



Elektrofahrzeuge

Bedeutung, Stand der Technik,
Handlungsbedarf

Autoren

ETG Task Force Elektrofahrzeuge

Prof. Dr.-Ing. Joachim Böcker, Universität Paderborn
Dipl.-Ing. Matthias Bösing, RWTH Aachen University
Matthias Bredehorn, RWTH Aachen University
Prof. Dr.-Ing. Wolf-Rüdiger Canders, Technische Universität Braunschweig
Dipl.-Ing. Bernd, Cebulski IAV GmbH, Chemnitz
Prof. Dr.-Ing. Peter Doetsch, RWTH Aachen University
Prof. Dr. ir. Rik De Doncker, RWTH Aachen University (ISEA & E.ON ERC)
Dr.-Ing. Omid Forati Kashani, Continental Engineering Services GmbH, Nürnberg
Prof. Dr.-Ing. Bernhard Friedrich, Technische Universität Braunschweig
Dipl.-Ing. (FH) Dipl.-Wirt.Ing. (FH) Thomas Grube, Forschungszentrum Jülich GmbH
Prof. Dr.-Ing. habil. Dr.h.c. Kay Hameyer, RWTH Aachen University
Dipl.-Ing. Martin Hennen, RWTH Aachen University
Prof. Dr.-Ing. Klaus Hoffmann, Universität der Bundeswehr Hamburg
Prof. Dr.-Ing. Wilfried Hofmann, Technische Universität Dresden
Dr.-Ing. Dorin Iles, Ingenieurbüro Dr.-Ing. Dorin Iles, St. Georgen
Dipl.-Ing. Alexander Kreim, Technische Universität Berlin
Dipl.-Ing. Benedikt Lutz, RWTH Aachen University
Prof. Dr.-Ing. Josef Lutz, Technische Universität Chemnitz
Dr.-Ing. Martin März, Fraunhofer-Institut für Integrierte Systeme und Bauelementetechnologie, Erlangen
Prof. Dr.-Ing. Axel Mertens, Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover
Dipl.-Ing. Christian Neef, WVI GmbH, Braunschweig
Dipl.-Ing. Wilhelm Peters, Universität Paderborn
Prof. Dr.-Ing. Christian Rehtanz, Technische Universität Dortmund
Dipl.-Ing. Johannes Rolink, Technische Universität Dortmund
Prof. Dr. rer. nat. Dirk Uwe Sauer, RWTH Aachen University
Tim Schäfer, Li-Tec Battery GmbH, Kamenz
Prof. Dr.-Ing. Uwe Schäfer, Technische Universität Berlin
Dr.-Ing. Heinz Schäfer, hofer eds GmbH, Würzburg
Dr.-Ing. Benedikt Schmülling, RWTH Aachen University
Dr.-Ing. Marc Schöning, RWTH Aachen University
Prof. Dr.-Ing. Detlef Stolten, Forschungszentrum Jülich GmbH
Dipl.-Ing. Daniel van Treek, RWTH Aachen University
Prof. Dr. rer. nat. Manfred Wermuth, Technische Universität Braunschweig
Dr.-Ing. Michael Wittler, FEV Motorentechnik GmbH, Aachen
Dr.-Ing. Rainer Wirth, Technische Universität Braunschweig

Impressum

VDE VERBAND DER ELEKTROTECHNIK
ELEKTRONIK INFORMATIONSTECHNIK e.V.

Stresemannallee 15 · 60596 Frankfurt am Main
Fon 069 6308-0 · Fax 069 6312925
<http://www.vde.com> · E-Mail: etg@vde.com

Zusätzlich zu dieser Veröffentlichung wurde die Publikation
„VDE-Studie Elektrofahrzeuge – Gesamttext“ herausgegeben.
Titelbild: Konzept StreetScooter, RWTH Aachen University
Gestaltung: Michael Kellermann · Graphik-Design · Schwielowsee-Caputh

