

Elektromobilität

**Systembedingungen, Einsatzbedingungen und
Systemintegration**

FGSV-Bericht



© 2018 Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V., Köln

Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die des Nachdruckes, der Übersetzung, des Vortrages, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten.

ISBN 978-3-86446-217-7



Elektromobilität

**Systembedingungen, Einsatzbedingungen und
Systemintegration**

FGSV-Bericht

Stand: Juli 2018

**Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen
Querschnittsausschuss 7: „Postfossiler Verkehr – Elektromobilität“**

Leiter:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Felix Huber, Wuppertal

Mitglieder:

Dipl.-Ing. Kristine Brosch, Wuppertal

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Fritz Busch, München

Dr.-Ing. Volker Deutsch, Köln

LRDir. Dipl.-Phys. Dirk Heuzeroth, Bergisch Gladbach

Dr.-Ing. Martin Kagerbauer, Karlsruhe

Dipl.-Geogr. Anne Klein-Hitpass, Berlin

RDir. Dipl.-Ing. Rainer Lehmann, Bergisch Gladbach

Dr.-Ing. Sven-Martin Nielsen, Köln

Dir. und Prof. Dipl.-Ing. Michael Rohloff, Bergisch Gladbach

Prof. Dr.-Ing. Petra K. Schäfer, Frankfurt am Main

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dirk Vallée, Aachen (†)

Aus Gründen der besseren Lesbarkeit wird bei geschlechtsspezifischen Begriffen jeweils nur eine Form verwendet, in der Regel die männliche. Diese Begriffe schließen die jeweils andere geschlechtsspezifische Form wertfrei mit ein.

Inhaltsübersicht

Vorwort	5
1 Einführung	6
1.1 Elektromobilität und Elektrofahrzeuge	6
1.2 Verkehrs- und umweltpolitische Bedeutung der Elektromobilität	10
2 Elektromobilität: Stand der Entwicklung	12
2.1 Energiewende, Klima- und Umweltschutz	12
2.2 Siedlungs- und Verkehrsentwicklung	12
2.3 Systembedingungen der Elektromobilität	13
2.4 Technische Eigenschaften von Elektromobilen	14
2.4.1 Wirkungsgrad	16
2.4.2 Reichweite	17
2.4.3 Batterien und Energiespeichersysteme	18
2.4.4 Ladesysteme und Ladestrategien	21
2.4.5 Wasserstoffantrieb	24
2.4.6 Fahrdynamik und Akzeptanz	24
2.4.7 Schadstoff- und Lärmemissionen	25
2.4.8 Lebenszykluskosten	25
2.5 Verkehrstechnische Anpassungen an die Elektromobilität	26
2.5.1 Fahrdynamik, Reichweite, Ladesysteme	26
2.5.2 Informations- und Leittechnik	26
2.5.3 Verkehrsmanagement	27
2.6 Ökologische Gesamtbilanz	27
2.6.1 Luftverschmutzung und Treibhausgasemissionen	27
2.6.2 Ressourcenverbrauch	28
2.7 Einsatzbereiche von Elektromobilen	29
2.7.1 E-Bikes, Pedelecs, E-Scooter, E-Motorräder	30
2.7.2 Elektrolastkraftwagen und Elektrofahrzeuge für den Wirtschaftsverkehr ...	32
2.7.3 Elektrofahrzeuge im ÖPNV	35
3 Systemintegration von Elektromobilen	38
3.1 Elektromobilität als Baustein eines inter-/multimodalen, integrierten Verkehrs ...	38
3.1.1 Elektromobile im multimodalen Einsatz	38
3.1.2 ÖPNV als Rückgrat der Elektromobilität	39
3.1.3 Verlässliche Ladung von Elektromobilen	40
3.1.4 Elektromobile in Sharing-Systemen	41
3.1.5 Lage und Gestaltung von Verknüpfungspunkten	42
3.1.6 Elektromobilität in unterschiedlichen Stadtstrukturen	44
3.1.7 Elektromobilität im ländlichen und suburbanen Raum	45
3.2 Verkehrstechnische Integration von Elektromobilität	46
4 Wertende Einschätzung	48
5 Literatur	51

Vorwort

Elektromobilität kann als technologische Herausforderung eines „automobilen Umbruchs“, sie kann aber auch als zentraler Baustein eines System- und Paradigmenwechsels, als sogenannte „Verkehrswende“ verstanden werden. Um die Ziele des Klimaschutzes zu erreichen, wird die Elektromobilität als der strategische Ansatzpunkt zur Dekarbonisierung des Verkehrs gewertet, aber auch als „Waffe“ gegen NO_x-Emissionen der Dieselfahrzeuge in belasteten Innenstädten. Durch die Nachfrage nach alternativen Energien und Antrieben fördert die Elektromobilität die Energiewende. Systemwechsel erzeugen Gewinner und Verlierer der Entwicklung. Insofern müssen die mit dem Systemwechsel verbundenen Vorteile für die Allgemeinheit die Nachteile für den Einzelnen sehr deutlich überwiegen. Ansonsten kommt der Systemwechsel nicht in Gang und wird abgelehnt.

Zur Elektromobilität ist eine Vielzahl von Forschungs- und Entwicklungsvorhaben durchgeführt worden, die sich vor allem auf die Technologieförderung beziehen. Die Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) hat ein Defizit hinsichtlich der Entwicklung von verkehrsstädtebaulichen Strategien zur Integration der Elektromobilität in die Verkehrssysteme der Zukunft identifiziert und den Querschnittsausschuss 7 „Postfossiler Verkehr – Elektromobilität“ mit einer entsprechenden Ausarbeitung beauftragt. Begreift man die Elektromobilität nur als technologische Herausforderung und als Aufgabe der Wirtschaftsförderung und nicht umfassend als neue Technologie, die intelligent in die neu zu entwickelnden Stadt- und Verkehrsstrukturen eingepasst werden muss, wird man ihre Potenziale nicht ausschöpfen können. Dann können Klimaschutzziele nicht erreicht werden und die Chancen, welche die Elektromobilität für einen stadt- und umweltverträglichen Verkehr durchaus bietet, bleiben ungenutzt.

Der vorliegende Bericht hat daher das Ziel, auf der Grundlage eines weit über den reinen „Ersatz der Verbrennungskraftmaschine durch den Elektroantrieb“ hinausgehenden, umfassenderen Verständnisses von Elektromobilität, einen Überblick über deren Systembedingungen herzustellen. Diese geben Hinweise auf einen sinnvollen Einsatz von Elektrofahrzeugen als Verkehrsmittel und für die Integration in zukunftsfähige Verkehrssysteme.

Damit will der Bericht über die System- und Einsatzbedingungen unterschiedlicher E-Mobile informieren und zur Diskussion ihrer Möglichkeiten und Effekte im Hinblick auf die unterschiedlichen Systemanforderungen anregen. Er richtet sich vor allem an Stadt- und Verkehrsplanerinnen und -planer, die sich mit den Fragen der Systemintegration von Elektromobilität auseinandersetzen. Ihre Aufgabe wird es sein, Elektromobilität und Stadt- und Verkehrsstrukturen optimal aneinander anzupassen.

Der Bericht steht in der Tradition früherer Veröffentlichungen der FGSV wie die Diskussionsschrift „Stadt und Verkehr – die nächsten 10 bis 15 Jahre“ (FGSV 006/10) oder „Übergänge in den postfossilen Verkehr – Notwendigkeiten, Entwicklungstrends und -pfade“ (FGSV 006/12), die oft Arbeitsgruppen-übergreifend Stellung zu aktuellen Themen beziehen.

1 Einführung

1.1 Elektromobilität und Elektrofahrzeuge

Elektromobilität ist die Erfüllung der unterschiedlichen individuellen Mobilitätsansprüche durch die Nutzung aller Arten von Fahrzeugen, die ganz oder teilweise mit elektrischem Strom betrieben werden (*Elektrofahrzeuge*). Fahrzeuge mit einem elektrischen Antrieb und einem weiteren Energiewandler (z. B. Verbrennungskraftmaschine) werden als Hybrid-(elektro)-fahrzeuge bezeichnet.

Elektromobilität ist unabdingbar, wenn die Klimaschutzverpflichtungen der Bundesregierung, die Klimaschutzziele eines Klimaschutzgesetzes NRW¹⁾ oder die Leitvorstellungen des Weißbuchs der EU²⁾ umgesetzt werden sollen. Postfossiler Verkehr ersetzt die fossilen Energieträger Kohle, Gas, Erdöl und die Kernenergie, welche die Bewegung von Personen, Gütern und Informationen ermöglichen, durch erneuerbare Energieträger, hohe Energieeffizienz und Körperkraft.³⁾ Damit wird die postfossile Mobilität zur wesentlichen Klimaschutzstrategie im Verkehr und mindert die wirtschaftlichen und sozialen Risiken des „peak oil“!

Elektromobilität ist mehr als der Austausch der Verbrennungskraftmaschine durch Elektroantriebe bei Fahrzeugen, sondern schließt auch die dazugehörige Energietechnik mit ein. Der Wechsel zur Elektromobilität vollzieht sich als umfassender Systemwechsel in Antriebs- und Energiebereitstellungstechnik mit Wirkungen für die Gestaltung der Verkehrsmittel, die Verkehrstechnik, die Verkehrsorganisation und die Stadtplanung. Der Begriff „Elektromobilität“ wird vor allem auf Stadtverkehr mit einer Vielzahl von Elektrofahrzeugen angewendet, wie:

-  Elektrische Rollstühle,
-  Elektrofahräder und S-Pedelecs,
-  E-Bikes, E-Scooter, E-Motorräder,
-  E-Autos,
-  E-Transporter und -Lkw, Sonderfahrzeuge,
-  elektrisch betriebene Busse,
-  elektrische betriebene Bahnen.

Elektrisch angetriebene Rollstühle dienen der Mobilität von Menschen mit Gehbehinderung oder Einschränkung der Gehfähigkeit. Elektrorollstühle gibt es für den Einsatz im

1) Klimaschutzgesetz NRW vom 21.1.2013: „Die Gesamtsumme der Treibhausgasemissionen in Nordrhein-Westfalen soll bis zum Jahr 2020 um mindestens 25 Prozent und bis zum Jahr 2050 um mindestens 80 Prozent im Vergleich zu den Gesamtemissionen des Jahres 1990 verringert werden“.

2) Weißbuch der Europäischen Kommission (2011) für die Verkehrsentwicklung bis 2050: „Verringerung der Treibhausgasemissionen um 80 % (im Verkehr um 60 %) gegenüber 1990“.

3) Definition nach Schindler, J.; Held, M.; Würdemann, G. (2009): Postfossile Mobilität – Wegweiser für die Zeit nach dem Peak Oil, S. 128 und 129, Verlag für Akademische Schriften (VAS)

Innen- und Außenbereich. Die meisten E-Rollstühle haben eine indirekte Lenkung, zum Beispiel über einen Joystick. Die maximale Endgeschwindigkeit muss durch den Nutzer begrenzt sein und darf 6 km/h nicht überschreiten.

Elektrofahrräder mit Trittsunterstützung werden „*Pedelecs*“ („Pedal Electric Cycle“) genannt. Elektrofahrräder erhöhen die Reichweite von konventionellen Fahrrädern. Mit dem Elektromotor können ohne große Anstrengung längere Distanzen und steilere Anstiege zurückgelegt werden als zuvor. Auch Entfernungen, für die üblicherweise ein Fahrzeug mit Verbrennungsantrieb genutzt worden ist, können mit Elektrofahrrädern bewältigt werden. Bei *Pedelecs* arbeitet der Motor nur dann, wenn der Fahrende in die Pedale tritt. Kraftsensoren steuern den Vorwärtsschub in Abhängigkeit von Messungen, wie stark der Fahrer in die Pedale tritt. Bei einer Geschwindigkeit von 25 km/h liefert der Motor keine weitere Unterstützungsleistung mehr zu. Es kann aber schneller gefahren werden. *Pedelecs* mit einer Motorleistung von maximal 250 Watt gelten rechtlich als Fahrräder. Schnelle *S-Pedelecs* mit einer Motorleistung von bis zu 500 Watt regeln ihre Unterstützung erst bei 45 km/h ab. Sie eignen sich damit besonders für Berufspendler. Rechtlich gelten *S-Pedelecs* als Mofas und dürfen daher nur auf der Straße, mit Helm, Versicherungskennzeichen, Mopedführerschein und ohne Kinderanhänger gefahren werden. *Pedelecs* mit leistungsstarken Lithium-Ionen-Akkus erreichen Reichweiten bis zu 100 Kilometern.

E-Bikes sind Elektrofahrräder mit tretunabhängigem Zusatzantrieb. Der Begriff *E-Bike* wird allerdings häufig auch als Oberbegriff für alle Arten von Elektrofahrrädern verwendet. Neben den sehr erfolgreichen Elektrofahrrädern entwickeln sich *Elektro-Roller* (sogenannte *E-Scooter*), *Elektro-Kleinkrafträder* und *Elektromotorräder*. *E-Scooter*⁴⁾ sind speziell für den Einsatz im Außenbereich konzipierte Elektromobile. Sie haben einerseits die Ausprägung von elektrisch betriebenen Rollern ähnlich den früheren Tretrollern – teilweise mit Sitz – oder sehen wie klassische Motorroller – nur mit Elektroantrieb – aus. Leistungsstarke *Elektromotorräder* zeichnen sich vor allem durch Beschleunigung und Endgeschwindigkeit aus.

Daneben sind eine ganze Reihe von Sondermobilen entwickelt worden, die eher der Gruppe der „*Fun-Mobile*“ zugerechnet werden müssen, die zum Teil aber auch den Charakter alternativer Mobile mit E-Antrieb und Bedeutung als Alltagsverkehrsmittel entwickeln können (z. B. Segway, Hoverboard, Longboard oder Golf-Mobile).

4) Scooter (Motorroller) stellen beispielsweise in China die überwiegend verwendeten Verkehrsmittel des Individualverkehrs (IV) neben dem Auto dar.

Pkw teilt die Nationale Plattform Elektromobilität nach ihren Antrieben ein:

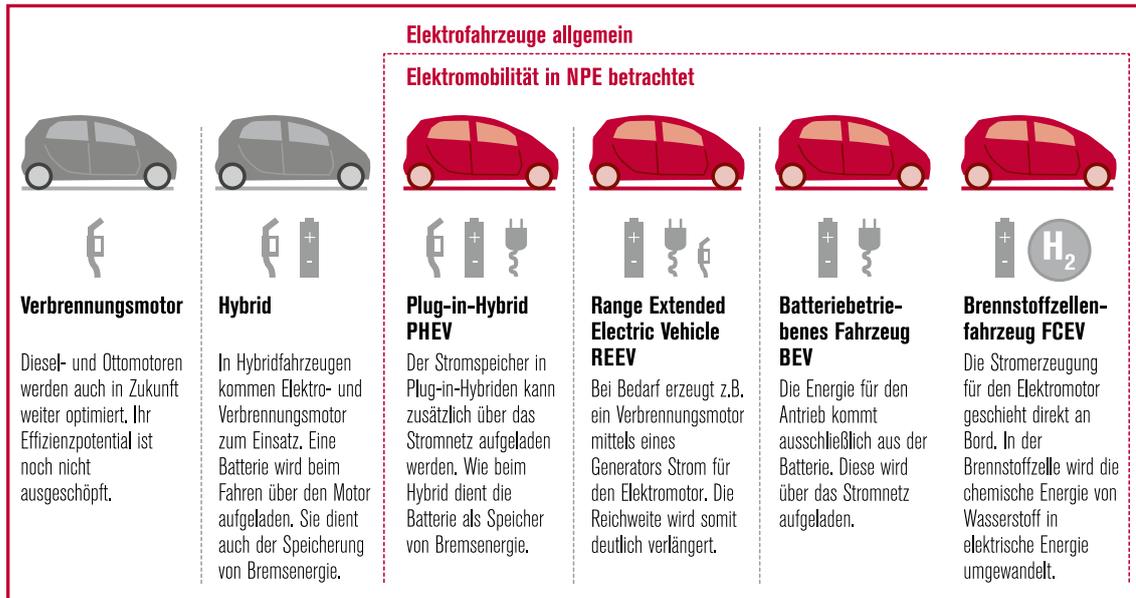


Bild 1: Einteilung der Pkw nach den Antriebstechnologien bzw. nach der Energieart ihres Antriebes (Quelle: Nationale Plattform Elektromobilität, 2012, S. 7)

Pkw werden in Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor („Conventional Vehicles“) und Elektrofahrzeuge (*E-Auto*) oder Hybridfahrzeuge (HEV) eingeteilt. Bei den Elektrofahrzeugen wird nur zwischen den Plug-in-Hybriden (PHEV) und den batteriebetriebenen Fahrzeugen (BEV) unterschieden.

Brennstoffzellenfahrzeuge (FCEV) verfügen ebenfalls über einen oder mehrere Elektroantriebe. Insofern können sie als Elektrofahrzeuge im weiteren Sinne angesehen werden. Allerdings wird hier die Energie nicht in einer Batterie, sondern in flüssiger Form als Wasserstoff in einem Tank mitgeführt.

Range Extended Electric Vehicles (REEV) sind eher den konventionellen Fahrzeugen zuzurechnen, wenn deren Elektroantrieb „Booster“-Funktionen übernimmt und die stromgetriebene Reichweite eher bescheiden ausfällt. Ansonsten sind REEV eigentlich batteriebetriebene Fahrzeuge (BEV), mit denen im Notfall Reichweiten wie mit konventionellen Fahrzeugen ermöglicht werden sollen.⁵⁾ E-Automobile und Elektro-Fahrräder lassen sich auch im städtischen Wirtschaftsverkehr (KEP-Dienste (Kurier-, Express- und Paketdienst, Lieferverkehre)) einsetzen.

Der öffentliche Verkehr (ÖV) leistet bereits heute 64 % der Personenkilometer elektrisch.

Straßenbahnen sind die älteste und verlässlichste Form von Elektromobilität. Seit ihrer Entwicklung durch Werner von Siemens vor 130 Jahren befördern sie im Personentransport von Groß- und Mittelstädten täglich Millionen von Menschen höchst umweltfreundlich und komfortabel zu ihren Reisezielen. Heute hat die elektrische Straßenbahn das Potenzial, sich zum Rückgrat eines mit alternativen Energien betriebenen post-fossilen (Gesamt-)Verkehrssystems zu entwickeln – integriert in den Umweltverbund aus ÖPNV (öffentlicher Personennahverkehr), Fuß- und Radverkehr und erweitert um

5) Diese Einteilung gilt für Elektrobusse sinngemäß.

verschiedenste Sharing-Systeme. Bei den Straßenbahnen ist Oberleitungsbetrieb die Regel; zeitweiser Kondensatorenbetrieb (supercaps) ohne Zuführung elektrischer Energie von außen ist möglich.

Elektrobusse, sei es batteriebetrieben oder durch eine Oberleitung, sind weitere Fahrzeugtypen, die insbesondere für den öffentlichen Personennahverkehr große Potenziale bergen.

Die Umweltvorteile der Elektro-Pkw gelten bei Bussen gleichermaßen. Sie können in Großstädten die Bedienung mit Straßenbahnen in Räumen und Zeiten schwächerer Nachfrage ergänzen und in Klein- und Mittelstädten Busse mit Verbrennungskraftmaschinen schrittweise ersetzen.

Da die Ausprägungen der Fahrzeuge mit elektrischem Antrieb vielfältig sind, werden im Weiteren Fahrzeuge gemäß der nachfolgenden Einteilung betrachtet:

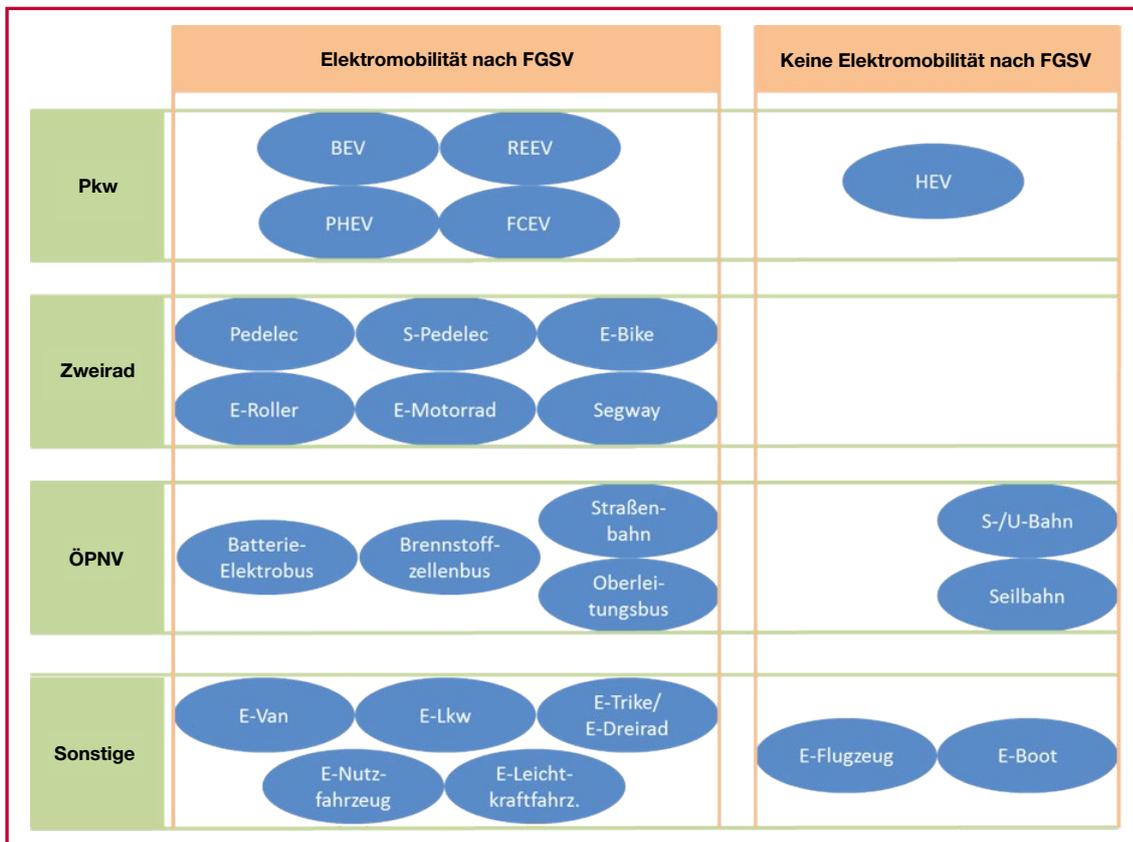


Bild 2: Einteilung der hier relevanten Verkehrsmittel der Elektromobilität für den Bericht

1.2 Verkehrs- und umweltpolitische Bedeutung der Elektromobilität

Eine Reihe verkehrs- und umweltpolitischer Entwicklungen sowie gesetzlicher Vorgaben zielen darauf ab, dass die Elektromobilität wachsen muss. Nach dem Weißbuch Verkehr (2011) fordert die Europäische Kommission ein wettbewerbsorientiertes und ressourcenschonendes Verkehrssystem. Notwendig sei ein neues Verkehrsangebot, das durch eine Bündelung neuer Technologien wie auch durch ein nachhaltigeres Verhalten gestützt wird. Für die technologische Innovation sieht die EU drei Hauptfaktoren:

-  Fahrzeugeffizienz durch neue Motoren, neue Werkstoffe und neue Konstruktionsweisen,
-  Verwendung von umweltschonender Energie durch neue Kraftstoffe und Antriebssysteme,
-  bessere Nutzung von Netzen und sichererer Betrieb durch Informations- und Kommunikationssysteme.

