

# Wirkungsgrad-Vergleich zwischen Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor und Fahrzeugen mit Elektromotor

Prof. Dr.-Ing. Peter Marx, [info@mx-electronic.com](mailto:info@mx-electronic.com) / [www.mx-electronic.com](http://www.mx-electronic.com)

## Energiebilanz bei herkömmlichen Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor

Wie kann der Kraftstoffverbrauch reduziert werden? Technische Maßnahmen, wie die Reduzierung des Fahrzeuggewichts, des Luft- und Rollwiderstands sowie eine Erhöhung des Wirkungsgrades des Antriebsstrangs und eine gemäßigte Fahrweise ohne häufige Beschleunigungs- und Bremsmanöver (d.h. flüssiger Verkehrsablauf) führen zu einer Verringerung des Kraftstoffverbrauchs. Ein einfaches Beispiel möge diesen Sachverhalt verdeutlichen:

Ein PKW mit der Masse 1500 kg wird von 0 auf 100 km/h beschleunigt. Seine kinetische Energie beträgt dann:

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

Der Energieinhalt von 1 Liter Benzin ist etwa 10 kWh. Der Wirkungsgrad des Verbrennungsmotors kann mit ca. 20 % angenommen werden, das bedeutet einen Primär-Energiebedarf von 0,8 kWh für die Beschleunigung und das entspricht 0,08 Liter Benzin.

Bei einem aktuellen Benzinpreis von 1,60 € kostet die einmalige Beschleunigung dieses Fahrzeugs von 0 auf 100 km/h also rd. 0,13 €!

Rechnet man noch den Energiebedarf für die Überwindung des Luft- und Rollwiderstands sowie die Verluste des Antriebsstrangs (Getriebe usw.) hinzu, erhöhen sich die Kosten auf etwa 0,15 €.

Wird das Fahrzeug nun bis zum Stillstand abgebremst, verwandelt sich die kinetische Energie in nutzlose Wärme.

## Vorteil des Elektroantriebs

Hier erkennt man neben der Abgasfreiheit sofort die gravierende Überlegenheit des E-Fahrzeugs, da bei diesem neben dem viel höheren Wirkungsgrad des Elektromotors von über 90 % die Bremsenergie zu über 80 % mittels Rekuperation in die Fahrbatterie zurückgespeist werden kann, 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.

## Fahrzeug mit Verbrennungsmotor

Beim Fahrzeug mit Verbrennungsmotor kann man

sagen, dass etwa 80 % 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 Schalldämpfer entweichenden Abgasen stecken runde 43 % 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 % der Kraftstoffenergie verloren. Im Winter übrigens nicht ganz nutzlos, denn dann wird ein Teil davon immerhin zum Heizen des Fahrzeuginnenraums verwendet.

Aber auch ohne die Verluste durch das Kühlwasser verliert der Motor ca. 9 % 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 % Verlustwärme. Damit gelangen nur 21 % der im Kraftstoff enthaltenen Energie an die Kurbelwelle. Doch damit sind sie noch längst nicht an den Antriebsrädern. Da holt sich z.B. 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 4 %.

Da versteht man auch, weshalb moderne Autos auf einen ständig mitlaufenden Kühlerventilator verzichten, denn auch der verbraucht einen erheblichen Anteil Energie.

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 2 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 leistungsarme Getriebe.

Dennoch lässt sich mit den verbleibenden 18 %

eine Menge anfangen. Und dabei lohnt es nun 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 Gewinn erzielen und der Spritverbrauch absenken. Doch am leider nur sehr geringen Gesamtwirkungsgrad unserer klassischen Autos mit Verbrennungsmotor ändert das im Prinzip leider nichts.

Von den 10 kWh die in einem Liter Benzin enthalten sind, bleibt an den Antriebsrädern nur ein knappes Fünftel = 1,8 kWh übrig, ein bescheidener Wirkungsgrad also.