Elektrofahrzeuge

**Bedeutung, Stand der Technik,
Handlungsbedarf**

**Studie der
Energietechnischen Gesellschaft im VDE (ETG)**

Inhalt

Vorwort	5
1 Einführung	7
2 Technische Aspekte von Elektrofahrzeugen	11
2.1 Typen und Kategorien	11
2.2 Leistungselektronische Bauelemente	14
2.3 Antriebswechselrichter	21
2.4 Elektrische Maschinen	26
2.5 Bewertung und Auswahl von elektrischen Antriebssträngen	33
2.6 Hilfsaggregate	35
2.7 Batterietechnologien und Batteriesysteme	40
2.8 Ladegeräte	47
2.9 Range Extender	51
2.10 Steckverbindungen	55
3 Sicherheit von Elektrofahrzeugen	57
3.1 Elektrische Sicherheit	57
3.2 Brandschutz und chemische Sicherheit	58
3.3 Weitere Sicherheitsaspekte	59
3.4 Ausblick und Forschungsschwerpunkte	61
4 Verkehrliche Kennwerte zum Einsatz von Kraftfahrzeugen	62
4.1 Kennwerte des Kraftfahrzeugeinsatzes	63
4.2 Ausblick	69
5 Integration von Elektrofahrzeugen in das Versorgungsnetz	70
5.1 Lade- und Abrechnungskonzepte	70
5.2 Netzauswirkungen von Elektrofahrzeugen	73
5.3 Bewertung	79
6 Kernaussagen und Handlungsbedarf	80
Abkürzungen	86
Literaturverzeichnis	87

Vorwort

Viele Gründe sprechen dafür, dass Elektrofahrzeuge in Zukunft eine bedeutende Rolle im Straßenverkehr einnehmen werden. Elektrofahrzeuge als Batterie- oder Brennstoffzellenfahrzeuge bieten bei zunehmend regenerativem Energiemix die Möglichkeit zu Einsparungen beim CO₂-Ausstoß, zur Verringerung der Abhängigkeit von fossilen Energieträgern sowie eine Reduktion von lokalen und globalen Emissionen. Die Elektrifizierung des Verkehrs ermöglicht die flexible Verwendung verschiedener Energiequellen und schafft damit größere Unabhängigkeit von Erdöl und politisch instabilen Lieferländern. Bezogen auf Elektrofahrzeuge mit Batterien besteht ein weiterer Vorteil in der Verfügbarkeit eines bereits vorhandenen Energieverteilungsnetzes. Sofern Schnellladung nicht erforderlich ist, wird bis etwa 1 Mio. E-Fahrzeuge kein nennenswerter Netzausbau notwendig. Die Investitionen für die Netzinfrastruktur sind somit zu Beginn überschaubar. Mit steigender Marktdurchdringung kann das Netz sukzessive ausgebaut und an den Bedarf angepasst werden. Im Gegensatz zu Biokraftstoffen kann elektrische Energie mit einem geringen Flächenbedarf bereitgestellt werden.

Elektrofahrzeuge mit Batterien bieten auf Grund ihres einfachen Aufbaus Vorteile in Wartung und Haltbarkeit. Ölwechsel sind nicht mehr erforderlich und durch rekuperatives Bremsen halten die Bremsbeläge länger. Weiterhin ermöglichen Elektroantriebe völlig neue Fahrzeugkonzepte. Die geänderten Rahmenbedingungen wie z. B. Reichweite, Batteriekosten und Nutzerverhalten erfordern neue Geschäftsmodelle (z. B. Batterieleasing und Kombiangebote) und erlauben den Quereinstieg von Unternehmen, die bisher nicht maßgeblich im PKW-Sektor tätig waren wie z. B. Energieversorger, Elektroindustrie und Logistikunternehmen.

Heutige Batterietechnologien führen im PKW-Einsatz bei Reichweiten oberhalb von etwa 150 km zu deutlich erhöhten Kosten und Fahrzeugmassen. Elektrofahrzeuge mit Batterien lassen sich bei Beibehaltung heutiger Reichweiten daher nicht sinnvoll darstellen. Auf der anderen Seite zeigen aktuelle Verkehrsumfragen, dass sich auch bei reduzierter PKW-Reichweite eine beträchtliche Anzahl von Fahrten ohne Weiteres mit Elektrofahrzeugen bestreiten lassen. So legen fast 90% aller Fahrzeuge privater Halter pro Tag weniger als 100 km zurück.