Dabei bestünde die Herausforderung auch darin, die Abhängigkeit des Verkehrssystems vom Öl aufzuheben, ohne seine Effizienz zu opfern und die Mobilität einzuschränken (vgl. Europäische Kommission, 2011, S. 3ff und 10f.).

Zur Entwicklung der Elektromobilität wurden in den letzten Jahren zahlreiche Projekte im Bereich der Grundlagen- und Anwendungsforschung durchgeführt. Die Ergebnisse wurden auf einer Vielzahl von Tagungen und in umfänglichen Veröffentlichungen vorgestellt. Allerdings waren und sind diese Aktivitäten zumeist technikgetrieben, automobil-lastig und einzelfragenbezogen. Es fehlt die Integration der Ergebnisse in den Gesamtkontext des von der Europäischen Kommission geforderten wettbewerbsorientierten und ressourcenschonenden, multimodal integrierten Verkehrssystems.

Auch ist das Verständnis von Elektromobilität noch nicht konsistent. Mal ist Elektromobilität eine „reine Frage der Technik“ oder sie wird als eine Art „Sammelbegriff für Aspekte einer postfossilen Mobilität“ um Verhaltens-(veränderungs)-aspekte erweitert (BMVI, 2014). Je nach Akteursperspektive wird unter der Einführung der Elektromobilität der „Markthochlauf“ oder der flächendeckende Ausbau mit Ladeinfrastruktur, die Erweiterung bestehender inter- und multimodaler Mobilitätsangebote um eine „elektrische Option“ oder die Förderung und Integration elektrisch betriebener Verkehrsmittel in übergeordnete Pläne (bspw. in Masterpläne oder die Verkehrsentwicklungsplanung) verstanden. Diese unterschiedlichen Perspektiven können gemeint sein, wenn von der Förderung, Einführung oder Umsetzung der Elektromobilität die Rede ist.

Dabei wird der Elektromobilität im Vergleich zur Mobilität mit konventionellen Fahrzeugen mit Verbrennungsantrieb eine Reihe von Vorteilen zugesprochen:

-  Verringerung der direkten Emissionen (Abgase wie z. B. NO_x, Lärm) der Fahrzeuge,
-  Verringerung des Flächenbedarfs bei Leichtfahrzeugen,
-  Verringerung der Abhängigkeit von Erdöl und Erhöhung der Sicherheit bei der Energiebereitstellung durch Nutzung verschiedener Energiequellen im eigenen politischen Einflussbereich,

-  Verringerung der CO₂-Emissionen durch Strom aus nicht fossilen, erneuerbaren Energien,
-  Förderung der regionalen Wertschöpfung,
-  Veränderung des Mobilitätsverhaltens durch neuartige Transportmittel (z. B. Segways, Elektro-Scooter, Pedelecs).

Bei einer umfassenden und integrierten Betrachtung der Elektromobilität stellen sich folgende Fragen:

-  Welche Anforderungen stellt die Elektromobilität an die Weiterentwicklung unserer Infrastruktursysteme und deren Betrieb?
-  Welche städtebaulichen Anforderungen und Wechselwirkungen ergeben sich aus dem breiten Einsatz dieser Technologie?
-  Wie müssen unsere Verkehrsangebote gestaltet werden, damit sich für die Elektromobilität auf Dauer komparative Vorteile gegenüber der konventionellen Verbrennungstechnologie ergeben?

Mit dem Systemwechsel von der Verbrennungskraftmaschine zum Elektroantrieb sind umfangreiche Veränderungen für die Automobilindustrie, die Zulieferindustrie und die Verkehrswirtschaft insgesamt verbunden.

2 Elektromobilität: Stand der Entwicklung

2.1 Energiewende, Klima- und Umweltschutz

Die Elektromobilität gilt als essentieller Faktor, wenn nicht sogar als Treiber einer sektor-übergreifenden, umfassenden Energiewende im Verkehr.

Die Bundesregierung hat die Elektromobilität im Mai 2010 zum wichtigen Element einer klimagerechten Energie- und Verkehrspolitik erklärt⁶⁾: „Elektromobilität ist ein wichtiges Element einer klimagerechten Energie- und Verkehrspolitik. Gleichzeitig unterstützt Elektromobilität uns dabei, unsere Industriegesellschaft mit innovativen, weltweit gefragten Produkten und Systemen nachhaltig zu gestalten. Elektromobilität ermöglicht CO₂-freie Fortbewegung, wenn die Fahrzeuge mit Strom aus erneuerbaren Energien geladen werden. Durch die Verwendung von Strom als Energieträger können die unterschiedlichsten regenerativen Energiequellen für die Mobilität genutzt werden. Damit wollen wir unabhängiger von fossilen Brennstoffen werden und auch in Zeiten knappen und teureren Öls eine erschwingliche Mobilität gewährleisten. Zudem können die Fahrzeuge als mobile Speicher dienen, um Strom aus Erneuerbarer Energie zu speichern. Mittelfristig ist auch eine Rückspeisung des Stroms in das Netz denkbar. Elektrofahrzeuge können so in Zukunft einen wichtigen Beitrag zur Netzstabilität leisten. Elektromobilität ist damit ein zentrales Handlungsfeld für eine neuausgerichtete Energiepolitik.“ (BMBF, 2011, S. 5)

Im Weißbuch Verkehr der EU-Kommission werden Ziele für die „Entwicklung und Einführung neuer und nachhaltiger Kraftstoffe und Antriebssysteme“ (KOM, 2011, S. 244) formuliert, die zu einer „Halbierung der Nutzung mit konventionellem Kraftstoff betriebener Pkw im Stadtverkehr bis 2030“ (ebd.) führen sollen. Bis 2050 soll ein vollständiger Verzicht erreicht sein, der für die Stadtlogistik in größeren Städten ebenfalls schon ab 2030 gelten soll. Weitere Ziele sind die Verringerung der Treibhausgasemissionen im Verkehr um 60 % gegenüber 1990, die Schaffung multimodaler Logistikketten bei Verlagerung des Straßengüterverkehrs auf andere Verkehrsträger sowie die Schaffung eines Rahmens für ein europäisches multimodales Verkehrsinformations- und Verkehrsmanagementsystem (ebd.).

2.2 Siedlungs- und Verkehrsentwicklung

Veränderte Rahmenbedingungen raumstruktureller (Wachstum von Ballungsräumen, Entleerung der Peripherie) und wirtschaftlicher (Finanzlage öffentlicher Haushalte, Schuldenbremse) Art, die Herausforderungen der Energiewende und die Aufgaben des Klimaschutzes und der Klimafolgenbewältigung bei einer gleichzeitigen Digitalisierung der Gesellschaft (die stetige Weiterentwicklung Informations- und Kommunikations-basierter Dienste) sowie erste empirische Befunde zu veränderter Verkehrsmittelwahl führen zu „Zwängen und Anreizen“ (Beckmann, 2013) für Innovationen im Gesamtverkehrssystem und bilden die Grundlage für die Förderung eines postfossilen Verkehrs. Städte werden dabei als „Wiege des Wandels“ zu Katalysatoren von Innovationen.

6) Siehe Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie et al.: „Regierungsprogramm Elektromobilität“, Berlin, Mai 2011, auch unter www.bundesregierung.de, hier S. 5

Elektromobilität als Element eines inter- und multimodalen Verkehrssystems bedarf einer verkehrlichen, stadtplanerischen und marktwirtschaftlichen Integration. Diese komplexe Aufgabe erfordert eine strategische Planung, insbesondere, da Elektromobilität hinsichtlich der Umsetzung in der Kommune nach wie vor ein Innovationsthema ist. Sie muss erst strukturell verankert und in Routinen überführt werden.

Um das sogenannte „30 ha-Ziel“ der Bundesregierung zur Reduzierung der Flächeninanspruchnahme zu erreichen, wird eine verkehrs- und flächensparende Entwicklung mit der Notwendigkeit der Verkehrsentwicklungsplanung und weiterer strategischer Planungen im Bereich Verkehr verknüpft. Die Synergien zwischen Stadtentwicklung und Elektromobilität erfordern einen systemischen Ansatz, der kommunale Ziele und Leitbilder berücksichtigt, sich am Leitbild der „Stadt und Region der kurzen Wege“ orientiert und auf eine ressourcenschonende Entwicklung der Städte und Regionen abzielt.

Eine *integrierte Verkehrsentwicklungsplanung* berücksichtigt „als einzige Planung alle Verkehrsträger, Verkehrsmittel und Verkehrszwecke“ und bewertet die Wechselwirkungen unterschiedlicher Maßnahmen sowie die Wechselwirkungen zwischen der Verkehrs-, Stadt- und Regionalentwicklung (FGSV, 2013). Besonders die Kommunen können mit diesem Instrument den Verkehr (Verkehrsinfrastrukturen, -arten, -mittel, -formen, -ebenen und deren Finanzierung) gestalten und dabei selbst auf geeignete elektromobile Fahrzeuge zurückgreifen und/oder durch die Festschreibung geeigneter Maßnahmen die Einführung der Elektromobilität fördern. Mit der nachhaltigen Gestaltung städtischer Verkehrssysteme und Stadtstrukturen – Nahmobilität und ÖPNV als Rückgrat des Verkehrssystems, Vernetzung der Verkehrsmittel, Förderung von Inter- und Multimodalität der Stadtbewohner, Erreichbarkeit, Zugänglichkeit und Leistbarkeit – kommt den Städten eine Schlüsselrolle bei der Integration der Elektromobilität zu. So können sie in einem Handlungskonzept als Ziele definieren, dass die Verkehrsmittel des ÖPNV langfristig ohne fossile Kraftstoffe zu betreiben sind, dass eine Verkehrsverlagerung hin zu elektrisch zurückgelegten Wegen, sei es mit E-ÖPNV, Pedelec oder E-Pkw, durch die Reduzierung der Stellplatzflächen bei gleichzeitiger Ausweisung von E-Carsharing- und E-Parkplätzen zu erreichen ist. Für Kommunen bietet sich der integrierte Einsatz in öffentlichen zugänglichen (E-Carsharing) und kommunalen Flotten an. Die Vernetzung mit dem ÖPNV, seit jeher traditionelles Handlungsfeld der Elektromobilität, sowie auch die Umgestaltung von Bahnhöfen zu „integrierten Mobilitätsstationen“ oder die Errichtung von „Mobilitätspunkten“ als intermodale Umstiegsorte ermöglichen den bequemen Wechsel zwischen den Verkehrsmitteln und -trägern. Hilfreich ist dabei die Ausrichtung an nationalen und europäischen Zielvorgaben zur Reduzierung der CO₂-Emissionen, um die Argumentation an Ort und Stelle zu erleichtern und eine Akzeptanz der Maßnahmen zu erwirken.

2.3 Systembedingungen der Elektromobilität

Elektromobile haben je nach Art der Fahrzeuge unterschiedliche Anforderungen an den Nutzer bzw. deren Nutzung. Drei Beispiele:

Pedelecs ermöglichen dem Nutzer in gleicher Zeit mit weniger Kraftaufwand eine längere Strecke zurückzulegen als mit einem konventionellen Fahrrad. Dadurch wird die Wegelänge und Weglängenverteilung mit dem Verkehrsmittel „Fahrrad“ erweitert bzw. verändert. Das Pendeln mit dem Pedelec oder S-Pedelec kann somit im Vergleich zum Pkw interessanter werden. Darüber hinaus ist es aber notwendig, die Infrastrukturen,

also die Verkehrssysteme, so auszulegen, dass sie diesen geänderten Anforderungen gerecht werden. Fahrradschnellrouten werden hier Abhilfe schaffen, um diese Form der Elektromobilität in das Verkehrssystem zu integrieren.

Forschungserkenntnisse weisen darauf hin, dass Elektrofahrzeuge in den Bereichen Stärken haben, in denen die Flexibilität im Verkehrsangebot (Flotten mit einem unterschiedlichen Fahrzeugantriebsmix) und im Verkehrsnachfragebereich (Bereitschaft zum Kombinieren oder Substituieren von Verkehrsmitteln je nach aktueller Situation) hoch sind. Die Integration von Elektromobilität in die bestehenden Verkehrssysteme spielt hier eine zentrale Rolle.

Elektrofahrzeuge eignen sich dann besonders, wenn nur geringe Variationen im Einsatzspektrum bestehen. Sie können dann spezifisch bezüglich Antrieb, Speicherkapazität, Routenplanung und Ladezyklen entwickelt und für ihren Einsatzzweck optimiert werden. Brennstoffzellenfahrzeuge verfügen dagegen über eine ähnliche Einsetzbarkeit wie Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren.

2.4 Technische Eigenschaften von Elektromobilen

Straßengebundene, batteriegetriebene Elektrofahrzeuge unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Fahreigenschaften bzw. Reichweitenrestriktionen sowie in den damit verbundenen Potenzialen und Grenzen grundlegend von konventionellen Fahrzeugen.

Konventionelle Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren sind technisch durch folgende Rahmenbedingungen gekennzeichnet:

-  Verwendung von Treibstoffen hoher Energiedichte: fossile- und bio-fuels je nach Antriebskonzept des Fahrzeugs in unterschiedlichen Anteilen,
-  ungünstiger Wirkungsgrad der Motoren,
-  Ausstoß von klimaschädlichen Gasen,
-  Lärmemissionen, sowohl durch Motorengeräusche bei langsamer, als auch Rollgeräusche bei schneller Fahrt,
-  große Bandbreite an Fahrzeuggewichten, Reichweiten und Höchstgeschwindigkeiten sowie
-  hohe Tankstellendichte und kurze Tankvorgänge.

Elektrofahrzeuge sind technisch durch folgende Rahmenbedingungen gekennzeichnet:

-  Antriebsenergie: Elektrische Energie je nach Antriebskonzept und fossile-, bio-fuels und Zusatzbatterien für Range Extender in unterschiedlichen Anteilen,
-  hoher Wirkungsgrad der Motoren,
-  geringe Energiedichte der Energiespeicher,
-  Batteriekapazität, -leistung und -gewicht,
-  Abhängigkeit zwischen Gewicht/Ladevolumen, Reichweiten und Höchstgeschwindigkeit,

- 🔧 Fähigkeit zur Rekuperation,
- 🔧 Wartungsarmut und Langlebigkeit der Motoren,
- 🔧 Standardisierung und Dichte der Ladeinfrastruktur,
- 🔧 längere Ladezeiten (im Vergleich zum Tanken),
- 🔧 Brandgefahr.

Elektrofahrzeuge sind zumeist konventionelle für Verbrennungsantriebe entwickelte Fahrzeuge, bei denen die Verbrennungskraftmaschine durch einen Elektromotor ersetzt wird, und die mit einer Batterie ausgestattet werden. Damit sind sie nicht auf die Systembedingungen von Elektroantrieben abgestimmt. Von Grund auf neu entwickelte Elektrofahrzeuge („Purpose Design“) mit einer weiten Einsatzbandbreite weisen andere Konstruktionsprinzipien auf und zeigen ein verändertes Fahrverhalten gegenüber konventionellen Fahrzeugen. Hier ist die Batterie in der Bodengruppe verbaut, was durch den tiefergelegten Schwerpunkt die Fahreigenschaften der Fahrzeuge verbessert. Durch den kleineren Antrieb können sie neben einem Kofferraum im Heck des Fahrzeugs zusätzlichen Stauraum unter der „Motorhaube“ anbieten.

Darüber hinaus gibt es für spezielle Nutzungen (z. B. Lieferdienste) entwickelte „Purpose Design-Fahrzeuge“ mit neu entwickelten Leichtbauweisen, um das Gewicht zu reduzieren. Sie zeichnen sich mit Ausnahme der Traktionsbatterie durch kleine Antriebskomponenten und Zusatzaggregate aus, weil ihre Reichweite und Endgeschwindigkeit auf den Einsatzzweck abgestimmt werden. Der sogenannte Streetscooter ist für den Einsatz im Zustellservice auf eine Höchstgeschwindigkeit von 80 km/h ausgelegt. Durch die Bereitschaft der Deutschen Post AG, sich mit dem Fahrzeugkonzept am Einsatzzweck zu orientieren, lässt sich der Streetscooter ökonomisch produzieren.⁷⁾

Elektroautos zeigen folgende Kennwerte:

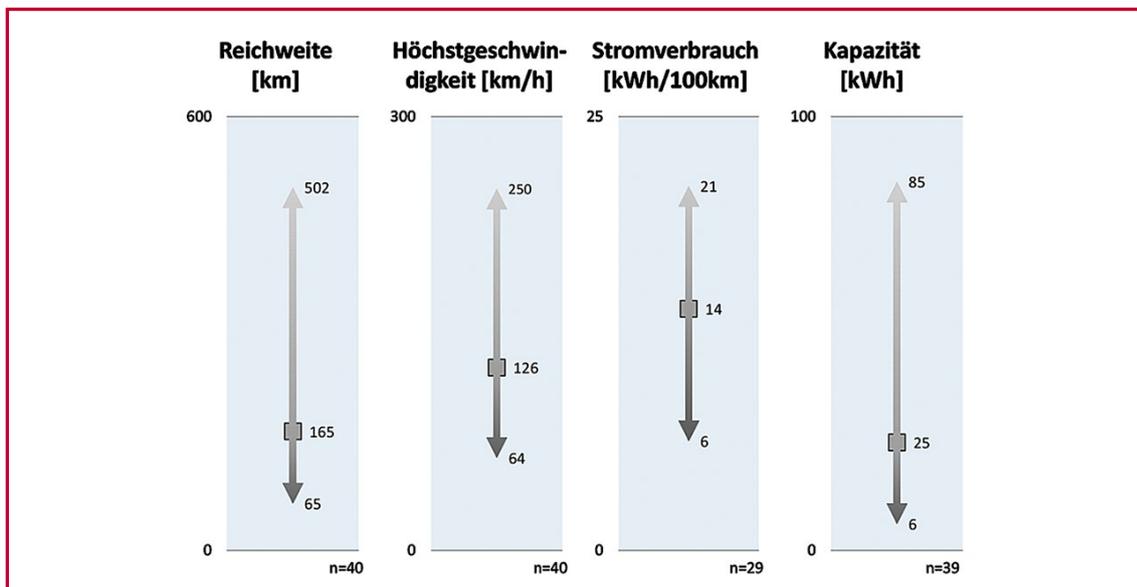


Bild 3: Statistische Kennwerte von Elektromobilen: Durchschnittswerte nach Herstellerangaben, Maxima und Minima (Quelle: eigene Darstellung einer Auswertung der Wertetabelle des ADAC aus einer Abbildung)

7) vgl. Karbach, T., 2014, S. 13

2.4.1 Wirkungsgrad

„Elektromotoren sind aufgrund ihrer Drehmomentverteilung⁸⁾ gut für den Einsatz als Traktionssystem im Kraftfahrzeug geeignet. Das volle Drehmoment kann bereits im Stillstand aufgebracht werden, was im Gegensatz zum konventionellen Antriebsstrang ein schaltbares Getriebe oder Kupplungen nicht erforderlich macht“⁹⁾.

Elektromotoren haben eine völlig andere Leistungscharakteristik als Verbrennungsmotoren. Sie verfügen bereits beim Anfahren und sehr geringen Drehzahlen über ein hohes Drehmoment und behalten dies über einen langen Drehzahlbereich konstant bei; erst nach dem Leistungshöhepunkt nimmt es kontinuierlich ab. Ein Verbrennungsmotor muss dagegen aus dem Stand erst in Schwung gebracht werden. Dies bringt im Falle von Elektroantrieben rennwagenähnliche Beschleunigungen von 0–50 km/h. Im oberen Drehzahlbereich fehlt dagegen die Leistung zur Beschleunigung, wenn der Luftwiderstand quadratisch mit der steigenden Geschwindigkeit anwächst. Aufgrund des guten Wirkungsgrades von Elektromotoren macht sich der Luftwiderstand als „Wirkungsgrad-Killer“ stärker bemerkbar als bei Verbrennungsmotoren. Der Verbrauch steigt und die Reichweite sinkt überproportional bei sehr hohem Tempo. Um zu vermeiden, dass sich bei hohen Geschwindigkeiten die Batterie zu rasch entleert, sind Elektrofahrzeuge oft durch Drehzahlbegrenzung in Ihrer Höchstgeschwindigkeit zugunsten der Reichweite „abgeregelt“, das heißt Elektroautos weisen eine geringere Höchstgeschwindigkeit als Fahrzeuge mit vergleichbar starken Verbrennungsmotoren auf. Ebenso benötigt die „Hubarbeit“ bei Bergfahrten viel Energie, so dass sich topografisch bewegtes Gelände stark auf die Reichweite auswirkt.

Die nachfolgende Grafik zeigt, wie der Elektromotor mit einem konstanten Drehmoment (M) vom Stand weg Leistung (P) bis zu einem Maximalwert (n_{eck}) aufbaut und dann konstant hält, während die Verbrennungskraftmaschine erst einmal anlaufen muss und der Leistungsaufbau dem Drehmoment versetzt nachläuft. Der Dieselmotor zeigt insgesamt höheren Leistungsaufbau.

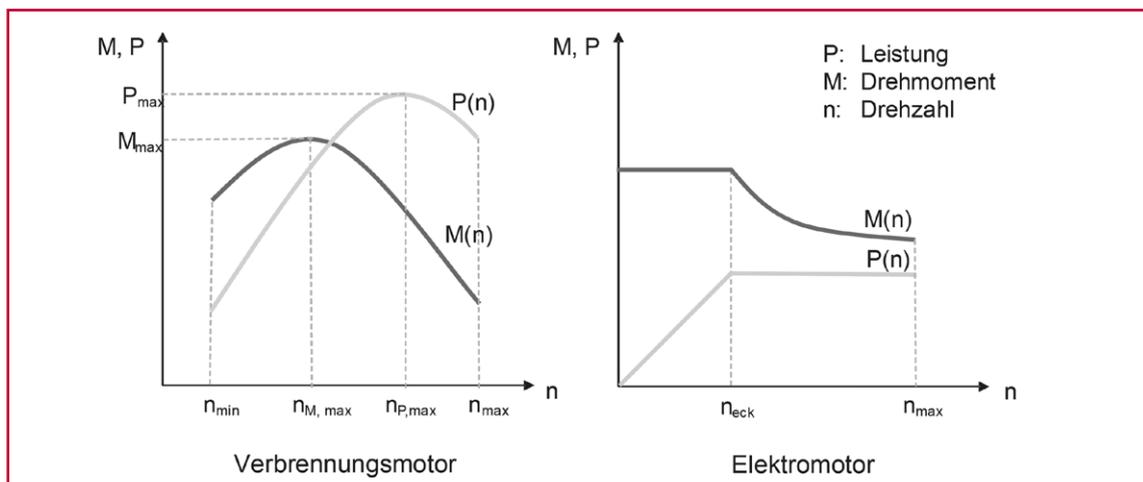


Bild 4: Leistungscharakteristika von Verbrennungs- und Elektromotor

8) Neben der Angabe der Nennleistung in Kilowatt (Pferdestärken) wird bei Elektromotoren zunehmend das maximale Drehmoment in definierten Drehzahlbereichen als weiteres Qualitätsmerkmal angegeben. Das Drehmoment (Maßeinheit: Newtonmeter (Nm)) ist ein Maß für die Drehwirkung der an einer Antriebswelle angreifenden Kräfte: Das Produkt aus Drehzahl und Drehmoment bestimmt die übertragene Leistung.