## Energiebilanz für das Elektro-Fahrzeug

Wenn z.B. eine Ladestation 10 kWh in die Fahrzeugbatterie speichert, können etwa 4 % als Batterieverlust für das Thermomanagement angesetzt werden. Der Wirkungsgrad eines hochwertigen Elektromotors liegt über 94 %. Nebenaggregate dürften nicht mehr als 4 % verbrauchen, d.h. der Gesamtwirkungsgrad liegt einschließlich der Brems-Energierückgewinnung (Rekuperation) in der Nähe von 85 %. Somit kommen an den Antriebsrädern von den 10 kWh immerhin noch rd. 8,5 kWh an!

## Benzinkosten für einen Mittelklassewagen mit Verbrennungsmotor für 100 km:

ca. 7 Liter Benzin x 1,60 € = **11,20 €** mit steigender Tendenz!

Der Energieinhalt von 1 Liter Benzin = 10 kWh

## Stromkosten für einen Mittelklassewagen mit Elektromotor für 100 km und bei v = 100 km / h:

ca. 15 kWh x 0,25 € = **3,75 €**

**Hinweis:** Der Wirkungsgrad von E-Antrieben liegt bei ca. 90 %, der Wirkungsgrad des Verbrennungsmotors nur bei etwa 20%.

Bei diesem Vergleich wird angenommen, dass der Strom für die E-Fahrzeuge aus erneuerbaren Quellen stammt. Sonne und Wind liefern derzeit in Deutschland etwa 28 % der gesamten elektrischen Energie, mit steigender Tendenz.

## Reichweitenvergleich:

Ein Mittelklasse-Fahrzeug mit 500 km Reichweite benötigt rd.

43 kg Dieseldieselfkraftstoff

15 kg Wasserstoff (flüssig)

800 kg Lithium-Ionen-Batterie (Elektroauto)

Der Grund hierfür liegt im unterschiedlichen Energieinhalt:

Diesel: 11,8 kWh / kg

Wasserstoff: 33 kWh / kg

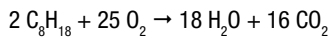
Li-Ionen-Batterie.: 0,13 kWh / kg

## Hinweis:

Zur Verbrennung von 1 kg Super-Benzin werden 15 kg Sauerstoff benötigt. Hieraus wird deutlich, weshalb ein Auto mit etwa 55 Liter Benzin ca. 800 km fahren kann, denn der rd. 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 z.Z. so groß und schwer ist.

## CO<sub>2</sub> - Emissionen bei der Kraftstoffverbrennung

Ein Kraftstoff-Luft-Gemisch wird im Brennraum des Motors entzündet und verbrannt und mit Hilfe des daraus resultierenden Druckanstiegs mechanische Arbeit verrichtet. Die dabei stattfindende Verbrennung lässt sich beispielsweise für einen Benzinmotor mit folgender (stark vereinfachten) chemischen Reaktionsgleichung beschreiben:



Sie besagt, dass Oktan (C<sub>8</sub>H<sub>18</sub>) und Sauerstoff (O<sub>2</sub>) zu Wasser (H<sub>2</sub>O) und Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>) verbrennen.

Mit diesen Reaktionsgleichungen lässt sich aus dem durchschnittlichen Kraftstoffverbrauch eines Fahrzeugs der zugehörige CO<sub>2</sub>-Ausstoß berechnen:

1 Liter Benzin verbrennt zu	<b>2,33</b> Kilogramm CO <sub>2</sub>
1 Liter Diesel verbrennt zu	<b>2,64</b> Kilogramm CO <sub>2</sub>
1 Liter Autogas verbrennt zu	<b>1,64</b> Kilogramm CO <sub>2</sub>
<b>CO<sub>2</sub> – Emissionen von Erdgas</b>	
Erdgas ist ein einfacher Kohlenwasserstoff mit der Formel CH <sub>4</sub> (Methan) und verbrennt nach folgender Gleichung: CH <sub>4</sub> + 2 O <sub>2</sub> → CO <sub>2</sub> + 2 H <sub>2</sub> O 1 m <sup>3</sup> H-Erdgas setzt 2,4 kg CO <sub>2</sub> frei	
1 kg Erdgas verbrennt zu	<b>2,79</b> Kg CO <sub>2</sub>

## Berechnung der Energie, die ein durchschnittliches E-Auto auf ebener Strecke für s = 100 km bei v = 100 km/h zur Überwindung des Luft- und Rollwiderstandes benötigt.

