

Wirkungsgrad-Vergleich zwischen Fahrzeugen mit Verbrennungs- und mit Elektromotor:

Harte Fakten



(Bild: Tom Wang – Shutterstock)

Elektrofahrzeuge gelten schlechthin als umweltfreundlich, weil sie bei der Fahrt keine Emissionen ausstoßen. Darüber hinaus sind sie geräuscharm unterwegs und punkten mit niedrigen Verbrauchskosten. Doch wie sieht der Wirkungsgrad eines Elektrofahrzeugs im Vergleich zu seinem Pendant mit Verbrennungsmotor aus?

Von Prof. Dr.-Ing. Peter Marx

Auf Deutschlands Straßen sind nach wie vor am häufigsten Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor zu finden. Nach Angaben des Kraftfahrt-Bundesamts entfallen von den bis zum 01.01.2018 zugelassenen rund 47 Millionen Pkw 65,5 Prozent sowie 32,8 Prozent auf die Kraftstoffarten Benzin bzw. Diesel. Im Vergleich dazu sind lediglich ca. 54.000 reine

Elektro-Pkw in Deutschland zugelassen. Dabei sollte man sich bei einem Neukauf überlegen, ob der Erwerb eines Verbrenners noch anzustreben ist.

Energiebilanz beim PKW mit Verbrennungsmotor

Eine der wichtigsten Fragen bei der Entwicklung eines Pkw mit Verbrennungs-

motor: Wie kann der Kraftstoffverbrauch reduziert werden? Technische Maßnahmen, wie die Reduzierung des Fahrzeuggewichts, des Luft- und Rollwiderstands sowie eine Erhöhung des Wirkungsgrades des Antriebstrangs sowie eine gemäßigte Fahrweise ohne häufige Beschleunigungs- und Bremsmanöver (d.h. flüssiger Verkehrsablauf) führen zu einem niedrigeren Kraftstoffverbrauch.

Ein Beispiel verdeutlicht diesen Sachverhalt. Ein Pkw mit der Masse 1.500 kg wird auf horizontaler Straße in 10 s von 0 auf 100 km/h beschleunigt. Seine kinetische Energie beträgt:

$$E = 0,5 \text{ m} \times v^2$$

$$E = 0,5 \times 1500 \text{ kg} \times (100 \text{ km/h})^2 = 0,16 \text{ kWh}$$

Für die erforderliche Motorleistung folgt:

$$P = 0,16 \text{ kWh} / 10 \text{ s} = 57,6 \text{ kW}$$

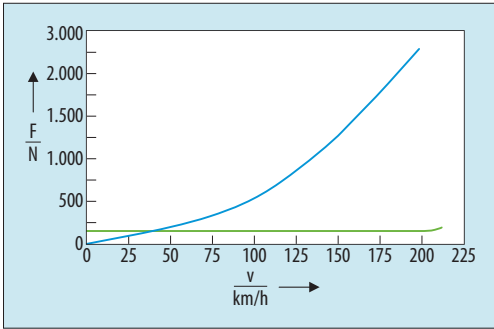


Bild 1. Quadratische Zunahme des Luftwiderstands F_L mit der Geschwindigkeit v . Der Rollwiderstand bleibt annähernd konstant (grüne Linie).

(Quelle: kfz-tech.de)

Der Energieinhalt von 1 l Benzin ist etwa 10 kWh (Diesel 10,9 kWh). Der Wirkungsgrad des Verbrennungsmotors kann mit ca. 20 Prozent angenommen werden. Das bedeutet einen Primärenergiebedarf von 0,8 kWh für die Beschleunigung, was 0,08 l Benzin entspricht.

Bei einem aktuellen Benzinpreis von 1,35 € (Stand: Anfang April 2018) kostet die einmalige Beschleunigung dieses Fahrzeugs von 0 auf 100 km/h also rund 0,11 €. Rechnet man noch den Energiebedarf für die Überwindung des Luft- und Rollwiderstands sowie die Verluste des Antriebstrangs (Getriebe usw.) hinzu, erhöhen sich die Kosten auf etwa 0,15 €. Wird das Fahrzeug dann bis zum Stillstand abgebremst, verwandelt sich die kinetische Energie in nutzlose Wärme.

