

Elektroauto vs. Verbrennerfahrzeug im einjährigen Alltagsbetrieb

Ansgar Wego

Die saisonalen Unterschiede beim alltäglichen Fahrbetrieb und viele weitere Betriebsparameter eines Elektrofahrzeugs wurden im Vergleich zu einem Fahrzeug mit Dieselmotor quantitativ in einem einjährigen Feldversuch ermittelt. Die Ergebnisse werden in diesem Beitrag präsentiert.

Die Zulassungszahlen für batterieelektrische Fahrzeuge (BEV) in Deutschland und vielen weiteren Industrieländern steigen stetig. Die Zuwachsraten betragen 30 % bis 40 % jährlich [1]. Die Elektromobilität verdrängt damit zunehmend den Anteil an Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren. An diesem Trend ändern auch Fahrzeuge mit hybriden Antrieben nichts. Hybridfahrzeuge als Übergangstechnologie werden mittelfristig wieder vom Markt verschwinden. Grund für den langfristigen Erfolg von Elektrofahrzeugen ist deren Effizienz. Aus energetischer Sicht gibt es keine geeignetere Antriebsart. Verbrennungsmotoren erreichen physikalisch begrenzte Wirkungsgrade von unter 50 %. Das bedeutet, dass mindestens 50 % der Energie, die im Kraftstoff enthalten ist, in Wärme umgesetzt wird und nicht für den Antrieb zur Verfügung steht. Elektromotoren dagegen erreichen sehr hohe Wirkungsgrade von bis zu 99 %. Bekannter Nachteil von Elektrofahrzeugen ist der kleine Energiespeicher und die daraus resultierende geringe Reichweite. Die Ursache hierfür liegt in der geringen Energiedichte von Batteriespeichern. Sowohl auf das Volumen als auch auf die Masse bezogen ist die Energiedichte bei den bislang bekannten Batteriespeichersystemen um das 40- bis 50-fache geringer als bei Benzin- oder Dieselmotoren. Folgende überschlägige Betrachtung soll die Unterschiede bei den Speichermöglichkeiten verdeutlichen. Eine heute übliche Batteriegröße von Elektrofahrzeugen ist etwa 60 kWh. Der Energieinhalt (Brennwert) von Diesel (sowie Benzin) beträgt etwa 10 kWh/Liter. Damit hat ein Fahrzeug mit einer 60 kWh-Batterie umgerechnet ein „Tankvolumen“ von etwa 6 Litern! Mit diesen 6 Litern sollen alltagstaugliche Fahrstrecken zurückgelegt werden können. Bei einem angenommenen Kraftstoffverbrauch von etwa 6 Litern je 100 km käme damit ein Fahrzeug mit Verbrennungsmotor lediglich 100 km weit. Elektrofahrzeuge mit einem typischen Verbrauch von etwa 20 kWh je 100 km kommen bei dieser Batteriegröße aber etwa 300 km weit! Reichweiten im 300 km-Bereich sind alltagstauglich und führen somit zur zunehmenden Akzeptanz bei Kunden. Der hohe Wirkungsgrad des Elektroantriebs führt allerdings auch zu einem Problem, welches bei Verbrennungsmotoren naturgemäß nicht existiert: Es gibt kaum Abwärme! Während die Wärme des Verbrennungsmotors zum Heizen des Fahrzeugs im Winter eingesetzt werden kann, muss diese Wärme beim Elektrofahrzeug zusätzlich aus dem Batteriespeicher gewonnen werden. Auch die Temperierung der Batterie selbst ist bei Elektrofahrzeugen Stand der Technik und führt insbesondere im Winter zu einem zusätzlichen Energiebedarf. Die Folge sind deutliche saisonale Unterschiede beim Verbrauch eines Elektroautos.

Eingesetzte Testfahrzeuge

Zur Datenermittlung wurden die Fahr- und Betriebswerte eines Elektrofahrzeugs und eines vergleichbaren Dieselfahrzeugs (Abbildung 1) im einjährigen Fahrbetrieb im Alltagsgebrauch gesammelt. Tabelle 1 führt relevante technische Parameter der verwendeten Fahrzeuge auf.



