

3.2 Theorie der Fahrwiderstände

Die Längsbewegung eines Fahrzeuges wird durch vier äußere Kräfte beeinflusst:

- Rollwiderstandskraft F_R
- Luftwiderstandskraft F_W
- Hangabtriebskraft F_H
- Beschleunigungskraft F_B

Während Luft- und Rollwiderstand irreversible Verluste erzeugen, sind Hangabtriebs- und Beschleunigungskraft prinzipiell reversibel. Das heißt die durch „Anheben“ und „Beschleunigen“ in das Fahrzeug hinein gesteckte potenzielle oder kinetische Energie kann mit einem hybriden oder elektrischen Antrieb zum Teil zurückgewonnen werden. Die sich ausweitende Elektrifizierung des Antriebsstrangs führt also dazu, dass Roll- und vor allem Luftwiderstand in ihrer Bedeutung noch zunehmen werden.

3.2.1 Rollwiderstand

Der Rollwiderstand entsteht primär durch Walkverlustarbeit (Hystereseverluste) bei der Deformation der Reifenstruktur beim Abrollen, hauptsächlich durch Kompression sowie Biegung der Lauffläche und der Seitenwände (80 bis 95 %). Diese Verlustarbeit wird bestimmt durch die Walkamplitude (Radlast, Reifeninnendruck, ...) und die Walkfrequenz (Fahrgeschwindigkeit). Hinzu kommen Reibungsverluste zwischen Reifen und Straße (sog. Mikroschlupf, bis zu 5 %), sowie widerstandserhöhende Schwingungen von Seitenwand und Lauffläche, die mit der Geschwindigkeit deutlich zunehmen. Darüber hinaus spielen von der Achsgeometrie verursachte Widerstände (z. B. Vorspurwiderstand, der zusätzlich von der Reifenschräglauftiefe und einem geringen Sturzeinfluss abhängt) sowie Reibungsverluste in den Radlagern und Bremsen eine Rolle. Weiterhin haben Luftverwirbelungen am Reifen einen Einfluss (bis zu 15 %), die zwar eigentlich zum Luftwiderstand gehören, vom Rollwiderstand z. B. bei Rollenmessungen so einfach nicht zu trennen sind, vgl. Abb. 3.4.

Die Rollwiderstandskraft F_R (in N) berechnet sich aus Masse und Auftriebskraft:

$$F_R = \mu_R \cdot \left(m_F \cdot g - c_A \cdot A_x \cdot \frac{\rho_L}{2} \cdot v^2 \right). \quad (3.1)$$

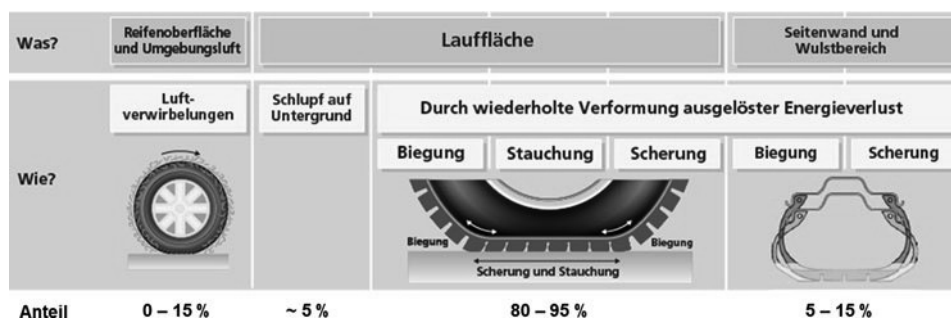


Abb. 3.4 Die bestimmenden Faktoren des Rollwiderstandes (Leister 2009; Heißing und Ersoy 2007)

