

# 2 Fahrwiderstände

---

- Radwiderstand
- Luftwiderstand
- Steigungswiderstand
- Beschleunigungswiderstand

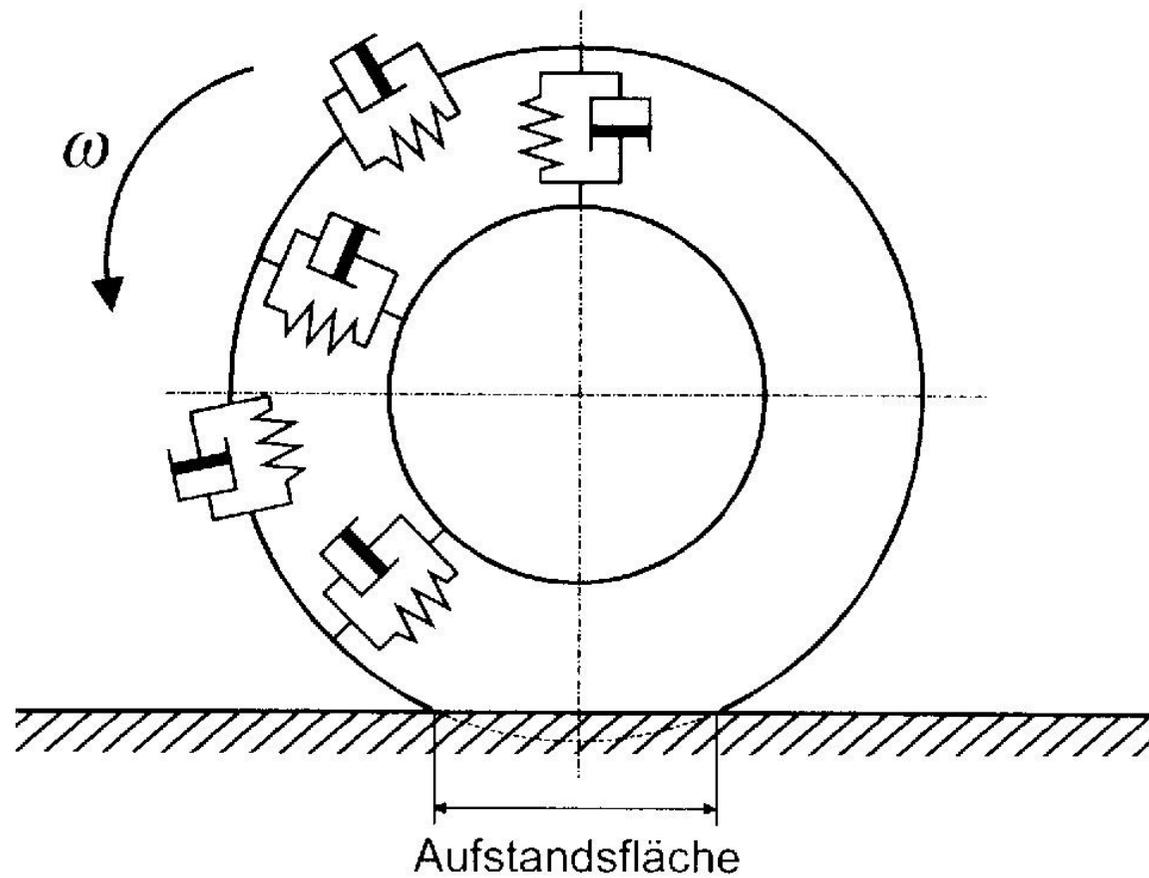
# 2.1 Radwiderstand

---

- Anteil durch Rollwiderstand
- Anteil durch Luft- bzw. Lüfterwiderstand
- Anteil durch Lagerreibung
- Anteil durch Schräglauf
- Anteil durch Schwallwiderstand