Hier erkennt man neben der Abgasfreiheit sofort die gravierende Überlegenheit des Elektrofahrzeugs. Denn bei diesem kann, neben dem viel höheren Wirkungsgrad des Elektromotors von über 90 Prozent, die Bremsenergie zu mehr als 30 Prozent mittels Rekuperation in die Fahratterie zurückgespeist werden, indem beim Bremsen der E-Motor in den Generatorbetrieb umgeschaltet wird. Um diese „elektrische Bremsenergie“ sehr schnell speichern zu können, kann man zusätzlich auch Superkondensatoren aufladen.

Große Verluste durch Abwärme

Beim Fahrzeug mit Verbrennungsmotor lässt sich sagen, dass etwa 80 Prozent der im Kraftstoff enthaltenen Energie zu nichts anderem dient, als die Umwelt aufzuheizen. Und das auf drei ganz verschiedenen Wegen: Den größten Anteil an den Verlusten haben die Auspuffgase. Denn in diesen unter Druck

und heiß aus dem Schall-dämpfer entweichenden Abgasen stecken runde 43 Prozent der Kraftstoffenergie. Manchmal wird immerhin ein Bruchteil davon genutzt – wenn nämlich die Auspuffgase dazu dienen, einen Abgasturbolader in Rotation zu versetzen.

Der Motor selbst ist natürlich auch eine Verlustquelle, denn er muss, damit er sich nicht überhitzt, ständig gekühlt werden. Und

über das Kühlwasser gehen weitere 27 Prozent der Kraftstoffenergie verloren. Im Winter immerhin nicht ganz nutzlos, denn dann wird ein Teil davon zum Heizen des Fahrzeuginnenraums verwendet.

Aber auch ohne die Verluste durch das Kühlwasser verliert der Motor etwa neun Prozent Wärmeenergie an die Umgebung durch Konvektion, Wärmeleitung und Wärmestrahlung, da er ja beim Betrieb sehr warm wird – ca. 80 °C. Zählt man alle drei Werte zusammen, dann kommt man bereits auf 79 Prozent Verlustwärme.

Damit gelangen nur 21 Prozent der im Kraftstoff enthaltenen Energie an die Kurbelwelle. Doch damit sind sie noch längst nicht an den Antriebsrädern. Da holt sich zum Beispiel der über einen Keilriemen angetriebene Generator seinen Anteil, um die Stromversorgung im Fahrzeug sicherzustellen. Zwar begnügt er sich mit nur einem Prozent der Kraftstoffenergie, doch von der Kurbelwellenleistung sind es rund vier Prozent. Jetzt ist verständlich, weshalb moderne Autos auf einen ständig mitlaufenden Kühlerventilator verzichten.

Doch noch immer ist die verbleibende Energie nicht an den Antriebsrädern. Der Weg dorthin führt nämlich über Getriebe und Ausgleichsgetriebe, Antriebswellen und verschiedene Achsen – kurzum, es gehen noch einmal weitere zwei Prozent verloren. So bleiben für den Antrieb schließlich 18 Prozent übrig und daran lässt sich nur sehr wenig ändern. Denn Verlustminderungen, wie etwa Leichtlauföle, schlagen sich allenfalls in Bruchteilen eines Prozents nieder. Das gilt auch gleichermaßen für reibungsarme Getriebe.

Dennoch lässt sich mit den verbleibenden 18 Prozent eine Menge anfangen. Dabei lohnt es durchaus, sich viel

Mühe im Windkanal zu geben, um die Aerodynamik des Fahrzeugs zu optimieren, um damit den Luftwiderstand zu reduzieren. Auch durch Rollwiderstandsverminderung der Reifen lässt sich ein Gewinn erzielen und der Spritverbrauch absenken. Doch am leider nur geringen Gesamtwirkungsgrad der Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor ändert das im Prinzip nichts: Von den 10 kWh, die in einem Liter Benzin enthalten sind, bleibt an den Antriebsrädern nur ein knappes Fünftel, also 1,8 kWh übrig – ein bescheidener Wirkungsgrad.