Abbildung 1: Eingesetzte Testfahrzeuge für den Feldversuch

Für eine direkte Vergleichbarkeit aller folgenden energiebasiereten Angaben wurde der Brennwert von Diesel mit 9,8 kWh je Liter verwendet. Die drei Kapazitätsangaben der Fahrbatterie (Energiespeicher) des Elektrofahrzeugs sind wie folgt zu interpretieren. Um eine zu hohe Auf- bzw. Entladung der Batterie im alltäglichen Gebrauch zu vermeiden sieht der Hersteller nur eine teilweise Nutzung der physikalisch vorhandenen Kapazität (62 kWh) vor. Die Spanne von 100 % der vollgeladenen Batterie bezieht sich auf die Nutzkapazität von 54 kWh. Bei einem angezeigten Ladestand von 0 % sind noch 4 kWh Energiereserve in der Batterie vorhanden, die vor einer zu starken Entladung und dem sofortigen „Stehenbleiben“ des Fahrzeugs schützen soll. Diese „stille Reserve“ ist zwar grundsätzlich nutzbar (das ergibt die 58 kWh Nettokapazität). Sie sollte im Alltag aber nicht verwendet werden. Das Fahrzeug gibt dazu auch keine Informationen zu Reichweite und Ladestand („unter Null“) im Boardcomputer an.

Tabelle 1 Technische Daten der eingesetzten Fahrzeuge

	Elektrofahrzeug	Dieselfahrzeug
Fahrzeugtyp	VW ID.3	VW Golf TDI 2.0
Leistung Drehmoment	150 kW 310 Nm	103 kW 320 Nm
Energiespeicher (brutto)	62 kWh	539 kWh (55 Liter)
Energiespeicher (netto)	58 kWh	entspricht brutto
Energiespeicher (nutzbar)	54 kWh	entspricht brutto
Leergewicht	1.804 kg	1.374 kg

Fahrbetrieb im Feldversuch

Die Fahrzeuge wurden bei ihrem Einsatz im Alltagsgebrauch untersucht. Der betrachtete Zeitraum erstreckte sich über ein Jahr (Juni bis Mai). In dieser Zeit legten die Fahrzeuge eine vergleichbare Strecke von jeweils ca. 30.000 km zurück. Die gefahrenen Strecken befanden sich fast ausschließlich im Großraum von Rostock. Die Fahrzeuge wurden vom selben Fahrer mit gleicher Fahrweise auf allen typischen Verkehrswegen mit ca. 50 % Autobahn-, 30 % Landstraßen- und 20 % Stadtanteil bewegt. Die für die zurückgelegte Gesamtstrecke erforderliche Energie-

bzw. Kraftstoffmenge und weitere Daten sind Tabelle 2 zu entnehmen.

Tabelle 2 Betriebsdaten der verwendeten Fahrzeuge

	Elektrofahrzeug	Dieselfahrzeug
Betriebszeitraum	1 Jahr	
gefahrte Gesamtstrecke	30.594 km	31.916 km
Streckenanteile (Stadt/Land/Autobahn)	20 % / 30 % / 50 %	
Energiebedarf	4.949 kWh (Laden)	16.197 kWh (1.653 Liter)
Gesamtdurchschnittsgeschwindigkeit	ca. 60 km/h	
Anzahl an Ladungen (Be-tankungen)	209	44
Durchschnittsfahrverbrauch	14,4 kWh/100 km	50,7 kWh/100 km (5,2 l/100 km)
Durchschn. Reichweite	374 km	1062 km

Die Verbrauchswerte des Elektrofahrzeugs wurden aus den Werten des Bordcomputers für den „Fahrverbrauch“ sowie der Ladeeinrichtung und den gefahrenen Strecken (für den „Ladeverbrauch“) ermittelt. Beim Dieselfahrzeug wurden die Verbrauchswerte aus den tatsächlichen Befüllungen beim Tanken (immer „vollgetankt“) und den zurückgelegten Strecken bestimmt. Die Genauigkeit der Streckenanzeige der Fahrzeuge wurde mit GPS-Werten überprüft. Die Abweichungen liegen im 1 % Bereich und wurden für die Betrachtungen in diesem Beitrag vernachlässigt. Die über den betrachteten Zeitraum gesammelten Fahrdaten der untersuchten Fahrzeuge ergaben detaillierte Datensätze, aus denen verschiedene statistische Aussagen abgeleitet wurden.