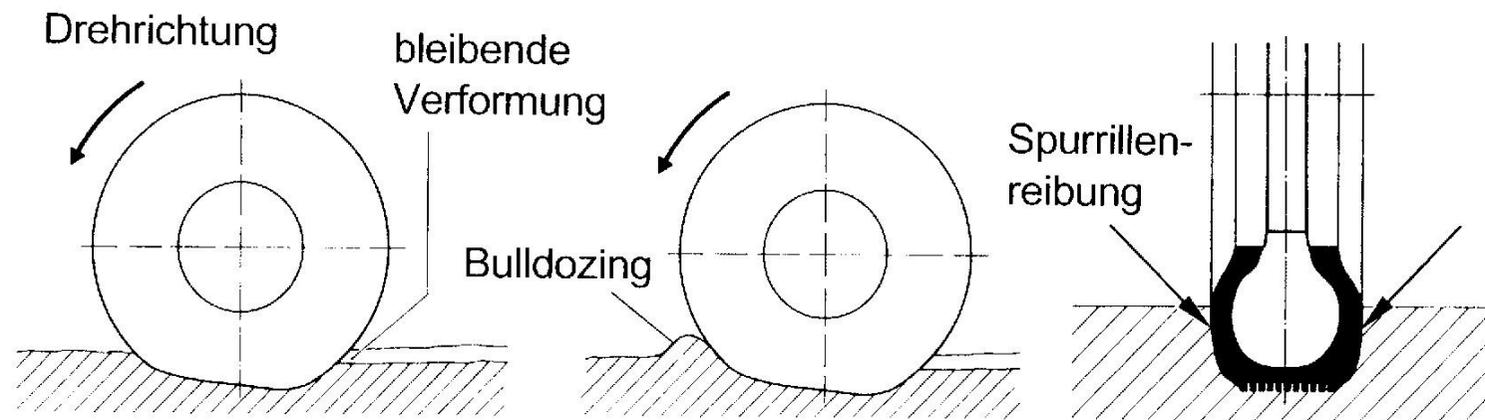
# Radersatzmodell

---



# Widerstand durch plastische Bodenverformung

---



**Widerstand durch  
Zusammendrücken  
des Bodens**

**Bulldozing-  
widerstand**

**Widerstand durch  
Spurrillenreibung**

# Rollwiderstand

---

Rollwiderstand  $F_R = f_R \cdot m_F \cdot g$

$F_R$  = Rollwiderstand

$f_R$  = Rollwiderstandsbeiwert

$m_F$  = Fahrzeugmasse

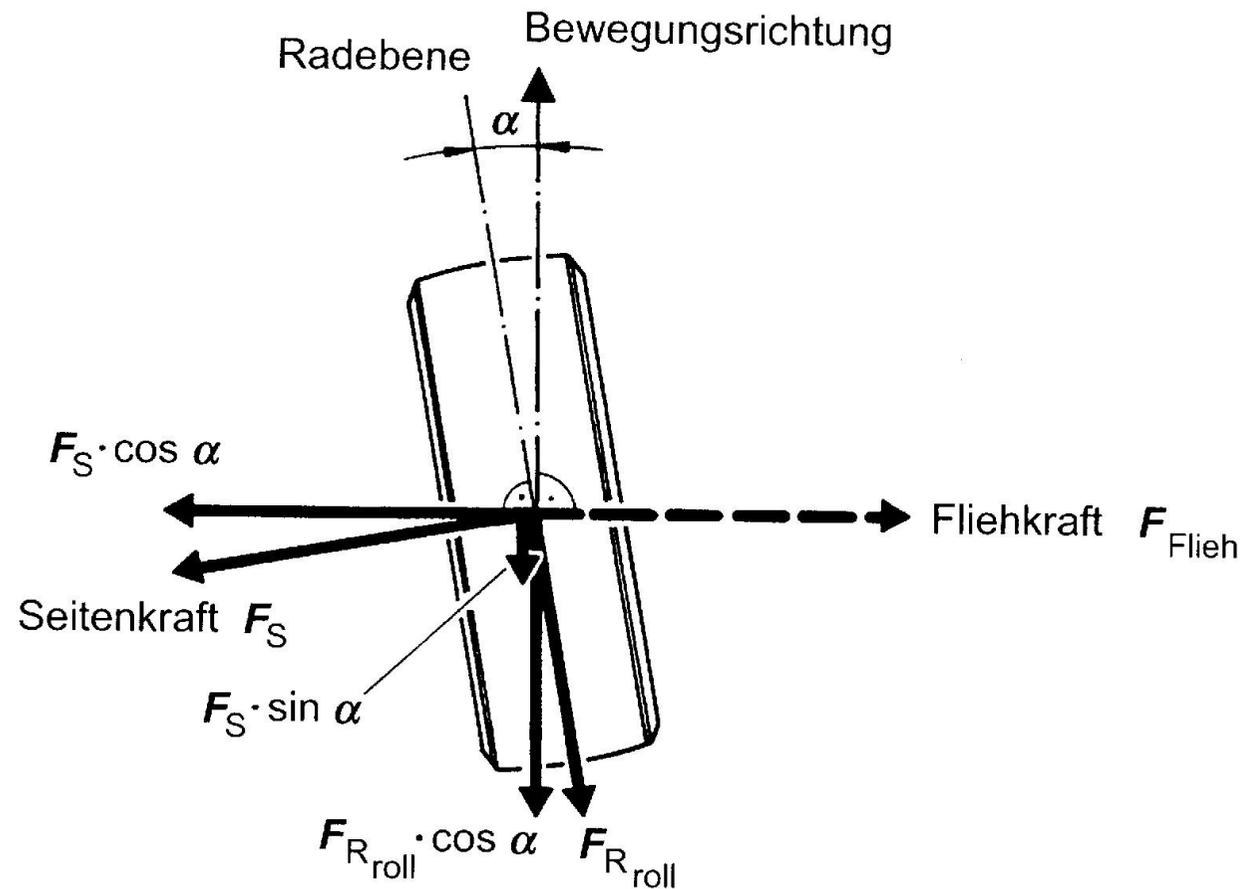
# Rollwiderstandsbeiwerte für unterschiedliche Fahrbahnen