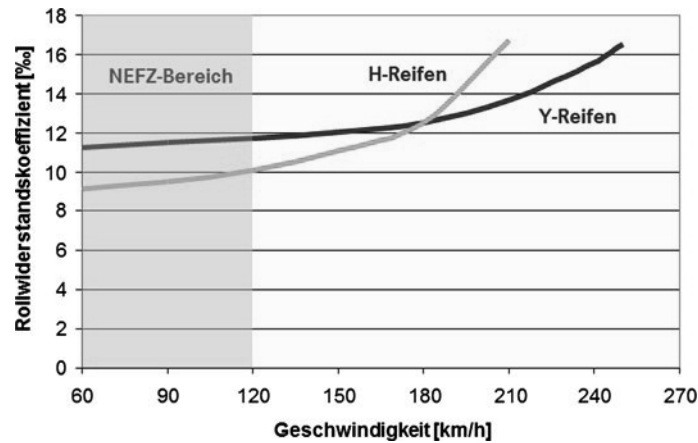


Abb. 3.5 Rollwiderstand als Funktion der Geschwindigkeit und der Bauart (Michelin 2005)

Dabei bedeuten μ_R der Rollwiderstandsbeiwert, m_F die Fahrzeugmasse in kg, g die Erdbeschleunigung ($9,81 \text{ m/s}^2$) und c_A der Auftriebsbeiwert – für die restlichen Größen siehe die identische Gl. 3.2. Da Fahrzeuge in der Regel unterschiedliche Achslasten besitzen, kann es sinnvoll sein, den Rollwiderstand je Achse auszurechnen, zumal die Achslasten – in Abhängigkeit der unterschiedlichen Auftriebsbeiwerte an Vorder- und Hinterachse – mit der Geschwindigkeit vorne und hinten unterschiedlich zu- oder abnehmen, vgl. dazu auch Abschn. 3.3.

Der Rollwiderstandsbeiwert oder -koeffizient ist keine Konstante, sondern variiert u. a. mit Radlast, Reifeninnendruck und Temperatur und nimmt aufgrund der geschwindigkeitsabhängiger Hystereseverluste und Verformungen mit der Geschwindigkeit zu. Dieser Anstieg ist von der Bauart abhängig: Y-Reifen (zugelassen bis 300 km/h) oder W-Reifen³ (bis 270 km/h) haben zur Verstärkung zusätzliche umfangsparallele Fäden, die Deformationen des Reifens und damit den Rollwiderstandsanstieg bei hohen Geschwindigkeiten begrenzen, haben aber bei niedrigen Geschwindigkeiten einen höheren Rollwiderstand als H-Reifen (bis 210 km/h) oder V-Reifen (bis 240 km/h), siehe Abb. 3.5.

Aufgrund neuartiger Gummimischungen (z. B. Silika-Technologie) und Fasern (z. B. Kevlar) kann der Rollwiderstand in Zukunft auf unter 7 % abgesenkt werden, ohne dass der Zielkonflikt mit anderen Eigenschaften wie Laufleistung, Bremsverhalten, Nassgriff, Schräglaufsteifigkeit etc. zu deutlich schlechteren Eigenschaften führt.

3.2.2 Luftwiderstand

Der Luftwiderstand eines Fahrzeuges entsteht überwiegend durch Druckdifferenzen am Fahrzeug in Strömungsrichtung (sog. Druckwiderstand, > 80 % Widerstandsanteil), Reibung an der Fahrzeugoberfläche (< 10 %) und aufgrund von Impuls- und Reibungsverlusten bei der Durchströmung von

³ Der Buchstabe beschreibt den Geschwindigkeitsindex, der die maximal erlaubte Fahrgeschwindigkeit angibt. Er ist in der Reifenbezeichnung als letztes Zeichen enthalten und ist auf der Flanke des Reifens abzulesen. Zur Bestimmung des Geschwindigkeitsindex wird die im Fahrzeugschein eingetragene bauartbedingte Höchstgeschwindigkeit ($v_{\text{max, zul}}$) zugrunde gelegt. Zu dieser kommt ein Sicherheitsaufschlag nach folgender Formel: $v_{\text{max, zul}} \cdot 0,01 + 6,5 \text{ km/h}$.