Die Luftwiderstandskraft F<sub>L</sub> lässt sich einfach berechnen:

### Beispiel Renault ZOE:

Breite = 1,56 m, Höhe = 1,40 m // A = 2,184 m<sup>2</sup>

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

ρ (Rho): Dichte der Luft (ca 1,2 kg/m<sup>3</sup> bei 20°C (ISA Standardatmosphäre)

c<sub>w</sub>: form- und oberflächenabhängiger Beiwert, der vereinfacht gesagt die aerodynamische Güte beschreibt (PKW heutzutage ca. 0,3)

v: Fahrzeuggeschwindigkeit

A: Stirnfläche (Projektionsfläche in Fahrtrichtung, also grob Breite mal Höhe)

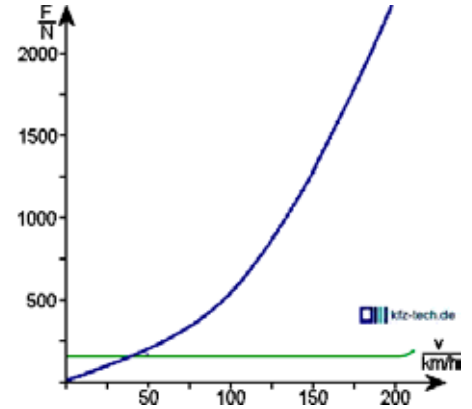
F<sub>L</sub> = 0,5 · 2,184 m<sup>2</sup> · 1,2 kg/m<sup>3</sup> · (100 km/h)<sup>2</sup> · 0,3  
mit 1 Nm = 1 Ws = 1 kg m<sup>2</sup> / s<sup>2</sup> erhält man

F<sub>L</sub> = 0,393 kg/m · 10<sup>10</sup> m<sup>2</sup> / (12,96 · 10<sup>6</sup> s<sup>2</sup>) =  
303 kg m / s<sup>2</sup> = **303 N**

Dieser Wert gilt für ruhende Luft. F<sub>L</sub> ändert sich mit der Windgeschwindigkeit und Windrichtung, d.h. F<sub>L</sub> kann größer (Gegenwind) oder kleiner (Rückenwind) werden.

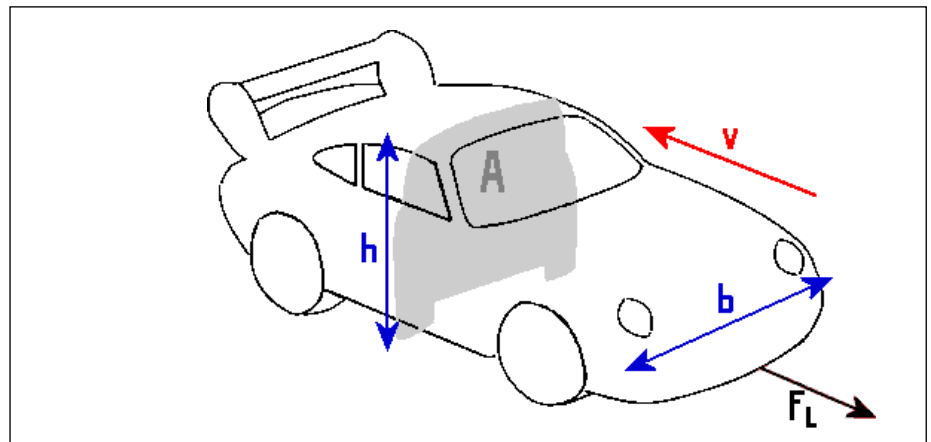
Die Luftdichte ist auch zu beachten, in Meereshöhe ist F<sub>L</sub> höher als im Hochgebirge.