---

| Fahrbahn   | Rollwiderstandsbeiwert $f_R$ |
|--|------------------------------|
| neuer, fester Asphalt; Beton; Kleinpflaster; Kopfsteinpflaster | 0,005 – 0,015                |
| gewalzter, fester Schotter; ausgefahrener, welliger Asphalt    | 0,02 -0,03                   |
| geteerter, ausgefahrener, welliger Schotter                    | 0,03 – 0,04                  |
| sehr gute Erdwege  | 0,04 – 0,05                  |
| Erdwege  | 0,05 – 0,15                  |
| Sand   | 0,15 – 0,35                  |

# Widerstand durch Schräglauf

---



# Übungsaufgabe

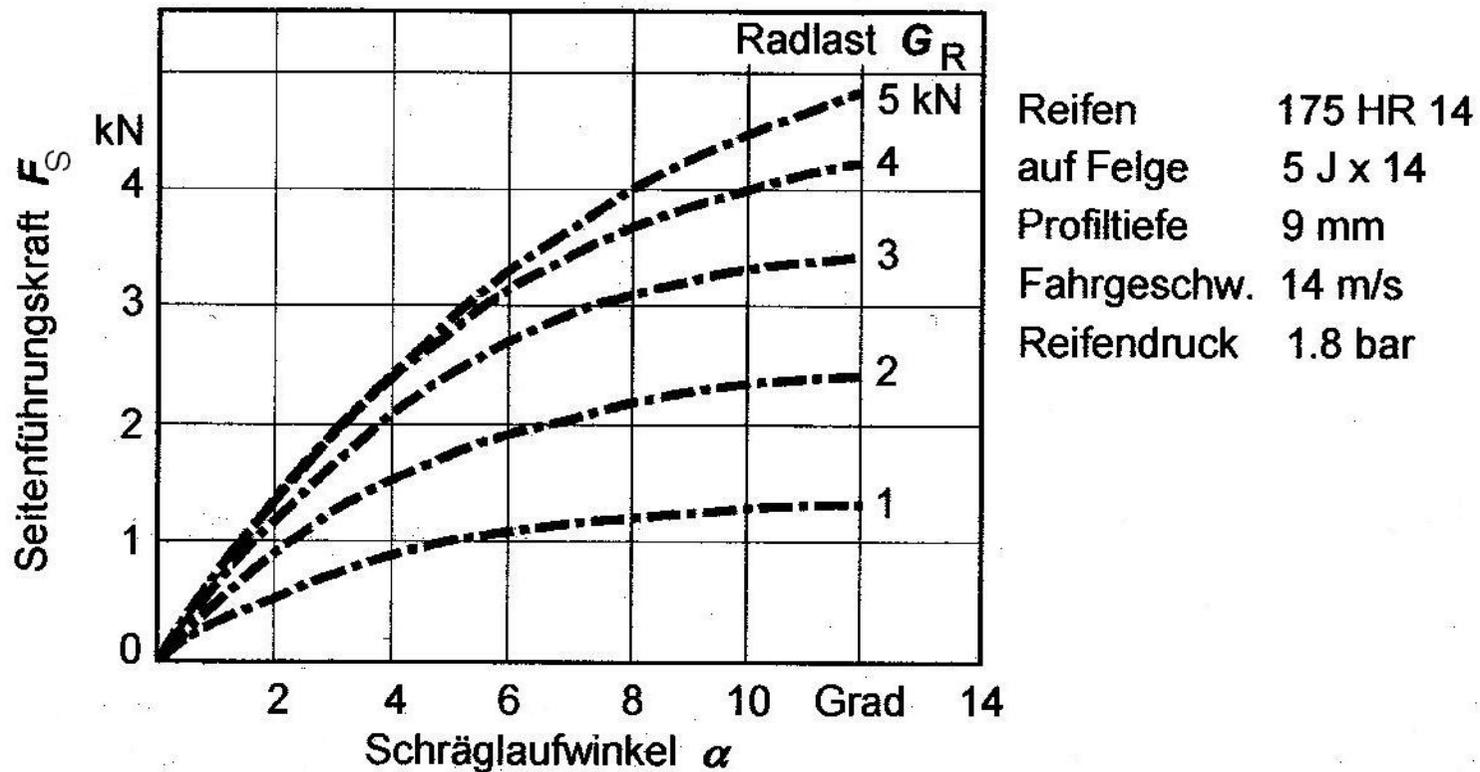
---

Die Spur eines Fahrzeugs ist falsch eingestellt. Im Fahrbetrieb ergibt sich eine Gesamt-Vorspur von  $4^\circ$  ( $2^\circ$  auf jeder Seite). Die Radlast pro Vorderrad beträgt 250 kg und der Rollwiderstandsbeiwert hat einen Wert von 0,015. Um welchen Betrag erhöht sich der Rollwiderstand durch den Schräglauf?

Verwenden Sie das beigefügte Diagramm zur Lösung der Aufgabe.