Energiebilanz für das Elektrofahrzeug

Wenn beim E-Fahrzeug eine Ladestation z.B. 10 kWh in die Fahrzeugbatterie speichert, können etwa vier Prozent als Batterieverlust für das Thermomanagement angesetzt werden. Der Wirkungsgrad eines hochwertigen Elektromotors liegt über 94 Prozent. Nebenaggregate dürften nicht mehr als vier Prozent verbrauchen, d.h. der Gesamtwirkungsgrad liegt einschließlich der Bremsenergieerückgewinnung in der Nähe von 85 Prozent. Somit kommen im Vergleich zum Verbrenner an den Antriebsrädern von den 10 kWh beachtliche 8,5 kWh an.

Ein Vergleich der Kosten

Weil Strom im Allgemeinen nach wie vor günstiger ist als Benzin, sollte das Elektrofahrzeug eindeutig Vorteile haben. Ein Vergleich zeigt es schwarz auf weiß.

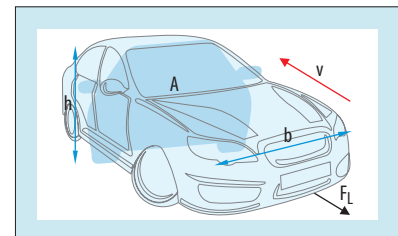


Bild 2. Den größten Einfluss auf den Luftwiderstand hat die Fahr- oder Luftgeschwindigkeit.

(Quelle: MX-Electronic)

Kraftstoffart pro l	CO ₂ in kg
Benzin	2,33
Diesel	2,64
Autogas	1,64

Tabelle 1. Kraftstoffarten und der dazugehörige CO₂-Ausstoß.

Benzinkosten für einen Mittelklassewagen mit Verbrennungsmotor für 100 km:

Ein Fahrzeug der Mittelklasse mit Verbrennungsmotor benötigt für eine Strecke von 100 km ca. 7 l Benzin. Bei dem angenommenen Benzinpreis von 1,35 € resultieren daraus Kosten von 9,45 € – Tendenz steigend.

Stromkosten für einen Mittelklassewagen mit Elektromotor für 100 km:

Wieviel betragen nun die Stromkosten für Elektrofahrzeug der gleichen Klasse auf 100 km, wenn das Fahrzeug eine Durchschnittsgeschwindigkeit $v = 100$ km/h hat? Bei 15 kWh Verbrauch an elektrischer Energie pro 100 km und einem Preis von 0,25 €/kWh ergeben sich 3,75 €. Bei diesem Vergleich wird angenommen, dass der Strom für die E-Fahrzeuge aus erneuerbaren Quellen stammt. Sonne und Wind liefern derzeit in Deutschland etwa 35 Prozent der gesamten elektrischen Energie, mit steigender Tendenz.

Vergleich der Reichweiten

Ein Mittelklasse-Fahrzeug mit 500 km Reichweite benötigt entweder rund:
 → 43 kg Dieselkraftstoff oder
 → 15 kg Wasserstoff (flüssig) oder
 → 800 kg Lithium-Ionen-Batterie (im Elektroauto)

Der Grund hierfür liegt im unterschiedlichen Energieinhalt. Diesel verfügt über 11,8 kWh/kg, Wasserstoff bietet 33 kWh/kg und die Li-Ionen-Batterie 0,13 kWh/kg. Zur Verbrennung von 1 kg Super-Benzin werden 15 kg Sauerstoff benötigt. Hieraus wird deutlich, weshalb ein Auto mit etwa 55 l Benzin ca. 800 km fahren kann, denn der rund 15-fache Anteil des zur Verbrennung nötigen Sauerstoffs wird beim Fahren laufend der angesaugten Luft entnommen. Beim Elektroauto muss dagegen die gesamte Energie in der Batterie mitgeführt werden – weshalb sie derzeit noch so groß und schwer ist.

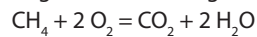
CO₂-Emissionen bei der Kraftstoffverbrennung

Ein Kraftstoff-Luft-Gemisch wird im Brennraum des Motors entzündet, verbrannt und mit Hilfe des daraus resultierenden Druckanstiegs mechanische Arbeit verrichtet. Die dabei statt-

findende Verbrennung lässt sich beispielsweise für einen Benzinmotor mit folgender (stark vereinfachter) chemischer Reaktionsgleichung beschreiben:
 $2 C_8H_{18} + 25 O_2 = 18 H_2O + 16 CO_2$

Sie besagt, dass Oktan (C_8H_{18}) und Sauerstoff (O_2) zu Wasser (H_2O) und Kohlenstoffdioxid (CO_2) verbrennen. Mit dieser Reaktionsgleichung lässt sich aus dem durchschnittlichen Kraftstoffverbrauch eines Fahrzeugs der zugehörige CO_2 -Ausstoß berechnen wie **Tabelle 1** verdeutlicht.