Bei 50 km/h beträgt die Luftwiderstandskraft F<sub>L</sub> wg. der quadratischen Abhängigkeit von v nur ein Viertel, d.h. **F<sub>L</sub> = 76 N**



Quadratische Zunahme des Luftwiderstands F<sub>L</sub> mit der Geschwindigkeit v

Grüne Linie = konstanter Rollwiderstand



Fahrzeug	Querschnittsfläche	c <sub>w</sub> -Wert	Luftwiderstand bei 100 km/h
Motorrad verkleidet	0,79 m <sup>2</sup>	0,57	224 N
Motorrad unverkleidet	0,81 m <sup>2</sup>	0,63	254 N
Kleinwagen	1,80 m <sup>2</sup>	0,32	287 N
Mittelklasse	2,00 m <sup>2</sup>	0,28	279 N

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

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

**Rollwiderstandskraft**

Durch die Verformung beim Abrollen wird die Kontaktkraft zwischen Körper und Unterlage asymmetrisch (Fig.1). Der Ersatz der Kontaktkräfte durch statisch äquivalente Einzelkräfte ergibt eine Normalkraft  $F_N$ , welche um die Strecke  $d$  nach vorne verschoben ist, und eine Reibungskraft  $F_R$  entgegen der Bewegungsrichtung (Fig.2).

Aus den Gleichgewichtsbedingungen folgt für Rollen bei konstanter Geschwindigkeit

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

Der Quotient  $\frac{d}{R}$  ist der Rollwiderstandskoeffizient  $C_R$

(veraltet auch: Rollwiderstandsbeiwert, Rollreibungsbeiwert):

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

Damit bekommt der Ausdruck für die Rollreibung  $F_R$  die Form

$$F_R = C_R \cdot F_N$$

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.

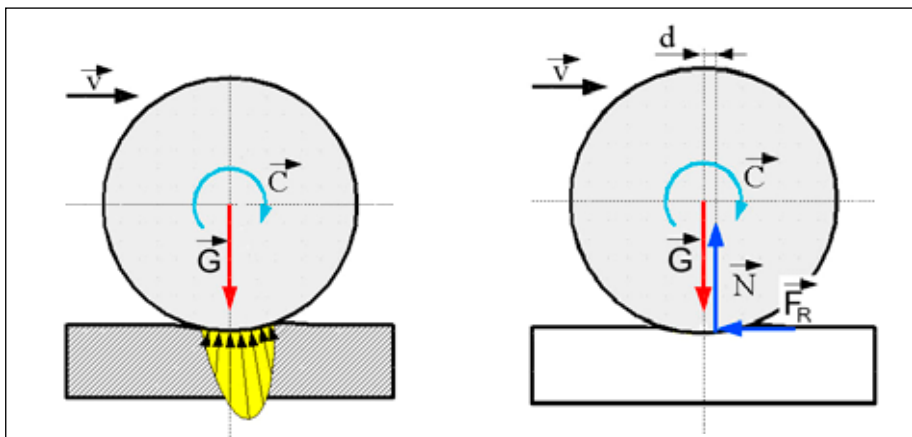


Fig. 1 Asymmetrische Kontaktkraft

**Typische Rollwiderstandskoeffizienten  $C_R$**

$C_R$	Wälzkörper/Wälzkörperbahn
0,0005–0,001	Kugellager, Kugel und Lager aus gehärtetem Stahl <sup>4</sup>
0,001–0,002	Eisenbahnrad auf Schiene <sup>1</sup>
0,015–0,02	Motorradreifen auf Asphalt
0,006–0,010	Autoreifen auf Asphalt, Lkw
0,011–0,015	Autoreifen auf Asphalt, Pkw
0,01–0,02	Autoreifen auf Beton <sup>2</sup>
0,020	Autoreifen auf Schotter
0,015–0,03	Autoreifen auf Kopfsteinpflaster <sup>2</sup>
0,03–0,06	Autoreifen auf Schlaglochstrecke <sup>2</sup>
0,045	Verbinderkette (Raupenfahrwerk, Leopard 2) auf fester Fahrbahn
0,050	Autoreifen auf Erdweg
0,04–0,08	Autoreifen auf festgefahrenem Sand <sup>2</sup>
0,035–0,08	Gurtband (Raupenfahrwerk, Caterpillar Challenger und John Deere 8000T) auf Asphalt
0,2–0,4	Autoreifen auf losem Sand <sup>2/3</sup>