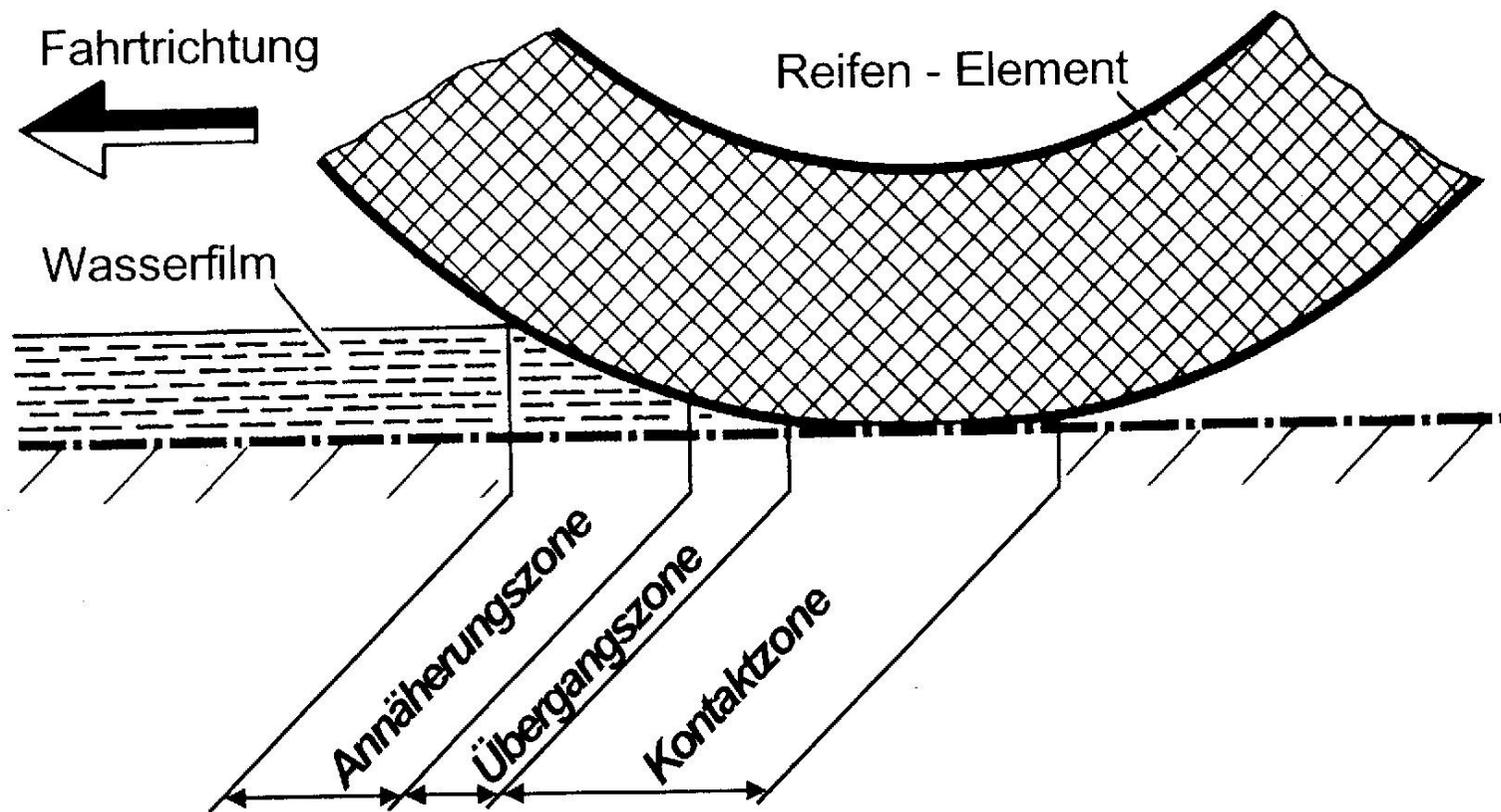
Leiten Sie eine linearisierte Gleichung für den Zusammenhang zwischen Rollwiderstandserhöhung und Schräglaufwinkel her.