Als Ergänzung: Erdgas ist ein einfacher Kohlenwasserstoff mit der Formel CH_4 (Methan) und verbrennt nach folgender Gleichung:



Ein Kubikmeter H-Erdgas setzt 2,4 kg CO_2 frei. Ein Kilogramm Erdgas verbrennt zu 2,79 kg CO_2 .

Luftwiderstand berechnen

Wie lässt sich die Energie berechnen, die ein durchschnittliches Elektroauto auf ebener Strecke für $s = 100$ km bei $v = 100$ km/h zur Überwindung des Luft- und Rollwiderstandes benötigt? Das wird am Beispiel des Renault Zoe verdeutlicht, der eine Breite von 1,56 m, eine Höhe von 1,4 m und somit eine Stirnfläche von 2,184 m² aufweist. Die Luftwiderstandskraft F_L lässt sich einfach berechnen:

$$F_L = \frac{1}{2} \times A \times \rho \times v^2 \times c_w$$

In dem genannten Beispiel heißt das:
 $F_L = 0,5 \times 2,184 \text{ m}^2 \times 1,2 \text{ kg/m}^3 \times (100 \text{ km/h})^2 \times 0,3$

Mit $1 \text{ Nm} = 1 \text{ Ws} = 1 \text{ kg m}^2/\text{s}^2$ erhält man:

$$F_L = 0,393 \text{ kg/m} \times 1010 \text{ m}^2 / (12,96 \times 10^6 \text{ s}^2)$$

$$F_L = 303 \text{ kg m/s}^2$$

$$F_L = 303 \text{ N}$$

Dieser Wert gilt für ruhende Luft (**Bild 1**). F_L ändert sich mit der Windgeschwindigkeit und Windrichtung – d.h. F_L kann größer oder kleiner bei Gegenwind bzw. Rückenwind werden. Ebenfalls zu beachten ist die Luftdichte ρ ; in Meereshöhe ist F_L höher als im Hochgebirge. Und: Bei 50 km/h beträgt die Luftwiderstandskraft F_L aufgrund der quadratischen Abhängigkeit von der Geschwindigkeit nur ein Viertel – d.h. $F_L = 76 \text{ N}$.

Den größten Einfluss auf den Luftwiderstand hat die Fahr- oder Luftgeschwindigkeit (**Bild 2**). Mit weitem Abstand folgen der Wert für die Form (c_w) und der größte Querschnitt. Weniger stark hängt der Luftwiderstand von der Luftdichte ab. Lässt sich die Querschnittsfläche nicht einwandfrei berechnen, so kann man sie durch eine Faustformel aus Höhe und Breite bestimmen:

$$A \approx 0,8 \times b \times h$$

Rollwiderstandskraft ermitteln

Durch die Verformung beim Abrollen wird die Kontaktkraft zwischen Körper und Unterlage asymmetrisch (**Bild 3**). Der Ersatz der Kontaktkräfte durch statisch äquivalente Einzelkräfte ergibt eine Normalkraft F_N , die um die Strecke d nach vorne verschoben ist, und eine Reibungskraft F_R entgegen der Bewegungsrichtung (**Bild 4**).

Aus den Gleichgewichtsbedingungen folgt für Rollen bei konstanter Geschwindigkeit:

$$F_R = \frac{d}{R} \times F_N$$

Der Quotient

$$\frac{d}{R}$$

ist der Rollwiderstandskoeffizient c_R (veraltet auch: Rollwiderstandsbeiwert, Rollreibungbeiwert):

$$c_R = \frac{d}{R}$$

Damit bekommt der Ausdruck für die Rollreibung F_R die Form:

$$F_R = c_R \times F_N$$

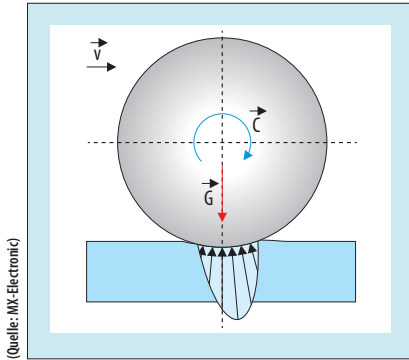
Der Rollwiderstandskoeffizient ist eine dimensionslose (einheitenfreie) Zahl, die von Materialeigenschaften und Geometrie des abrollenden Körpers abhängt (bei Reifen stark vom Luftdruck). Typische Zahlenwerte des Rollwiderstandskoeffizienten liegen um ein bis über zwei Größenordnungen unter denen des Gleitreibungskoeffizienten.

Der wiederum als Beispiel herangezogene Renault Zoe hat eine zulässige Gesamtmasse von 1943 kg. Daraus folgt für die Normalkraft:

$$F_N = m \times g = 1943 \text{ kg} \times 9,81 \text{ m/s}^2$$

$$F_N = 19061 \text{ kg m/s}^2$$

$$F_N = 19061 \text{ N}$$



(Quelle: MK-Electronic)

Bild 3. Asymmetrische Kontaktkraft.

Der Rollwiderstandskoeffizient c_R liegt bei einem Pkw-Autoreifen zwischen 0,011 und 0,015. Das bedeutet:
 $F_R = c_R \times F_N = 0,013 \times 19061 \text{ N}$
 $F_R = 248 \text{ N}$

Beim Renault Zoe wird bei 50 km/h im Stadtverkehr für die Überwindung des Luftwiderstands eine Kraft von etwa $F_L = 76 \text{ N}$ und zur Überwindung des Rollwiderstands (bei maximaler Zuladung) eine Kraft von $F_R = 248 \text{ N}$ benötigt, insgesamt also 324 N. Die benötigte Energie (Arbeit), die der Zoe auf ebener Strecke für $s = 100 \text{ km}$ bei $v = 50 \text{ km/h}$ zur Überwindung des Luft- und Rollwiderstandes benötigt, ist also:

$$E = \text{Kraft} \times \text{Weg} = F \times s$$

$$E = 324 \text{ N} \times 100 \text{ km}$$

$$E = 3,24 \times 10^7 \text{ Nm}$$

$$E = 3,24 \times 10^7 \text{ Ws}$$

$$E = 9 \text{ kWh}$$

Die Stromkosten betragen für 100 km demnach $9 \times 0,25 \text{ €} = 2,25 \text{ €}$.

Bei $v = 100 \text{ km/h}$ wird für die Überwindung des Luftwiderstands eine Kraft von etwa $F_L = 303 \text{ N}$ und zur Überwindung des Rollwiderstands (bei maximaler Zuladung) eine Kraft von $F_R = 248 \text{ N}$ benötigt, insgesamt also 551 N. Die benötigte Energie (Arbeit) für $s = 100 \text{ km}$ bei $v = 100 \text{ km/h}$ zur Überwindung des Luft- und Rollwiderstandes ist in diesem Fall analog:

$$E = \text{Kraft} \times \text{Weg} = F \times s$$

$$E = 551 \text{ N} \times 100 \text{ km}$$

$$E = 5,51 \times 10^7 \text{ Nm}$$

$$E = 5,51 \times 10^7 \text{ Ws}$$

$$E = 15,3 \text{ kWh}$$

Nicht berücksichtigt sind Verluste im elektrischen Antriebsstrang, d.h. die Batterie muss noch eine etwas höhere Energie liefern, geschätzt ca. fünf Prozent mehr.

Hinweis: Für die Leistung P ergibt sich eine kubische Abhängigkeit von der Fahrzeuggeschwindigkeit infolge des quadratisch ansteigenden Luftwiderstandes, denn es gilt:

$$F_L \sim v^2, \quad E \sim F_L \times s, \quad E \sim v^2 \times s$$

mit $v = s / t$ folgt:

$$P = E / t \sim v^2 \times (s / t) \sim v^3$$

d.h., wenn ein Auto mit doppelter Geschwindigkeit fährt, benötigt es die achtfache Leistung allein durch den quadratisch ansteigenden Luftwiderstand. Bei 50 km/h ist:

$$E = 76 \text{ N} \times 100 \text{ km} = 2,11 \text{ kWh}$$

Bei 100 km/h ist:

$$E = 303 \text{ N} \times 100 \text{ km} = 8,42 \text{ kWh}$$

Für die erforderlichen Leistungen ergibt sich damit:

$$P_{\text{Luft, 50km/h}} = 2,11 \text{ kWh} / 2 \text{ h} = 1,06 \text{ kW}$$

$$P_{\text{Luft, 100km/h}} = 8,42 \text{ kWh} / 1 \text{ h} = 8,42 \text{ kW}$$

Hinzu kommt die Leistung zur Überwindung des Rollwiderstands:

$$E_{\text{roll}} = F_R \times 100 \text{ km}$$

$$E_{\text{roll}} = 248 \text{ N} \times 100 \text{ km}$$

$$E_{\text{roll}} = 2,48 \times 10^7 \text{ Ws}$$

$$E_{\text{roll}} = 6,89 \text{ kWh}$$

Die erforderlichen Leistungen sind:

$$P_{\text{roll, 50km/h}} = 6,89 \text{ kWh} / 2 \text{ h} = 3,44 \text{ kW}$$

$$P_{\text{roll, 100km/h}} = 6,89 \text{ kWh} / 1 \text{ h} = 6,89 \text{ kW}$$

Daraus resultiert in Summe:

$$P_{\text{gesamt, 50km/h}} = P_{\text{Luft, 50km/h}} + P_{\text{roll, 50km/h}}$$

$$P_{\text{gesamt, 50km/h}} = 1,06 \text{ kW} + 3,44 \text{ kW}$$

$$P_{\text{gesamt, 50km/h}} = 4,5 \text{ kW}$$

$$P_{\text{gesamt, 100km/h}} = P_{\text{Luft, 100km/h}} + P_{\text{roll, 100km/h}}$$

$$P_{\text{gesamt, 100km/h}} = 8,42 \text{ kW} + 6,89 \text{ kW}$$

$$P_{\text{gesamt, 100km/h}} = 17,1 \text{ kW}$$

Bei Tempo 100 km/h ist also infolge des Luft- und Rollwiderstands die 3,8-fache Motorleistung notwendig.

Die Hersteller von E-Fahrzeugen sollten die Verbräuche in kWh für 100 km auf horizontalen, ebenen Straßen bei konstanter Geschwindigkeit im Bereich von 30 km/h bis 150 km/h in einem Diagramm darstellen, um den großen Einfluss des Luftwiderstands auf den kWh-Verbrauch – dieser steigt mit dem Quadrat der Geschwindigkeit an – zu verdeutlichen. Im Stadtverkehr sollte ebenfalls der durchschnittliche kWh-Verbrauch, zum Beispiel für 50 km Fahrstrecke angegeben werden, weil

sich dann infolge des Stopp-and-Go-Betriebs Bremsenergie zurückspeisen lässt. Diese Verbrauchsuntersuchungen müssen natürlich bei unterschiedlichen Außentemperaturen in den vier Jahreszeiten durchgeführt werden.

Ladeverluste bei Elektroautos

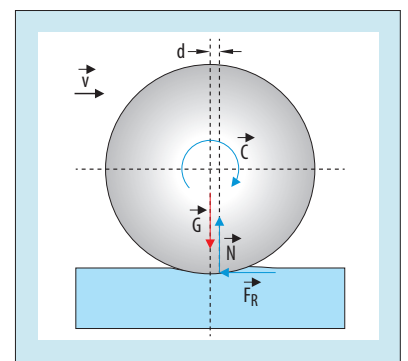
Die Ladeverluste in der Batterie und im Ladegerät beeinflussen die Energieeffizienz von Elektroautos. Beim Aufladen und Entladen von Akkumulatoren wird durch den inneren Widerstand der Zellen Wärme freigesetzt, wodurch ein Teil der zum Aufladen aufgewandten Energie verlorengeht. Das Verhältnis der aufgenommenen zu der beim Laden zugeführten Ladung wird als Ladewirkungsgrad bezeichnet. Generell sinkt der Ladewirkungsgrad sowohl durch Schnellladung mit sehr hohen Strömen als auch durch schnelle Entladung (Peukert-Effekt), weil die Verluste am Innenwiderstand zunehmen. Das optimale Nutzungsfenster ist dabei je nach Zellchemie stark unterschiedlich:

$$\eta = \frac{Q_{\text{auf}}}{Q_{\text{zu}}}$$

wobei η der Ladewirkungsgrad ist, Q_{auf} die aufgenommene Ladung, und Q_{zu} die zugeführte Ladung.