**Beispiel: Renault ZOE**

Zul. Gesamtmasse = 1943 kg

$$F_N = m \cdot g = 1943 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 = 19061 \text{ kg m/s}^2 = 19061 \text{ N}$$

0,011–0,015	Autoreifen auf Asphalt, Pkw
-------------	-----------------------------

$$F_R = C_R \cdot F_N = 0,013 \cdot 19061 \text{ N} = 248 \text{ N}$$

Beim Renault ZOE wird bei 100 km/h 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  $551 \text{ N}$ .

Die benötigte Energie (Arbeit) die das E-Auto ZOE auf ebener Strecke für  $s = 100 \text{ km}$  bei  $v = 100 \text{ km/h}$  zur Überwindung des Luft- und Rollwiderstandes benötigt, ist also:  
 $E = \text{Kraft} \cdot \text{Weg} = F \cdot s = 551 \text{ N} \cdot 100 \text{ km}$

$$E = 5,51 \cdot 10^7 \text{ Nm} = 5,51 \cdot 10^7 \text{ Ws} = \mathbf{15,3 \text{ kWh}}$$

Beim Renault ZOE wird bei 50 km/h (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  $324 \text{ N}$ . Die benötigte Energie (Arbeit) die das E-Auto ZOE auf ebener Strecke für  $s = 100 \text{ km}$  bei  $v = 50 \text{ km/h}$  zur Überwindung des Luft- und Rollwiderstandes benötigt ist also:  
 $E = \text{Kraft} \cdot \text{Weg} = F \cdot s = 324 \text{ N} \cdot 100 \text{ km}$

$$E = 3,24 \cdot 10^7 \text{ Nm} = 3,24 \cdot 10^7 \text{ Ws} = \mathbf{9 \text{ kWh}}$$

**Die Stromkosten betragen für 100 km also nur  $9 \cdot 0,25 \text{ €} = 2,25 \text{ €}$**

Nicht berücksichtigt sind Verluste im elektrischen Antriebsstrang, d.h. die Batterie muss noch eine etwas höhere Energie liefern, geschätzt ca. 5% mehr.

**Zum Vergleich:**

1 Liter Benzin entspricht 10 kWh

1 Liter Diesel entspricht 10,9 kWh

Der Wirkungsgrad von Verbrennungsmotoren ist sehr viel geringer als der von Elektromotoren, deshalb verbrauchen selbst sehr sparsame herkömm-

liche Autos mehr als 4 Liter Kraftstoff für 100 km! Die Hersteller 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 z.B. für 50 km angegeben werden, da hier infolge des stop and go – Betriebs-Bremsenergie zurückgespeist werden kann. Diese Verbrauchs-Untersuchungen müssen natürlich bei unterschiedlichen Außentemperaturen in den vier Jahreszeiten durchgeführt werden! Ein **akustischer** Vergleich von reinen Elektroautos sowie vergleichbaren Verbrenner-Autos mit Benzin- / Dieselmotor auf gerader, horizontaler Versuchsstrecke z.B. bei 30 km/h, 50 km/h, 100 km/h und 150 km/h bzgl. **Motorgeräusch** und sonstigen Fahrgeräuschen wäre sehr interessant für den möglichen Käufer eines E-Fahrzeugs. Hierbei ist zu unterscheiden zwischen den Geräuschen im Fahrzeug-Innenraum und im Außenraum.

## 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 verloren geht. Das Verhältnis der entnehmbaren zu der beim Laden aufzuwendenden Energie wird als Ladewirkungsgrad bezeichnet. Generell sinkt der Ladewirkungsgrad sowohl durch Schnellladung mit sehr hohen Strömen als auch durch schnelle Entladung (Peukert-Effekt), da die Verluste am Innenwiderstand zunehmen. Das optimale Nutzungsfenster ist dabei je nach Zellchemie stark unterschiedlich.