# Seitenkraft in Abhängigkeit von Schräglaufwinkel und Radlast



# Schwallwiderstand

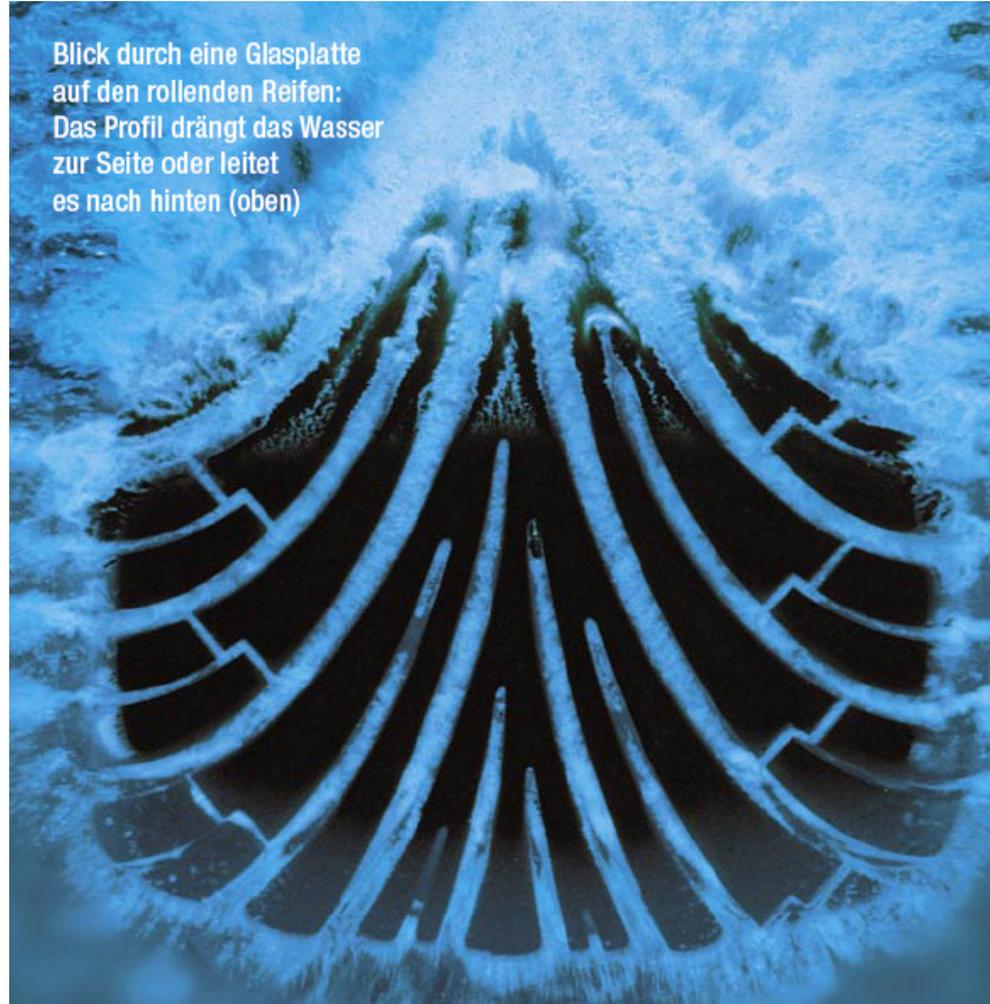
---



# Wasserverdrängung

---

Blick durch eine Glasplatte  
auf den rollenden Reifen:  
Das Profil drängt das Wasser  
zur Seite oder leitet  
es nach hinten (oben)