Für lange Fahrten erscheinen alternative Mobilitätskonzepte sinnvoller. Im privaten Bereich kommen dafür eigene oder gemietete hybride und konventionelle Fahrzeuge, Range Extender und der öffentliche Fernverkehr sowie Schnelllade- oder Batteriewechselstationen prinzipiell in Frage. Wichtig ist, dass sie für den Fahrer von Elektrofahrzeugen das subjektive Empfinden erhalten, die Mobilität frei gestalten zu können. Die alternativen Mobilitätskonzepte sollten sowohl finanziell erschwinglich als auch komfortabel sein.

Gründe genug, warum die Bedeutung von Elektrofahrzeugen in Zukunft steigen und zu Veränderungen in der bisherigen Geschäftslandschaft führen wird. Unter diesen Rahmenbedingungen ist es die Aufgabe der vorliegenden Studie, die Potentiale von Elektrofahrzeugen mit Batterien aufzuzeigen, die technische Realisierbarkeit zu bewerten und den Forschungs- und Entwicklungsbedarf abzuleiten. Hiermit sollen der Öffentlichkeit und der Politik ausgewogene Informationen und Empfehlungen zur Verfügung gestellt werden, welche Forschungs- und Entwicklungsinitiativen die Einführung von Elektrofahrzeugen unterstützen können. Dazu werden in dieser Studie die wesentlichen Komponenten von Elektrofahrzeugen unter technischen Gesichtspunkten bewertet. Neben den Schlüsselkomponenten des Antriebsstrangs werden auch Hilfsaggregate, Ladegeräte, Steckverbinder und Range Extender betrachtet. Es hat sich gezeigt, dass die technische Realisierbarkeit von Elektrofahrzeugen gegeben ist und ein wesentliches Forschungsziel die Entwicklung von speziell auf eine Serienproduktion zugeschnittenen Komponenten ist. Dabei spielen Zuverlässigkeit, Kosten und Sicherheit eine entscheidende Rolle.

Neben dem Fahrzeug selber ist die Anbindung der Fahrzeuge an das Versorgungsnetz ein wichtiger Aspekt, der in dieser Studie betrachtet wird. Anhand von Szenarien für die Einführung von 1 Mio. Elektrofahrzeugen wird gezeigt, dass keine großen Investitionen in die Netze notwendig sind. Dennoch müssen für eine größere Verbreitung von Elektrofahrzeugen frühzeitig klare Rahmenbedingungen geschaffen werden, um einheitliche Schnittstellen zu gewährleisten.

1 Einführung

Da elektrische Energie sowohl aus verschiedenen fossilen Primärenergieträgern als auch aus regenerativen Energieträgern erzeugt werden kann, kann durch die Einführung von Elektrofahrzeugen die Abhängigkeit unserer Volkswirtschaft von Ölimporten reduziert und die Mobilität auf eine zukunftssichere Basis gestellt werden. Dieses kommt auch in den Meseberger Beschlüssen der Bundesregierung und den Zielsetzungen der nationalen Strategiekonferenz Elektromobilität zum Ausdruck [1].

Die Gesamtemissionen eines Elektrofahrzeugs hängen dabei stark vom aktuellen Energiemix ab. Stützt sich das Elektrofahrzeug ausschließlich auf fossil erzeugte elektrische Energie, wie z. B. aus Kohlekraftwerken, so kann hinsichtlich der CO₂-Emissionen näherungsweise von einer Emissionsgleichheit zwischen Elektrofahrzeug und konventionell angetriebenem Fahrzeug ausgegangen werden [2]. Aber selbst dann wäre bereits die Abhängigkeit vom Erdöl als Energierohstoff für den Straßenverkehr reduzierbar. Eine deutliche Reduktion der Treibhausgasemissionen des Straßenverkehrs wird erreicht, wenn die elektrische Energie CO₂-neutral erzeugt wird. Dafür werden europaweit Stromerzeugungstechnologien auf Basis von Wasserkraft, Windkraft und Solarenergie, von Kohle mit CO₂-Abtrennung und -Speicherung (Carbon capture and storage, CCS) und von Kernenergie eingesetzt oder diskutiert.