9) Wallentowitz, H., Freialdenhoven, A., 2011, S. 90

Elektrofahrzeuge zeichnen sich bei der Umwandlung von Strom in Bewegungsenergie durch einen hohen Wirkungsgrad und damit einen deutlich geringeren Endenergieverbrauch als mit Verbrennungskraftmaschinen angetriebene Fahrzeuge aus. Während Elektromotoren Wirkungsgrade über 90 % aufweisen, zeigen hier Benzinantriebe einen Wirkungsgrad von bis zu 40 % und Dieselantriebe bis zu 50 %. Bei Betrachtung der Gesamtenergiebilanz relativiert sich der gute Wirkungsgrad von Elektroantrieben durch den Umwandlungsverlust bei der Stromerzeugung (bezogen auf die Primärenergie), dem Transport und der Speicherung von Strom. Dem bei Wasserstofffahrzeugen deutlich schlechteren Wirkungsgrad gegenüber Batteriefahrzeugen steht der Vorteil der Heizung gegenüber, da die Brennstoffzelle wie ein Verbrennungsmotor Abwärme erzeugt (die aber nicht für Kühlung im Sommer genutzt werden kann).

Neben dem im Vergleich sehr hohen Wirkungsgrad sind Elektromotoren auch in der Lage, einen Teil der Antriebsenergie bei Bremsvorgängen zu rekuperieren und wieder in die Batterie zu speisen, was den Gesamtwirkungsgrad zusätzlich erhöhen kann. Beim Bremsen und bei Verzögerung (Schubbetrieb) rekuperiert ein Elektrofahrzeug und kann damit vor allem auf Bergabfahrten zu einem signifikanten Energiegewinn beitragen. Testfahrten haben gezeigt, dass rund ein Viertel der auf der Bergauffahrt verbrauchten Energie bei der Bergabfahrt derselben Strecke durch Rekuperation zurückgewonnen und wieder eingespeist werden kann. Die Rekuperation ist jedoch nicht in jedem Fall sinnvoll. Wenn das Fahrzeug genug Schwung hat, bei längeren leichten Bergabfahrten und in Situationen, in denen eher der Gewinn von Metern als von Energie angestrebt wird, gewinnt die Funktion des „Segelns“ zur Erhöhung des Aktionsradius an Bedeutung. Dann fährt das Fahrzeug solange im „Nullpunkt“ zwischen Antrieb und Schubtrieb mit ausgekoppeltem Motor, bis der Abstandsradar registriert, dass es auf ein vorausfahrendes Fahrzeug aufläuft und beginnt mit dem Generatorbetrieb das Fahrzeug „einzubremsen“¹⁰⁾.

Elektromotoren können dank ihrer kompakten Größe und des leisen und vibrationsarmen Betriebsverhaltens unterschiedlich im Fahrzeug positioniert und eingesetzt werden. Neben einem zentralen Antrieb jeweils ein Motor an Vorder- und Hinterachse ist der Einsatz von Radnabenmotoren möglich, die weitere Vorteile, wie eine selektive Ansteuerung der einzelnen Räder, bieten; dadurch lassen sich aufwendige technische Lösungen wie das ESP (Elektronische Stabilitätskontrolle) ersetzen. Diese Eigenschaften eröffnen neue Freiräume in der Karosserie und Gewichtsreduzierung, die für die Auslegung der Batterien genutzt werden können.

Die Stärken des Elektroantriebs können speziell im Stadtverkehr ausgespielt werden, da Elektrofahrzeuge durch die Energierückgewinnung bei Bremsvorgängen und im Gefälle besonders sparsam unterwegs sind. Gekoppelt mit den geringeren Wartungskosten, ist der sparsame Verbrauch für niedrigere Betriebskosten im Vergleich mit Verbrennungs-Pkw verantwortlich.

2.4.2 Reichweite

Geschwindigkeit und Fahrweise, ob energiezehrend oder sehr sparsam, wirken sich maßgeblich auf den Energieverbrauch und die Reichweite eines Elektrofahrzeugs aus. Bei vorausschauendem und gleichmäßigem Fahren kann eine höhere Distanz zurückgelegt werden als bei Fahrten mit häufigen Brems- und Beschleunigungsvorgängen.

10) vgl. Schöttle, M., 2013, S. 1 und ADAC Motorwelt, 7/2015, S. 26

Darüber hinaus haben das Gewicht des Fahrzeugs, die lokal herrschenden Temperaturen (mit gegebenenfalls Einschalten von Heizung oder Klimaanlage) sowie die topographischen Bedingungen entscheidenden Einfluss auf die erzielbare Reichweite. Zusätzliche Aggregate zur Stromerzeugung im Fahrzeug, sogenannte „Range Extender“, können die Reichweite erhöhen.

Bei Brennstoffzellenfahrzeugen ist die Reichweite weniger von Bedeutung, da, sofern entsprechende Tankstellen vorhanden sind, dort nachgetankt werden kann.

Reine Elektroautos wiesen Anfang 2014 noch Reichweiten von 120 km bis 160 km und durchschnittlich 130 km auf.¹¹⁾ Hierbei handelt es sich um Herstellerangaben, die oft unter für Elektroantriebe günstigen Rahmenbedingungen (Außentemperaturen, ausgeschaltete Stromverbraucher (Heizung, Licht, Lüftung usw.) ermittelt werden.¹²⁾ Damit verringert sich die mögliche Realdistanz, die mit einem vollständig geladenen Fahrzeug zurückgelegt werden kann, deutlich gegenüber einem fossil betriebenen Pkw mit voller Tankfüllung. Reichweiten von über 500 km können aber heute mit neuen Batteriekonzepten und mit einem speziellen Batteriemangementkonzept erzielt werden.

Plug-in-Hybride und Fahrzeuge mit Range Extender erreichen Reichweiten, die mit Fahrzeugen mit Verbrennungsantrieb vergleichbar sind. Im reinen Elektroantrieb liegen ihre Reichweiten oft weit unter denen reiner Elektrofahrzeuge, da hier der Elektroantrieb zumeist Booster-Funktionen übernehmen muss. Hier liegen die nominellen Reichweiten bei maximal ca. 50 Kilometern.

Wie verschiedene Studien belegen¹³⁾, reichen die Reichweiten marktgängiger Elektromobile jedoch für mehr als 90 % der Fahrten im Alltag aus. Lediglich für Langstrecken sind Alternativen notwendig (z. B. Bahn, Fernbusse, Hybrid- oder konventionelle Pkw).

Bei Pedelecs variieren die Reichweiten je nach Preis, Typ und Ausstattung. Übliche Reichweiten sind 80–100 km. Diese werden allerdings in der Realität nur bei neuen Akkus und günstigen Bedingungen erreicht. Erfahrungen zeigen, dass auch die Alterung des Akkus einen erheblichen Einfluss hat. Bei neueren Akkus wird eine Leistungseinbuße von 1 % pro Jahr angestrebt.

2.4.3 Batterien und Energiespeichersysteme

Durch schwere und teure Batterien und geringe Reichweiten waren Elektrofahrzeuge bisher nicht so flexibel und freizügig nutzbar wie Fahrzeuge mit Verbrennungskraftantrieb. Die Energiedichte von Lithium-Ionen-Batterien liegt derzeit bei 190 Wattstunden pro Kilogramm. „Ein Elektroauto benötigt auf 100 Kilometer ca. 20.000 Wattstunden und muss für 300 Kilometer Reichweite rund 315 Kilogramm an Akkus mitführen“¹⁴⁾.

11) Die tatsächlichen Werte liegen bei einem SOC (State of Charge) von 80 %, der Nutzung von Nebenaggregaten sowie einer „Reserve“ eher zwischen 70 und 90 km.

12) vgl. auch: http://www.auto-motor-und-sport.de/bilder/elektroautos-6-modelle-im-haertetest-8498096.html?fotoshow_item=1

13) Schäfer, P.; Knese, D. (2012): Elektrolöwe 2010 – Der hessische Elektroautofahrer. In: Straßenverkehrstechnik, Ausgabe 4/2012

14) Dünnes, A., 2015, FOCUS Online, S. 1 und 2

Batterietypen

Zur Speicherung der elektrischen Energie in Fahrzeugen werden üblicherweise Batterien eingesetzt und als Ergänzung (für Sonderaufgaben wie Rekuperation, Start-/Anfahrvorgang, etc.) kommen in besonderen Einsatzbereichen sogenannte „Supercaps“ zum Einsatz.

Gängige Batterietypen sind

-  Bleibatterien (heute regelmäßig als Starterbatterie in Fahrzeugen verbaut, kostengünstig, geringe Energiedichte),
-  Nickel-Metall-Hydrid-Batterien (hohe Lebensdauer, hohe Materialkosten, mittlere Energiedichte) sowie
-  Lithium-Ionen-Batterien (hohe Energiedichte, hohe Lebensdauer, noch relativ teuer – aber hohes Kostensenkungspotenzial).

Supercaps sind eine Ansammlung von Doppelschichtkondensatoren. Sie zeichnen sich durch eine sehr hohe Lebensdauer, sehr hohe Leistungsdichten sowie eine einfache Wiederaufladbarkeit aus und werden deshalb zurzeit in Bussen und Bahnen sowie bei Maschinen eingesetzt. Aufgrund der hohen Kosten ist mittelfristig kein Einsatzpotenzial als Hauptspeicher in kleineren Fahrzeugen zu erkennen.

Batteriekenngrößen

Die Batteriekapazität in kWh gibt die Energie an, die eine Batterie zu speichern vermag, und beschreibt in Verbindung mit dem Stromverbrauch die Leistungsperformance eines Elektrofahrzeugs. Elektrofahrzeuge weisen eine Batteriekapazität zwischen 11 kWh und 85 kWh auf. Im Durchschnitt liegt die Batteriekapazität bei 25 kWh.¹⁵⁾ Beim Antrieb des Pedelecs, der eine Ergänzung zum manuellen Betrieb darstellt und wo die Fahrzeuge mit 20–30 kg Fahrzeuggewicht deutlich leicht sind, liegt die aktuelle Akkuleistung bei 0,2–0,7 kWh. Durch Kombination von Akkus sind bis zu 1 kWh für S-Pedelecs möglich.

Für den Einsatz in der Elektromobilität sind insbesondere die Leistungs- und Energiedichte sowie die Lebensdauer der Speichermedien von besonderer Bedeutung. Darüber hinaus sind der Wirkungsgrad und die Selbstentladung wichtige Parameter. Zur Beurteilung der Leistung von Batterien ist die Batteriespannung die wesentliche Kenngröße. Je höher die Leistung sein soll, desto höher sollte die Spannung sein, um Verluste zu reduzieren. Typische Batteriespannungen in Elektrofahrzeugen liegen heute im Bereich von ca. 400 V. Wesentlich höhere Spannungen sind unter Sicherheitsaspekten (Unfall, Berührung, Feuer etc.) kritisch zu sehen. Die Energiekapazität einer Batterie ist für die Entladetiefe und die Lebensdauer von besonderer Bedeutung.

¹⁵⁾ Die Kapazität der Batterie des E-smart liegt bei 17,6 kWh, die des BMW i3 bei 18,8 kWh.

Batterielebensdauer

Die Lebensdauer einer Batterie wird über zwei Kriterien definiert:

-  einerseits über die kalendarische Lebensdauer (Lebensdauer ohne Belastung) und
-  andererseits über die sogenannte Zyklen-Lebensdauer (Ladungsdurchsatz = Anzahl möglicher Entladungen und Wiederaufladungen).

Batterien für Elektrofahrzeuge müssen eine hohe Anzahl von Ladezyklen verkraften und auch bei einer nahezu vollständigen Entladung wieder aufladbar sein, ohne Schaden zu nehmen. Zudem sollten keine sogenannten Memory-Effekte auftreten, das heißt eine schnelle Alterung durch häufigeres Teilentladen und Wiederaufladen. Die Zyklen-Lebensdauer sollte mindestens 3.000 Vollzyklen betragen, womit eine kalendarische Lebensdauer von 8 bis 12 Jahren erreicht werden kann, was in etwa der Lebensdauer des Fahrzeugs entspricht. Bei einer elektrischen Reichweite von 100 km ergeben 3.000 Ladezyklen eine potentielle Reichweite von ca. 300.000 km. Die Lebensdauer der Batterien scheint nach Herstellerangaben – je nach Batteriekonzept – mit 700–7.000 Ladezyklen oder 8–10 Jahren keine systemrelevante Bedeutung mehr zu besitzen.

Tabelle 1: Kennwerte von Energiespeichern¹⁶⁾

Batterietyp	Energiedichte [Wh/kg]	Leistungsdichte [W/kg]	Lebensdauer [Zyklen/Jahre]
Blei	30–50	150–300	300–1.000; 5
Nickel-Cadmium	40–50	100–200	> 2.000; 6
Nickel-Metall-Hydrid	60–80	200–300	> 1.000; > 5
Lithium-Ionen	90–150	500–2.000	> 2.000; 5–10
Zum Vergleich			
Diesel		11.800	
Wasserstoff		800	

Reine Elektrofahrzeuge werden den physikalischen Zusammenhang zwischen hohem Gewicht und der vergleichsweise geringen Energiedichte nicht auflösen können. Daher werden in Elektrofahrzeugen auch Kombinationen aus flüssigen oder gasförmigen Treibstoffen (hohe Energiedichte und geringes Gewicht) zum Einsatz kommen, die z. B. in Brennstoffzellen in Strom umgewandelt und schnell geladen werden können. Die Wasserstofftechnologie ist aufgrund der bisher noch nicht gelösten Infrastruktur zum Nachtanken noch nicht weit verbreitet. Bis dahin stellen die klassischen Lademöglichkeiten einen systembegrenzenden Faktor dar.

¹⁶⁾ Kampker, A.; Vallée, D.; Schnettler, A. (Hrsg.): Elektromobilität – Grundlagen einer Zukunftstechnologie; Sauer, D.-U.: Batteriesysteme und deren Steuerung; Springer Verlag, 2013

Ältere Batterien, die nicht mehr die benötigte Leistungsfähigkeit aufweisen (z. B. im Busbetrieb unter 70 % fallen), werden dem sogenannten „second life“ zugeführt. Hier kommen sie in Fahrzeugen zum Einsatz (z. B. elektrische Gabelstapler), die keine so hohen Anforderungen stellen oder sie werden zu größeren Speichereinheiten zusammengeschlossen, um in Wohngebieten nicht benötigten Strom aus alternativen Energiegewinnungsformen zwischenzuspeichern.

2.4.4 Ladesysteme und Ladestrategien

Folgende Systeme zum Laden von Elektrofahrzeugen lassen sich unterscheiden:

-  Kabelgebundenes (konduktives) Laden an einer Ladestation,
-  kabelloses (induktives) Laden mittels elektromagnetischer Felder,
-  Laden an einer Oberleitung sowie der
-  Austausch der Fahrzeugbatterie durch ein Batteriewechselsystem.

Das *kabelgebundene Laden* (Laden der Batterie über ein Kabel und Steckerverbindung mit Ladesäule, Wallbox, Supercharger etc.) stellt derzeit den Standard dar. Obwohl die Fahrzeugbatterien selbst immer durch Gleichstrom geladen werden, sind bei der Spannungsversorgung das Wechsel- und das Gleichstromladen zu unterscheiden. Bei Wechselstrom erfolgt die Energieübertragung durch ein- oder dreiphasigen Wechselstrom zu dem meist im Fahrzeug verbauten Ladegerät mit integriertem Gleichrichter. Für das Laden mit Gleichstrom wird das Ladegerät normalerweise in der Ladesäule integriert. Durch entsprechende Normen werden Ladestecker und Ladeprotokoll standardisiert. Kleinere Elektrofahrzeuge können über „haushaltsübliche“ Schuko-Steckdosen geladen werden. Normalladen ist so an öffentlichen Lichtmasten (Straßenlaternen) denkbar.

Um Elektrofahrzeuge überall systemübergreifend und problemlos laden zu können, werden standardisierte Stromanschlüsse und Bezahlssysteme benötigt. Hier haben sich folgende Standards durchgesetzt:

Tabelle 2: Übersicht über die Steckerformen, die sich auf dem Markt durchsetzen werden¹⁷⁾

	Normalladen ^{***)} (bis 22 kW)		Schnellladen ^{***)} (> 22 kW)	
Steckertyp	Schukostecker	Typ-2-Stecker	CCS 50 kW	CCS 150 kW ^{**)}
Stromart	Wechselstrom (AC)		Gleichstrom (DC)	
Ladeleistung ^{*)}	2,3 kW	3,6 kW	50 kW	150 kW
Ladezeit	13 h	8 h	30 Min	10 Min

*) Vollladung am Beispiel eines Fahrzeugs mit Batteriekapazität 24,2 kW

***) Hochleistungsladen, es sind auch schon Fahrzeuge mit 300 kW-Ladeleistung in der Entwicklung

***) Unterscheidung Normalladen/Schnellladen nach EU-Verordnung 2014/94/EU

Aus heutiger Sicht ist nicht absehbar, welche Systeme sich in Zukunft durchsetzen werden und insoweit Planungs- und Investitionssicherheit bieten.

17) Quelle: Autobild extra, Nr. 25, 2016, S. 119

Derzeit werden handelsüblich drei Ladesysteme angeboten:

-  Das Laden einer Elektroauto-Batterie zu Hause über den Schukostecker bis zu 80 % der Ladekapazität dauert 7 bis 8 h, danach wird der Ladestrom reduziert. Hier laden ca. 80 % der Nutzer ihr Fahrzeug.
-  Mit einer vom Fachmann installierten Wallbox (ein System zum Laden von Elektroautos) ist ein bis zu 10 mal schnelleres Laden möglich.
-  An öffentlichen Ladestationen, z. B. auf den Rastanlagen der Autobahnen soll Schnellladen mit speziellen Ladesäulen ermöglicht werden. E-Auto-Batterien lassen sich dort innerhalb weniger Minuten bis zu 80 % aufladen (Einschränkung s. oben).

Der Aufbau insbesondere von Schnellladeinfrastruktur wird in Deutschland u. a. mit den Projekten „SLAM – Schnellladen an Achsen und in Metropolen“ sowie im EU-Projekt „FAST-E“ mit Schnellladestationen mit mindestens 50 kW Ladeleistung im Abstand von 80 km vorangetrieben. Als nächste Entwicklungsstufe werden sogenannte „Supercharger“ oder Hochleistungsladestationen mit einer Ladeleistung von 150 bis 350 kW entwickelt, die dann ein Nachladen für 500 km Reichweite innerhalb von 30 Minuten ermöglichen.

Schnellladen verfügt über ein hohes Potenzial, um die Reichweitenproblematik zu reduzieren und damit einer der wesentlichen Markteintrittsschwellen entgegenzuwirken. Da Schnellladesysteme auf eine intensive Nutzung vieler verschiedener Anwender ausgelegt sind, sind zeitabhängige Tarife zu präferieren, die einen finanziellen Anreiz bieten, den Ladepunkt nach Abschluss des Ladevorgangs zügig für die nächste Nutzung freizugeben.

Beim Linienbus wird zwischen „Voll-“ und „Gelegenheitslader“ unterschieden. Der Voll-lader hat eine ausreichend große Batterie, um über Nacht aufgeladen zu werden und den gesamten Tag im Linienbetrieb mit einer Ladung eingesetzt zu werden. Um Gewicht und Kosten für Batterien zu reduzieren, wird die „*punktueller Stromversorgung*“ von Elektro-Bussen an Haltestellen erprobt. An ausgewählten Versorgungspunkten (z. B. Endhaltestellen und Unterwegs-Haltestellen mit längerem Aufenthalt) werden die Fahrzeuge an der Station mittels Pantograph mit dem Lademast „verbunden“.

Induktive Ladesysteme bestehen aus einer am oder im Boden angebrachten Spule und einer zweiten Magnetspule im Fahrzeugboden. Durch die exakte Positionierung der beiden Spulen zueinander kann die Energieübertragung mit hohem Wirkungsgrad (> 90 %) berührungslos und schnell erfolgen.

Für die Versorgung von Elektrofahrzeugen bietet sich außerdem die klassische Technik der Energieversorgung aus der *Oberleitung* dort an, wo regelmäßig viele Fahrzeuge mit hohem Energiebedarf verkehren. Im Stadtverkehr ist der Regelfall eine Versorgung mit 750 V Gleichstrom, da diese Technologie u. a. geringere Schutzabstände erfordert als Systeme mit höherer Spannung. Allerdings sind die Verluste dort auch etwas größer und es bedarf vieler Unterwerke. Die Technologie wird in Städten bei Straßenbahnen und in den Städten Eberswalde, Esslingen und Solingen auch für O-Bus/Trolleybus-Systeme angewendet. Die im Straßenraum angebrachten Oberleitungen stellen eine aufwändige Infrastruktur dar und werden teilweise städtebaulich als störend empfunden. Der Kontakt zu den Oberleitungen erfolgt über Pantographen oder mittels Stangen an den Fahr-

zeugen. Pantographen (üblich bei Bahnen) schleifen unter der Oberleitung und können leicht an- und abgesetzt werden. Stromstangen der O-Busse benötigen spezielle Einfädelungsstellen. Außerdem werden O-Busse mit Batterien (oder kleinen Verbrennungsmotoren) ausgestattet, um Baustellen umfahren oder in Bereiche einfahren zu können, die man aus bestimmten Gründen nicht mit Oberleitungen ausstatten will (städtebaulich sensible Bereiche, komplexe Knotenpunkte). Hier muss das Problem des „An- und Abdrahtens“ während der Fahrt technisch befriedigend gelöst werden.

Um Elektroantriebe für lange Strecken auch für den Schwerlastverkehr nutzbar zu machen, wird derzeit die Ausrüstung der rechten Fahrstreifen der Autobahnen mit einer Oberleitung diskutiert und auf Versuchsstrecken getestet. Fragen des Ein- und Ausfädelns an Autobahnauf- und Abfahrten sowie der erforderlichen Durchfahrthöhen unter Brücken sind derzeit ebenso wenig flächendeckend gelöst wie die der Finanzierung.

