahrzeuge in Großstädten oder durch Megatrends wie das autonome Fahren, werden BEV und FCEV ihre jeweiligen Vorteile (Auflade- bzw. Tankzeiten, Reichweiten, etc.) ausspielen.

Praxisbeispiel:

Über einen Zeitraum von mehr als zwei Jahren haben wir in der Studie PIONeER [11] Fahrtenbücher von zwei Fahrzeugen der N1-Klasse (< 3,5 t) eines Windenergiedienstleisters ausgewertet. Circa 80 Prozent der Einzelfahrten sind kürzer als 200 km. Derzeit angekündigte batterieelektrische Fahrzeuge dieser Klasse geben Reichweiten nach NEFZ von bis zu 400 km an [12]. Es kann daher davon ausgegangen werden, dass eine Reichweite von 200 km auch im Winter und bei vollem Beladungszustand sichergestellt ist. Abbildung 3 zeigt, dass die verbleibenden 20 Prozent der Einzelfahrten jedoch ca. 62 Prozent der Gesamtjahresstrecke dieser Fahrzeuge entsprechen – also deutlich größere Reichweiten benötigt werden.

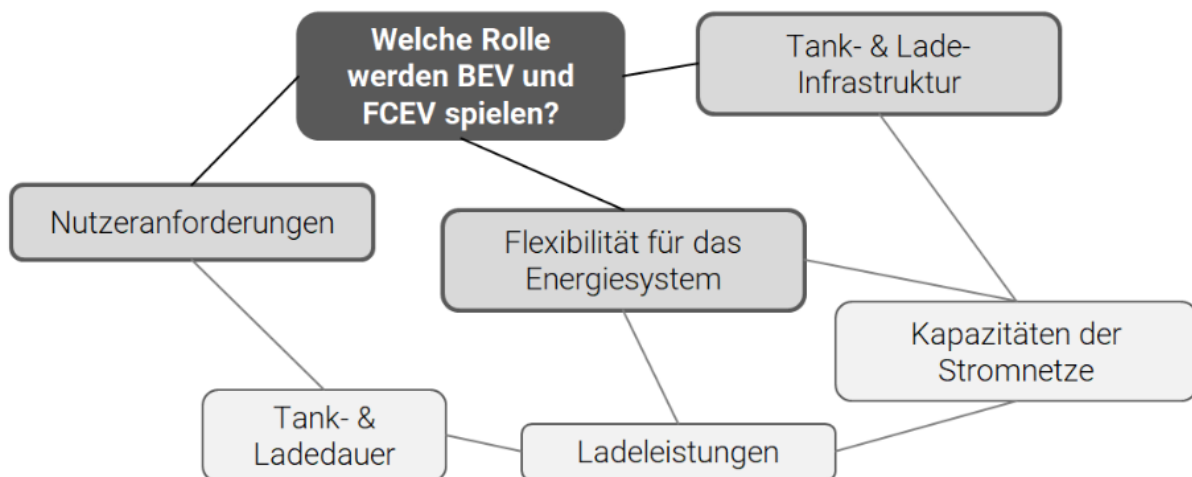


**Abbildung 3: Darstellung der Fahrten zweier Nutzfahrzeuge nach Streckenlänge**

Brennstoffzellenfahrzeuge könnten in diesem Fall sämtliche Anforderungen erfüllen. Als Plug-In-Hybrid ausgeführt, kann eine Traktionsbatterie kürzere Strecken effizient zurücklegen und auf Langenstrecken kurze Tankzeiten und ausreichende Reichweiten garantieren. Mercedes-Benz hat für das PKW-Segment ein vergleichbares Konzept für den GLC F-CELL angekündigt[13]. Sollten in diesem Fuhrpark stattdessen BEV zum Einsatz kommen, sind eine flächendeckende Schnellladeinfrastruktur sowie ausreichend dimensionierte Stromanschlüsse zum gleichzeitigen Laden mehrerer Fahrzeuge erforderlich.