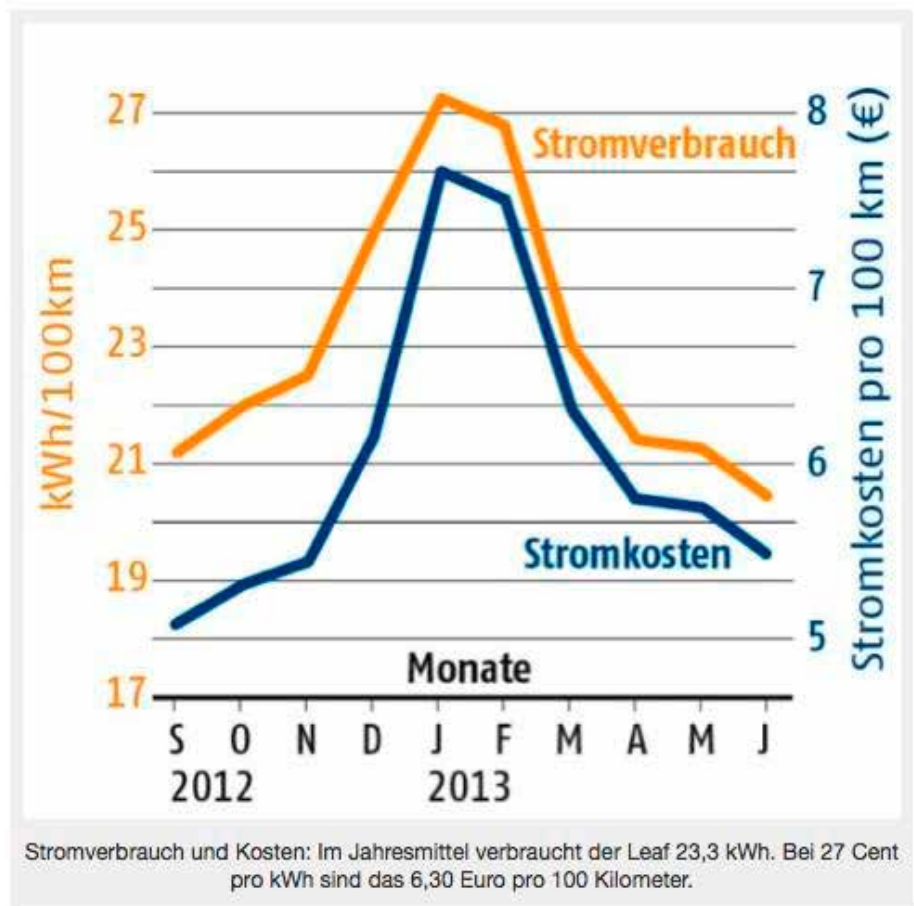
Beim Aufladen und Entladen von Akkumulatoren wird Wärme frei, wodurch ein Teil der zum Aufladen aufgewandten Energie verloren geht.

Das Verhältnis der aufgenommenen zu der beim Laden zugeführten Ladung wird als Ladewirkungsgrad bezeichnet:

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

wobei  $\eta$  Ladewirkungsgrad ist,  $Q_{\text{auf}}$  die aufgenommene Ladung, und  $Q_{\text{zu}}$  die zugeführte Ladung. Das Aufladen der Akkus von Elektroautos dauert bis zu 13 Stunden. Eine **Schnellladung** ist bei manchen Akkus schon in 30 Minuten möglich.

Die elektrische Leistung  $P$  ist das Produkt aus dem Quadrat der Stromstärke  $I$  und dem Widerstand  $R$ .



Die moderneren Li-Ionen-Akkus können mehr als 2000 Lade-Zyklen vertragen. Das bedeutet ein Batteriewechsel alle 200.000 km.