Ein weiterer Ansatz, PKW CO₂-neutral und unabhängig vom Erdöl zu gestalten, besteht in der Verwendung nachwachsender Rohstoffe zur Produktion von Biokraftstoffen. Eine Überschlagsrechnung zeigt schnell, dass dieser Weg alleine jedoch nicht zum gewünschten Ziel führen kann. Mit künftigen Prozessen zur Herstellung von Biokraftstoffen der zweiten Generation können aus einem Hektar Ackerland pro Jahr etwa 4.000 – 5.000 Liter Kraftstoff produziert werden [3][4]. Bei einem effizienten Wagen mit Verbrennungsmotor, der im Mittel 5 l Kraftstoff auf 100 km verbraucht, wird mit Biokraftstoffen von einem Hektar eine jährliche Fahrleistung von etwa 80.000 km erreicht. Bei heute 43 Mio. zugelassenen PKW und einer Gesamtfahrleistung von 580 Mrd. km pro Jahr würden folglich 7,2 Mio. Hektar oder 42% der landwirtschaftlichen Fläche Deutschlands zur Produktion des Kraftstoffes benötigt. Eine vollständige Umstellung des PKW-Verkehrs auf Biokraftstoffe ist somit sehr unwahrscheinlich. Außerdem bestehen Zweifel an der Ökobilanz von Biokraftstoffen [5][6].

Doch die durch Verbrennungsmotoren entstehenden Umwelteinflüsse gehen über die Emission von CO_2 hinaus. So werden mit Elektrofahrzeugen auch regionale Umweltauswirkungen wie Versauerung (SO_2 , NO_x , CKW und NH_3), Eutrophierung (NO_x), erhöhte Ozonwerte und die Feinstaubbelastung reduziert, die bei regelmäßiger Exposition zu Atemwegserkrankungen, Lungenfunktionsstörungen und Lungenentzündungen führen können. Auch die durch den Antrieb und den Reibungswiderstand verursachten Lärmemissionen sind vor allem im städtischen Bereich von hoher gesundheitlicher Relevanz. Circa 50% der Bevölkerung sind tagsüber akut durch Verkehrslärm in ihrem physischen und sozialen Wohlbefinden beeinträchtigt (>55 dB(A)). Etwa 15% sind durch Verkehrslärm oberhalb 65 dB(A) betroffen, wodurch ein erhöhtes Risiko für Herz-Kreislaufkrankungen besteht [7]. In Hinsicht auf die Emissionen bieten Elektrofahrzeuge erhebliche Vorteile. So ist es durch Elektrofahrzeuge möglich, Emissionen, die bei Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor in den Städten anfallen, in Kraftwerke außerhalb der Städte zu verlegen und somit die Umwelt in besonders belasteten Regionen zu entlasten. Diese Option ist parallel zu den Aktivitäten zu sehen, den Anteil der regenerativen Energie am Strommix weiter zu steigern, so dass auch die gesamte globale Emissionsbilanz zu deutlich günstigeren Werten hin verschoben wird. Auch bietet die Filterung der Abgase in großen zentralen Kraftwerken nicht nur ökologische, sondern auch volkswirtschaftliche Vorteile gegenüber der dezentralen Abgasfilterung in den einzelnen PKW.

Bei den Betriebskosten ist ein Elektrofahrzeug im Vergleich zu einem herkömmlichen Fahrzeug bereits heute im Vorteil, da eine Kilowattstunde Fahrenergie am Rad mit dem Elektroantrieb für den Endkunden in etwa nur die halben Kosten verursacht. So werden beispielsweise bei einem typischen Fahrzeug der unteren Mittelklasse auf einer Strecke von 100 km ungefähr 15 kWh an Energie benötigt. Dies entspricht beim Elektrofahrzeug einem Preis von ca. 3 – 4 € pro 100 km. Ein vergleichbares sparsames Fahrzeug mit Ottomotor verbraucht bei moderater Fahrweise ungefähr 5 l pro 100 km, also etwa 6 – 7 €. Unklar ist allerdings, wie sich die Strompreise mit Blick auf die weitere Integration fluktuierender, erneuerbarer Energie entwickeln werden und wie elektrische Energie für Fahrzeugantriebe zukünftig steuerlich behandelt wird, vor allem hinsichtlich der Anwendung der Mineralölsteuer. Die Wartungskosten eines Elektrofahrzeugs werden als wesentlich geringer eingeschätzt, da Elektromotor und Wechselrichter praktisch wartungsfrei sind. Ebenso sind ein geringerer Verschleiß der Bremsen und somit eine geringere Bremsstaubbelastung zu erwarten. Damit sind Elektrofahrzeuge auch bei leicht erhöhten Anschaffungskosten am Markt konkurrenzfähig.

