

Zum besseren Verständnis - Fahrwiderstand, S. 81+82

In folgendem Text analysieren wir gemeinsam die Einflussfaktoren auf einen fahrenden PKW und berechnen die einzelnen Größen. Der Text wurde bereits leicht adaptiert, damit er einfacher verständlich wird. Es sind jedoch noch immer einige schwierige Fachwörter im Text, wie z. B.

Roll-Widerstand: _____

Luft-Widerstand: _____

Widerstandsbeiwert: _____

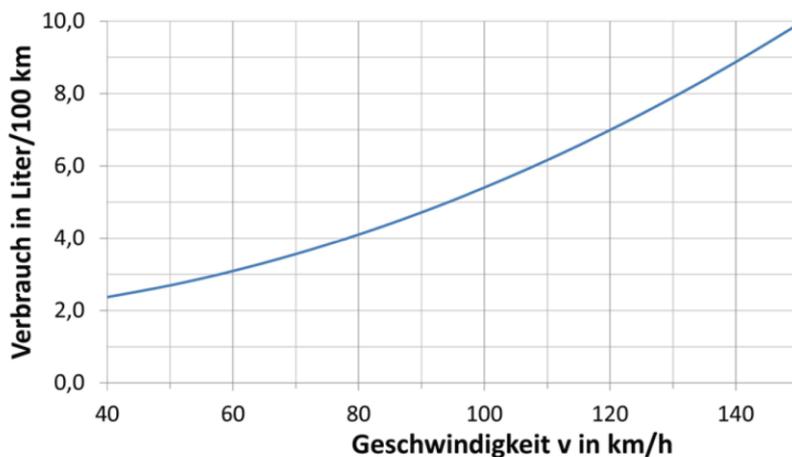
Querschnittsfläche: _____

Energieinhalt (Heizwert): _____

Recherchiere zu den Wörtern im Internet und versuche sie mit deinen eigenen Worten zu beschreiben. Lies dir danach den Text durch und markiere die Kernaussagen im Text.

Weitere Aufgaben für ein besseres Textverständnis:

Öffne die Excel-Tabelle im digitalen Zusatzmaterial und untersuche welche Größen für das Diagramm benötigt werden. Welche Werte bleiben konstant und welche Werte ändern sich mit der Geschwindigkeit?



82.3 Benzinverbrauch in Liter/100 km für den PKW im Beispiel. Vorausgesetzt wurden: keine verkehrsbedingten Beschleunigungen, keine Steigungen und kein Gegenwind.
Bild: Dr. Helmut Kühnelt, Klosterneuburg

In Abb. 82.2 siehst du einen Elektro-LKW, der vollelektrisch betrieben werden kann. Recherchiere die Hintergründe dazu und bewerte, ob dies eine sinnvolle Technologie ist.

Fahrwiderstand am PKW

Mobilität mit einem eigenen Auto hat einen hohen Preis. Wenn wir uns Kraftfahrzeuge ansehen, können wir sehen, dass bei der Umwandlung von chemischer Energie des Treibstoffs in mechanische Energie im Verbrennungsmotor mehr als die Hälfte der Energie verloren geht. Diese Energie wird als Wärme an die Umwelt abgegeben.

Die verfügbare mechanische Energie wird teilweise in kinetische Energie des Fahrzeugs oder bei Steigungen in potenzielle Energie und teilweise in elektrische Energie für die Fahrzeugelektronik, die Klimaanlage und die Beleuchtung umgewandelt.

Ein anderer Teil muss genutzt werden, um den Luft-Widerstand und den Roll-Widerstand zu überwinden, was auch dazu führt, dass die Umwelt erwärmt wird. Es gibt viele Fragen, aber hier fragen wir nur: Wie wichtig sind Roll- und Luft-Widerstand bei Fahrzeugen?