## Akkumulatortypen

- Bleiakkumulator
- Lithium-Ionen-Akkumulator auf der Basis von  $\text{LiCoO}_2$
- Lithium-Polymer-Akkumulator
- Lithium-Eisen-Phosphat-Akkumulator
- Lithium-Schwefel-Akkumulator
- Natrium-Nickelchlorid-Akkumulator (Zebra-Batterie)
- Natrium-Schwefel-Akkumulator
- Nickel-Eisen-Akkumulator
- Nickel-Cadmium-Akkumulator
- Nickel-Metallhydrid-Akkumulator
- Nickel-Wasserstoff-Akkumulator
- Nickel-Zink-Akkumulator
- Silber-Zink-Akkumulator
- Zinn-Schwefel-Lithium-Akkumulator

## Ermittlung der Standby- sowie Lade und Entladeverluste bei E-Autos

- Verluste beim Laden der Batterie (z.B. Erwärmung des Hochvoltakkus durch den Batterie-Innenwi-

derstand) sowie Verluste im bordeigenen Ladegerät und in der Ladesäule / Wallbox. / Laden mit einphasigem bzw. dreiphasigem Wechselstrom oder Gleichstrom und induktives Laden

- Verluste beim Entladen der Batterie in Fahrbetrieb (auch hier Erwärmung des Hochvoltakkus durch den Batterie-Innenwiderstand)
- Standby-Verluste, diese entstehen durch das thermische Batteriemangement, wenn das Fahrzeug steht und sind abhängig von der Umgebungstemperatur, Sommer / Winter / geheizte, ungeheizte Garage / Parkplatz im Freien
- Selbstentladeverluste der Batterie bei ruhendem Fahrzeug

Leider geben die Hersteller diese wichtigen Daten bislang nicht exakt an, obwohl diese Parameter für den Erwerber eines E-Fahrzeugs von großem Interesse sein dürften und u.a. auch relevant für eine Kaufentscheidung sind. 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. Li-Ionen-Akku: Ladezustand 60 %, 20 °C; Selbstentladung monatlich < 2 %



Wie bekannt, fahren Autos im Jahres-Mittel nur eine Stunde am Tag. Wenn ein Elektroauto also täglich etwa 23 Stunden mit der eigenen Ladestation in der Garage oder z.B. mit der Ladesäule auf dem Stellplatz beim Arbeitgeber verbunden ist, ist die Kenntnis der sog. Standby-Verluste sehr 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, Sommer, Winter usw..

## Umweltschutz

Der Wirkungsgrad von modernen Elektromotoren ist mindestens 90%. Der Wirkungsgrad der Lade-Entlade-Zyklen der Akkus beträgt ungefähr 90%. Der totale Wirkungsgrad beträgt also 81% gegenüber den 18% von Benzinmotoren. Elektroenergie kann aus erneuerbaren Energiequellen hergestellt werden, wie zum Beispiel Windenergie oder Sonnenenergie. Ein weiterer Vorteil von Elektroautos ist, dass schädliche Gase nicht in den Städten entstehen. Die Luft wird sauberer und der Geräuschpegel geringer, das Leben in den Innenstädten angenehmer.

## Elektro-Mobilität und Laternen-Ladestationen

Die jährliche Stromerzeugung in Deutschland betrug 2013 etwa

600 Milliarden kWh = 600 GkWh = 600 TWh elektrische Energie.

Die installierte Nettoleistung der Kraftwerke in Deutschland betrug 2011 rund 168 GW.

38,5 GW davon entfallen umweltfreundlich auf Wind (17 GW), Solar (15 GW) und Wasser + Biomasse (6,5 GW). Das entspricht 23%. Die Tabelle zeigt den Anteil der einzelnen Energieträger an der installierten Kraftwerksleistung und den Beitrag zur Stromproduktion. (Quelle: BDEW)

## Energiebedarf von E-Autos bei durchschnittlicher Fahrstrecke von 50 km pro Tag:

- a) 1 Mio. E-Autos x 365 Tage x 7,2 kWh = 2,63 109 kWh = 2,63 TWh
- b) 40 Mio. E-Autos x 365 Tage x 7,2 kWh = 105 109 kWh = 105 TWh

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

- Im Fall a) 2,63 TWh / 600 TWh = 0,44 %
- Im Fall b) 105 TWh / 600 TWh = 17,5 %

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

- a) 1 Mio. E-Autos verbrauchen ca. **0,3 %** der elektrischen Energie
  - b) 40 Mio. E-Autos verbrauchen ca. **10 %** der elektrischen Energie
- d.h. ein Energieengpass ist nicht zu erwarten.