Derzeit lässt sich noch nicht sagen, ob und wann diese Technik wie auch die induktive Ladetechnik serienreif sein werden, welche Kosten und baulichen Erfordernisse zu erwarten sind, welche Abrechnungskonzepte und Geschäftsmodelle sich eignen und wie genehmigungsrechtliche Verfahren aussehen müssten.

Da die Reichweite von Elektrofahrzeugen noch stark begrenzt ist und die Ladevorgänge noch nicht durchgängig im Minutenbereich erledigt werden können, haben die Fragen

-  der technischen Gestaltung des Ladevorgangs,
-  der flächendeckenden Verfügbarkeit sowie
-  der einfachen, diskriminierungsfreien Zugänglichkeit

der Ladeinfrastruktur für die Elektromobilität große Bedeutung. An jeder öffentlich zugänglichen Ladesäule (regional und überregional) sollte jederzeit „spontan“ geladen werden können, unabhängig davon, wer die Säule betreibt oder mit Strom beliefert (diskriminierungsfreier Zugang). Ein einheitliches Bezahlungssystem, Zugang zu Informationen über Ladeinfrastrukturstandorte, technische Ausstattung und aktuellen Status der Säulen werden erwartet. Ziel muss die Interoperabilität (der allgemeine Zugang, die Anschlussfähigkeit aller Systeme und einheitliche Bezahlungssysteme) sein. Systeme, die keinen unmittelbaren Bezahlvorgang an der Ladesäule vorsehen, benötigen die Technologie einer Nutzeridentifizierung und eines Abrechnungssystems zwischen Kunden und Energielieferanten.

2.4.5 Wasserstoffantrieb

Bei mit Wasserstoff angetriebenen Fahrzeugen wird der Betriebsstoff in einer „fuel cell“ oder Brennstoffzelle (FCEV) durch eine chemische Reaktion zwischen Wasserstoff und Sauerstoff in Strom als elektrische Antriebsenergie umgewandelt. Dabei entsteht als Umwandlungsprodukt nur Wasserdampf. Damit sind Brennstoffzellenfahrzeuge sehr umweltfreundlich, wenn der Wasserstoff künftig unter Nutzung alternativer Energien gewonnen wird; sie sind jedoch weniger effizient als Elektrofahrzeuge, da zur Herstellung von Wasserstoff sehr viel Energie benötigt wird. Brennstoffzellenfahrzeuge verfügen über eine Lithium-Ionen-Batterie, um Bremsenergie zu rekuperieren.

Der Vorteil der Brennstoffzellenfahrzeuge liegt in der raschen Betankbarkeit von 3–5 Minuten und im Langstreckenbereich (Reichweiten über 500 km) und im Transportsektor (Lkw und Busse). Erforscht wird derzeit, durch welche Stoffe das teure Platin, das für die Brennstoffzelle benötigt wird, ersetzt werden kann.

Die Produktion von Wasserstoff könnte sich im Verbund mit der Erzeugung der elektrischen Energie für batterie-elektrische Vehikel bei entsprechender Standortwahl und Auslegung der Energiesysteme als vorteilhaft erweisen, wenn überschüssige Energien nicht in Batteriespeichern zwischengespeichert werden. Durch Elektrolyse ließe sich diese Energie für die Produktion von Wasserstoff etwa auch in den weniger effizienten Kleingeräten in peripher gelegenen Tankstellen nutzen.

Wasserstoff steht in folgenden Formen zur Verfügung:

-  Flüssiger Wasserstoff: Temperatur bis -253 °C bei max. 16,5 bar,
-  Gasförmiger Wasserstoff: Temperatur 20 °C bei 250/350 bar,
-  Gasförmiger Wasserstoff: Temperatur -40 °C bei 700 bar.

Große Herausforderungen stellen der hohe Druck, die niedrige Temperatur und die hohe Diffusionsfähigkeit des leicht flüchtigen und hoch entzündlichen Wasserstoffs durch die Wandung von Tanks an den gesamten Transport-, Lagerungs- und Betankungsprozess. Derzeit gibt es für den Aufbau eines Alltagsbetriebs keine Produktions-, Verteilungs- und Betankungsinfrastruktur.

Für Brennstoffzellenfahrzeuge fehlt noch die Infrastruktur in Form von Wasserstofftankstellen. Dort wird der Wasserstoff in flüssigem oder komprimiert gasförmigem Zustand (700 bar) vorgehalten. Zur Verflüssigung sind -253 °C notwendig, was supraisolierte Tanks und Tankfahrzeuge notwendig macht. Außerdem verflüchtigt sich Wasserstoff durch Isolationsverluste. Frisch betankte Fahrzeuge sollte daher kontinuierlich eingesetzt werden.

2.4.6 Fahrdynamik und Akzeptanz

Reine E-Autos weisen geringere Höchstgeschwindigkeiten als Fahrzeuge mit Verbrennungsantrieben auf, da bei Beschleunigungsarbeit ein quadratischer Zusammenhang von Energieeinsatz zur Geschwindigkeit existiert. Die Höchstgeschwindigkeiten liegen zwischen 100 und 200 km/h und im Schnitt bei 125 km/h.¹⁸⁾ Die Verlagerung der Motoren in die Radnaben erhöht die Wendigkeit von Elektroautos.

¹⁸⁾ vgl. Bild 3: Statistische Auswertung der Höchstgeschwindigkeiten von Elektroautos

Bei konsequentem Leichtbau, stufenloser Beschleunigung und aufgrund des gleichmäßig hohen maximalen Drehmoments beschleunigen viele Elektrofahrzeuge „vom Stand weg“ schneller. Sie erweisen sich als sportliche und dynamische Fahrzeuge für den urbanen und citynahen Verkehr, erzeugen einen Überraschungseffekt und vermitteln vielen Menschen das Gefühl eines großen Fahrspaßes, insbesondere bei erstmaliger Nutzung. Der Fahreindruck auf der geraden Strecke ähnelt eher einem Gleiten. Interessanterweise gilt dies sowohl für reine Elektromobile als auch für Pedelecs.

Dennoch zeigt sich, dass die geringere Reichweite bei vielen Menschen eine psychologische Barriere für den Einstieg in die Elektromobilität bedeutet. Diese ist eng verbunden mit der Frage der Verfügbarkeit von öffentlich zugänglicher Ladeinfrastruktur. Ein ausreichendes Angebot an öffentlichen und halb-öffentlichen Ladepunkten, idealerweise mit einem diskriminierungsfreien Zugang ausgestattet, und neuen Ladetechniken können die „Reichweitenangst“ bei Nutzerinnen und Nutzern reduzieren.

2.4.7 Schadstoff- und Lärmemissionen

Elektrofahrzeuge sind mit einem leisen Surren in Beschleunigungsphasen und lokal emissionsfrei unterwegs. Bis ca. 30 km/h fahren Elektrofahrzeuge nahezu geräuschlos. Je nach Fahrbahnoberfläche und Beschleunigung können die Reifen-Fahrbahn-Geräusche bei einer höheren Geschwindigkeit dominieren.

Insbesondere in Städten fallen bei Elektrofahrzeugen schädliche Schadstoffe, wie z. B. Stickoxide, nicht an. Der Ausstoß des klimaschädlichen Treibhausgases Kohlendioxid kann minimiert werden, wenn der geladene Strom aus erneuerbaren Energien stammt. Dies fördert die Unabhängigkeit von Erdöl. Außerdem können Elektro-Pkw als Speicher für die schwankenden Energieeinträge durch Wind und Sonne dienen und den Ausbau regenerativer Energien unterstützen. Elektrisch betriebene Fahrzeuge erzeugen zwar keinen Feinstaub beim Verbrennungsvorgang; sie tragen dagegen durch Reifen- und Bremsabriebe in vergleichbarer Weise zur Feinstaubbelastung bei wie die Verbrennungsfahrzeuge.

In Innenstädten mit vielen (lichtsignalgesteuerten) Knotenpunkten können Elektrofahrzeuge zur Lärmentlastung und höherer Aufenthaltsqualität beitragen. Jedoch kann es für Blinde und Sehbehinderte sowie unaufmerksame Verkehrsteilnehmer auch zu Gefahren kommen, wenn ein herannahendes Fahrzeug nicht gehört wird.

2.4.8 Lebenszykluskosten

Ein Auto mit Verbrennungsmotor hat 90 mal mehr bewegliche Teile als ein Elektroauto. Elektromotoren zeichnen sich durch Wartungsarmut und Langlebigkeit aus. Da Elektromotoren kaum Verschleißteile aufweisen, sind sie sehr wartungsarm und weisen eine lange Lebensdauer auf. Elektro-Fahrzeuge müssen in wesentlich geringerem Umfang gewartet werden als Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor, ihre Inspektionskosten sind wesentlich geringer.

Hauptursache für die Alterung und teuerste Komponente am Elektrofahrzeug ist in der Regel die Batterie. Fahrzeughersteller arbeiten deshalb neben der Lebenszeitverlängerung an Konzepten, bei denen die Batterie über Leasing oder quasi als Bestandteil der Infrastruktur zur Verfügung gestellt wird, um den Nutzern die Vorbehalte gegenüber verbrauchten Batterien zu nehmen. Durch „second-life-Konzepte“ für verbrauchte Batterien soll der Austausch gegen neue Batterien kostengünstiger gestaltet werden.

Damit entwickeln sich die Lebenszykluskosten von Elektrofahrzeugen trotz hoher Erstanschaffungspreise bereits heute positiv im Vergleich zum Verbrennungsfahrzeug. Auch wenn die Lebenszykluskosten von Elektrofahrzeugen aufgrund technischer Entwicklungen (z. B. steigende Leistungsfähigkeit und fallende Kosten der Batterien) deren Beschaffung in absehbarer Zeit als „ökonomisch rational“ erscheinen lassen, so liegt der entscheidende Mehrwert der Elektrofahrzeuge eindeutig im Umweltbereich (Lärmvermeidung, lokale Schadstoffeinsparungen, Vermeidung klimaschädlicher Gase) und in ihrem Beitrag zur Energiewende (postfossiler Verkehr). Da dieser Nutzen der Elektromobilität vor allem der Allgemeinheit zugutekommt, legt das politische Ziel der Förderung umweltfreundlicher Verkehre nahe, über eine stärkere Internalisierung der externen Kosten nachzudenken.

2.5 Verkehrstechnische Anpassungen an die Elektromobilität

Durch Einführung der Elektromobilität ergeben sich neue Anforderungen an und Möglichkeiten für die Verkehrstechnik. Diese resultieren im Wesentlichen aus den *Merkmale der Elektromobile* selbst und der die Elektromobilität *begleitenden Maßnahmen*:

2.5.1 Fahrdynamik, Reichweite, Ladesysteme

Die Möglichkeit, Fahrzeuge auch während der Fahrt induktiv zu laden, erfordert die Entwicklung spezieller Fahrbahnkonstruktionen, evtl. die Einrichtung spezieller Fahrstreifen und geeignete Spurführungstechnik im Fahrzeug. Aufgrund von zum Teil deutlich anderem Antriebs- und Fahrverhalten der E-Fahrzeuge (Batterie, Ladeinfrastruktur, Geräusch, Beschleunigung) entstehen verschiedene sicherheitstechnische Herausforderungen.

2.5.2 Informations- und Leittechnik

Die in der Standardisierung befindlichen Inhalte der Fahrzeug-Infrastruktur-Kommunikation (v2i) müssen ergänzt werden um Fahrt- und Energieinformationen (für lokale und/oder netzorientierte Maßnahmen).

Da sich gerade die alternativen Energieformen durch eine „volatile“ (veränderliche) Bereitstellung der Energie zu Zeiten und an Orten auszeichnen, die nicht unbedingt mit dem Verbrauch zusammenfallen, wird darüber nachgedacht, zum Ausgleich der Angebots-/Nachfrageschwankungen die Batterien der E-Fahrzeuge zu einem überdimensionalen virtuellen Speicher in einem intelligenten Netz, dem sogenannten „SmartGrid“ zusammenzuführen. Die Fahrzeug-Batterien nehmen nach dieser Idee dann nicht nur Energie auf, sie geben sie auch ab, wenn sie aktuell nicht zum Fahrbetrieb benötigt wird. Die Einführung von Smart Grid-Technologie und damit die teilweise Einbindung von E-Fahrzeugen in das Energieversorgungssystem erfordert eine standardisierte Verknüpfung von Energie- und Verkehrsnetzen sowie deren integrierte, zumindest abgestimmte Steuerung.

Grundsätzlich stellt die sichere Datenübertragung zwischen

-  den Komponenten im Fahrzeug,
-  den Fahrzeugen (car-to-car),
-  Fahrzeug und SmartMedia des Nutzers sowie
-  Fahrzeug und Verkehrs- und Energieinfrastruktur

aktuell noch eine der größten Herausforderungen für die Hersteller und Zulieferer dar. Grundsätzlich muss sichergestellt sein, dass alle notwendigen und relevanten Informationen auch in Unfall- oder Versagenssituationen zuverlässig übertragen und Einwirkungen Unbefugter verhindert werden.

2.5.3 Verkehrsmanagement

Der beginnende Aufbau von vernetzten Plattformen für verschiedene E-Mobilitätsdienste erfordert Abstimmungsmaßnahmen auf der Ebene des Verkehrsmanagements, die auch in die Verkehrstechnik durchwirken können.

Eine eindeutige Erkennung/Unterscheidung von Elektromobilen durch automatisierte Erfassungstechnik ist Voraussetzung für dynamische Leit- und Überwachungssysteme (Fahrstreifenfreigabe, Umweltzonen, Parkplätze, Maut ...).

Der Anzeige- und Inhaltsvorrat für statische und dynamische Hinweise (Information, Verkehrszeichen, digitale Datenübertragung TPG, etc.) ist für neue Maßnahmen (Ladestationen, Parkplatzinfo, Routen usw.) zu ergänzen. Der Ladevorgang kann zum erweiterten Informationsaustausch zwischen Fahrzeug und Verkehrsleitsystem genutzt werden (über standardisierten Datenaustausch an der Ladesäule).

2.6 Ökologische Gesamtbilanz

Die Lebenszyklus-orientierte Untersuchung von Tessum, Hill und Marshall¹⁹⁾ zu den gesamtbilanzierten Gesundheitskosten von Elektroautos im Vergleich zu konventionellen Antrieben macht deutlich, dass dieser Fahrzeugtyp, je nachdem, aus welchen Quellen die genutzte elektrische Antriebsenergie stammt, unterschiedliche Schäden erzeugen kann.

2.6.1 Luftverschmutzung und Treibhausgasemissionen

Nach dieser Untersuchung tragen Elektrofahrzeuge nur dann zur Verringerung der Luftverschmutzung bei, wenn der verwendete Strom aus Wind-, Wasser-, Solar- oder Erdgaskraftwerken stammt: „We find that powering vehicles with corn ethanol or with coal-based or ‚grid average‘ electricity increases monetized environmental health impacts by 80 % or more relative to using conventional gasoline. Conversely, EVs powered by low-emitting electricity from natural gas, wind, water, or solar power reduce environmental health impacts by 50 % or more. Consideration of potential climate change impacts alongside the human health outcomes described here further reinforces the environmental preferability of EVs powered by low-emitting electricity relative to gasoline vehicles.“¹⁹⁾ Diese Effekte werden vor allem durch die Umweltbeeinträchtigungen beim Bau der Kraftwerke und bei der Herstellung der Batterien bewirkt.

¹⁹⁾ Tessum, C. W., Hill, J. W. und Marshall, J. D., 2014, Abstract

Die gleichen Autoren geben aber auch zu, dass ein mit alternativen Energien gespeister Elektroantrieb die beste Umweltperformance – besonders bezogen auf die CO₂-Bilanz – im Vergleich der Antriebe aufweist. Diese Auffassung deckt sich auch mit Untersuchungen des Instituts für Energie- und Umweltforschung Heidelberg (IFEU).^{20),21)}

„Für eine Kilowattstunde Batteriekapazität werden demnach 125.000 Gramm an CO₂-Emissionen freigesetzt. Bei der Produktion eines Stromspeichers mit 20 Kilowattstunden fallen also knapp 2,5 Tonnen CO₂ an. Da beim Bau des Elektromotors jedoch weniger CO₂ anfällt als bei einem Benzinmotor, muss mit ungefähr 2,27 Tonnen CO₂ kalkuliert werden. Das Elektroauto muss also gut 20.000 Kilometer fahren, damit eine „schwarze Umwelt-Null“ erreicht wird.“²²⁾ Nicht berücksichtigt ist dabei, dass Elektrofahrzeuge über weniger Komponenten (kein Getriebe) und durch geringeren Verschleiß eine längere Lebensdauer aufweisen dürften. Nach Ergebnissen der Eidgenössischen Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (EMPA) in der Schweiz darf ein Benzinauto maximal 3,9 Liter pro 100 Kilometer verbrauchen, um ähnlich umweltverträglich wie ein modernes mit Solarenergie betanktes Elektroauto zu sein (siehe dazu die Forderungen von Greenpeace)²³⁾.

2.6.2 Ressourcenverbrauch

Das Wuppertal Institut hat ermittelt, dass die Herstellung eines Benzin-Pkw nur 56 % der Ressourcen eines Elektrofahrzeugs verbrauche. Dieser ökologische Nachteil wird dann in der Nutzungsphase durch deutlich niedrigere Ressourcenverbräuche pro gefahrenem Kilometer kompensiert, so dass das Elektrofahrzeug bei einer durchschnittlichen Nutzung dennoch klar besser abschneidet. Bei Betrieb mit reinem Ökostrom würde dieser Zeitpunkt deutlich früher erreicht.²⁴⁾

Bei Elektrofahrzeugen entsteht ein großes Interesse, insbesondere die elektronischen Bauteile wiederzuverwenden, weil damit politische Abhängigkeiten bei der Gewinnung verbunden sind oder es sich um generell knappe Rohstoffe handelt.

Eine Achillesferse der Elektromobilität stellt der besondere Bedarf an seltenen Erden dar, deren Herstellung beträchtliche Umweltauswirkungen erzeugen kann. 12 Metalle sind besonders wichtig für die Herstellung von Elektroautos. „Diese sind Kupfer für alle Komponenten, Seltene Erden wie Neodym, Praseodym, Dysprosium und Terbium für die Elektromotoren sowie Indium, Gallium, Germanium, Gold, Silber, Platin und Palladium für die übrigen Komponenten wie Leistungselektronik“²⁵⁾. Für die Elektromobilität ergibt sich ein besonderer Bedarf an prioritären Metallen, wie dem Dysprosium, das für die Herstellung von Spezialmagneten benötigt wird, wie sie in Elektromotoren zum Einsatz kommen. China verfügt hier über ein Monopol dieses Rohstoffs sowie der Produktion der Magnete und hat als weltweit größter Lieferant bereits den Lieferumfang gedrosselt, um die eigene Wertschöpfung zu erhöhen. Auch für Silizium sind die Vorkommen in China marktbestimmend.

20) vgl. hierzu Untersuchungen des Öko-Instituts: <http://www.oeko.de/forschung-beratung/themen/nachhaltiger-verkehr/elektromobilitaet/>

21) Zitiert nach Dünnes, A., 2015, FOCUS Online, S. 2

22) s.o. S. 2, andere Autoren gehen von 30.000–100.000 km aus.

23) Rügner, E.: „Der ökologische Rucksack des Elektroautos“, WZ vom 22.9.2017, S. 7

24) Zitiert nach s.o. S. 7

25) Öko-Institut, 2015

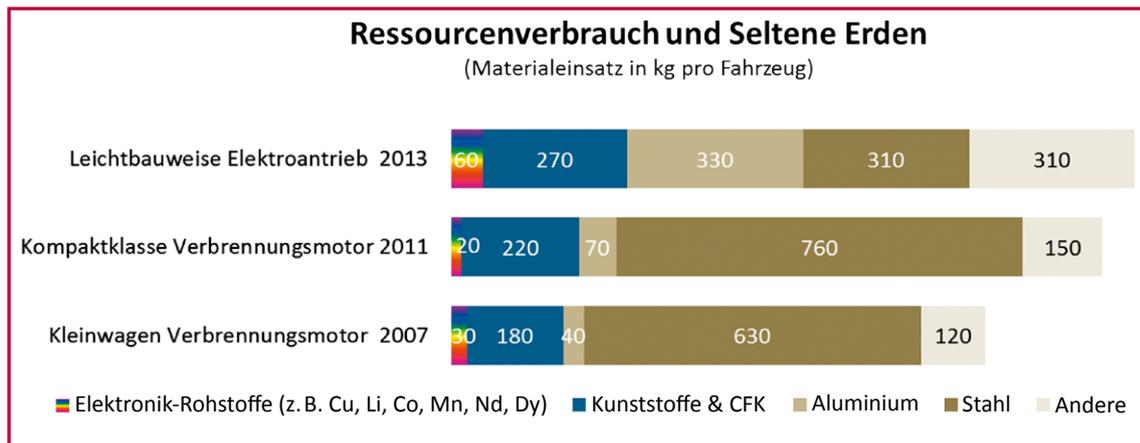


Bild 5: Ressourcenbedarf eines Elektro-Leichtbaufahrzeugs im Vergleich zu Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren (Quelle: eigene Darstellung)

Aufgrund der besonderen Mengen an verwendeten seltenen Erden und Leichtbaustoffen kommt dem Recycling von Elektrofahrzeugen eine besondere Bedeutung zu. „Da der Gesetzgeber eine Rückgewinnungsquote von 50 Prozent, gemessen am Gewicht, vorschreibt, wird derzeit fieberhaft an Recyclinganlagen gearbeitet, um das Lithium, Nickel und Kobalt zu recyceln“²⁶⁾.

2.7 Einsatzbereiche von Elektromobilen

In der Diskussion um die Elektromobilität werden häufig die geringe Energiedichte des batteriegestützten Elektroantriebs, die begrenzte Reichweite und das Batteriegewicht, das „mitgeschleppt“ werden muss, als Hindernisse angeführt. Eine solche Argumentation verkennt allerdings folgende Aspekte:

Bei konventionellen verbrennungskraftgetriebenen Fahrzeugen stehen Leistungsreserven zur Verfügung, die aufgrund des ungünstigen Wirkungsgrades nur zum sehr geringen Teil abgerufen werden.

Elektroantriebe benötigen keine Getriebe und keine Aggregate wie Anlasser; sie sparen damit Gewicht ein. Übliche Gewichte von Batterien liegen heute zwischen 175 kg und 230 kg²⁷⁾. Ein Elektro-Smart ist damit unwesentlich schwerer als das vergleichbare Modell mit Verbrennungsmotor.²⁸⁾

Das Elektromobil wird mehr auf den überwiegenden Einsatzbereich ausgelegt, das heißt Batterieleistung und damit -gewicht sind eine Funktion aus benötigter Reichweite und Ladeperformance, während das Verbrennungsfahrzeug aufgrund seiner Leistungsreserven, die es mit sich „herumfährt“, den Einsatzzweck nur in geringem Umfang determiniert.