### Argumente aus dem Themengebiet Stromnetz

Der Umbau der Stromerzeugung von konventionellen Kraftwerken zu Erneuerbaren Energien ist eine Herausforderung für die Stromnetze. Mit zunehmender Marktdurchdringung von BEV werden die Anforderungen weiter steigen – insbesondere bei hohen Ladeleistungen (Abbildung 4) und insbesondere auf den niederen Netzebenen. Die Bandbreite der möglichen Ladeleistungen von BEV reicht beim Laden mit Wechselstrom von 2,7 kW bis zu 43 kW und beim DC-Laden bis 350 kW. Nutzfahrzeuge wie etwa Busse werden derzeit bereits mit Leistungen von mehr als 350 kW geladen[14]. Es gibt Untersuchungen, die nahelegen, dass in den meisten Fällen geringe Ladeleistungen für die alltäglichen Wege privater PKW genügen[5]. Einige OEMs versprechen das sehr schnelle „Laden wie Tanken“, was nur mit hohen Ladeleistungen möglich ist[15]. FCEV auf der anderen Seite benötigen zwar mehr elektrische Energie für die Kraftstoffherstellung mittels Elektrolyse, diese ist jedoch hinsichtlich Lastverlauf und Standort flexibel, was eine höhere Netzverträglichkeit bedeutet.

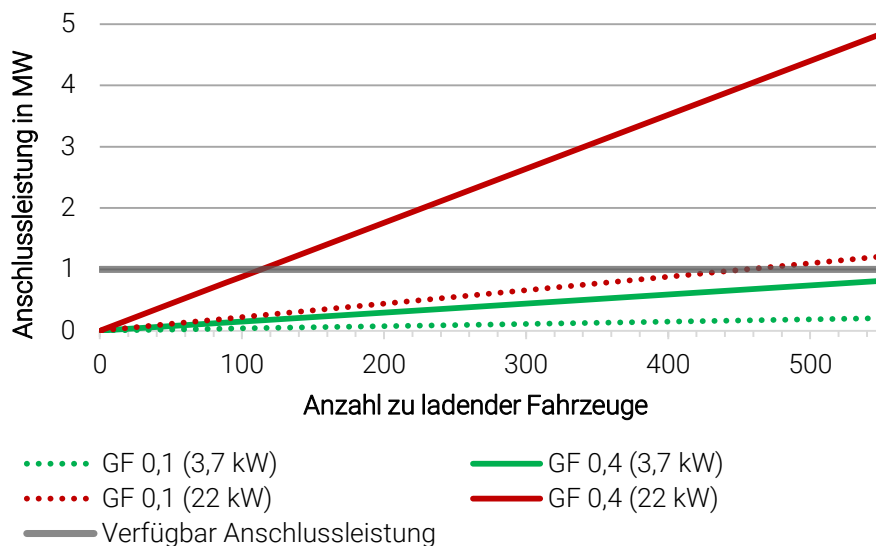


**Abbildung 4: Ausgewählte Aspekte im Hinblick auf das Stromnetz**

Auch BEV könnten flexibel geladen werden oder sogar Energie zurückspeisen (Vehicle-to-Grid). Wie stark sie sich tatsächlich flexibilisieren lassen und ob Nutzerinnen und Nutzer bereit sein werden, andere mitentscheiden zu lassen, wann und wie schnell ihr Fahrzeug geladen wird, ist unklar. Wie stark die Auswirkungen einer großen Anzahl an BEV auf das Stromnetz sein werden lässt sich also nicht so einfach bestimmen. Dies spiegelt sich auch in verschiedenen Untersuchungen und ihren teils sehr unterschiedlichen Ergebnissen wider. Ihr Urteil zur Netzauswirkung von BEV reicht dabei von „netzverträglich“[16] oder sogar „netzstützend“ [17] bis zu „netzbelastend“[18][19].

In jedem Fall kann es lokal zu starken Netzbelastungen bzw. -restriktionen kommen, insbesondere dort, wo viele BEV parken und laden. Dies ist das Ergebnis unserer Untersuchung eines der fünf Parkhäuser am zukünftigen Flughafen BER. Das Parkhaus verfügt über 1.650 Stellplätze für Mietfahrzeuge; die maximale Leistung des Netzanschlusses beträgt 1 MW. Darüber müssen jedoch neben den Fahrzeugen auch Beleuchtung und Waschanlagen versorgt werden. Die maximal erforderliche Netzanschlussleistung wurde für den Fall bestimmt, dass