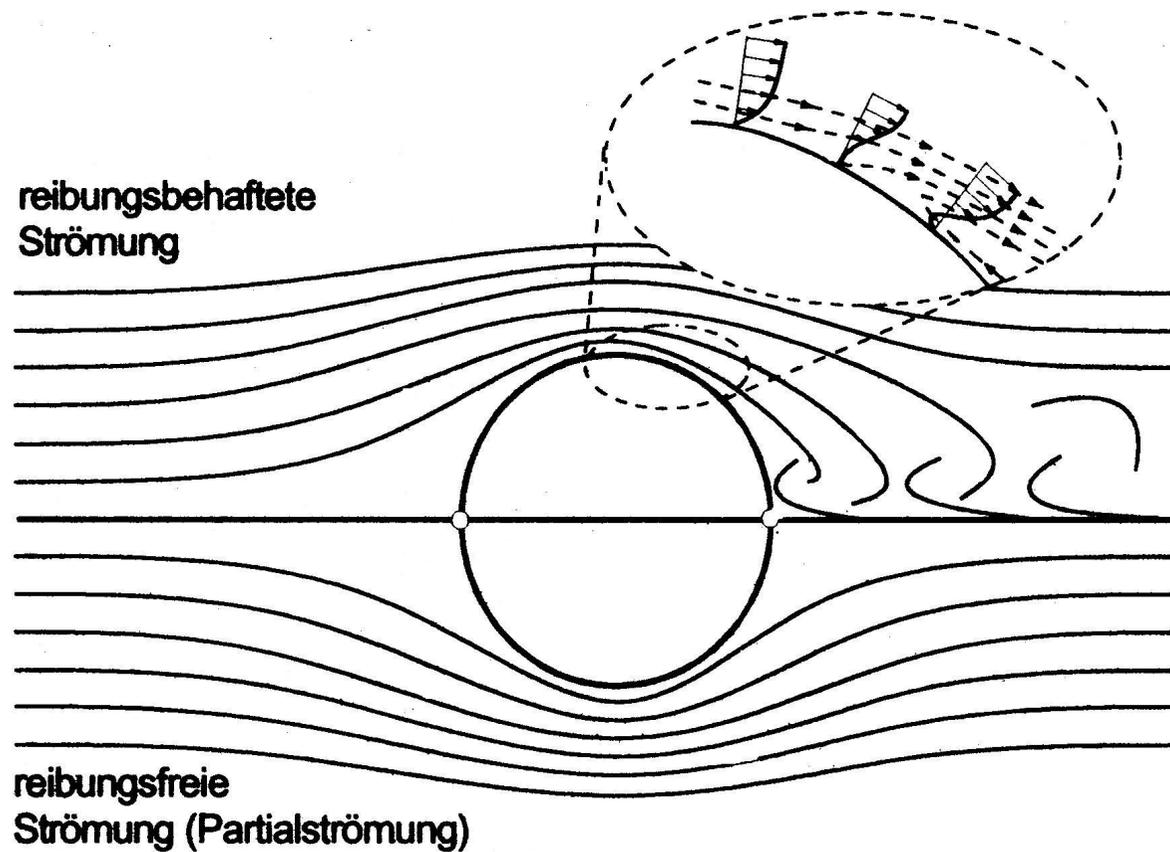
## 2.2 Luftwiderstand

---

- Druckwiderstand
- Reibungswiderstand
- induzierter Widerstand
