

Wirkungsgrad-Vergleich zwischen Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor und Fahrzeugen mit Elektromotor

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 Antriebstrangs 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:

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

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 Antriebstrangs (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.

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 Bruchteilen eines Prozents nieder. Da gilt auch gleichermaßen für reibungsarme 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:

ca. 12 kWh x 0,25 € = **3,00 €**

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

Reichweitenvergleich:

Ein Mittelklasse-Fahrzeug mit 500 km Reichweite benötigt rd.

43 kg Dieselkraftstoff

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

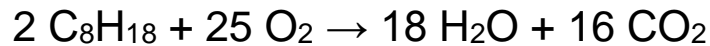
Li-Ionen-Batterie.: 0,13 kWh / kg

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.

CO₂ - 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:



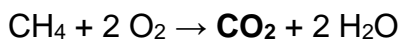
Sie besagt, dass Oktan (C_8H_{18}) und Sauerstoff (O_2) zu Wasser (H_2O) und Kohlenstoffdioxid (CO_2) verbrennen.

Mit diesen Reaktionsgleichungen lässt sich aus dem durchschnittlichen Kraftstoffverbrauch eines Fahrzeugs der zugehörige CO_2 -Ausstoß berechnen.

1 Liter Benzin verbrennt zu	2,33 Kilogramm CO_2
1 Liter Diesel verbrennt zu	2,64 Kilogramm CO_2
1 Liter Autogas verbrennt zu	1,64 Kilogramm CO_2

CO_2 – Emissionen von Erdgas

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



1 m^3 H-Erdgas setzt 2,4 kg CO_2 frei

1 kg Erdgas verbrennt zu **2,79** Kg CO_2

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_L lässt sich einfach berechnen:

Beispiel Renault ZOE:

Breite = 1,56 m, Höhe = 1,40 m // $A = 2,184 \text{ m}^2$

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

ρ (Rho): Dichte der Luft (ca $1,2 \text{ kg/m}^3$ bei 20°C (ISA Standardatmosphäre)

c_w : 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)

$$F_L = 0,5 \cdot 2,184 \text{ m}^2 \cdot 1,2 \text{ kg/m}^3 \cdot (100 \text{ km/h})^2 \cdot 0,3$$

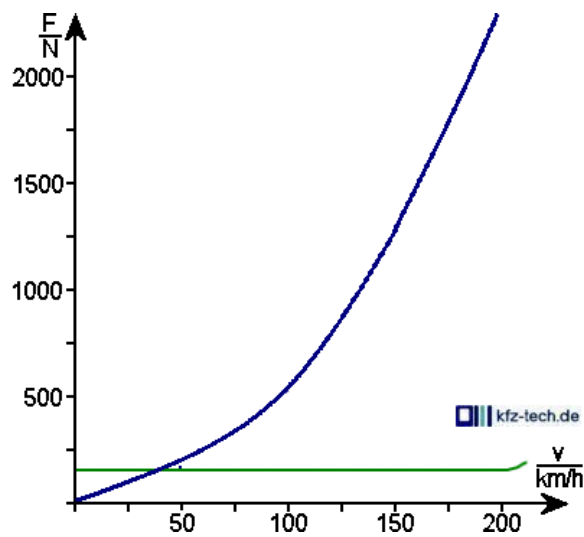
mit $1 \text{ Nm} = 1 \text{ Ws} = 1 \text{ kg m}^2 / \text{s}^2$ erhält man

$$F_L = 0,393 \text{ kg/m} \cdot 10^{10} \text{ m}^2 / (12,96 \cdot 10^6 \text{ s}^2) = 303 \text{ kg m} / \text{s}^2 = \mathbf{303 \text{ N}}$$

Dieser Wert gilt für ruhende Luft. F_L ändert sich mit der Windgeschwindigkeit und Windrichtung, d.h. F_L kann größer (Gegenwind) oder kleiner (Rückenwind) werden.

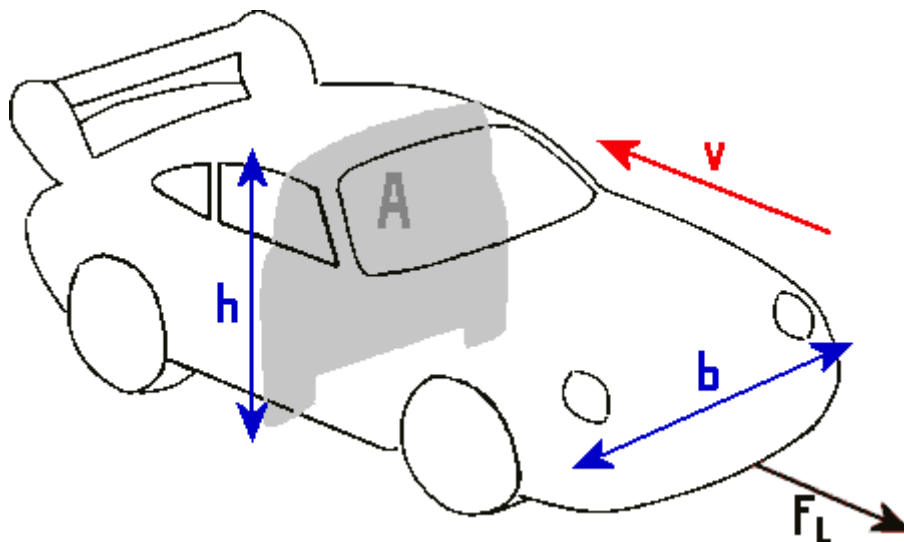
Die Luftdichte ist auch zu beachten, in Meereshöhe ist F_L höher als im Hochgebirge.