26) Dünnes, A., 2015, FOCUS Online, S. 3

27) Bei smart for two electric drive und BMW i3

28) Vergleich smart for two electric drive und smart mit Dieselantrieb

Bei der funktionalen Gestaltung von Elektromobilen kommt es also sehr darauf an, ein ausgewogenes Verhältnis zwischen der Leistungsfähigkeit der Batterie hinsichtlich der Reichweite und den Lademöglichkeiten zu finden. Verfügt man über viele Lademöglichkeiten, kann die Batterie kleiner, leichter und damit billiger werden. Reichweiten sind abhängig von Verwendungszweck, Fahrzeugauslegung, Topografie, Außentemperatur, Hilfsaggregaten (z. B. Klimaanlage, Sitzheizung usw.) und Fahrweise. Voraussetzung für eine optimale Reichweite ist eine umfassende Elektrofahrzeug-Nutzungs- und Reiseplanung incl. „Energetischer Navigation“ (energieminimale Routensuche).²⁹⁾

Da die Fahrzeugkonzeption eine besondere Bedeutung für die erzielbare Reichweite hat, ist es besonders sinnvoll, Elektrofahrzeuge für definierte Einsatzzwecke technisch entsprechend auszulegen („Purpose Design“), anstatt konventionelle Fahrzeuge mit einem Elektroantrieb auszustatten („Conversion Design“). So ist zum Beispiel der Streetscooter der RWTH Aachen, der im Auftrag der Deutschen Post AG im Brief- und Paketzustelldienst eingesetzt wird, aufgrund der geringen Größe von Zustellbezirken auf die maximale Reichweite von 80 km und für den überwiegend innerstädtischen Betrieb auf eine Höchstgeschwindigkeit von 120 km/h ausgelegt³⁰⁾. Dies macht in Verbindung mit einem spezifischen Batteriemangement-System das Fahrzeug besonders ökonomisch.

Die Maximalgeschwindigkeit von Elektromobilen liegt im Schnitt deutlich unter der von vergleichbaren konventionellen Pkws. Während dies im Stadtverkehr keine Auswirkungen hat, kann es für die Akzeptanz bei Fahrten auf der Autobahn eine Rolle spielen. Zielgruppen, die sich überwiegend im Stadtverkehr bewegen und damit auch die Vorteile der besonderen Stadtverträglichkeit realisieren können, sind alle Arten von KEP-Diensten, Pflegedienste, Monteure (Telekommunikation), Pflichtaufgaben für Kontrolle, Wartung und Service (Heizungsableser/-Kontrolle), Schornsteinfeger, usw.). Außerdem haben Verwaltungs-, Ver- und Entsorgungsfahrzeuge relativ enge Einsatzrahmenbedingungen, für die sich Elektrofahrzeuge spezialisieren lassen.

2.7.1 E-Bikes, Pedelecs, E-Scooter, E-Motorräder

Zwei-, aber auch drei- und vierrädrige, elektrisch angetriebene Leichtbau-Fahrzeuge bieten eine sinnvolle, ressourcenschonende Möglichkeit des Personen- und – in bestimmtem Umfang – Lastentransports. Generell definiert die Anordnung des Motors die Fahreigenschaften eines Pedelecs:

-  Mittelmotoren liefern einen günstigen, weil mittigen Schwerpunkt. Eine Rekuperation ist mit ihnen nicht möglich.
-  Vorderradnabenmotoren erlauben die Kombination mit allen gängigen Schaltungen und Rücktritt.
-  Heckmotoren bieten nur Platz für Ketten-, nicht für Nabenschaltungen, erlauben aber die Rekuperation.

29) Navigationssysteme verfolgen in der Regel die Strategie „strecken- oder zeitkürzester Weg“ auf Grundlage typisierter Netzelemente. Bei Elektrofahrzeuge ist als zusätzlicher Parameter die Topografie zu beachten.

30) vgl. Karbach, T., 2014, S. 13

Neben den im Vergleich geringeren Anschaffungskosten ist für diese Fahrzeuge (zurzeit noch) keine Fahrerlaubnis (abweichend bei E-Motorrädern) erforderlich, sodass geringe Voraussetzungen an das Fahrpersonal bestehen. Die Vorteile elektrischer Zweiräder liegen außerdem im geringen Stellplatzbedarf und der Lademöglichkeit an einer herkömmlichen Steckdose. Geringe Wartungskosten und wenig Raumbedarf für Stellplätze machen diese Fahrzeuge für den Einsatz im täglichen Stadtverkehr attraktiv. Elektrische Zweiräder sind eine leise und umweltfreundliche Alternative zum konventionellen Kraftfahrzeug, da sie lokal emissionsfrei sind. Sie haben das Potenzial, einen hohen Beitrag zum Lärmschutz zu leisten und gleichzeitig die Schadstoffemissionen deutlich zu reduzieren.

In den letzten Jahren verzeichnen Elektrofahrräder einen enormen Marktzuwachs, da sie die Vorteile des Fahrrades in Bezug auf die flexible Mobilität (Steigerung der Reichweiten und der Durchschnittsgeschwindigkeiten) mit dem Komfort des Elektroantriebs kombinieren. Elektrofahrräder haben inzwischen Reichweiten, die deutlich über den überwiegenden Wegelängen der Alltagsmobilität, den durchschnittlichen Pendlerreichweiten und im Bereich der Reichweiten von Freizeitfahrten liegen. Somit sind Elektrofahrräder universell verkehrstauglich. In der Kosten-Nutzenabwägung schneiden sie immer besser ab, so dass über 2,1 Mio. dieser Fahrzeuge auf den Straßen unterwegs sind (Marktanteil 12 %) (Stand 2017).

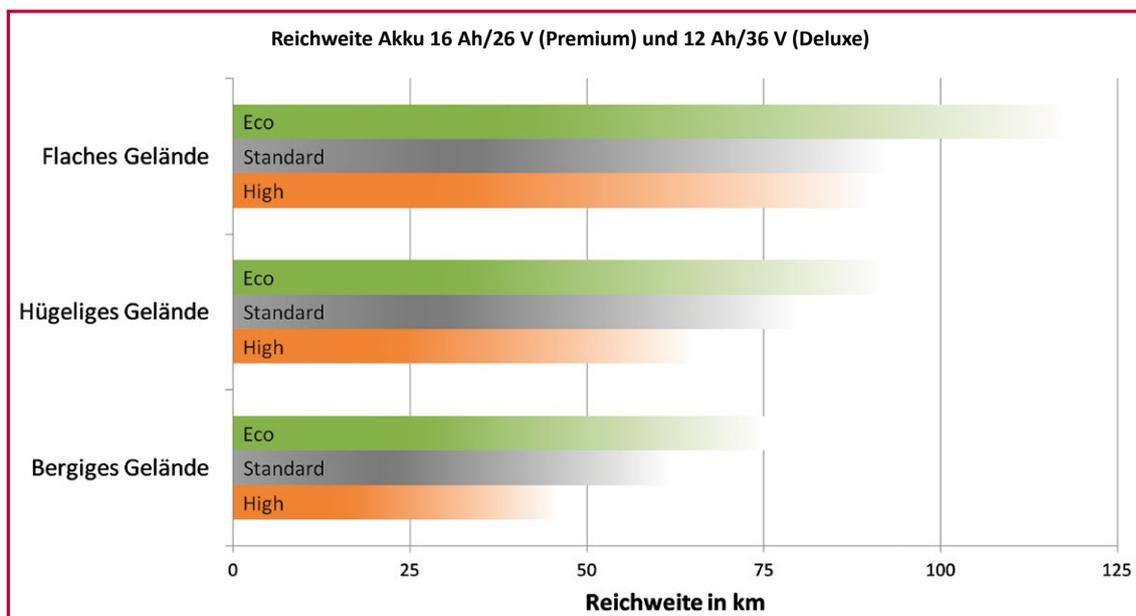


Bild 6: Übliche Reichweiten von Elektrofahrrädern Pedelec 25, die bereits seit längerem für die Alltagsmobilität völlig ausreichend sind
(Quelle: eigene Auswertung)³¹⁾

31) nach Biketec AG-FLYER, Electrovelos, Katalog 2012

Neben den Elektrofahrrädern entwickeln sich weitere Formen zweirädriger, elektrisch angetriebener Leichtbaufahrzeuge. Diese lassen sich rechtlich wie folgt einteilen:

Straßenverkehrsrechtliche Einordnung	Fahrrad mit limitierter Tretunterstützung	Kleinkraftrad bis		Kleinkraftrad bis 45 km/h	Leichtkraftrad bis 80 km/h	Krafttrad
		20 km/h	25 km/h			
Bezeichnung	Pedelec	S Pedelec E-Bike		E-Bike E-Roller	E-Bike E-Roller	E-Bike E-Roller
Motorantrieb ohne Pedalieren	nein (ggf. Anfahr-/Schiebehilfe bis 6 km/h)	ja		ja	ja	ja
Motorleistung	bis 250 W	bis 1 kW		bis 4 kW	bis 11 kW	/
Unterstützungsgrenze	25 km/h	45 km/h		45 km/h	80 km/h	/
Bauartbedingte Höchstgeschwindigkeit (alleinig Motorantrieb)	/	20 km/h	25 km/h	25 km/h	45 km/h	80 kmh
Fahrerlaubnis	nein	Mofa-Prüfbescheinigung		mind. M	mind. A1	A
Kennzeichenpflicht	nein	Versicherungskennzeichen		Versicherungskennzeichen	Amtliches Kennzeichen	Amtliches Kennzeichen
Radwegbenutzung	ja	nein, nur falls Zusatzschild „Mofa frei“		nein	nein	nein
Helmpflicht	nein	nein	ja	ja	ja	ja

Bild 7: Rechtliche Einordnung von Pedelecs, E-Bikes und E-Rollern³²⁾

Es ist damit zu rechnen, dass zukünftig weitere leichte Fahrzeuge mit elektrischem Antrieb Einzug in das tägliche Verkehrsbild halten werden.

2.7.2 Elektrolastkraftwagen und Elektrofahrzeuge für den Wirtschaftsverkehr

Im Wirtschaftsverkehr besteht ein besonderer Nutzen von Elektrofahrzeugen durch folgende Vorteile:

-  Im Vergleich zum Verbrennungsmotor entstehen niedrigere Verbrauchs- und Wartungskosten, sodass die Betriebskosten gering und die Wirtschaftlichkeit sehr hoch sind.
-  Dies wird ergänzt durch die geräuscharme und lokal emissionsfreie Fortbewegung mit Elektrofahrzeugen. Da im Wirtschaftsverkehr innerorts hohe Verkehrsleistungen erbracht werden, wirkt sich dies stark auf die Umwelt- und Umfeldqualität in den Städten aus.
-  Gerade für Kurzstreckenfahrten, bei denen häufig Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor noch nicht auf ihre Betriebstemperaturen kommen (und somit überproportional viele Schadstoffe ausstoßen), wird die Nachhaltigkeit dieser Mobilitätsform deutlich.
-  Bei häufigem Anfahren stellt der Elektroantrieb sofort ein hohes Drehmoment zur Verfügung, sodass sein Anfahr- und Beschleunigungsverhalten gerade bei Lade- und Lieferverkehren zügiger ist und sich energiesparsamer darstellt.

³²⁾ nach Richtlinie 2002/24/EG und StVZO, Quelle: „Internationales Verkehrswesen“ 1/2012

Ein großer Teil der täglichen Mobilitätsanforderungen von Lastkraftwagen könnte angesichts der hohen Anzahl der Kurzstreckenfahrten sowohl im privaten wie auch im gewerblichen Bereich heute schon mit Elektrofahrzeugen abgedeckt werden. Zudem bestehen hinsichtlich der Einsatzmuster wiederkehrende Abfolgen und meist eine Rückkehr an bestimmte Standorte (z. B. über Nacht), sodass definierte Standorte für ein Nachladen sowohl hinsichtlich der Standorte als auch der geforderten Lademenge und -leistung bestehen. Insofern lassen sich hier sehr wirtschaftlich die besonderen Randbedingungen der Elektromobilität ausnutzen.

Im Wirtschaftsverkehr als Summe aus Geschäftsverkehr, Güterverkehr und Werkverkehr haben die Transportzwecke Güter-, Personen- und Dienstleistung spezifische Anforderungsprofile an die eingesetzten Fahrzeuge.³³⁾ Dementsprechend bestehen unterschiedliche Potenziale für den Einsatz von elektrisch angetriebenen Fahrzeugen im Wirtschaftsverkehr.

Der Güter(wirtschafts)verkehr wird in der Regel mit leichten und schweren Nutzfahrzeugen abgewickelt. In vielen Bereichen liegen bereits Praxiserfahrungen mit elektrischen Antrieben vor. Auch beim Personenwirtschafts- und Dienstleistungsverkehr kann der Einsatz von Elektrofahrzeugen sinnvoll sein. Beim Personenwirtschaftsverkehr geht es vor allem um dienstliche Fahrten im Dienstwagen. Unter Dienstleistungsverkehr versteht man den gemeinsamen Transport von Personen und Gütern, zum Beispiel Fahrten im Bereich des Handwerks. Beide Bereiche zusammen (Personenwirtschafts- und Dienstleistungsverkehr) machen über die Hälfte aller Fahrten des Wirtschaftsverkehrs aus.³⁴⁾

Elektrische Antriebe werden nicht nur von Privatpersonen zurückhaltend betrachtet, sondern auch von gewerblichen Anwendern. Die oft zitierte Angst vor der fehlenden Reichweite ist jedoch ein Phänomen, das für Unternehmen, die regelmäßig stadtnah fahren, kein Problem darstellt. Gerade regelmäßig verwendete Routen, feste Servicegebiete und kurze Fahrtstrecken in der Stadt eignen sich tendenziell für den Einsatz elektrischer Fahrzeuge. Kommen häufiges Anfahren und Abbremsen bzw. Staus und zähflüssiger Verkehr dazu, bieten elektrische Fahrzeuge deutliche wirtschaftliche Vorteile. Paket- und Lieferdienste (Kurier-Express-Paketdienste, KEP-Dienste) setzen daher seit längerer Zeit schon elektrische Zustellfahrzeuge ein. Darüber hinaus eröffnen E-Fahrzeuge die Möglichkeit, in Gebiete einzufahren, die zukünftig beispielsweise aufgrund von Feinstaubbelastungen oder Lärmschutzgrenzwerten für Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren unzugänglich sein könnten.³⁵⁾ E-Fahrzeuge können auch in Innenräumen betrieben werden. Damit könnten sie künftig in Logistikhallen einfahren.

Aufgrund der Konstruktion des Antriebsstrangs (kein Anlasser, keine Getriebe) sind diese E-Fahrzeuge ideal für Fahrten mit einer hohen Anzahl an Start-Stopp-Vorgängen, wie sie bei Anbietern von KEP-Diensten vorkommen. Das Segment der KEP-Dienste ist nicht zuletzt durch den Internet-Versandhandel seit dem Jahr 2000 stark gewachsen und macht einen immer größeren Teil aller Gütereinfahrten in Großstädten aus.

33) vgl. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: Begriffsbestimmungen, Teil: Verkehrsplanung, Straßenentwurf und Straßenbetrieb (FGSV 220)

34) vgl. „Starterset Elektromobilität (Praktische Tipps für Kommunen zum Einstieg in die Elektromobilität)“: <http://starterset-elektromobilitaet.de/content/welchen-bereichen-des-wirtschaftsverkehrs-ist-der-einsatz-von-e-fahrzeugen-denkbar>

35) vgl. Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik IML: Elektromobilität im Güterverkehr (http://www.iml.fraunhofer.de/content/dam/iml/de/documents/OE%20320/Infoseiten%20Produkte/elektromobilitaet_WEB.pdf)

KEP-Dienste transportieren in der Regel Güter mit geringem Gewicht, haben begrenzte Einsatzgebiete und beliefern pro Tour zahlreiche Endkunden. Dieses Einsatzprofil passt besonders zu speziell auf diese Aufgabe ausgelegten Elektrofahrzeugen. Zudem stehen die Fahrzeuge nachts auf Betriebshöfen, hier können die Batterien einfach aufgeladen werden. Auch der Einsatz von Lasten-Pedelecs breitet sich bei Kurierdiensten immer weiter aus.

Der Werkverkehr umfasst den Transport von Gütern für das eigene Unternehmen. E-Fahrzeuge lassen sich hierfür ebenfalls gut einsetzen, da die meist regelmäßigen Fahrten (zum Beispiel zwischen zwei Unternehmensstandorten) die Planbarkeit der Batterieladevorgänge erleichtern.

Je nach Anforderung eines Unternehmens können Elektrofahrzeuge verschiedener Art (Pkw, Pedelecs, E-Scooter) den Fuhrpark ergänzen oder die Verbrennungsmotoren ersetzen. Dabei können die Elektrofahrzeuge für Außendienstfahrten, medizinische und pflegerische Dienstleistungen oder Service- und Handwerksdienste eingesetzt werden. Kostenvorteile bieten zum Beispiel Kooperationen mit Carsharing-Anbietern, indem ein Unternehmen E-Carsharing-Fahrzeuge zu bestimmten Zeiten fest bucht.

Kommunen interessieren sich zunehmend dafür, Elektrofahrzeuge in die kommunalen Dienste und die kommunalen Flotten einzubinden. So ermöglichen Elektrofahrzeuge beispielsweise im Bereich der Müllabfuhr nicht nur eine schadstoffarme Bedienung der Wohngebiete, sondern aufgrund der geringen Lärmemissionen (bis auf den Lärm beim Entleeren der Tonnen) können die Bedienungszeiträume auch in die frühen Morgenstunden erweitert werden, was betriebliche Vorteile ergibt. Hier sollten Kommunen mittelfristig eine Strategie zur Umstellung entwickeln. Zum Beispiel können Anforderungskataloge für die Anschaffung von Fahrzeugen Kriterien wie CO₂-neutrale Antriebe enthalten. Das Portal „Starterset Elektromobilität (Praktische Tipps für Kommunen zum Einstieg in die Elektromobilität)“³⁶⁾ gibt Hinweise für den Einsatz von Elektromobilen in Fahrzeugflotten (wobei dieses Einsatzfeld zu den ältesten Aufgabengebieten elektrischer Fahrzeuge gehört – kurz vor der einsetzenden Dominanz des Verbrennungsüber den Elektromotor vor 100 Jahren waren am Beginn des 20. Jahrhunderts z. B. in Deutschland große Flotten von elektrischen Lieferwagen wie etwa bei der Post und bei Versorgern unterwegs, die auf den Firmengeländen problemlos aufgeladen und gewartet werden konnten).

Für den Transport deutlich schwererer Güter, wie diese beispielsweise Speditionen transportieren, werden derzeit die ersten reinen Elektrofahrzeuge angekündigt. Interessant könnte hier die Nutzung von Fahrzeugen mit Parallel- oder Hybridantrieben in sensiblen Stadtgebieten sein. Da im Güterverkehr vielfach feste Relationen nach festen Fahrplänen bedient werden, können die Bedienungsreichweiten eingehalten werden, wenn der e-Lkw seinen Anhänger oder Sattelaufleger an einem Umschlagstandort wechselt, der innerhalb der Reichweite dieses Lkw liegt. Solche Ideen ließen sich zu sogenannten „Hub-and Spoke“-Systemen bis hin zu Mehrnaben-Netzen entwickeln.³⁷⁾

Eine andere Möglichkeit, solche Fahrzeuge mit hohem Aktionsradius einzusetzen, stellen das „Batterie-Swapping“, der Austausch stark genormter und in Stationen vorgeladener Batterien dar. Technisch in der Erprobung sind hier Systemansätze mit Induktion, einer Stromschiene oder einer Oberleitung (siehe Abschnitt 2.4.4).

36) Siehe <http://www.starterset-elektromobilität.de/>

37) vgl. Winterberg, J., Wuppertal, 2017

2.7.3 Elektrofahrzeuge im ÖPNV

Die große „elektro-mobile Bedeutung“ des ÖPNV ergibt sich durch die Straßenbahn (und den O-Bus). Die hohe Akzeptanz der Straßenbahn als schienengebundenes, mit elektrischer Energie betriebenes öffentliches Personennahverkehrsmittel für den heutigen Stadtverkehr ist eng mit ihren Systembedingungen verknüpft:

-  den physikalischen und technischen Vorzügen (geringe Reibung, Spurführung, Massenleistungsfähigkeit),
-  die aufeinander bezogene und sich gegenseitig bedingende Entwicklung von Straßenbahnen und Stadtstrukturen bewirkt, dass beide Systeme in besonderer Weise „passgenau“ sind,
-  gleichzeitig war die elektrische Straßenbahn wichtiger Treiber von weiteren für das Stadtsystem bedeutsamen Entwicklungen, wie z. B. die der kommunalen Energiewirtschaft und der Energieverbände.

Innerstädtisch werden die Schwerelinien des öffentlichen Verkehrs mit Stadt- und Straßenbahnsystemen bedient. Dabei erfolgt die Energieversorgung der streckengebundenen Stadt- und Straßenbahnsysteme mit Strom über eine Oberleitungsanlage. Die Umsetzung optisch ansprechender Oberleitungsanlagen erfordert die Berücksichtigung der wirtschaftlichen Anforderungen und bei der elektrischen Dimensionierung von Anfang an eine Abstimmung zwischen Fachingenieuren und Stadtplanern.

Zukünftig können weiter entwickelte oberleitungslose Systeme mit Neufahrzeugen für städtebaulich besonders sensible Abschnitte je nach lokalen Gegebenheiten in Betracht kommen. Der finanzielle Aufwand ist allerdings sehr hoch. Daher sind oberleitungslose Systeme selbst beim Aufbau völlig neuer Systeme nicht als Standardlösung zu sehen. Stadt- und Straßenbahnsysteme besitzen stationäre oder On-board-Rekuperationssysteme, um die Bremsenergie zu speichern oder an andere Fahrzeuge im Fahrleitungsnetz weiterzuleiten.

Serielle oder parallele Hybridbusse (plug-in) nutzen einen elektrischen Antrieb in Verbindung mit einem Verbrennungsmotor. Mit Hilfe einer Batterie können städtebaulich sensible Streckenabschnitte auch emissionsfrei und elektrisch, mit ausgeschaltetem Dieselmotor, befahren werden. Der Vorteil liegt in einer kleinen, kostengünstigen Batterie, der betrieblichen Flexibilität, da man keine Ladevorgänge an Endhaltestellen einplanen muss und der von einem Dieselbus bekannten hohen Reichweite. Diese Antriebsart ermöglicht einen sehr flexiblen Einsatz des Fahrzeuges.