Das Aufladen der Akkus von Elektroautos dauert bis zu zehn Stunden. Eine Schnellladung ist schon in 30 Minuten möglich. Die moderneren Li-Ionen-Akkus können mehr als 2000 Ladezyklen vertragen. Das bedeutet ein Batteriewechsel alle 200.000 km.

Wird ein Akku nicht benutzt, so verliert er über die Zeit einen Teil seiner gespeicherten Energie. Diesen Vorgang nennt man Selbstentladung. Das Maß der Selbstentladung hängt von Typ und Alter des Akkumulators sowie von der Lagertemperatur ab.



(Quelle: MK-Electronic)

Bild 4. Kräfte während des Rollens.

Wie bekannt, fahren Autos im Jahresmittel nur eine Stunde am Tag. Wenn ein Elektroauto also täglich etwa 23 Stunden mit der eigenen Ladestation in der Garage oder mit der Ladesäule auf dem Stellplatz beim Arbeitgeber verbunden ist, ist die Kenntnis der Stand-by-Verluste äußerst wichtig. Diese setzen sich zusammen aus Lade- und Entladeverlusten der Batterie und des bordeigenen Ladegeräts sowie Verluste durch das Thermomanagement der Batterie. Diese ändern sich sicher mit der Jahreszeit.

Umweltschutz, Energiebedarf und Versorgungsinfrastruktur

Der Wirkungsgrad von modernen Elektromotoren ist wenigstens 90 Prozent. Der Wirkungsgrad der Lade-Entlade-Zyklen der Akkus beträgt ungefähr 90 Prozent. Der totale Wirkungsgrad beträgt also 81 Prozent im Vergleich zu den 18 Prozent von Benzinmotoren. Elektroenergie lässt sich aus erneuerbaren Energiequellen herstellen, wie Wind- oder Sonnenenergie. Ein weiterer Vorteil von Elektroautos ist, dass schädliche Gase nicht in den Städten entstehen. Die Luft wird sauberer und der Geräuschpegel geringer – und somit das Leben in den Innenstädten angenehmer.

Kritiker werfen immer wieder das Argument in den Raum, dass die Energieversorgung in Deutschland nicht für die eine Million Elektroautos ausgelegt ist. Doch um welchen Energiebedarf handelt es sich eigentlich? Elektrofahrzeuge weisen bei einer durchschnittlichen Fahrstrecke von 50 km pro Tag folgenden Energiebedarf auf:

→ 1 Million E-Autos x 365 Tage x 7,2 kWh
= 2,63 x 109 kWh
= 2,63 TWh

→ 40 Millionen E-Autos x 365 Tage x 7,2 kWh = 105 x 109 kWh
= 105 TWh



MIKROFLAMM-LÖTEN
Videoclips und Beispiele auf www.spirig.tv
Kostenlose Anwendungsversuche

Mit der jährlichen Nettostromerzeugung in Deutschland von rund 600 Milliarden kWh entfallen auf den Energiebedarf der Elektroautos:

→ 2,63 TWh / 600 TWh = 0,44 Prozent
→ 105 TWh / 600 TWh = 17,5 Prozent

Wenn man unterstellt, dass nicht jeder Autobesitzer an 365 Tagen 50 km fährt, kommt man zu folgender realistischer Einschätzung des Energiebedarfs:

→ 1 Million E-Autos verbrauchen ca. 0,3 Prozent der elektrischen Energie
→ 40 Millionen E-Autos verbrauchen rund zehn Prozent der elektrischen Energie

Das heißt, dass ein Energieengpass nicht zu erwarten ist. Und Engpässe in der Stromversorgung sind auch bei einem schnellen Markthochlauf nicht zu befürchten. Selbst wenn im Jahr 2020 eine Millionen Autos rein elektrisch fahren würden, liefe das lediglich auf 2 TWh Mehrverbrauch hinaus.