- innerer Widerstand

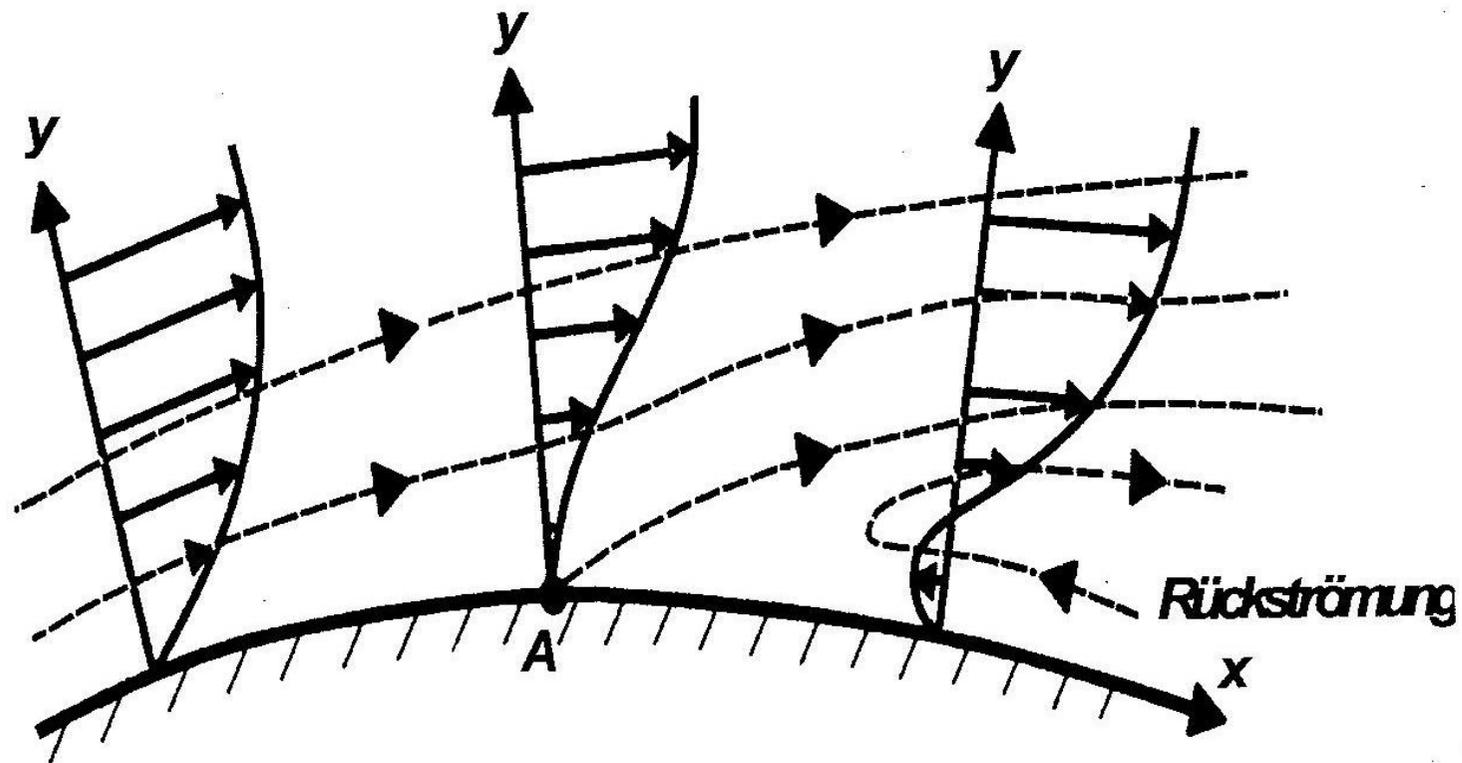
# Reibungsbehaftete und reibungsfreie Zylinderumströmung