Batterie-Obusse (Oberleitungsbus bzw. Trolleybus) basieren auf dem bewährten konventionellen O-Bus. Beim O-Bus erfolgen die Zufuhr der elektrischen Energie durch eine Oberleitungsanlage analog zur Straßenbahn und deren Umsetzung in kinetische Energie permanent. Bei Obus-Neusystemen wird der erweiterte Ansatz verfolgt, die Fahrzeuge mit einer Hochleistungsbatterie auszustatten, die während der Fahrt unter der (partiellen) Oberleitung aufgeladen wird und dann innerhalb eines begrenzten Radius ein oberleitungsfreies Fahren ermöglicht (beispielsweise in historischen Straßen oder Quartieren, bei Verästelungen im Liniennetz sowie an Knotenpunkten, die eine hochkomplexe Fahrleitungsanlage erfordern).

Bei *Batteriebusen* hängt die Reichweite vor allem von der Auslegung der Batteriekapazität ab: Je nach Umlauflänge und Speicherkapazität der Batterie reicht eine Ladung für einen Tageseinsatz aus (Volllader) oder die Batterie muss während des Einsatzes nachgeladen werden (Gelegenheitslader). Bei allen Batteriebusen kann die Bremsenergie zurückgewonnen werden.

Beim *Volllader* sind die Batteriekapazität und die Einsätze so zu wählen, dass eine ausreichende Versorgung ohne Zwischenladung über den Tag möglich ist. Die Nachladung erfolgt dann während längerer Standzeiten an zentralen Punkten wie dem Betriebshof. Busse, die nachts im Depot langsam geladen werden (Volllader oder Depot Charging), sind zumeist mit großen Batterien ausgestattet, mit denen sie möglichst 300 km weit fahren sollten bzw. 18 bis 20 Stunden im Linienbetrieb ohne Nachladen eingesetzt werden sollten. Für jedes Fahrzeug muss aufgrund der gleichzeitig durchgeführten Ladevorgänge eine eigene Ladeeinheit vorgesehen werden.

Das zeitgleiche Aufladen erfordert eine umfangreiche elektrische Infrastruktur. Alternativ könnte auch eine teilentladene Batterie mit Hilfe eines Wechselsystems gegen eine volle Batterie ausgetauscht werden. Die einfachste Ausführung eines „Wechselsystems“ ist ein Batterieanhänger. Durch den Austausch kann die Batterie kleiner dimensioniert werden, allerdings müssen dann pro Fahrzeug mindestens zwei Batterien vorhanden sein. Dieses Konzept wird jedoch zurzeit nicht weiterverfolgt.

Busse, die als *Gelegenheitslader* teilweise oder vollständig auf der Strecke geladen werden (Opportunity Charging), sind mit kleineren Energiespeichern ausgestattet und werden an einem oder mehreren Ladepunkten (oft Endhalttestellen) in drei bis fünf Minuten nachgeladen: Dies kann über ein induktives oder konduktives Ladesystem erfolgen.

Die Anzahl der Ladepunkte und die Aufenthaltsdauer sind im Wesentlichen von der Länge der jeweils vorher und nachfolgend sicher zu überwindenden Strecken abhängig. Der Bus ist damit betrieblich an Strecken mit Nachlademöglichkeit gebunden, wodurch seine Einsatzflexibilität eingeschränkt wird.

Auch wenn die Verkehrsbetriebe aktuell noch die Ausrichtung auf ein Konzept bevorzugen, werden sich mit dem weiteren „Markthochlauf“ vermutlich Mischkonzepte aus Depot Charging und Opportunity Charging entwickeln, um die nötige Flexibilität im Linien- und Netzbetrieb zu ermöglichen.

Bei *Brennstoffzellenbussen* wird die elektrische Energie durch Umwandlung aus Wasserstoff gewonnen, der an einer Wasserstoff-Tankstelle bezogen wird. Die Fahrzeuge sind infolge des elektrischen Antriebs, der Brennstoffzelle und der Druckgastanks schwerer als Dieselbusse. In der Regel können die Busse mit einer für mindestens einen Tageseinsatz ausreichenden Wasserstoffmenge betankt werden.

(Brennstoffzellen-)Hybridbusse sind zusätzlich mit Batterien ausgestattet, um die Rekuperationsenergie (Bremsenergie) aufzunehmen sowie um die Lastspitzen für die teure Brennstoffzelle zu reduzieren, so dass diese möglichst in einem stationären Arbeitspunkt betrieben werden kann. Linienbusse werden auch zur Evakuierung (z. B. bei Hochwasser oder bei Bränden) und im Schienenersatzverkehr eingesetzt. Dieser flexible Einsatz ist mit Batteriebusen als Gelegenheitsladern nur schwer vorstellbar, jedoch mit wasserstoffbetriebenen Fahrzeugen. Busse, die verlässlich längere Wege im Linienbetrieb, zum Beispiel im Regionalverkehr, zurücklegen müssen, können mit einem Range Extender zur Reichweitenerweiterung ausgestattet werden. Dieses sind bislang Dieselaggregate. Im E-Betrieb bieten sich hier Brennstoffzellen an.

Nach den derzeitigen Einsatzerfahrungen benötigen Standard-Elektrobusse (12 m Länge) ohne Berücksichtigung der Wirkungsverluste bei der Energieerzeugung 0,85 bis 1,2 kWh/km Antriebsleistung. Die Hilfsaggregate für Heizung und Klimatisierung benötigen in kalten und warmen Zeiten die gleiche Menge Energie, wie für den Fahrbetrieb nötig ist. Daher konzentrieren sich die Entwicklungen derzeit auf energiesparende Lösungen für die Nebenverbraucher.

Unabhängig vom gewählten Elektrobus-Konzept ist eine intensive Analyse der bestehenden Fahr- und Dienstpläne erforderlich, um eventuelle Produktivitätsnachteile, vor allem beim Gelegenheitslader, zu überwinden. Hier stehen die Wende- und Haltestellenaufenthaltszeiten und ihre zielorientierte Nutzung für (die in der Regel längeren) Ladezeiten im Mittelpunkt. Diese müssen über das ganze Jahr gleichermaßen sichergestellt werden und sind deshalb unter Berücksichtigung nutzbarer Wende- und Haltestellenaufenthaltszeiten additiv in Abhängigkeit von Verspätungen einzuplanen. Zur Entscheidungsfindung sind iterative Planungsprozesse erforderlich, um die elektrische Systemauslegung, Liniennetzbildung, Fahr- und Dienstplanung und die städtebauliche Integration gemeinsam zu optimieren. Bei diesem Optimierungsprozess müssen dann Überlegungen hinsichtlich der Life-Cycle-Costs in Abhängigkeit von Preisszenarien, Betriebsrobustheit, Fahrplanwirkungsgrad sowie dem strategischen Betriebsmodell bei der Einführung besonders beachtet werden. Belastbare Erfahrungswerte, die eine quantitative Aussage innerhalb dieses Optimierungsprozesses ermöglichen, sind heute noch nicht verfügbar.

Derzeit werden Batterie- und Brennstoffzellenbusse in ca. 30 Projekten im Linienverkehr in Deutschland getestet, um Fragen der Reichweite, Verfügbarkeit und Instandhaltung zu klären und sich zu vergewissern, ob die Technik zuverlässig und bezahlbar (einschließlich Refinanzierung) ist. Im Hinblick auf den gesamten Lebenszyklus ist eine Batteriebus-Flotte mit aktuellen Prototypen bezogen auf den Kapitaldienst der Anschaffung und der Infrastruktur, der Instandhaltung sowie Energiekosten noch mindestens 50 % teurer als eine Dieselbus-Flotte aus der Serie, selbst wenn besondere Einführungskosten, Einschränkungen bei der Flexibilität und Produktivität sowie die noch höhere Störungsanfälligkeit unberücksichtigt bleiben. Auf der anderen Seite ermöglicht der Elektrobus allein durch die hohe Nutzungsdauer von oft mehr als 16 Stunden am Tag und den höheren Wirkungsgrad von elektrischen Antrieben eine Entlastung, gemessen an den Schadstoffemissionen, die sonst erst durch 60 bis 100 Autos mit Elektroantrieb erreicht werden würde. Ein Umstieg von MIV auf den ÖV würde damit besonders große ökologische Vorteile mit sich bringen, sofern regenerative Energie zur Verfügung steht. Damit einher geht eine Lärmreduzierung. Für Verkehrsunternehmen, die in Stadtwerke integriert sind, ergeben sich durch die Nutzung von Strom/Wasserstoff aus erneuerbaren Quellen neue Märkte. Eine sukzessive Umstellung auf emissionsarme und leise Elektroantriebe ist zudem eine aktive Risikovorsorge zur Überwindung der Abhängigkeit von fossilen Energieträgern und ihrer künftigen Preisentwicklung. Rechnerisch führt Strom aus Kohle bei einem Batteriebus zu keinen energetischen Einsparungen im Vergleich zu einem Dieselbus, dafür aber zu mehr CO₂-Ausstoß. Ein aus regenerativen Energiequellen angetriebener Batteriebus benötigt dagegen – aufgrund des höheren Wirkungsgrades bei Erzeugung und Antrieb – nur die Hälfte der Energie, die bei fossiler Herkunft aufzubringen wäre, und stößt kein CO₂ aus. Im UN-Klimaabkommen von Paris wird dies für den Verkehr auch als Zielbild für 2050 beschrieben.

3 Systemintegration von Elektromobilen

Elektromobilität ist dann von Nutzen, wenn sie als Systemelement eines integrierten Stadt- und Regionalverkehrs begriffen und in Mobilitätskonzepte und Verkehrs-(entwicklungs)-pläne integriert wird. Sie wird so zum Bestandteil kollektiver, individueller und intermodaler Mobilitätsangebote, die die Vernetzung und Nutzung unterschiedlicher umweltverträglicher Verkehrsmittel fördern. Die Einsatzmöglichkeiten elektrischer Fahrzeuge in den Städten sind vielfältig und liegen im öffentlichen wie im individuellen Personenverkehr, im Wirtschaftsverkehr, in kommunalen und betrieblichen Flotten, in Carsharing- und Bikesharing-Systemen etc. Dabei zeigt sich, dass zwischen den einzelnen Einsatzfeldern große Unterschiede hinsichtlich Technik, Nutzeranforderungen, möglichen Betriebskonzepten und nicht zuletzt stadt- und verkehrsplanerischen Rahmenbedingungen bestehen. Die Integration der Elektromobilität in ein integriertes Verkehrssystem ist Gegenstand der nachfolgenden Ausführungen.

3.1 Elektromobilität als Baustein eines inter-/multimodalen, integrierten Verkehrs

3.1.1 Elektromobile im multimodalen Einsatz

Durch die zunehmende Diversifizierung und Individualisierung der Mobilität wächst die Nachfrage nach inter- und multimodalem Verkehr. Die Elektromobilität setzt auf diese Trends auf bzw. ist ein Treiber dieser Entwicklung.

-  Intermodale Verkehrsnachfrage bedeutet, dass Personen innerhalb eines Weges verschiedene Verkehrsmittel kombinieren (inklusive Fußverkehr).
-  Multimodale Verkehrsnachfrage bedeutet die Verwendung von verschiedenen Verkehrsmitteln auf unterschiedlichen Wegen innerhalb eines bestimmten Zeitraums.

Um Inter- und Multimodalität gewährleisten zu können, sind integrierte Mobilitätsangebote notwendig. Diese integrierte Mobilität geht von aufeinander abgestimmten Angeboten aus, die auf die Nutzerbedürfnisse zugeschnitten sind und einen einfachen und übergreifenden Zugang zu unterschiedlichen Verkehrsmitteln bieten. Mobilitätsdienstleistungen spielen in diesem Bereich eine große Rolle. Neben den infrastrukturellen Angeboten sind Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT) ein wichtiger Baustein, um eine integrierte und systemübergreifende Angebotskombination zu ermöglichen. Dabei sind durchgängige anbieterübergreifende Schnittstellen notwendig, um die Kunden zu informieren bzw. ihnen Buchungs- und Abrechnungsmöglichkeiten zu geben.

Die Einbindung der Elektromobilität mit ihren Randbedingungen (z. B. Reichweiten, Ladezyklen, Eignung als Verkehrsmittel) in die Verkehrssysteme setzt sowohl den intermodalen als auch den multimodalen Verkehr voraus. Elektromobilität funktioniert dann, wenn alle Verkehrsangebote (elektrisch und konventionell) integriert sind und nahtlose IKT-basierte Übergänge zwischen den Verkehrsmitteln, sei es auf einem Weg oder auf verschiedenen Wegen, möglich sind.

3.1.2 ÖPNV als Rückgrat der Elektromobilität

Der öffentliche Personennahverkehr mit Bussen und Bahnen stellt hinsichtlich Kosteneffizienz, Klimaschutz, Luftreinhaltung und Vereinbarkeit mit städtebaulichen Anforderungen aufgrund seiner systemspezifischen Vorteile (wie höhere Beförderungskapazität im Verbund mit dem Zufußgehen und Fahrradfahren) nach wie vor das intelligenteste Verkehrsangebot dar. Zudem schafft er die Voraussetzung dafür, dass der Privat- und Wirtschaftsverkehr weitgehend funktionieren kann. Mit dem Ausbau der Elektromobilität wächst die Gefahr, dass der öffentliche Verkehr in der allgemeinen planerischen Beurteilung seinen sogenannten „Umweltvorteil“ verlieren könnte. Eine Umstellung ausschließlich des Pkw auf elektrische Antriebe, und damit die Vermeidung von Lärm, Schadstoffen und klimaschädlichen Gasen allein ist deshalb keine nachhaltige Option, da der wachsende Strom an fließenden und ruhenden Fahrzeugen zu stadunverträglichen Bedingungen führt. Außerdem kann ein ausreichender „Level of Service“ auf hochbelasteten Stadtstraßen dann nicht gewährleistet werden, wenn zunehmend Fahrten mit öffentlichen Verkehrsmitteln durch Individualverkehr mit Elektrofahrzeugen ersetzt werden.

Elektroautos allein sind unter den Zielsetzungen der „Verkehrswende“ keine Alternative zu einem weiteren Ausbau und der Vernetzung des ÖPNV. Es ist zu berücksichtigen, dass das Elektroauto, wie das konventionelle Auto auch, einen hohen Flächenbedarf hat und eine kostenintensive Infrastruktur sowie viel Energie bei hohen Betriebskosten in Relation zum ÖPNV benötigt. Sofern die Stadtplanung die Belange des Autoverkehrs in den Mittelpunkt ihrer Konzepte stellt, setzt sich die räumliche Zersiedlung auch mit Elektroautos weiter fort, was wiederum die Nutzung des Autos begünstigt. Vor diesem Hintergrund bedarf es der Anpassung von Rahmenbedingungen wie der Kostenstrukturen, damit der ÖPNV zum Rückgrat der Elektromobilität werden kann.

Die Verlässlichkeit des Linienbusverkehrs als Rückgrat multimodaler Mobilität ist zu fördern. Auch wenn das Elektromobilitätsgesetz die Freigabe von Busspuren (Bussonderfahrstreifen) für E-Autos vorsieht, bedarf es einer differenzierten Betrachtung der Verkehrsmengen und Störeinflüsse. Es stellt sich die Frage nach der Grenze: ab welchem Marktdurchsatz von E-Autos sind diese Privilegien (sofern einmal gewährt) wieder zurückzunehmen?

Gerade elektrischen Linienbussen helfen Busspuren und andere Optimierungsmaßnahmen, den Betrieb planbarer zu machen – wodurch die teuren und schweren Batterien kleiner ausgelegt und Reservebusse vermieden werden können. Beides kommt der Wirtschaftlichkeit bei der Marktdurchdringung mit Elektrobussen entgegen. Nutzervorteile für E-Autos zum Nachteil des öffentlichen Verkehrs und Anreize, die den Elektro-Pkw von Kosten entlasten bzw. die das Fahren oder Parken bequemer machen, verschlechtern die Wettbewerbsposition des ÖV und sind somit kontraproduktiv für die Lebensqualität in den Städten. Unter Berücksichtigung des Sachzwanges, dass Elektrofahrzeuge bei jeder sich bietenden Gelegenheit wieder aufgeladen werden müssen, wäre eine Garantie eines individuell reservierten Parkplatzes mit Stromanschluss am Fahrtziel mit Hilfe der Telematik eine weitere Manifestierung der „autogerechten“ Stadt (jedoch nicht im Sinne der Veröffentlichung aus dem Jahr 1959, bei der dem Auto kein Vorrang eingeräumt werden sollte³⁸⁾).

38) Quelle: Reichow, H. B.: „Die autogerechte Stadt – Ein Weg aus dem Verkehrs-Chaos“. Otto Maier Verlag, Ravensburg 1959

Elektro-Fahrzeuge können für „Feeder-Verkehre“ von und zu Haltestellen des ÖV genutzt werden. Hierfür sind neben Segways, Pedelecs, E-Bikes oder E-Scootern und E-Rollern auch E-Trikes oder E-Quads denkbar. So können auch ältere Personen den ÖPNV gut erreichen und die Distanzen zu den Haltestellen könnten etwas vergrößert werden. Allerdings müssen an den Haltestellen dann gesicherte (witterungsgeschützte) Abstellplätze mit Ladeoptionen vorgehalten werden.

Ein weiteres Ziel ist die Unterstützung von neuen Mobilitätslösungen, die vom privaten Pkw-Besitz unabhängig machen. Verkehrsunternehmen kooperieren bereits jetzt mit Carsharing-Anbietern. Neue Selbstbedienungs-Vermietsysteme für Elektro-Fahrräder und E-Autos als Ergänzung des ÖV sind schon deswegen für diesen interessant, weil sie den gesellschaftlichen Trend weg vom privaten Pkw-Besitz unterstützen. Verkehrsunternehmen und -verbände, die neue multimodale Mobilitätsmodelle aufbauen und anbieten, sollten schwerpunktmäßig gefördert werden und weniger der Kauf von privaten Elektro-Pkws.

Im ländlichen Raum mit seiner dünneren Besiedlung und den dispersen Nachfragestrukturen sind im Zusammenspiel von ÖV und Elektrofahrzeugen aller Art neue Mobilitätskonzepte erprobt worden. Hierzu gehören Bike-and-Ride (B+R) bzw. Park-and-Ride (P+R) mit Elektrofahrzeugen, die an der Haltestelle aufgeladen werden können, für den Alltagsverkehr ebenso wie die Kombination von ÖV und Fahrzeugen für Freizeit und Tourismus, der in ländlichen Regionen einen wichtigen Wirtschaftszweig darstellt.

Der ÖPNV als Rückgrat der Elektromobilität bedeutet auch, dass die Vernetzung der neuen Mobilitätsangebote unter dem Dach des öffentlichen Verkehrs vorangetrieben wird. Der Umweltverbund ist in Kombination mit Bike-and-Ride, Park-and-Ride, öffentlichen Miet-Fahrrädern, Miet-Elektrorollern und Miet-E-Autos zu einem vernetzten System mit baulichen Schnittstellen weiter zu entwickeln. Die Angebote sind über eine gemeinsame Informationsplattform zu vernetzen und mit einem Vertriebssystem auszustatten. Dabei hat der ÖPNV eine gute Ausgangsposition, eine Führungsrolle zu übernehmen. Er verfügt über Informationen über seine Fahrgäste (und evtl. auch von den Stromkunden im gleichen Hause), er hat in zunehmender Zahl geeignete Zugangsmedien verbreitet und er verfügt über Haltestellen und sonstige Flächen im Stadtgebiet. Bei Verkehrsverbänden und -unternehmen stehen im Zusammenspiel mit dem Aufgabenträger integrierte – und nicht rein kommerzielle – Planungsansätze im Vordergrund.

3.1.3 Verlässliche Ladung von Elektromobilen

Auf Grundlage der StVO kann derzeit ein Ladeplatz an einer öffentlichen Ladesäule im öffentlichen Straßenraum nicht gewährleistet (reserviert) werden. Dies gilt weniger für die Einfamilienhausgebiete mit eigener Garage (und Ladestation) als vielmehr für die vielen innenstadtnahen Wohngebiete mit ihrer mehrgeschossigen Bebauung in geschlossener Blockrandstruktur. Zunächst stellt sich hier generell die Frage, wie das Laden organisiert werden soll, wenn es zu einem höheren Durchsatz mit Elektrofahrzeugen kommen wird. Außerdem wird ein Fahrer sein E-Fahrzeug nach der Ladezeit nachts um drei Uhr nicht wegfahren, nur um dem Verkehrsrecht (wie etwa „Parken maximal vier Stunden während des Ladens“) genüge zu tun.

Hat der Besitzer eines E-Fahrzeugs keinen eigenen Stellplatz mit Lademöglichkeit, ist er auf einen im öffentlichen Straßenraum angewiesen – wie vielleicht auch sein Nachbar.

Wenn der Bedarf wächst, müssen dann immer mehr öffentliche Ladesäulen eingerichtet werden? Werden mehr und mehr Säulen eingerichtet, wo parken die verbleibenden Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor und wie lange macht dies das Stromnetz mit?

Gerade für die zentralen Innenstadtbereiche und für die innenstadtnahen Wohngebiete gilt es, noch überzeugende Konzepte zu entwickeln, sofern diese noch nicht mit Konzepten autoarmer bzw. -freier Lebensstile durchdrungen sind.

3.1.4 Elektromobile in Sharing-Systemen

Das Angebot elektrisch angetriebener Pkw vergrößert sich ständig und umfasst eine Bandbreite, die derzeit vom City-Fahrzeug über die Elektroauto-Mittelklasse bis hin zu Luxus-Fahrzeugen reicht.

Eine Integration dieser Elektromobile in Sharing-Systeme ist problemlos möglich, setzt aber eine Ladeinfrastruktur für die Nutzerinnen und Nutzer der elektrischen Fahrzeuge (aber auch für Fahrräder und Roller) voraus. Von den derzeit rund 25.500 zugelassenen Elektrofahrzeugen (Stand 2016, ohne Elektrofahräder und -roller) in Deutschland können ca. 15 % bis 20 % bei Carsharing-Organisationen ausgeliehen werden. Das Portal „e-Car-Sharing“ listet elektrisches Carsharing in Berlin, Frankfurt am Main und im Rhein-Main-Gebiet, Hamburg, Hannover, Köln, München, Nürnberg/Erlangen, Ruhrgebiet, in Stuttgart und Ulm auf. In Berlin sind zum Beispiel von den ca. 28.000 Carsharing-Fahrzeugen ca. 430 (1,5 %) elektrische unterwegs.

Drei Varianten des Carsharing können dabei unterschieden werden:



Stationäres Carsharing,



Freefloating-Sharing (bzw. „Geschäftsgebiet-Carsharing“) und



privates Carsharing.

Die Gesamtanzahl der Fahrräder bei Vermietsystemen liegt bei etwa 18.000 (Stand 2014), wobei die Zahl jedoch nur sehr schwer aus Statistiken ermittelt werden kann. Eine Information über den Anteil von Pedelecs daran gibt es derzeit nicht.