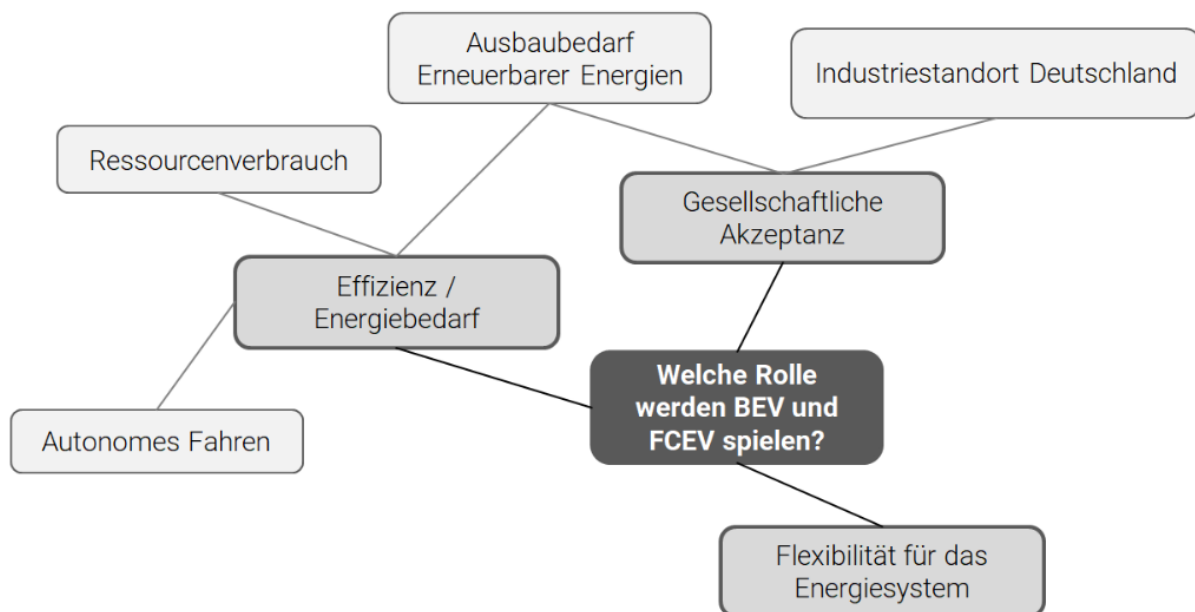
bis zu ein Drittel der Fahrzeuge zukünftig BEV sind. Dabei wurden verschiedene Ladeleistungen und Gleichzeitigkeitsfaktoren untersucht (siehe Abbildung 55). Bereits bei Ladeleistungen von 22 kW und einem geringen Gleichzeitigkeitsfaktor von 0,1 muss der Netzanschluss mehr als 1 MW bereitstellen (rot gepunktete Linie). Bei einem höheren Gleichzeitigkeitsfaktor von 0,4 können nur etwa 100 Fahrzeuge versorgt werden. Selbst geringe Ladeleistungen lasten den Netzanschluss bei einem Gleichzeitigkeitsfaktor von 0,4 fast vollständig aus. Es wird deutlich, dass diese Last zukünftig flexibilisiert werden muss, etwa über gesteuertes Laden oder stationäre Speicher, oder dass die Netzanschlusstelle verstärkt werden muss. Eine Alternative wären FCEV: Die benachbarte H2-Tankstelle mit Onsite-Elektrolyse benötigt einen Netzanschluss von gerade einmal 0,5 MW und kann damit etwa 400 Fahrzeuge versorgen – in jeweils fünf Minuten.



**Abbildung 5: Erforderliche Netzanschlussleistung für ein Parkhaus in Abhängigkeit von BEV-Anzahl, Ladeleistung und Gleichzeitigkeitsfaktor (GF)**

### Argumente mit Hinblick auf das Energiesystem

Der grundlegende systemische Vorteil des batterieelektrischen Antriebs ist seine hohe Effizienz in allen Abschnitten der energetischen Umwandlung (Primärenergieeffizienz bzgl. Well-to-Wheel). Daraus folgt, dass batterieelektrische Mobilität in Summe weniger Energie benötigt als die wasserstoffelektrische. Wird gefordert, dass der Großteil des Energiebedarfs inländisch erzeugt wird, leitet sich ab, dass sich batterieelektrische Mobilität weniger stark auf den notwendigen Ausbau Erneuerbarer Energie auswirkt. Zum einen ist dies für sich gesehen ein Vorteil, da der Ausbau in einigen Regionen Deutschland bereits jetzt auf Kritik stößt [20], zum anderen können hierdurch Treibhausgasemissionen vermieden werden, die bei der Herstellung und Installation Erneuerbarer-Energie-Erzeugungsanlagen entstehen [21] (Abbildung 6). Auf der anderen Seite hängen die Auswirkungen von BEV auf das Energiesystem auch davon ab, wie flexibel sie geladen werden können. Bei nur mäßiger Flexibilität bedeuten sie eine zusätzliche, weitestgehend starre Last. Die Kraftstoffherstellung für FCEV hingegen kann flexibilisiert werden und fügt sich so vorteilhaft in das Energiesystem ein. So kann ggf. der Aufbau zusätzlicher stationärer Speicher begrenzt werden [22].