Saisonale Verbrauchsschwankungen

Für die Quantifizierung der Verbrauchsunterschiede zwischen den Sommer- und Winterbetriebszeiten wurden die Verbrauchsmittelwerte für die Sommermonate von Juni bis August sowie für die Wintermonate von Dezember bis Februar gebildet und mit dem Jahresdurchschnitt verglichen. Beim Elektrofahrzeug zeigte sich dabei die erwartete deutliche Verbrauchsschwankung zwischen Winter- und Sommerbetrieb. Bezogen auf den Jahresdurchschnitt lagen die Werte bei +18 % für den Winter- und bei -7,6 % für den Sommerbetrieb. Diese Verbrauchsunterschiede münden in entsprechend signifikanten Reichweiteschwankungen. Ebenfalls bezogen auf den Jahresdurchschnitt von 374 km reduziert sich die Reichweite im Winterbetrieb auf mittlere 317 km (-15,3 %). Im Sommer erhöht sich die Reichweite dagegen auf mittlere 405 km (+8,2 %). Der gesamte Reichweitesunterschied zwischen Sommer und Winter beträgt also durchschnittliche 88 km! Das ist im alltäglichen Fahrbetrieb deutlich zu spüren und erfordert ein vorausschauendes Planen des Fahrbetriebs. Die Grafik in Abbildung 2 zeigt den Energieverbrauch des Elektrofahrzeugs je 100 km Fahrstrecke im Jahresverlauf. Dabei stellt die Grafik zwei unterschiedliche Verbrauchswerte dar. In schwarzer Farbe ist der eigentliche Energieverbrauch des Fahrbetriebs dargestellt. Dieser wird aus den Strom- und Spannungsmesswerten hinter der Fahrbatterie gewonnen und auch im Fahrzeug als Verbrauch angezeigt („Fahrverbrauch“). Die roten Werte dagegen sind aus den Energiemesswerten der Ladevorrichtungen gewonnen worden („Ladeverbrauch“). Der „Ladeverbrauch“ beinhaltet somit zusätzlich die Verluste, die beim Laden der Batterie entstehen. Zu beiden Datensätzen ist der jeweilige Mittelwert mit dargestellt worden.

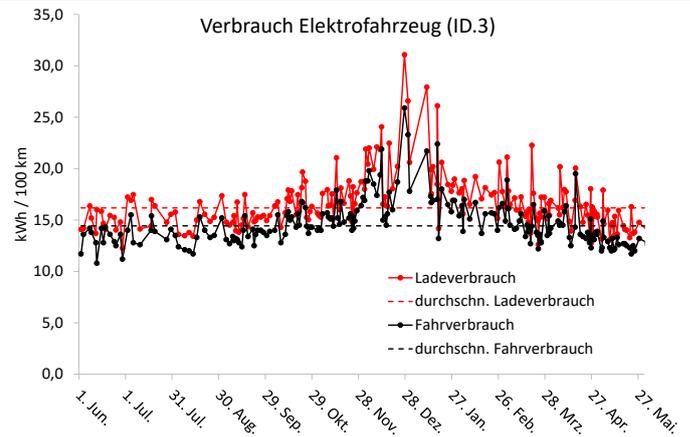


Abbildung 2: Verbrauchsverläufe des Elektrofahrzeugs

Das Dieselfahrzeug dagegen zeigt die erwarteten geringen saisonalen Verbrauchsschwankungen. Die Unterschiede zwischen Winter und Sommer betragen bezogen auf den Jahresdurchschnitt +3,5 % im Winter und -2,0 % im Sommer. Einerseits liegt dies daran, dass ohnehin nur weniger als 50 % der Energie für den Antrieb nutzbar sind. Andererseits kann die Wärme der Verbrennung im Winter genutzt werden und beeinflusst den Verbrauch damit nicht. Die entsprechenden Reichweiten reduzieren sich im Winter um -3,3 % und erhöhen sich im Sommer um +2,1 %. Die Grafik in Abbildung 3 zeigt den Verbrauch des Dieselfahrzeugs im Jahresverlauf.