Ausschlaggebender Parameter für den wirtschaftlichen Einsatz von Elektrofahrzeugen ist die Entwicklung des Batteriepreises. Dabei können Elektrofahrzeuge mit Batteriekapazitäten von 10 kWh zwar schlechter herkömmlich angetriebene Carsharing-Fahrzeuge ersetzen, sind jedoch früher wirtschaftlich. Bei einer dem bisherigen Verlauf folgenden durchschnittlichen Entwicklung des Batteriepreises könnten für das Beispiel Karlsruhe (als Carsharing-„Hochburg“) in einer Flotte von 416 Fahrzeugen 8 E-Fahrzeuge integriert werden, bei positiver Annahme zur Entwicklung des Batteriepreises bis zu 26, bei Subventionen beim Kauf bis zu 53³⁹⁾. Diese Substitution wird jedoch nur bei Annahme der flexibelsten Form des Lademanagements, der Spontan-Teilladung, erzielt. Wird eine Vorausbuchung bevorzugt, verringert sich die Zahl der wirtschaftlich ersetzbaren Fahrzeuge wegen der dann geringeren Fahrleistungen deutlich. Die Spanne der realistischen Anteile von Elektrofahrzeugen in Carsharing-Systemen reicht nach der Untersuchung von ca. 6 bis ca. 13 %. Von elektromobilem Carsharing für Gewerbekunden handelt die Untersuchung von Lißner, Becker und Clarus.⁴⁰⁾

39) Doll, C.; Gutmann, M.; Wietschel, M.: Integration von Elektrofahrzeugen in Carsharing-Flotten – Simulation anhand realer Fahrprofile, Fraunhofer ISI, Karlsruhe, Mai 2011

40) Lißner, S.; Becker, U.; Clarus, E.: Elektromobiles Carsharing für Gewerbekunden – Evaluation unterschiedlicher Angebotsformen hinsichtlich ihrer Umwelteffekte

Neben dem Carsharing entwickelt sich das Bike-Sharing vor allem in Großstädten und in Verbindung mit ÖPNV-Angeboten. Hier kann das Pedelec-Sharing als neue Angebotsform die Attraktivität der modal verknüpften Systeme steigern. Es ist dann die Frage der (induktiven) Ladung zu klären.

3.1.5 Lage und Gestaltung von Verknüpfungspunkten

Für die Anbindung des Umlandes an die Stadt bietet sich eine Erweiterung der heute bekannten und verbreiteten P+R-Anlagen durch die Kombination des elektrischen Individualverkehr (E-Auto, Pedelec) mit lokalen ÖPNV-Angeboten an. Damit können die negativen Wirkungen von Einpendlerverkehren (z. B. hohe Verkehrsbelastung durch Staus und ruhenden Verkehr) auf dicht mit Busverkehren bedienten Hauptachsen oder durch Schnellbusse an Stadtrand „abgefangen“ werden. Dies reduziert die Verkehrsmenge in der Stadt und führt neben einer Minderung der Lärm- und Feinstaubbelastungen zu einer allgemeinen stadträumlichen Entlastung. Auch für Mittelstädte mit reinen Bussystemen stellt dieser Anwendungsfall ein ganz neues Einsatzfeld dar. Ein solcher Ansatz kann sich zudem die räumliche Flexibilität des Busses zunutze machen, die bei schienengebundenen Systemen nicht gegeben ist. Hierfür sind geeignete Verknüpfungspunkte zwischen den Hauptachsen des Straßennetzes und dem ÖPNV zu identifizieren, an denen dann P+R-Anlagen eingerichtet werden können. Hinsichtlich der Ausstattung mit Ladesäulen, Schnell- und Normalladen und den Abrechnungsmöglichkeiten gelten die bereits dargestellten Anforderungen. In solchen Fällen ist die Verfügbarkeit der elektrischen Netze besonders zu untersuchen.

Für den zweckmäßigen Einsatz von Elektromobilen ist die Verknüpfung mit anderen Verkehrsmitteln des Regional- und Fernverkehrs notwendig. Sie kann, wie heute bereits praktiziert, an Flughäfen und Bahnhöfen, aber auch an ausgewählten Haltestellen von S- und Straßenbahn- und Bussystemen realisiert werden. Die Verknüpfung unterschiedlicher Verkehrsträger wird idealerweise durch weitere Mobilitätsdienstleistungen wie Carsharing und Bikesharing ergänzt. Entsprechende Abstellflächen und Fahrradabstellanlagen sind daher vorzuhalten. Diese Verknüpfungspunkte, vielfach auch als Mobilitätspunkte oder Mobilitätsstationen bezeichnet, haben eine hohe Bedeutung für eine integrierte und vernetzte Mobilität.

Auch kleinere Bahnhöfe und Haltestellen sowie S- und Straßenbahnhaltestellen eignen sich als Verknüpfungspunkte zwischen individuellen Elektrofahrzeugen und dem ÖPNV. Immer da, wo P+R sinnvoll ist, existiert auch ein Potenzial für einen Umstieg von Elektrofahrzeugen auf den ÖPNV oder das Fahrrad. Die grundsätzliche Errichtung von Ladestationen an Verknüpfungspunkten erscheint daher sinnvoll. Die Anzahl der Ladesäulen und dort vorgehaltenen Ladepunkte sowie die Frage nach Art der Ladeinfrastruktur (Normal- oder Schnellladung) ist an innerstädtischen Halte- und Verknüpfungspunkten differenzierter zu betrachten als an großen Bahnhöfen und Flughäfen, da hier die Standzeiten der Fahrzeuge beim klassischen P+R häufig kürzer als durchschnittliche Ladezyklen an Stationen des Normalladens sind. Dieses gilt z. B. bei Einkaufs- oder Freizeitverkehren, beispielsweise bei Besuchen von Sport- oder Kulturveranstaltungen.

An größeren *Bahnhöfen und Flughäfen* sind Park- und Abstellvorgänge oft von längerer Dauer und erfolgen in besonderen Abstellanlagen (Parkplätzen und Parkhäusern für Pkw und Fahrräder/Pedelecs). Sollen sie die Funktion von Verknüpfungspunkten übernehmen, ist eine ausreichende Anzahl von Stellplätzen mit Lademöglichkeiten vorzusehen. Aufgrund der längeren Standzeiten sind Normalladestationen in Form von Wallboxen im Regelfall ausreichend. Für eine ausreichende Kapazität der Stromversorgung sind die Anschlussleistungen der Parkhäuser zu prüfen und gegebenenfalls zusätzliche Anschlüsse an die Mittelspannungsebene mit entsprechenden Transformatoren vorzusehen. In Einzelfällen müssen gegebenenfalls einzelne Stellplätze als Standorte für Transformatoren genutzt werden. Bei der Tarifierung und den Bezahlssystemen sollten die Parkkosten und die Stromtarife integriert (Park & Charge) bzw. eine Bezahlmöglichkeit für den Strom vorgehalten werden.

Zur Frage der Anzahl von Normal- und Schnellladestationen sind seitens der Kommunen, der Verkehrsbetriebe sowie Betreiber von Ladeinfrastruktur und Verknüpfungspunkten Einzelfallbetrachtungen anzustellen. Hinsichtlich der Stromversorgung ist auf eine ausreichende Leistungsfähigkeit zu achten, die insbesondere in dünner besiedelten Regionen oder an dezentralen Standorten problematisch sein und in der Folge zu einem erhöhten Aufwand für Zuleitungen bzw. den Anschluss an das Mittelspannungsnetz führen kann. Bei gleichstrombetriebenen Stadt- und Straßenbahnen bietet sich das Gleichstromnetz dieser Systeme als Anschlussebene an, da dort häufig ausreichende Kapazitäten zur Verfügung stehen oder mit überschaubarem Aufwand geschaffen werden können. Zudem bietet der Anschluss an das Gleichspannungsnetz die Chance, Schnellladeinfrastruktur anzuschließen. Hinsichtlich der Bezahlmöglichkeiten gelten die oben bei den Bahnhöfen genannten Bedingungen.

Elektromobilität kann auch den Einsatz von Pedelecs oder besonderen elektrisch unterstützten Fahrzeugen für Kurzstrecken (z. B. Segways) umfassen. Dafür sind an Bahnhöfen, Haltestellen, zentralen Bushaltestellen etc. zukünftig auch für Pedelecs, Segways etc. Abstellflächen und Lademöglichkeiten vorzuhalten. Insbesondere den Pedelecs wird auf mittleren Entfernungen von 5 bis 10 km ein hohes Potenzial zur Substitution von Autoverkehren zugesprochen. Die elektrisch unterstützten Fahrräder stellen erhöhte Anforderungen an sichere und wettergeschützte Fahrradabstellanlagen. Diese sind in ausreichender Anzahl in die Verknüpfungspunkte zu integrieren, auf ein übersichtliches Umfeld mit hoher sozialer Sicherheit und auf eine ausreichende Beleuchtung ist zu achten. Anschlussmöglichkeiten zum Laden werden nach bisherigen Erkenntnissen als weniger wichtig erachtet. Wo sich Anschlussmöglichkeiten (220 V) ohne große Aufwände realisieren lassen, würden sie einen Mehrwert darstellen. Pedelecs und auch Segways erlauben als Kurzstreckenverkehrsmittel darüber hinaus eine schnelle Überwindung der sogenannten „letzten Meile“ und sind für die umweltfreundliche Abwicklung innerstädtischer Verkehre stets zu berücksichtigen.

3.1.6 Elektromobilität in unterschiedlichen Stadtstrukturen

Aus Sicht der postfossilen Mobilität liegt es nahe, die Verkehrssysteme von den Verknüpfungspunkten und den Linien des ÖPNV her zu denken und zu entwickeln. Für den ÖPNV könnte es sich als Systemvorteil erweisen, dass er zumindest in den großen Städten über leistungsfähige Stromtrassen im Linienverlauf verfügt. Diese Energie kann auch zur Schnellladung von individuellen E-Mobilitätsformen insbesondere an den Haltestellen zur Verfügung gestellt werden, die so zu multimodalen Verknüpfungspunkten mit E-Car-/E-Bike-Sharing-Angeboten und Ladestationen für private E-Mobile werden können. Da E-Fahrzeuge emissionsfrei unterwegs sind, können Haltestellen in den Innenstadtbereichen zur Erhöhung der Akzeptanz vollständig „eingehaust“ werden oder in Gebäuden liegen.

-  Die Zufahrt in die Innenstädte im Lade- und Lieferverkehr könnte zur Verringerung von Feinstaub- und Stickoxid-Belastungen künftig nur noch E-Transportern gestattet werden.
-  In den Seitenstraßen und -gassen wird Elektrofahrrädern sowie gegebenenfalls elektrischen Kleinkrafträdern die Benutzung erlaubt.
-  In den zentralen Innenstadtbereich können Elektroautos gar nicht oder nur mit einem zuvor festgelegten Maximalgewicht einfahren. Velorouten durch die zentrale Innenstadt ergänzen das System.
-  E-Lastenfahrräder bedienen hier die „letzte Meile“ von zentralen Container-Standorten bis zu den Geschäften oder werden für Lieferservices von Waren genutzt.

Zukunftsvision: Der Innenstadtring verfügt über eine Nahverkehrstrasse mit Bus-, Stadt- und Straßenbahnlinien. Der Bus-ÖPNV auf dem Innenstadtring wird mit alternativen Antrieben (Hybrid-/E-/Wasserstoff-Antrieb, Stromzufuhr über Caps, Oberleitung oder induktiv) ausgestattet. Velorouten/Radschnellwege (Radschnellverbindungen) werden über den Innenstadtring geführt. Geschützte Stellplatzanlagen und Flächen mit entsprechender Ladeinfrastruktur für Radangebote werden den Haltestellen des ÖPNV (z. B. Kreuzung von Ring und Radiale) zugeordnet.

Innenstadtnahe Wohngebiete und Großwohnanlagen zeichnen sich in der Regel durch eine gute Erreichbarkeit mit dem Umweltverbund aus und sind auf jeden Fall für eine Erschließung durch die Straßenbahn relevant. Hier ist zudem das Fahrradfahren durch alle bekannten verkehrsplanerischen Maßnahmen generell zu fördern. Ein Schwerpunkt muss auf Abstellflächen, insbesondere auch für E-Bikes, mit Sicherungsbügeln gelegt werden. Entsprechende Ladeinfrastruktur in Zuordnung zu den wichtigen Haltestellen des ÖPNV ist vorzusehen.

Die Radialen und Tangenten verfügen zumeist über leistungsfähige ÖPNV-Trassen und damit in der Regel auch über Bus-, Stadt- und Straßenbahnlinien. Sie zeichnen sich in der Regel durch eine gute Erreichbarkeit mit dem Umweltverbund aus. Hier ist das Fahrradfahren, auch mit Pedelecs durch alle bekannten verkehrsplanerischen Maßnahmen zu fördern. Velorouten können auf den Radialen oder zwischen den Radialen geführt werden.

An den Ladestationen des ÖPNV an den Endhaltestellen lassen sich auch öffentliche E-Fahrzeuge (z. B. Müllabfuhr, Straßenreinigung, Fahrzeuge des Grünflächenamtes usw.) laden.

3.1.7 Elektromobilität im ländlichen und suburbanen Raum

In ländlichen Räumen muss die nicht motorisierte Bevölkerung (die nicht von der Elektromobilität profitiert) ihre Mobilität aufwändig organisieren und ist darin eingeschränkt. Versuche, vor allem durch öffentliche Verkehrsangebote daran etwas zu ändern, sind in der Regel von begrenztem Erfolg. Elektromobilität im ländlichen Raum wird daher zu einem überwiegenden Teil elektrifizierter MIV sein. Dies scheint aus heutiger Perspektive grundsätzlich möglich: Die Batteriereichweite, durchschnittlich zurückgelegte Wegstrecken sowie die vorhandenen privaten Lademöglichkeiten können die Alltagsmobilität der ländlichen Bevölkerung sichern, die in der Regel über einen Pkw sowie über einen Stellplatz mit Nachlademöglichkeit z. B. am Wohnort verfügt. Werden Lademöglichkeiten am Arbeitsplatz oder den Einkaufsgelegenheiten geschaffen, kann das Reichweitenproblem im Wesentlichen als lösbar angesehen werden.

Ansatzpunkte, öffentlichen Verkehr zu ermöglichen und zu stärken, sind „Zubringerverkehre“ zum ÖV unter Nutzung von Pedelecs. Mit ihnen lassen sich Haltepunkte von (Schnell-) Bus- oder Bahnverkehren auf Achsen oder zu touristischen Angeboten in Regionen erreichen, die über einen starken Fremdenverkehr verfügen. Hier kann die Elektromobilität in touristische Mobilitätsketten eingebunden werden. Von attraktiven Zusatzangeboten, die in erster Linie auf die Besucher zielen, könnte auch die lokale Bevölkerung profitieren. Perspektivisch interessant kann die Elektromobilität auch im Zusammenhang mit dem Aufbau dezentraler Versorgungsstrategien sein.

Dennoch wird die Autoabhängigkeit der Landbevölkerung auch künftig bestehen bleiben und sich auch durch elektro-mobile Ansätze nicht auflösen lassen. E-Carsharing oder Dorfautos sind Ansätze, die Automobilität auf dem Land zu optimieren und dabei auch auf die Elektromobilität zu setzen. Pilotanwendungen sind dabei erfolgversprechend, allerdings lassen sich noch keine abschließenden Aussagen treffen. Den Verkehr und insbesondere auch die Berufs- und Pendlerverkehre zu elektrifizieren, setzt die Nutzungsbereitschaft der Bevölkerung voraus.

In den Einfamilienhaus- und Dorfgebieten sollte möglichst keine Ladeinfrastruktur für E-Mobile im öffentlichen Straßenraum, sondern nur auf Privatflächen angeordnet werden (Ausnahme: gegebenenfalls Ladestationen für Besucher). An geeigneter Stelle sind Flächen für quartiersbezogenes Carsharing mit Ladeinfrastruktur vorzusehen. Für Bike-sharing-Angebote sind auch für E-Bikes Abstellflächen mit Sicherheitsbügeln und entsprechender Ladeinfrastruktur in Zuordnung zu den wichtigen Haltestellen des ÖPNV vorzusehen.

Hinsichtlich der ladeinfrastrukturellen Anforderungen und der Verkehrsmittelausstattung der privaten Haushalte unterscheiden sich suburbane Räume nicht wesentlich von ländlichen Regionen. Die zurückgelegten Wegestrecken sind mit der heutigen Batteriereichweite ebenso zu bewältigen. Im Unterschied zu ländlichen Räumen ist durch die größere Nähe zur Stadt eine Verknüpfung mit anderen Verkehrsangeboten grundsätzlich besser möglich. So können P+R-Anlagen an Verknüpfungsanlagen mit Elektromobilität z. B. durch den Einsatz von Pedelecs als Zubringer zur Mobilitätsstation verknüpft werden. Elektromobilität kann auch hier in Räumen und Zeiten schwacher Nachfrage auf umweltfreundliche Art die Schwächen des ÖPNV ausgleichen (Feinverteilung, Ausdünnung der Netze oder Taktzeiten). Infrastrukturelle Anforderungen stellen sich an eine entsprechende Fahrradinfrastruktur, idealerweise in Form von Radschnellverbindungen und an intermodale Verknüpfungspunkte (Abstellanlagen).

3.2 Verkehrstechnische Integration von Elektromobilität

Die technischen Randbedingungen der Elektromobile und der durch sie betroffenen Verkehrssystemtechnik haben Folgen für die bestehende Verkehrs-(leit-)technik und bedingen darüber hinaus neuartige Lösungen. Generell kann festgehalten werden, dass die Elektromobilität kaum grundsätzliche oder weitreichende Änderungen in den Instrumenten der Verkehrstechnik bewirken wird. Deren Einsatz wird bestimmt durch die übergeordnete Philosophie des Mobilitäts- und Verkehrsmanagements, und hier werden auch die wesentlichen Akzente der Elektromobilität gesetzt. Wohl aber ergeben sich Auswirkungen auf einige Details im Regelkreis aus „Elektrifizierter Mobilität und Verkehrsablauf – Sensorik bzw. Erfassung – Datenverarbeitung und Steuerung – Aktorik bzw. Anzeige“. Nachfolgend sind dazu einige Themen exemplarisch angesprochen. Sie beziehen sich im Wesentlichen auf die Einsatzbereiche Sicherheit, Bevorzugung oder besondere Behandlung, Information und Routing sowie Betriebsablauf und Flottenmanagement.

Sicherheitsmaßnahmen werden aufgrund von leisen Fahrzeugen unter 30 km/h im städtischen Raum, z. B. zur Wahrnehmung durch Fußgänger, durch höhere Geschwindigkeit und Gewicht von E-Bikes erforderlich und haben Warnung oder Geschwindigkeitsbegrenzungen für E-Bikes zum Ziel. Diese Maßnahmen können durch dynamische Hinweise (Wechsellichtzeichen, akustische Signale für Fußgänger) am Gefährdungspunkt oder davor eingesetzt werden. In der Diskussion ist eine eventuelle Anpassung der Zeitbedarfswertermittlung und Zwischenzeitberechnung von Lichtsignalanlagen (LSA) wegen gegebenenfalls geringerer Einfahrzeiten von schnell startenden E-Fahrzeugen.

Die *Erkennung* von Elektroautos mit besonderen E-Kennzeichen wird für die Steuerung von Maßnahmen über Emissionszonen, Maut, Fahrbahnnutzung, Parkflächen usw. benötigt. Die Erkennung erfolgt entweder durch ANPR-Systeme (Automatic Number Plate Recognition) auf Videobasis oder durch v2x-Kommunikation, sofern Fahrzeug und Infrastruktur, z. B. Lichtsignalanlage, dafür ausgestattet sind. Die Standardisierung des v2x-Kanals hinsichtlich spezifischer E-Fahrzeugmerkmale ist derzeit noch nicht erfolgt.

Im Zusammenhang mit neuen Mobilitätsdiensten kommt der *Vernetzung*, über das reine Elektromobilitäts-System hinaus, steigende Bedeutung zu. Hier werden zum einen grundlegende Mobilitätsdaten betrachtet, zum andern aber auch Daten zum Energiebedarf und Energieangebot (Ort und Kosten). Die Vernetzung der Verkehrs- und Energiedaten führt im Zusammenspiel mit neuen Dienstleistern und Geschäftsmodellen zu hohem Bedarf an genauen Nachfrage- und Angebotsdaten (Verkehr und Energie), die zentral für Dienstleister bereitgestellt werden sollen. Eine Institution hierfür ist der momentan von der Bundesanstalt für Straßenwesen betriebene Mobilitäts- und Datenmarktplatz (MDM).

Informations- und Leitsysteme können dahingehend erweitert werden, dass spezielle Informationen zu verfügbaren Ladestellen samt verfügbarer Kapazität, energieoptimale Routen zu aus verkehrspolitischer Sicht wichtigen Zielen und ähnliche Informationen bereitgestellt werden (für lokale oder zentrale Routingdienste). Entwicklungen in diesem Bereich gehen u. a. dahin, energieverbrauchsrelevante Informationen in öffentliche digitale Straßenkarten einzupflegen und auch Flottenverbrauchsdaten mit gemittelten Fahrprofilen als Basis von Reichweitenberechnungen in E-Fahrzeugen zentral bereitzustellen.

Eine verkehrliche Bevorzugung von einigen oder allen Elektrofahrzeugen durch Extrafahrstreifen oder lokale Verbote von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor ist eine mögliche verkehrliche Maßnahme für bestimmte Gebiete, Tageszeiten oder Situationen. In Verbindung mit einer allgemeinen Verkehrszustandserfassung oder/und Bestimmung der verkehrsbedingten Schadstoffbelastung durch klassische Methoden können an entsprechenden Zufahrtskontrollpunkten oder bei Auffahrt auf speziell vorgesehene Fahrstreifen (analog den Busspuren) Erkennungssysteme zusammen mit Wechsellichtzeichen und/oder LSA zum Einsatz kommen. Ähnliche Überlegungen gelten für die Überwachung von sonstigen Verkehrsflächen, die bevorzugt oder ausschließlich von Elektrofahrzeugen genutzt werden sollen (Ladestellen, Parkmöglichkeiten, Car-Sharing etc.).

Auf betrieblicher Ebene entstehen neue Bedarfe für IKT-gestützte Flottenmanagement-Lösungen, z. B. für Dienstfahrzeuge, Busse, Taxen, gegebenenfalls (Klein-)Lastwagen. Hier sind aufgrund der höheren Energiebedarfe, der höheren Fahrleistungen und der besonderen Bedeutung dieser Flotten besondere Maßnahmen und hohe Zuverlässigkeit der Informationsdienste gefordert. Dies ist ein Grenzbereich der Verkehrstechnik, betrifft diese aber insofern, als Zugriff auf die Verkehrsinformationen und die aus den Fahrzeugen und der Leittechnik bereitgestellten Daten erforderlich ist, der über Vernetzung und öffentliche Leittechnik erfolgt.