Ladesäulen für Elektroautos und Plug-in-Hybride werden auf lange Sicht laut EnBW-Chef Frank Mastiaux unrentabel bleiben. Bei Kosten von rund 10.000 Euro pro Ladesäule seien durch das reine Stromladen nicht refinanzierbar. Es könne sein, dass der Infrastrukturaufbau nur in Public-Private-Partnerships zu stemmen ist.

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, läuft das nur 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 Strombedarf von unter 90 TWh pro Jahr.

Außerdem bilden die Autobatterien einen relativ großen Energiespeicher (max. 20 kWh x 40 Mio. = 800 GWh = 0,8 TWh), der als Puffer für Wind- und Solarstrom dienen kann.

Das visionäre Konzept Vehicle to Grid (Fahrzeug im Netz) sieht vor, die in Elektro- und Hybridautos gespeicherte elektrische Energie für das öffentliche Stromnetz kurzzeitig - zum Beispiel für Bedarfsspitzen - nutzbar zu machen. Dies verringert allerdings die für Fahrzwecke verfügbaren Ladezyklen der Akkus.

Welche Leistung Pmax könnte maximal kurzfristig (1h) aus Fahrzeugbatterien zur Verfügung gestellt werden?

**Annahme:** 40 Mio. Batterien x 20 kWh-Speicherkapazität = 800 x 106 kWh = 800 GWh  
Pmax = 800 GWh / 1 h = 800 GW

Wenn realistischerweise nur 5 % der in den Autobatterien gespeicherten Energie zur Verfügung gestellt werden kann, bedeutet dies eine Leistung von 40 GW, d.h. rd. 40 % der gesamten installierten Kraftwerksleistung in Deutschland kann für kurzfristige Bedarfsspitzen zur Verfügung gestellt werden.

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, benötigt man eine Ladezeit von

$$15 \text{ kWh} / 3,68 \text{ kW} = 4,1 \text{ Stunden}$$

**Fazit:** E-Fahrzeuge mit Batterien bis etwa 20 kWh-Kapazität, die wahrscheinlich in der Einführungsphase der Elektromobilität überwiegend im Stadtverkehr eingesetzt werden, können in wenigen Stunden an einem normalen Netzanschluss mit 230 V / 16 A aufgeladen werden, d.h., Außenleuchten mit einem einphasigen Netz-Ladeanschluss werden sicher in Innenstädten von vielen Laternenparkern, die die o.g. E-Autos besitzen, 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 V / 32 A (64 A) erforderlich ist, der dann auch ein Schnell-Laden ermöglicht.

Drehstrom-Wirkleistung bei 32 A:

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

bzw. bei 64 A:

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

Bei der Schnell-Ladung bis 200 kW erfolgt die Aufladung mittels einer in der Ladestation integrierten Gleichstromquelle, wobei die fahrzeugeigene Spannungsebene im Bereich von 300 VDC bis 700 VDC liegt, bei großen Nutzfahrzeugen bis 1000 VDC,

Kraftwerkstyp	Anteil an der installierten Leistung, %	Anteil an der Nettostromerzeugung, %
Wind	17,3	8,0
Steinkohle	16,4	18,1
Erdgas	15,4	14,1
Photovoltaik	14,9	3,3
Braunkohle	11,9	24,3
Heizöl, Pumpspeicher, Sonstige	10,4	5,2
Kernenergie	7,2	17,6
Wasser (ohne Pumpspeicher)	3,3	3,3
Biomasse, sonstige Regenerative	3,2	6,1