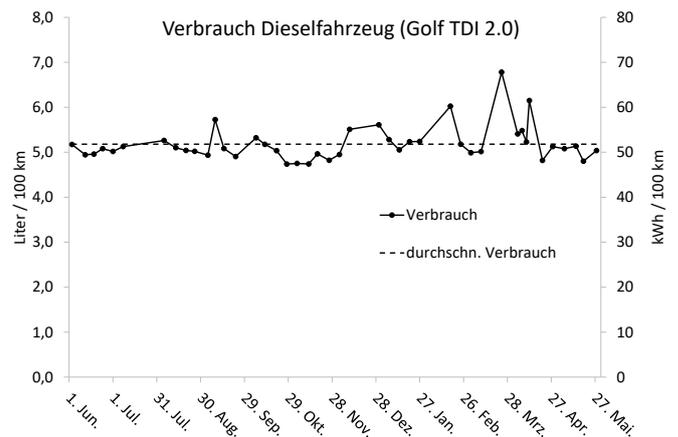


Abbildung 3: Verbrauchsverlauf des Dieselfahrzeugs

In den folgenden Tabellen (Tabellen 3 und 4) sind die saisonalen Fahrdaten im Detail aufgeführt. In den Tabellen sind zusätzlich die Fahrdaten für die Frühlings- und Herbstsaison aufgeführt.

Tabelle 3 Saisonale Verbrauchsunterschiede zwischen E- und Dieselfahrzeug

Saison	Elektrofahrzeug	Schwankung	Dieselfahrzeug	Schwankung
Frühling (03-05)	13,7 kWh/100 km	-5,2 %	52,2 kWh/100 km	+2,8 %
Sommer (06-08)	13,3 kWh/100 km	-7,6 %	49,7 kWh/100 km	-2,0 %
Herbst (09-11)	14,5 kWh/100 km	+0,1 %	49,0 kWh/100 km	-3,5 %
Winter (12-02)	17,0 kWh/100 km	+18,0 %	52,2 kWh/100 km	+3,5 %
Gesamt (01-12)	14,4 kWh/100 km	/	50,7 kWh/100 km	/

Tabelle 4 Saisonale Reichweitenunterschiede zwischen E- und Dieselfahrzeug

Saison	Elektrofahrzeug	Schwankung	Dieselfahrzeug	Schwankung
Frühling (03-05)	394,5 km	+5,5 %	1032,9 km	-2,7 %
Sommer (06-08)	404,8 km	+8,2 %	1084,3 km	+2,1 %
Herbst (09-11)	373,6 km	-0,1 %	1100,8 km	+3,6 %
Winter (12-02)	317,0 km	-15,3 %	1026,5 km	-3,3 %
Gesamt (01-12)	374,1 km	/	1062,1 km	/

Ladeverluste beim Elektrofahrzeug

Das Elektrofahrzeug wurde im betrachteten Zeitraum 209-mal geladen. Davon 208-mal an einer 11 kW AC-Ladeeinrichtung und einmal an einem DC-Schnelllader. Der „Fahrverbrauch“ des Fahrzeugs im Jahresdurchschnitt betrug 14,4 kWh/100 km, der durchschnittliche „Ladeverbrauch“ dagegen 16,2 kWh/100 km. Damit ergibt sich ein mittlerer Ladeverlust von ca. 12 %!

Statistische Fahrdaten

Die in der Tabelle 5 aufgeführten statistischen Betriebswerte zeigen einige interessante Erkenntnisse.