**Abbildung 6: Ausgewählte systemische Aspekte**

### Weitere Aspekte der Debatte

Neben den genannten gibt es Argumente, die das Potenzial bergen, die gesamte Debatte zu dominieren und alle anderen Argumente quasi obsolet werden zu lassen. Einige Untersuchungen der letzten Jahre lassen vermuten, dass sowohl Reserven als auch Ressourcen einiger notwendiger Elemente für die Batterieproduktion (darunter Kobalt oder Lithium) noch in diesem Jahrhundert erschöpft sein könnten [23][24]. Obwohl laufende Forschungen zu stofflichen Alternativen hier Abhilfe schaffen könnten, weisen andere Untersuchungen darauf hin, dass selbst bei ausreichender Bereitstellung von Rohstoffen die Kapazität der Batterieproduktionsstätten ein Flaschenhals für Lithiumbatterien insgesamt sein könnte [25]. Bei uneingeschränkter Forderung nach ähnlichen Modal Splits, wie wir sie heute vorfinden, könnten FCEV hierdurch allein aus versorgungstechnischer Sicht notwendig werden. Weiterhin kann aus industriepolitischer Perspektive die Brennstoffzellentechnologie für den

Wirtschaftsstandort Deutschland vorteilhaft sein[26][27]. In jedem Fall ist das Gesamtbild der Verkehrswende im Auge zu behalten. Immer wieder wird auf die Megatrends der Mobilitätswende verwiesen – darunter vor allem Autonomisierung und Sharing. Diese könnten kompatibler mit batterieelektrischer Mobilität als mit wasserstoffelektrischer sein oder genau umgekehrt. Mindestens sollte davon ausgegangen werden, dass diese und andere Megatrends die aktuellen Argumentationsmuster aufbrechen und neu sortieren können.

### **Fazit und Ausblick**

Was bedeutet das für Batterien und Wasserstoff als alternative Antriebe? In der Verkehrswende müssen vielfältige Aspekte und Wechselwirkungen berücksichtigt werden. Es wundert daher nicht, dass es keinen Masterplan „Batterie-oder-Brennstoffzelle“ gibt. Diese Komplexität sollte jedoch ein Ansporn für alle Akteure der Energie- und Verkehrswende zur gemeinsamen Diskussion sein, denn schließlich hängen Treibhausgasemissionen sondern auch viele Arbeitsplätze in Deutschland an der Fahrzeugindustrie.

### **Machen Sie mit**

Dieser Artikel skizziert eine Argumentationsanalyse, die nur einige Aspekte der Debatte anreißt. Sie basiert auf einer umfangreichen Argumentationskarte, die das Reiner Lemoine Institut erarbeitet hat und aktuell weiterentwickelt. Um die Debatte so umfassend wie möglich abzubilden und dadurch die Forschung auf diesem Themengebiet zu unterstützen, sind Außenperspektiven und Ergänzungen ausdrücklich erwünscht. Wir laden alle Leserinnen und Leser zur Diskussion und zur Vervollständigung der Argumentationskarte ein ([www.reiner-lemoine-institut.de/mobilitaet\\_argumap](http://www.reiner-lemoine-institut.de/mobilitaet_argumap)). So möchten wir die Kartierung permanent erweitern und zu einer Grundlage für eine differenzierte und umfassende Debatte wachsen lassen.