4 Wertende Einschätzung

Einen Überblick über die Elektromobilität zu vermitteln, ist ein schwieriges Unterfangen, da die Entwicklung der Technologien rasant voranschreitet und die Aussagen überholen kann. Um ihre Stellung in einem sich schnell entwickelnden neuen Markt behaupten zu können, bedienen sich zahlreiche Technologieentwickler in ihren Veröffentlichungen des „Prinzips der Ankündigung“! Es ist oft schwer zu entscheiden, welche Entwicklung einen echten technologischen Fortschritt darstellt und wo das „Prinzip Hoffnung“ die Autoren getrieben hat. Da sich die Elektromobilität bisher nicht so durchsetzt, wie sich das Politik, Wirtschaft und Teile der Wissenschaft erhofft haben, wird teils mit „alternativen Fakten“ gearbeitet. So wird die fehlende Marktdurchdringung beispielsweise in Veröffentlichungen oft auf den Interessens- und Nachfragemangel durch die Verbraucher zurückgeführt, obwohl viele Anbieter neuer Elektrofahrzeuge die Versprechungen noch gar nicht bedienen können.

Dennoch verfestigt sich der Eindruck, dass die Elektromobilität, nicht zuletzt aufgrund der konsequenten Quotenvorgaben Chinas, bei den großen Fahrzeugherstellern nun als unumkehrbare Zukunftsaufgabe „angekommen“ ist. In den nächsten Jahren wird sich das Neuwagenangebot der Fahrzeughersteller wandeln und es kommen in allen Klassen neue Elektrofahrzeuge auf den Markt, die mit ihren Systembedingungen durchaus mit den klassischen Verbrennungsfahrzeugen konkurrieren, ja diese in Leistung, Drehmoment, Beschleunigung und Wartungsaufwand noch deutlich „toppen“ werden.

Leider wird die Chance der Elektromobilität nur unzureichend oder zu wenig genutzt, ganz neue energiesparende und stadtverträgliche Fahrzeugkonzepte zu entwickeln, denn die Technologie der Elektromobilität mit ihrer geringen Energiedichte verlangt eigentlich „systembedingt“ nach entsprechend leichten und angepassten Fahrzeugkonzepten, intelligenten Steuerungen, neuen sparsamen Fahrweisen und regt mit der Rekuperation zum Energiesparen an. Damit ergäben sich Fahrzeugkonzepte, die in unseren Städten weniger dominant aufträten, sich besser einordnen würden und leichter zu handhaben wären, als dies die neuesten, nach dem Prinzip „schneller, breiter, größer“ konstruierten Fahrzeuggenerationen tun. Vielmehr besteht die Gefahr, dass mit den neuen Elektroautos vielfach noch eine neue Entwicklungsstufe der Absurdität erklimmen wird, wenn dann 2,5-Tonnen-Fahrzeuge eine 75 kg schwere Person mit Drehmomenten jenseits der 500 Newtonmeter in unter 3 Sekunden auf 100 Stundenkilometer beschleunigen. Vielleicht benötigt man solche beispiellosen Leistungen, um die Kunden vom Elektroauto zu überzeugen, eine gute Antwort auf unsere realen und alltäglichen Mobilitätsanforderungen und eine gelingende Energiewende bieten solche Lösungen nicht.

Aber eine sich ausschließlich an neuen Elektroautos orientierende Betrachtung greift insgesamt zu kurz:

-  Elektromobile sind auch die gut nachgefragten Elektrofahrräder, die eine völlig neue urbane Nahmobilität und einen schadstofffreien Lieferverkehr ermöglichen.
-  Der Wechsel zur Elektromobilität bedeutet den weiteren Ausbau des öffentlichen Verkehrs zum Rückgrat eines vollständig dekarbonisierten Transportangebots.



Elektromobilität erlaubt leisen und lokal schadstofffreien Wirtschaftsverkehr und neue sehr stadt- und umweltverträgliche Kommunalfahrzeuge.

Mit der Entwicklung der Elektromobilität entstehen neue Fahrzeugkonzepte wie Segways, Bio-Hybrids, Jetflyer, schnelle S-Pedelecs, E-Scooter, E-Roller und E-Motorräder, die in die urbanen Verkehrsangebote integriert werden müssen. Mit dem daraus resultierenden Gestaltungs-, Entwicklungs- und Regelungsbedarf müssen sich Straßen- und Verkehrsplaner im Verbund mit Städtebauern und Stadtplanern und Politikverantwortlichen auseinandersetzen.

Dies gilt insbesondere für die Verkehrsräume der neuen Mobile, für die Dimensionierung von Fahrstreifen, für Stellplätze, für die Knotenpunktgestaltung, für LSA-Steuerungen und für Anordnung und den Betrieb von Ladeinfrastruktur. Neue Sharing-Angebote für Elektromobile sind zu entwickeln. Vielfältige Mobilitätsformen müssen multimodal in Mobilitätsstationen integriert und informatorisch vernetzt werden.

Da der großstädtische öffentliche Verkehr in der Regel über die entsprechende Elektroinfrastruktur verfügt, liegt es nahe, ihn auch aus energetischer Sicht als Rückgrat der Mobilität zu begreifen und die Verknüpfungspunkte an die Haltestellen von S-Bahnen, Straßenbahnen und Trolley-Bussen zu holen.

In der nächsten Zeit kommen immer mehr E-Fahrzeuge auf den Markt. Durch die Nutzung von Elektrofahrzeugen im Alltagsgebrauch entsteht immer mehr Wissen über die wirklichen Eigenschaften und Anforderungen solcher Vehikel. Die Entwicklung und Auslegung von Elektrofahrzeugen, aber besonders der angemessenen Infrastruktur, sollte auf der Grundlage der Wünsche und Anforderungen ihrer Nutzer erfolgen, die sich aus den realen Erfahrungen im Alltagsgebrauch ergeben.

Die Elektromobilität bietet zudem die Chance zur verkehrstechnischen Integration in Leitsysteme und – wie die Verbrennungsfahrzeuge auch – zum automatisierten und vernetzten Fahren. Automatisierte Fahrzeugsysteme können die Fahraufgaben in speziellen Situationen für einen begrenzten Zeitraum komplett übernehmen. Im Gegensatz zum autonomen Fahren benötigt das automatisierte Fahrzeugsystem einen Fahrer. Vernetztes Fahren bezeichnet die Kommunikation zwischen Fahrzeugen sowie zwischen Fahrzeugen und Infrastrukturen.⁴¹⁾ Diese Technologie ist zunächst unabhängig von der Antriebsenergie und der Antriebsart.

Dennoch kann ein mittelbarer Zusammenhang zwischen dieser neuen Steuerungstechnologie und der Elektromobilität hergestellt werden. Die hohen Kosten der Elektromobilität werden nach Meinung einiger Fachleute auf der einen Seite die Nutzung von Sharingsystemen weiter befördern. Auf der anderen Seite profitieren Sharingsysteme vom automatisierten Fahren neben der besseren Auslastung des vorhandenen Fahrzeugpools und der Parkflächen besonders davon, dass durch die für das automatisierte Fahren erforderliche digitale Ausstattung und Vernetzung Ladevorgänge optimiert und Fahrzeuge in die Lage versetzt werden, sich untereinander und mit der Umwelt nach bestimmten Regeln abzustimmen.

41) Vgl. BMVI.de/DE/Themen/Digitales/Automatisiertes-und-ernetztes-Fahren/automatisiertes-und-ernetztes-fahren.html

Generell sind Elektromobilität, automatisiertes und vernetztes Fahren sich gegenseitig ergänzende Zukunftstechnologien, die zunehmend miteinander verknüpft und in ihren Systembedingungen aufeinander abgestimmt werden. So ist eine hoch integrierte Mobilitäts-Systemwelt mit neuen multimodal übergreifende Mobilitätsdienstleistungen zu entwickeln, die von einem durchgängigen Informationsfluss und Datenaustausch lebt und deren Vorteile für die mobilen Kunden im Sinne des „Nutzens statt Besitzens“ liegen. Dazu muss die Automobilindustrie schrittweise von einer Produktions- zu einer Dienstleistungsindustrie mutieren.

Im Vorwort dieses Berichts wurde die Aufgabe formuliert, dass die Elektromobilität zu einer Verkehrswende und einer besseren Integration des Verkehrs in die Strukturen einer europäischen Stadt genutzt werden muss. Dieses kann die Elektromobilität ganz sicher leisten, wenn sie umfassend verstanden und neue Fahrzeuge mit Augenmaß entwickelt werden. Voraussetzung ist jedoch, dass Stadt- und Verkehrsplanerinnen und -planer die Systembedingungen dieser Fahrzeuge verstehen und deren Potenziale in verkehrsstädtebauliche Konzepte integrieren, die dem Verkehr wieder seine „dienende Rolle“ zuweisen. Das Ergebnis wäre eine ruhigere, sicherere, grünere, urbanere und noch lebenswertere Stadt mit höchst komfortabler Mobilität.

5 Literatur

- ADAC Fahrzeugtechnik: „Elektroautos: Marktübersicht/Kenndaten“ – Stand 1/2014, München
- ADAC Motorwelt: „Die Zukunft ist ganz leise – Test E-Motorräder“. In: ADAC Motorwelt, Heft 5, Mai 2012, S. 62
- Acatech: „BEZIEHT POSITIONEN – Nr. 6 – Wie Deutschland zum Leitanbieter für Elektromobilität werden kann“, München, 2010 (www.acatech.de – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften)
- Autobild extra, Nr. 25/2016, S. 119
- Barthel, S.: „Elektroautos im Car-Sharing“. In: Internationales Verkehrswesen, Heft 1/2011, DVWG (Hrsg.), S. 38 ff.
- Beckmann, K. J.; Holzappel, H.; Sammer, G.: „Elektromobilität: Macht der Wandel des Fahrzeugantriebs den Verkehr umweltfreundlich?“, www.motor-talk.de und www.researchgate.net, (Gruppe emeritierter Verkehrsprofessoren Deutschlands und Österreichs)
- Biketec AG-FLYER, Electrovelos, Katalog 2012
- Blümel, H.; Petersen, R.: Energieverbrauch und Kohlendioxidemissionen der motorisierten Stadtverkehrsmittel. In: Bracher, T.; Haag, M.; Holzappel, H.; Kiepe, F.; Lehmbrock, M.; Reutter, U.: Handbuch der kommunalen Verkehrsplanung. Berlin, Offenbach 1991/2012; 64. Ergänzungslieferung
- Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (Hrsg.): „Elektromobilität in Deutschland – Praxisleitfaden“, Berlin, 2011
- Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie et al.: „Regierungsprogramm Elektromobilität“, Berlin, Mai 2011, auch unter www.bundesregierung.de
- Bundesministerium für Wirtschaft und Energie: „Die Energie der Zukunft, Erster Fortschrittsbericht zur Energiewende – Langfassung“, Berlin, Dezember 2014
- DAT Deutsche Automobil Treuhand GmbH: „Leitfaden über den Kraftstoffverbrauch, die CO₂-Emissionen und Stromverbrauch“, 2015
- Doll, C.; Gutmann, M.; Wietschel, M.: „Integration von Elektrofahrzeugen in Car-sharing-Flotten – Simulation anhand realer Fahrprofile“. Fraunhofer ISI, Karlsruhe, Mai 2011
- Dü n n e s, A.: „Besser als Benzin oder ökologisches Feigenblatt? So sauber ist ein Elektroauto wirklich.“ In: FOCUS Online, 2.9.2015
- Engelen, K.: „Marktpotentiale batterieelektrischer Pkw in Deutschland – räumliche Differenzierung auf Basis von Querschnitts- und Längsschnitterhebungen zum Mobilitätsverhalten“. In: STADT REGION LAND, Bericht 56, Aachen, 2014
- European Commission, Directorate-General for Research and Innovation, Directorate H – Transport Unit H2 – Surface Transport (Hrsg.): „European Green Vehicles Initiative PPP Multiannual Roadmap, The Multiannual Roadmap for the EGVI contractual Public Private Partnership under Horizon 2020“, Brüssel, 2014, www.egvi.eu

- Europäische Kommission: „WEISSBUCH. Fahrplan zu einem einheitlichen europäischen Verkehrsraum – Hin zu einem wettbewerbsorientierten und ressourcenschonenden Verkehrssystem“, Brüssel, 2012 (<http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ.do?uri=COM:2011:0144:FIN:DE:PDF>)
- Europäische Kommission: Richtlinie 2002/24/EG über die Typgenehmigung für zweirädrige oder dreirädrige Kraftfahrzeuge und zur Aufhebung der Richtlinie 92/61/EWG des Rates (<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX%3A32002L0024>)
- Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV): Begriffsbestimmungen. Teil: Verkehrsplanung, Straßenentwurf und Straßenbetrieb, Ausgabe 2012 (FGSV 220)
- Franke, T.: „Nachhaltige Mobilität mit begrenzten Ressourcen: Erleben und Verhalten im Umgang mit der Reichweite von Elektrofahrzeugen“, PhD-Dissertation, 2014
- Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik (IML): Elektromobilität im Güterverkehr (http://www.iml.fraunhofer.de/content/dam/iml/de/documents/OE%20320/Infoseiten%20Produkte/elektromobilitaet_WEB.pdf)
- Gnann, T.; Plötz, P.: „Status Quo und Perspektiven der Elektromobilität in Deutschland“, Fraunhofer ISI, Karlsruhe, 2011
- Guzzella, L.: „Anforderungen an ÖV-Systeme der Zukunft. Welche straßen-bezogenen Antriebstechnologien sind richtungsweisend?“ Vortrag auf der Tagung Trolley-motion, Leipzig 23.+24.10.2012 (http://www.trolley-motion.ch/uploads/media/Lino_Guzzella.pdf)
- Hacker, F.; Harthan, R.; Kasten, P.; Loreck, C.; Zimmer, W.: Marktpotenziale und CO₂-Bilanz von Elektromobilität – Arbeitspakete 2 bis 5 des Forschungsvorhabens OPTUM: Optimierung der Umweltentlastungspotenziale von Elektrofahrzeugen“, Berlin, 2011
- Hensley, R.; Newman, J.; Rogers, M.: „Battery technology charges ahead – New research suggests that the price of lithium-ion batteries could fall dramatically by 2020, creating conditions for the widespread adoption of electrified vehicles in some markets“, Mc Kinsey Quarterly, Juli 2012 (http://www.mckinsey.com/insights/energy_resources_materials/battery_technology_charges_ahead)
- Hohenberger, T.; Mühlenhoff, J.: „Energiewende im Verkehr – Potenziale für erneuerbare Mobilität“, in Renew's Spezial, Ausgabe 71/März 2014, Agentur für Erneuerbare Energien e. V. (Hrsg.) Berlin, 2014
- Huber, F.; Falk, M.: „Neue Mobilitätsangebote und Verkehrsinfrastrukturen der post-fossilen Gesellschaft“, Berlin, 2012
- Huber, F.; Reutter, U.: „Potenziale und mögliche Entwicklungspfade für Elektromobilität in Leipzig und alternative Mobilitätsmaßnahmen“, Fachgutachten, Wuppertal/Kaiserslautern August 2012, noch nicht veröffentlicht
- Huber, F.: „Welche Rolle spielt die Elektromobilität?“. In: Institut für Landes- und Stadtentwicklungsforschung, Jahresbericht 2012, Dortmund
- Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg (IFEU) (<https://www.ifeu.de/>)
- Kambly, K. R.; Bradley, T. H.: „Estimating the HVAC energy consumption of plug-in electric vehicles.“, Journal of Power Sources, 2014, Seiten 259, 117–124

- Karbach, T.: „Post kauft Elektromobil-Hersteller“. In: Westfälische Zeitung, 10.12.2014, S. 13
- „Klimaschutzgesetz NRW – Gesetz zur Förderung des Klimaschutzes in Nordrhein-Westfalen“, i.d.F. der Bekanntmachung vom 29. Januar 2013 (https://recht.nrw.de/lmi/owa/br_vbl_detail_text?anw_nr=6&vd_id=13718)
- Kampker, A.; Vallée, D.; Schnettler, A. (Hrsg.): „Elektromobilität – Grundlagen einer Zukunftstechnologie“, Springer Verlag, 2013
- Knappen, L.; Kochan, B.; Bellemanns, T.; Janssens, D.; Wets, G.: „Activity based model for countrywide electric vehicle powerd demand calculation“ in 2011 IEEE First International Workshop on Smart Grid Modeling and Simulation (SGMS) – at IEEE SmartGridComm 2011
- Köbel, C.: „PRIMOVE: Bombardier’s eMobility Lösung für alle elektrische Fahrzeuge“, Vortrag auf der Tagung Trolley motion, Leipzig 23.+24.10.2012 (http://www.trolley-motion.ch/uploads/media/Christian_Koebel_Bombardier.pdf)
- Landtag NRW (<http://www.landtag.nrw.de/portal/WWW/dokumentenarchiv/Dokument/MMG16-29.pdf?von=1&bis=0>)
- Lißner, S.; Becker, U.; Clarus, E.: „Elektromobiles Carsharing für Gewerbekunden – Evaluation unterschiedlicher Angebotsformen hinsichtlich ihrer Umwelteffekte“. In: Internationales Verkehrswesen/International Transportation, Heft 3/2016, S. 62-65
- Müller-Hellmann, A.: „Innovative Ansätze zur Nachhaltigkeit energie- und umweltpolitischer Ziele im deutschen ÖPNV“, Vortrag auf der Tagung Trolley motion, Leipzig 23.+24.10.2012 (http://www.trolley-motion.ch/uploads/media/Adolf_Mueller-Hellmann_VDV.pdf)
- Müller-Hellmann, A.: „Elektromobilität im ÖPNV – Eine Erfolgsstory?“. In: „Bus & Bahn“ Heft 3/2012, Verband deutscher Verkehrsunternehmen (VDV) (Hrsg.), Köln 2012
- Nationale Plattform Elektromobilität (NPE): „Fortschrittsbericht der Nationalen Plattform Elektromobilität“, (Dritter Bericht), Berlin, Mai 2012
- Olszewska, M.: „Innovationen bei Trolleybussen“, Vorstand Vertrieb & Marketing der Firma Solaris/Vortrag auf der Tagung Trolley motion, Leipzig 23.+24.10.2012 (http://www.trolley-motion.ch/uploads/media/Malgorzata_Olszewska_Solaris.pdf)
- Öko-Institut: (<http://www.oeko.de/forschung-beratung/themen/nachhaltiger-verkehr/elektromobilitaet/>)
- Plötz, P.; Gnann, T.; Kühn, A.; Wietschel, M.: „Markthochlaufszzenarien für Elektrofahrzeuge“, Studie im Auftrag der acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften und der Arbeitsgruppe 7 der Nationalen Plattform Elektromobilität (NPE), Karlsruhe 2013
- Reichow, H. B.: „Die autogerechte Stadt – Ein Weg aus dem Verkehrs-Chaos“. Otto Maier Verlag, Ravensburg 1959
- Rüger, E.: „Der ökologische Rucksack des Elektroautos“ in WZ, 22.9.2017, S. 7
- Samadani, E.; Fraser, R.; Fowler, M.: „Evaluation of Air Conditioning Impact on the Electric Vehicle Range and Li-Ion Battery Life“. In: SAE Technical Paper (No. 2014-01-1853), 2014
- Schäfer, P. K.; Knese, D.: „Elektrolöwe 2010 – Der hessische Elektroautofahrer“. In: Straßenverkehrstechnik, Ausgabe 4/2012

- Schindler, J.; Held, M.; Würdemann, G.: „Postfossile Mobilität – Wegweiser für die Zeit nach dem Peak Oil“, Verlag für Akademische Schriften (VAS), 2009
- Schöttle, Markus, 2013, Redaktion ATZ elektronik, www.springer.com
- Starterset Elektromobilität: (<http://www.starterset-elektromobilität.de/>)
- StVZO – Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung. In: Bundesgesetzblatt I, S. 679 ff, mit nachfolgenden Änderungsverordnungen (auch enthalten im FGSV Reader, Premiumausstattung. FGSV R 130, www.fgsv-verlag.de)
- Tessum, C. W.; Hill, J. W.; Marshall, J. D.: Life cycle air quality impacts of conventional and alternative light-duty transportation in the United States (Abstract), 2014
- VDV-Hauptgeschäftsstelle: „Positionspapier Elektromobilität“, Stand: 30. Mai 2011
- Wallentowitz, H.; Freialdenhoven, A.: „Strategien zur Elektrifizierung des Antriebsstranges“, Wiesbaden, 2011 (2. Aufl.)
- Wikipedia: Autonomes Fahren (https://de.wikipedia.org/wiki/Autonomes_Fahren)
- Winterberg, J.: „Technische und wirtschaftliche Einsatzszenarien für batterieelektrische Lkw in Speditionsnetzen“, Bachelorarbeit an der Bergischen Universität Wuppertal, 2017

FGSV-Berichte

FGSV 006/13

Elektromobilität – Systembedingungen, Einsatzbedingungen und Systemintegration, Ausgabe 2018

FGSV 006/12

Übergänge in den postfossilen Verkehr – Notwendigkeiten, Entwicklungstrends und -pfade, Ausgabe 2016

FGSV 006/11

Erhaltungsbedarf für Bundesfernstraßen, Landes- und Kommunalstraßen, Ausgabe 1999

FGSV 006/10

Stadt und Verkehr – die nächsten 10 bis 15 Jahre, Ausgabe 1997

FGSV 006/9

Arbeitshilfe zur praxisorientierten Einbeziehung der Wechselwirkungen in Umweltverträglichkeitsstudien für Straßenbauvorhaben, Ausgabe 1997

FGSV 006/8

Europäische Normen für die Straßenausstattung und den Straßenbau – Stand und Erwartungen, Ausgabe 1993

FGSV 006/7

Neue Technologie zur Beeinflussung des Straßenverkehrs – Aspekte der Systemeinführung, Ausgabe 1993

FGSV 006/6

Zweites internationales Symposium über Oberflächeneigenschaften von Fahrbahnen, Ausgabe 1992

FGSV 006/5

VSM – Verkehrs-System-Management, Ausgabe 1986

FGSV 006/4

Energie und Verkehr, Ausgabe 1984

FGSV 006/3

Straße und Umwelt, Ausgabe 1980

FGSV 006/2

Aspekte der Verkehrsentwicklung in der Bundesrepublik Deutschland, Ausgabe 1974

FGSV 006/1

50 Jahre Forschungsgesellschaft für das Straßenwesen 1924 bis 1974



Forschungsgesellschaft
für Straßen- und Verkehrswesen

Geschäftsstelle

An Lyskirchen 14
50676 Köln
Telefon 0 221 9 35 83 0
Telefax 0 221 9 35 83 73
info@fgsv.de
www.fgsv.de

Herstellung und Vertrieb

FGSV Verlag
Wesselinger Str. 15-17 · 50999 Köln
Telefon 0 22 36 38 46 30
Telefax 0 22 36 38 46 40
info@fgsv-verlag.de
www.fgsv-verlag.de