Tabelle 5 Statistische Daten zum Betrieb der verwendeten Fahrzeuge

	Elektrofahrzeug	Dieselfahrzeug
Ladevorgänge AC	208	/
Ladevorgänge DC	1	/
Betankungen	/	44
Durchschn. Ladeverlust	12,1 %	/
min. Fahrverbrauch	10,8 kWh/100 km	46,4 kWh/100 km (4,7 l/100 km)
durchschn. Fahrverbrauch	14,4 kWh/100 km	50,7 kWh/100 km (5,2 l/100 km)
max. Fahrverbrauch	25,9 kWh/100 km	66,4 kWh/100 km (6,8 l/100 km)
min. Ladeverbrauch	12,3 kWh/100 km	/
durchschn. Ladeverbrauch	16,2 kWh/100 km	/
max. Ladeverbrauch	31,1 kWh/100 km	/
min. Energieentnahme Zyklus	3,5 kWh	155,2 kWh (15,8 l)
durchschn. Energieentnahme je Zyklus	21,1 kWh	368,1 kWh (37,6 l)
max. Energieentnahme je Zyklus	53,3 kWh	488,1 kWh (49,8 l)
durchschn. Lade- /Tankabstand	1,8 Tage	8,4 Tage
min. Fahrstrecke je Zyklus	28 km	289 km
mittl. Fahrstrecke je Zyklus	146 km	725 km
max. Fahrstrecke je Zyklus	378 km	988 km
durchschn. Füllstand vor Fahrzyklus	81,7 %	100 %
durchschn. Füllstand nach Fahrzyklus	43,2 %	31,1 %
durchschn. Speichernutzung	38,9 %	68,9 %

Als Erstes sei hier die reale Nutzung der Fahrbatterie des Elektrofahrzeugs hervorgehoben. Es zeigt sich, dass sich im alltäglichen Fahrbetrieb ein schonender Lade- und Entladebetrieb realisieren lässt. Im Durchschnitt musste die Batterie auf nicht mehr als die empfohlenen ca. 80 % aufgeladen werden. Auch die Entladung war im Schnitt nur bis etwa 40 % erforderlich. Dies ist für die Lebensdauer der Batterie optimal. Weiterhin zeigt die Tabelle, dass bei einer jährlichen Fahrleistung von ca. 30.000 km statistisch etwa jeden zweiten Tag geladen werden

muss. Und dies ist an einer batterieschonenden 11 kW Ladeeinrichtung möglich. Da die Betriebskosten durch den Energiebedarf beim Laden bestimmt werden, ist der „Ladeverbrauch“ eine wichtige Größe. Hierbei zu berücksichtigen ist jedoch, dass die einzelnen Ladeverlustwerte stark streuen (zwischen 2 % und 25 %) und somit die Verlustermittlung nur über entsprechend viele Datenwerte sinnvoll ist. Mit dem über mehr als 200 Ladevorgänge ermittelten Wert von ca. 12 % über einen Zeitraum von einem Jahr kann der für das hier eingesetzte Elektrofahrzeug ermittelte Ladeverlust als statistisch gesichert betrachtet werden.

Degradation der Fahrbatterie

Ein bedeutendes Thema bei Elektrofahrzeugen ist die Kapazitätsabnahme der Fahrbatterie (Degradation). Die Degradation ist von der Nutzung und dem Alter der Batterie abhängig und kann grundsätzlich nicht verhindert, sondern bestenfalls minimiert werden. Die bekannten Einflussfaktoren sind Auflade- und Entladeleistung, Auf- und Entladestand sowie die Zeit. Um die Degradation der Fahrbatterie des verwendeten Elektrofahrzeugs zu prüfen, wurden explizite „Kapazitätsmessfahrten“ durchgeführt. Dazu wurde die Batterie auf 100 % geladen und anschließend mit einer nahezu unterbrechungsfreien Fahrt bis auf 0 % entladen. Um die inneren Verluste der Batterie (bedingt durch den Innenwiderstand) gering zu halten, wurde die Fahrt mit niedriger Leistung (durchschnittliche Geschwindigkeit ca. 80 km/h) durchgeführt. Aus der zurückgelegten Fahrstrecke und dem Fahrverbrauch wurde so die der Batterie entnehmbare Energie berechnet und mit der Nutzkapazität im Neuzustand verglichen. Da das vollständige Auf- und Entladen die Degradation fördert, wurde die Messung nicht mehrfach durchgeführt. Daher sind die ermittelten Werte zwar nicht statistisch sicher, repräsentieren aber dennoch hinreichend genau den zu erwartenden Degradationstrend. Die Ergebnisse der Degradationsprüfung zeigt Tabelle 6.