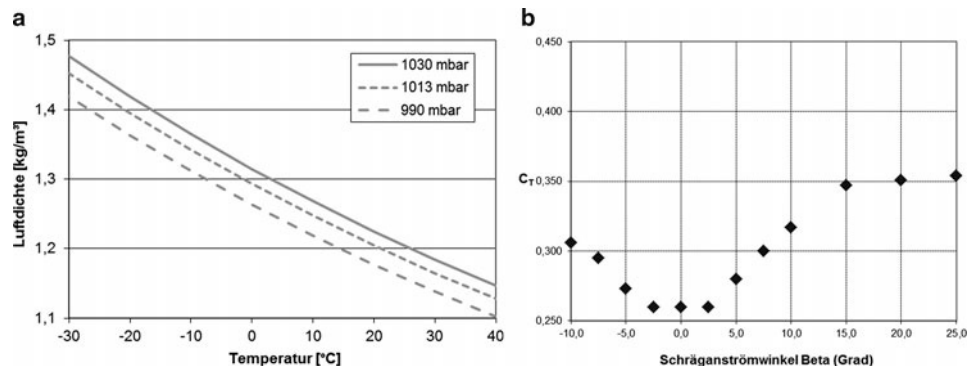


Abb. 3.6 a Luftdichte als Funktion von Temperatur und Luftdruck, b c_W -Wert⁴ als Funktion des Anströmwinkels bei der neuen B-Klasse von Mercedes-Benz

Kühler, Motorraum und Innenraum (ca. 10 %). Diese drei Widerstandsanteile zusammen ergeben die Luftwiderstandskraft (in N), die aus dem dimensionslosen c_W -Wert nach folgender Formel berechnet werden kann:

$$F_W = c_W \cdot A_x \cdot \frac{\rho_L}{2} \cdot v^2 \quad (3.2)$$

mit A_x als Stirnfläche in m^2 und v als Geschwindigkeit in m/s . Die Luftdichte ρ_L ist dabei keine Konstante, sondern von Temperatur und Luftdruck abhängig, der wiederum von Wetterlage und Höhe beeinflusst wird, vgl. Abb. 3.6a:

$$\rho_L = 1,293 \cdot \frac{273}{T + 273} \cdot \frac{p}{1013} \cdot \frac{kg}{m^3} \quad (3.3)$$

mit T als Temperatur in $^{\circ}C$ und p als Luftdruck in mbar.

In der Praxis ist – selbst bei konstanter Fahrgeschwindigkeit – die Anströmgeschwindigkeit keine Konstante, da sie durch natürliche und künstliche Böen (z. B. durch den Nachlauf anderer Fahrzeuge) beeinflusst wird. Die resultierende Anströmgeschwindigkeit ergibt sich durch vektorielle Addition der Fahr- und der Windgeschwindigkeit. In der Regel ist die Widerstandserhöhung durch Seitenwind klein, da zum einen der c_W -Wert im Bereich kleiner Schräganströmwinkel nur wenig ansteigt und zum anderen die Windgeschwindigkeiten in Relation zur Fahrgeschwindigkeit gering ausfallen. Im Beispiel der neuen B-Klasse (s. Abb. 3.6b) ist bis $2,5^{\circ}$ Schräganströmung keinerlei Anstieg des c_W -Wertes messbar. Bei 5 Grad sind es je nach Seite 5 bzw. 8 % Anstieg. Erst darüber wird der Widerstandsanstieg habhaft, diese Schräganströmwerte kommen in der Praxis jedoch praktisch nicht vor; vgl. dazu auch den Abschn. 4.2.4.

⁴ Unter Schiebewinkeln wird der Widerstandsbeiwert in Fahrzeuglängsrichtung als Tangentialkraftbeiwert c_T bezeichnet, vgl. Abschn. 4.2.4. Es gilt $c_T(0^{\circ}) = c_W$.