Roll-Widerstand

Auf Seite 51 haben wir gelernt, dass die Rollreibung durch $F_R = f_R \cdot F_G$ beschrieben wird. Sie wirkt entgegengesetzt zur Bewegungsrichtung. Um sie auszugleichen, muss der Antrieb des PKW eine gleich große Kraft in Fahrtrichtung liefern. Für die Rollreibung von PKW-Reifen auf normaler Fahrbahn gilt $f_R \approx 0,02$. Um also einen Kleinwagen mit $m = 1\,000\text{ kg}$ (Gewicht F_G ca. 10 kN) zu bewegen, müssen wir eine Kraft von etwa 200 N aufwenden. Dies entspricht dem Gewicht von 2 Eimern Wasser.

Wie wirkt sich der Roll-Widerstand beim Fahren aus?

Wie viel Prozent der maximalen Motor-Leistung (zum Beispiel 50 kW) muss man bei einer Geschwindigkeit von 30 m/s (108 km/h) aufbringen, um den Roll-Widerstand auszugleichen?

Arbeit ist Kraft mal Weg.

Um während der Zeit-Dauer Δt den Energie-Verlust durch den Roll-Widerstand auszugleichen, muss am PKW eine Arbeit $W_R = F_R \cdot s = F_R \cdot v \cdot \Delta t$ verrichtet werden. Leistung (P) ist Arbeit (W) pro Zeit (t). Als Formel schreiben wir $P = W / t$ Damit ergibt sich:

$$F_R = f_R \cdot F_G = 0,02 \cdot 10\text{ kN} = 200\text{ N}$$

$$P_R = \frac{W_R}{\Delta t} = F_R \cdot v = 200\text{ N} \cdot 30\text{ m/s} = 6\,000\text{ W} = 6\text{ kW}$$

Etwa zwölf Prozent der maximalen Motor-Leistung werden im Beispiel für den Roll-Widerstand eines Kleinwagens benötigt. Wenn man Reifen benutzt, die eine kleinere Rollreibungszahl haben (Leichtlaufreifen, $f_R \approx 0,01$), würde der Roll-Widerstand halbiert werden. Das bedeutet, dass man weniger Energie braucht, um das Auto zu bewegen. Wenn der Reifendruck zu niedrig ist, würde der Roll-Widerstand erhöht werden (**81.1**).

Untersuche, Überlege, Forsche: Erkläre, wie man auf den Wert „12% der Motorleistung“ in unserem Beispiel kommt.

Luft-Widerstand

Beim PKW ist der Luft-Widerstand (**81.2**) wichtiger als der Roll-Widerstand. Die vor dem Fahrzeug befindliche ruhende Luft muss weggeschoben, d. h. beschleunigt werden:

Der PKW verrichtet dadurch während einer Zeit Δt entlang des Weges $v \cdot \Delta t$ die Arbeit $F_L \cdot v \cdot \Delta t$ und erteilt der Luftmasse $\rho_L \cdot A \cdot v \cdot \Delta t$ die kinetische Energie $\frac{1}{2} \rho_L \cdot A \cdot v \cdot \Delta t \cdot v^2$ (A ist die Querschnittsfläche des PKW in Fahrtrichtung).

Wenn man beide Ausdrücke gleichsetzt, ergibt sich mit einem zusätzlichen Faktor c_w (c_w ist der Widerstandsbeiwert) der Luft-Widerstand mit folgender Formel:

$$\text{Luft-Widerstand } F_L = \frac{1}{2} c_w \cdot A \cdot \rho_L \cdot v^2$$

Der Faktor c_w hängt von der Form des Fahrzeugs ab: Je kleiner c_w , desto „windschlüpfiger“ ist der PKW. Messungen haben in einem großen Geschwindigkeitsbereich die Gültigkeit der Formel bestätigt: Der Luft-Widerstand eines Körpers ist proportional zu v^2 , zur Dichte der Luft ρ_L und zum Querschnitt A .

c_w hängt von der Form des Fahrzeugs ab und wird im Windkanal gemessen. A beträgt bei Klein-PKW ca. $2,5 \text{ m}^2$. ρ_L ist die Dichte der Luft ($1,2 \text{ kg/m}^3$ bei $20 \text{ }^\circ\text{C}$), $c_w \approx 0,35$ für PKW.