Tabelle 6 Degradation der Fahrbatterie des Elektrofahrzeugs

Fahrleistung	entnehmbare Energie	Degradation	Reichweite bei Durchschnittsverbrauch	Reichweitenverlust
Werkzeugzustand	54,0 kWh	0,0 %	374,1 km	
nach ca. 25.000 km	53,3 kWh	1,3 %	370,1 km	-1,1 %
nach ca. 50.000 km	52,6 kWh	2,5 %	365,3 km	-2,4 %

Eine Degradation von unter 3 % nach etwa 50.000 km Fahrleistung entkräftet die häufig vorherrschende Befürchtung eines rapiden Kapazitätsverlustes der Fahrbatterie und somit eines entsprechenden Reichweitenverlustes. Aus anderen Untersuchungen zu diesem Thema ist bekannt, dass die Degradationskurve im Laufe der Fahrzeugnutzung eher abflacht, sodass deren lineare Fortschreibung nicht sinnvoll erscheint [2]. In der Praxis bedeutet dies, dass auch bei einem Elektrofahrzeug mit hoher Laufleistung und dem hier vorgestellten Nutzungsprofil noch mit einem hohen Gebrauchswert zu rechnen ist.

Fazit

Elektro- und Verbrennerfahrzeuge sind hinsichtlich ihrer Betriebseigenschaften recht unterschiedlich, sodass ein pauschaler Vergleich schwerfällt. Für definierte Nutzungsprofile lassen sich aus den Ergebnissen des Feldversuchs aber dennoch Vor-

und Nachteile ableiten. Dass Verbrennerfahrzeuge derzeit noch deutlich höhere Reichweiten gegenüber Elektrofahrzeugen besitzen ist allgemein bekannt. Im vorgestellten alltäglichen Nutzungsprofil ist dieser Nachteil allerdings kaum relevant. Die signifikanten saisonalen Verbrauchs- und Reichweitenunterschiede bei Elektrofahrzeugen erfordern eine vorausschauende Fahrzeugnutzung für die Wintermonate. Die Einschränkungen diesbezüglich sind aber im Alltag hinnehmbar. Der Wertverlust bestimmt sich bei Verbrennerfahrzeugen hauptsächlich durch die Laufleistung. Bei Elektrofahrzeugen bestimmt die Laufleistung die Degradation der Fahrbatterie. Somit ist für beide Fahrzeugarten die Laufleistung für den Wertverlust maßgeblich. Vor dem Hintergrund steigender Energiekosten aufgrund der aktuellen wirtschaftspolitischen Weltlage wird ein nachhaltiger und wirtschaftlicher Betrieb von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren schwieriger. Mit Blick auf den Wirkungsgrad schneiden Elektrofahrzeuge deutlich besser ab, sodass die Energie wesentlich besser ausgenutzt werden kann. Bestimmte Nachteile von Elektrofahrzeugen können daher gut akzeptiert werden. Das Dieselfahrzeug hatte in diesem Feldversuch gegenüber dem Elektrofahrzeug einen ca. 3,5-fach höheren Energieverbrauch! Aus energetischer Sicht geht das Elektrofahrzeug aus diesem Vergleich daher als eindeutiger Sieger hervor, ohne dass im täglichen Fahrbetrieb deutliche Einschränkungen hinzunehmen wären.

Quellen

[1] Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW); https://www.zsw-bw.de/fileadmin/user_upload/pi03-2020-ZSW-WeltweiteZahlenElektroautos.pdf; 2020; downloaded 21.12.2022

[2] Zhang, Y., Tang, Q., Zhang, Y. et al. Identifying degradation patterns of lithium ion batteries from impedance spectroscopy using machine learning. Nat Commun 11, 1706 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41467-020-15235-7>

Autor



Prof. Dr.-Ing. Ansgar Wego
Hochschule Wismar
Fakultät für Ingenieurwissenschaften
Bereich Elektrotechnik und Informatik
Allgemeine Elektrotechnik