## Literaturverzeichnis

- [1] International Energy Agency: Global EV Outlook 2017, Paris, IEA Publications, 2017
- [2] Bloomberg New Energy Finance: Electric Vehicle Outlook 2017, New York, 2017
- [3] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur: Verkehr und Mobilität in Deutschland - Daten und Fakten kompakt, Berlin, 2016
- [4] Höfler, F.; Neumann, M.: Nutzung der mittelständischen Tankstelleninfrastruktur. Berlin/Cottbus/Magdeburg, MEW e.V., 2016
- [5] Schumann, D.: Status quo Ladeinfrastruktur - Begleit- und Wirkungsforschung Schaufenster Elektromobilität (BuW) Ergebnispapier Nr. 36. Frankfurt am Main, Deutsches Dialog Institut GmbH, 2016
- [6] Kreyenberg, D.: Fahrzeugantriebe für die Elektromobilität, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2015
- [7] Schühle, F.: Die Marktdurchdringung der Elektromobilität in Deutschland. München/Mering: Rainer Hampp Verlag, 2014
- [8] Passier, R.; Raupbach, A.: Elektromobilität funktioniert!? - Alltagstauglichkeit für die Langstrecke. Dresden, TU Dresden, 2016
- [9] Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V.: Hochlauf der Elektromobilität in Deutschland bis 2020. Berlin, 2017
- [10] Duddenhöffer, K.: Akzeptanz von Elektroautos in Deutschland und China. Wiesbaden: Springer Gabler, 2015
- [11] Elektromobilität: RLI legt Studie zum Ausbau der öffentlichen Ladeinfrastruktur in Brandenburg vor. Online: <http://reiner-lemoine-institut.de/elektromobilitaet-rli-legt-studie-zum-ausbau-der-oeffentlichen-ladeinfrastruktur-in-brandenburg-vor/>, aufgerufen am 14.08.2017
- [12] Volkswagen e-Crafter: Transporter mit E-Motor vorgestellt. Online: <https://www.heise.de/autos/artikel/Volkswagen-e-Crafter-Transporter-mit-E-Motor-vorgestellt-3329025.html>, aufgerufen am 14.08.2017
- [13] Unter der Lupe: Mercedes-Benz GLC F-CELL: Die Brennstoffzelle bekommt einen Stecker. Online: <http://media.daimler.com/marsMediaSite/ko/de/11111320>, aufgerufen am 14.08.2017
- [14] eBus-Schnelladelösungen von Siemens. Online: <https://www.siemens.com/press/pool/de/events/2015/mobility/2015-06-uitp/presentation-ebus-d.pdf>, aufgerufen am 14.08.2017

- [15] Der Weg in die E-Mobilität aus Sicht der Audi AG. Online: [https://www.siemens.de/Digital-Factory/download/EventDocs/Der%20Weg%20in%20die%20E-Mobilit%C3%A4t\\_Audi\\_Marcel%20Aslund.pdf](https://www.siemens.de/Digital-Factory/download/EventDocs/Der%20Weg%20in%20die%20E-Mobilit%C3%A4t_Audi_Marcel%20Aslund.pdf), aufgerufen am 14.08.2017
- [16] Linsen, J.; et al.: Netzintegration von Fahrzeugen mit elektrifizierten Antriebssystemen in bestehende und zukünftige Energieversorgungsstrukturen. Jülich: Forschungszentrum Jülich GmbH Zentralbibliothek, 2012
- [17] Ciechanowicz, D.; et al.: Ökonomische Bewertung von Vehicle-to-Grid in Deutschland. In: *Tagungsband der MKWI 2012*, Braunschweig, 2012
- [18] Nobis, P.; et al.: Netzstabilität mit Elektromobilität. München: Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V., 2015
- [19] Lienkamp, M.: Status Elektromobilität 2014. München, 2014
- [20] Walter, G.: Erfolgsfaktoren für die Akzeptanz von Erneuerbare-Energie-Anlagen. *Energiewirtschaftliche Tagesfragen 61 (2011), Nr. 3, S. 2-4*
- [21] National Renewable Energy Laboratory: Life Cycle Greenhouse Gas Emissions from Solar Photovoltaics. Golden, 2012
- [22] Goldammer, K.; et al.: Energie- und Verkehrswende – eine nationale Betrachtung. In: 2. ATZ-Fachtagung: Netzintegration der Elektromobilität 2017, Konferenzbeitrag, Berlin, 2017
- [23] Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.: Begleitforschung zu Technologien, Perspektiven und Ökobilanzen der Elektromobilität. Stuttgart, 2015
- [24] Fraunhofer ISI: Lithium für Zukunftstechnologien. Karlsruhe, 2009
- [25] Rasilier, T.: Reichweitenabschätzung der Lithiumvorkommen. München, Forschungsstelle für Energiewirtschaft e. V., 2010
- [26] Schade, W.; et al.: Sieben Herausforderungen für die deutsche Automobilindustrie. Berlin: edition sigma, 2014
- [27] Peters, A.; et al.: Konzepte der Elektromobilität und deren Bedeutung für Wirtschaft, Gesellschaft und Umwelt. Berlin: Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag, 2012