Bei 50 km/h beträgt die Luftwiderstandskraft F_L wg. der quadratischen Abhängigkeit von v nur ein Viertel, d.h. $F_L = 76 \text{ N}$



Quadratische Zunahme des Luftwiderstands F_L mit der Geschwindigkeit v

Grüne Linie = konstanter Rollwiderstand



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

Den größten Einfluss auf den Luftwiderstand hat die Fahr- oder Luftgeschwindigkeit. Mit weitem Abstand folgen der Wert für die Form (c_w) 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*, *Rollreibungbeiwert*):

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

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.

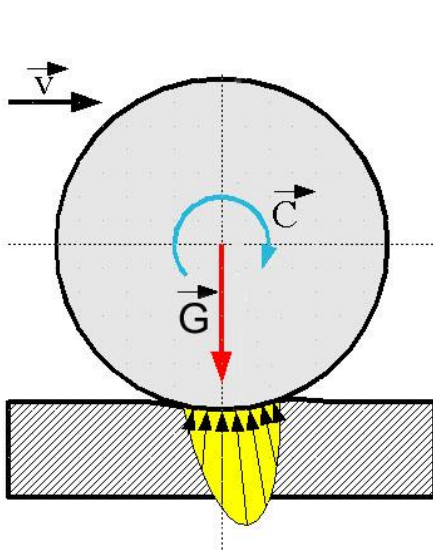


Fig. 1 Asymmetrische Kontaktkraft

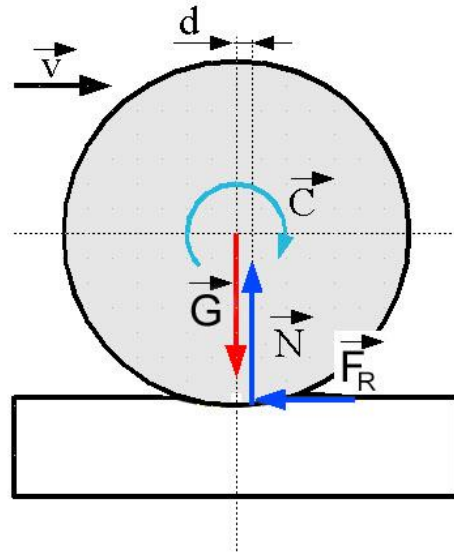


Fig. 2 Kräfte während des Rollens

Typische Rollwiderstandskoeffizienten c_R

c_R	Wälzkörper/Wälzkörperbahn
0,0005–0,001	<u>Kugellager</u> , Kugel und Lager aus <u>gehärtetem Stahl</u> ⁴
0,001–0,002	<u>Eisenbahnrad</u> auf Schiene ¹
0,015–0,02	<u>Motorradreifen</u> auf <u>Asphalt</u>
0,006–0,010	<u>Autoreifen</u> auf Asphalt, Lkw
0,011–0,015	Autoreifen auf Asphalt, Pkw
0,01–0,02	Autoreifen auf <u>Beton</u> ²
0,020	Autoreifen auf <u>Schotter</u>

0,015–0,03	Autoreifen auf <u>Kopfsteinpflaster</u> ²
0,03–0,06	Autoreifen auf <u>Schlaglochstrecke</u> ²
0,045	<u>Verbinderkette</u> (Raupefahrwerk, Leopard 2) auf fester Fahrbahn
0,050	Autoreifen auf Erdweg
0,04–0,08	Autoreifen auf festgefahretem <u>Sand</u> ²
0,035–0,08	<u>Gurtband</u> (Raupefahrwerk, Caterpillar Challenger und John Deere 8000T) auf Asphalt
0,2–0,4	Autoreifen auf losem Sand ^{2/3}

1

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 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 N .

Die benötigte Energie (Arbeit) die das E-Auto ZOE auf ebener Strecke für $s = 100 \text{ km}$ bei $v = \mathbf{50 \text{ km/h}}$ 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 herkömmliche Autos mehr als 4 Liter Kraftstoff für 100 km!