Die elektrische Antriebstechnik eröffnet wegen der guten Regelbarkeit und der hohen Flexibilität bezüglich Ausführung und Anordnung der Antriebe erhebliche Potentiale hinsichtlich Sicherheit, Fahrkomfort und Karosseriegestaltung. Hierzu gehört der höhere Fahrkomfort durch Geräuscharmheit und zugkraftunterbrechungsfreies Fahren, welches auch einen erhöhten Fahrzeugdurchfluss erwarten lässt. Weiterhin bieten die Elektroantriebe erhebliche Möglichkeiten für eine funktionellere Karosseriegestaltung hinsichtlich Anordnung der Aggregate und der Sicherheitsfunktionen (Crash, Fußgängerunfall). Durch die schnellen Reaktionszeiten der Elektromaschine stehen neue Freiheitsgrade für eine erhöhte Fahrsicherheit zur Verfügung.

Unter der Voraussetzung, dass unsere Mobilität auch in Zukunft erhalten bleiben soll, werden häufig Zweifel laut, ob dies mit Elektrofahrzeugen überhaupt möglich ist. In diesem Zusammenhang wird oft gefordert, die Reichweite von Elektrofahrzeugen auf über 500 km zu steigern. Ein kurzer Blick auf die verfügbaren Energiespeicher zeigt jedoch schnell, dass eine solche Reichweite sich heutzutage ökonomisch nicht sinnvoll realisieren lässt. Beim Einsatz von modernen Akkutechnologien mit einem spezifischen Energiegehalt von 100 Wh/kg und einem Verbrauch eines effizienten elektrischen Kleinwagens von etwa 15 kWh/100km ergibt sich bei einer geforderten Reichweite von 500 km ein Batteriegewicht von etwa 750 kg. Dies ist für einen Kleinwagen nicht akzeptabel und würde neben den hohen Kosten für die große Batterie auch zu einem erhöhten Energieverbrauch des Fahrzeugs führen. Dass wir in Zukunft nicht auf Mobilität verzichten müssen, zeigt ein Blick auf das heutige Fahrverhalten. Dazu werden in Kapitel 4 verschiedene Auswertungen des täglichen Fahrverhaltens präsentiert. Bei der Betrachtung des tatsächlichen Nutzerverhaltens zeigt sich, dass fast 90% aller Tagesfahrleistungen privater PKW kleiner als 100 km sind. Ein Elektroauto mit einer Reichweite von 100 km würde folglich bereits den Großteil aller heute getätigten Fahrten abdecken. Das Batteriepack für ein solches Fahrzeug würde lediglich 150 kg wiegen und ein Volumen von etwa 70 l haben und könnte in einem Kleinwagen untergebracht werden.

Wird ein Elektrofahrzeug als Zweitwagen eingesetzt, der in 2005 in 20% aller Haushalte vorhanden war [8], würden sich also nur sehr geringe Einschränkungen für den Nutzer ergeben, da längere Fahrten leicht mit dem anderen Fahrzeug zurückgelegt werden können. Aber auch wenn nur ein Fahrzeug zur Verfügung steht, kann die Mobilität für lange Strecken durch verschiedene Konzepte erhalten bleiben. Zum einen besteht die Möglichkeit, die Reichweite von Elektrofahrzeugen durch Range Extender auf Basis von kleinen Verbrennungsmotoren mit Generator oder Brennstoffzellen, den Wechsel der ganzen Batterie oder Schnell-

ladestationen erheblich zu steigern. Damit kann auch der Forderung nach Reichweiten von 500 km und darüber hinaus Rechnung getragen werden. Ein Verzicht auf Mobilität ist somit auch bei einem gesteigerten Einsatz von Elektrofahrzeugen nicht abzusehen.

Neben den objektiven Gesichtspunkten der Mobilität spielt auch das subjektive Empfinden eine Rolle. Fahrzeuge sind neben einem Gebrauchsgut oft auch ein mit Emotionen verbundenes Luxusgut. Genauso wichtig wie die Frage nach der Mobilität mit Elektrofahrzeugen ist somit das Image. Aus diesem Grund sollten Elektrofahrzeuge nicht nur unter dem Gesichtspunkt entwickelt werden, möglichst viele Funktionen konventioneller Fahrzeuge nachzubilden, sondern vor allem neue Funktionen und soziale Vorteile zu realisieren [9], [10].