Zum Vergleich: Der Bruttostromverbrauch betrug 2012 in Deutschland rund 594 TWh. Würde etwa der komplette Bestand von aktuell 43,4 Millionen Pkw in der Bundesrepublik mit Strom fahren, entspräche das einem Energiebedarf von < 90 TWh pro Jahr. Außerdem bilden die Autobatterien einen relativ großen Energiespeicher, der als Puffer für Wind- und Solarstrom dienen kann.

Das Konzept Vehicle-to-Grid (Fahrzeug im Netz) sieht vor, die in Elektro- und Hybridfahrzeugen gespeicherte elektrische Energie für das öffentliche Stromnetz kurzzeitig – zum Beispiel für Bedarfsspitzen – nutzbar zu machen. Das verringert allerdings die für Fahrzwecke verfügbaren Ladezyklen der Akkus. Welche Leistung P_{max} könnte maximal kurzfristig für eine Stunde aus Fahrzeugbatterien zur Verfügung gestellt werden?

Die Annahme: 40 Millionen Batterien mit je 20 kWh Speicherkapazität stellen 800×10^6 kWh oder 800 GWh bereit:

$$P_{max} = 800 \text{ GWh} / 1 \text{ h} = 800 \text{ GW}$$

Wenn realistischerweise nur fünf Prozent der in den Autobatterien gespeicherten Energie zur Verfügung gestellt werden kann, bedeutet das eine Leistung von 40 GW. Das entspricht rund 40 Prozent der gesamten installierten Kraftwerksleistung in Deutsch-

land, die für kurzfristige Bedarfsspitzen zur Verfügung gestellt werden kann.

Ladeszenarien

Eine Ladestation mit 230 V und 16 A ermöglicht eine maximale Ladeleistung von $230 \text{ V} \times 16 \text{ A} = 3,68 \text{ kW}$. Um 15 kWh erneut in der Autobatterie zu speichern, ist eine Ladezeit von $15 \text{ kWh} / 3,68 \text{ kW} = 4,1$ Stunden notwendig.

Elektrofahrzeuge mit Batterien bis etwa 30 kWh-Kapazität, die wahrscheinlich in der Einführungsphase der Elektromobilität überwiegend im Stadtverkehr eingesetzt werden, können in wenigen Stunden an einem normalen Drehstrom-Netzanschluss mit 230 V/16 A aufgeladen werden. Das heißt, Außenleuchten mit einem einphasigen Netz-Ladeanschluss werden sicher in Innenstädten von vielen Laternenparkern zum Aufladen benutzt. Abhängig von der Kapazität der Akkus benötigt man zukünftig Ladeleistungen im Bereich von 3 kW bis 200 kW, wobei ab etwa 7 kW ein Drehstromanschluss mit $400 \text{ V} / 32 \text{ A}$ (64 A) erforderlich ist, der dann auch ein DC-Schnellladen ermöglicht. Für die Drehstrom-Wirkleistung gilt bei 32 A:

$$P_w = \sqrt{3} \times 400 \text{ V} \times 32 \text{ A} = 22 \text{ kW}$$

sowie bei 64 A:

$$P_w = \sqrt{3} \times 400 \text{ V} \times 64 \text{ A} = 44 \text{ kW}$$

Bei der Schnellladung bis 200 kW erfolgt die Aufladung mit einer in der Ladestation integrierten Gleichstromquelle, wobei die fahrzeugeigene Spannungsebene im Bereich von 300 bis 700 V (DC) liegt, bei großen Nutzfahrzeugen bis 1000 V (DC). eck



Prof. Dr. Peter Marx

studierte Elektrotechnik und Lichttechnik an der Technischen Universität Berlin. Er promovierte 1974 zum Doktor-Ingenieur. 1974 bis 1977 war Marx Lehrbeauftragter für Elektronische Messtechnik und seit 1977 Hochschullehrer für das Lehrgebiet Elektronische Messtechnik im Fachbereich Elektrotechnik und Feinwerktechnik der TFH-Berlin. Im Jahr 2000 hat Marx MX-Elektronik gegründet, die elektronische und lichttechnische Systeme herstellt. Ab 2001 war er Vorstandsmitglied der Deutschen Lichttechnischen Gesellschaft, Mitglied seit 1995.