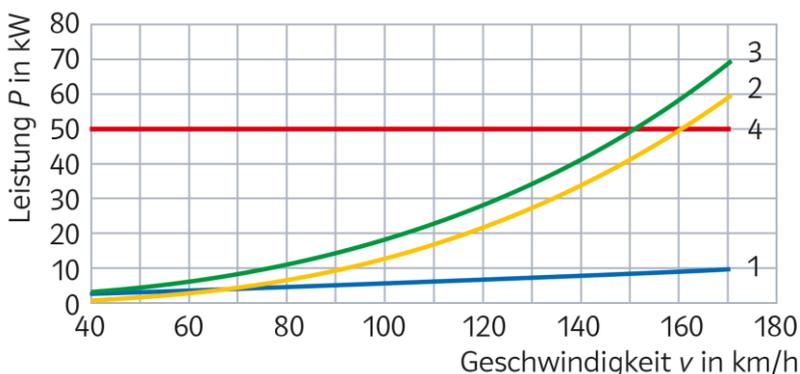
Die Leistung P_L , die für eine konstante Geschwindigkeit v gegen den Luft-Widerstand F_L aufgewandt werden muss, beträgt bei $v = 30 \text{ m/s}$:

$$P_L = F_L \cdot v = \frac{1}{2} c_w \cdot A \cdot \rho_L \cdot v^3 = 14 \text{ kW}$$

Das ist etwa ein Viertel der angenommenen maximalen Motorleistung von 50 kW .

Beachte, dass mit zunehmender Geschwindigkeit die notwendige Leistung und dadurch der Treibstoffverbrauch mit der 3. Potenz ansteigen. Der Roll-Widerstand erfordert hingegen einen linear zunehmenden Anteil der Motorleistung.

82.1 zeigt, welche Motorleistung für den Luft- und den Roll-Widerstand gebraucht wird. Ab einer bestimmten Geschwindigkeit steht keine Motorleistung mehr zum weiteren Beschleunigen zur Verfügung, die Maximalgeschwindigkeit ist erreicht.



82.1 Anteile der Motorleistung für (1) Roll-, (2) Luft-Widerstand und ihre Summe (3) als Funktionen der PKW-Geschwindigkeit im Vergleich zur verfügbaren maximalen Motorleistung (4). Solange die maximale Motorleistung (4) größer als die Summe der Fahrwiderstände ist, kann der PKW beschleunigt werden. Die Höchstgeschwindigkeit wird am Schnittpunkt von (3) und (4) erreicht.
Bild: Bernd Pavlik, Neusiedl am See

Untersuche, Überlege, Forsche: In Abb. **82.1** siehst du 4 verschiedene Kurven. Eine dieser Kurven ist eine Kombination aus 2 anderen Kurven. Erkläre um welche Funktion es sich dabei handelt und wie diese zustande kommt. Analysiere, an welchem Punkt diese Kurve auf die rote Kurve trifft (maximale Motorleistung) und was an diesem Schnittpunkt passiert.

Treibstoff sparen, ist das möglich?

In der Regel möchte man eine bestimmte Strecke s zurücklegen. Wir fragen daher, wie der Kraftstoffverbrauch in diesem Fall von der Geschwindigkeit abhängt, das heißt, welche Arbeit gegen den Luft-Widerstand verrichtet wird. Wegen $W_L = F_L \cdot s = \frac{1}{2} c_w \cdot A \cdot v^2 \cdot s$ sehen wir:

Neben einer günstigen Form des Fahrzeugs (c_w und A möglichst klein) ist die Senkung der Geschwindigkeit der wichtigste Faktor, um Energie zu sparen: 10 % weniger Geschwindigkeit bedeutet fast 20 % weniger Luft-Widerstand. Im Zeichen von Klimaschutz und Erdölverteuerung soll der Treibstoffverbrauch gesenkt werden. Wir schätzen für unseren Kleinwagen ab: Wie viel Treibstoff wird ungefähr zur Überwindung von Luft- und Roll-Widerstand bei konstanten 30 m/s (ca. 108 km/h) und 36 m/s (ca. 130 km/h) auf ebener Straße für eine Strecke von 100 km verbraucht?

Die Antwort erfordert zwei Schritte: die Berechnung der notwendigen Arbeit und den Vergleich mit dem Energieinhalt von Benzin bzw. Diesel.

Berechnung der notwendigen Arbeit:

Roll-Widerstand – benötigter Arbeitsaufwand für 100 km

$$W_R = F_R \cdot s = 200 \text{ N} \cdot 100 \text{ km} = 2 \cdot 10^7 \text{ Nm} = 20 \cdot 10^6 \text{ J} = 20 \text{ MJ}$$

Arbeit gegen den **Luft-Widerstand** – benötigter Arbeitsaufwand für 100 km und $v = 30 \text{ m/s}$, bzw. $v = 36 \text{ m/s}$:

$$\begin{aligned} W_L &= F_L \cdot s = \frac{1}{2} c_w \cdot A \cdot \rho_L \cdot v^2 \cdot s \\ &= 0,5 \cdot 0,35 \cdot 2,5 \cdot 1,2 \cdot 30^2 \cdot 100 \cdot 10^3 \text{ J} = 47 \text{ MJ bei } v = 30 \text{ m/s bzw.} \\ &= 0,5 \cdot 0,35 \cdot 2,5 \cdot 1,2 \cdot 36^2 \cdot 100 \cdot 10^3 \text{ J} = 68 \text{ MJ bei } v = 36 \text{ m/s} \end{aligned}$$

Insgesamt also $W = W_R + W_L = 67 \text{ MJ}$ ($v = 30 \text{ m/s}$) bzw. 88 MJ ($v = 36 \text{ m/s}$).

Energievergleich:

Ein Liter Benzin hat einen Energieinhalt (Heizwert) von ca. 32 MJ (Diesel: 35 MJ). In einem Automotor wird davon zwischen 35 % (Benzinmotor) und 50 % (Dieselmotor) in mechanische Energie umgewandelt, der Rest erwärmt die Umwelt. Der Kraftstoffverbrauch pro 100 km in Litern ergibt sich daher zu

$$\begin{aligned} 67 \text{ MJ} / (32 \text{ MJ} / \text{Liter} \cdot 0,35) &= \text{ca. } 6 \text{ Liter } (v = 30 \text{ m/s}) \text{ bzw. ca. } 8 \text{ Liter } (v = 36 \text{ m/s}) \text{ für Benzin-PKW und} \\ 67 \text{ MJ} / (35 \text{ MJ} / \text{Liter} \cdot 0,5) &= \text{ca. } 4 \text{ Liter } (v = 30 \text{ m/s}) \text{ bzw. ca. } 5 \text{ Liter } (v = 36 \text{ m/s}) \text{ für Diesel-PKW.} \end{aligned}$$

Das sind realistische Verbrauchsabschätzungen. Bergfahrten, Überhol-Manöver, Dachträger etc. erhöhen den Verbrauch. Für kleine Elektro-PKW wird ein mittlerer Energiebedarf von 15 kWh (ca. 54 MJ) pro 100 km angegeben. Ihr c_w -Wert (ca. 0,25) ist geringer, ihr Gewicht **wegen der Batterie allerdings wesentlich höher**.

Bei diesen Verbrauchsangaben ist nicht berücksichtigt, dass beim Laden der Batterie an einer „Stromtankstelle“ etwa 20 % Verlust entstehen (bedingt durch Umwandlung von Wechsel- in Gleichspannung und durch den elektrischen Widerstand der Batterie).