---



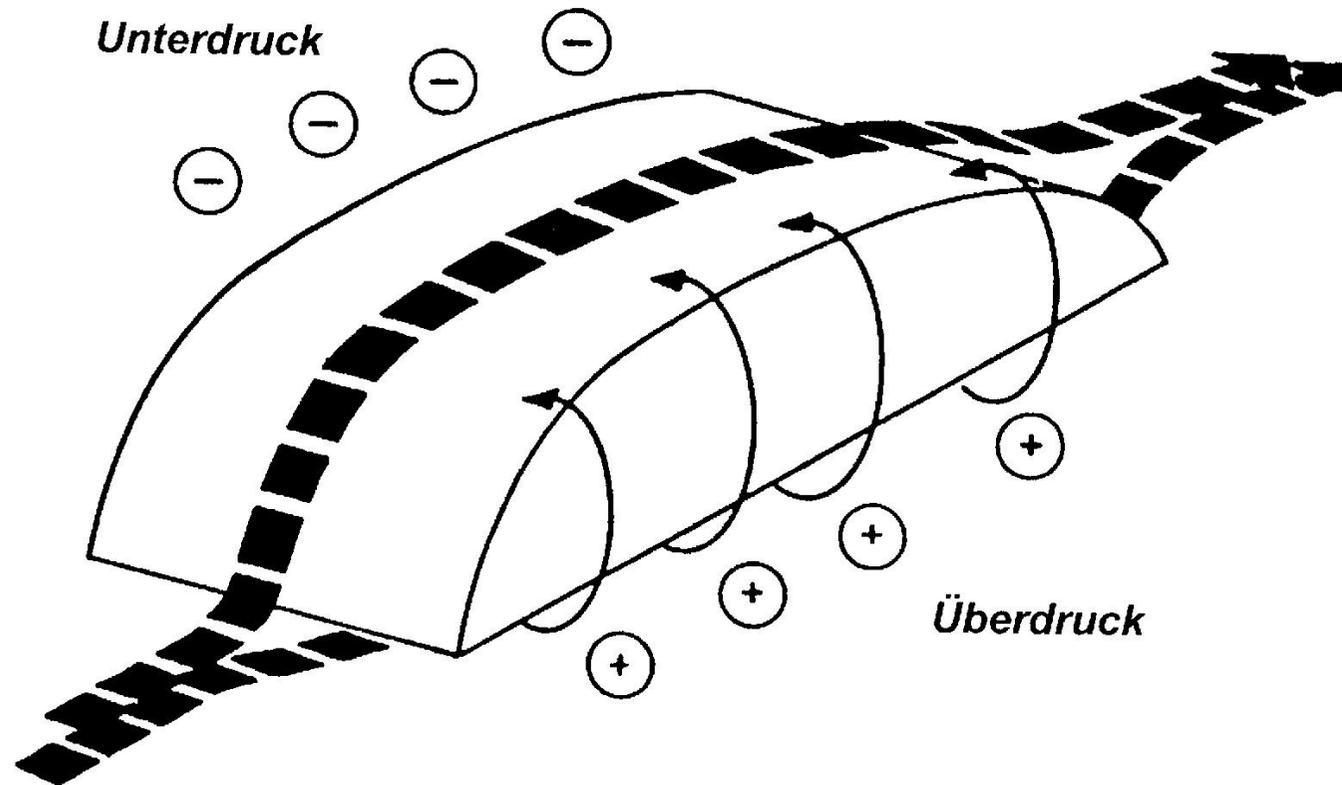
# Ablösung einer Strömung

---



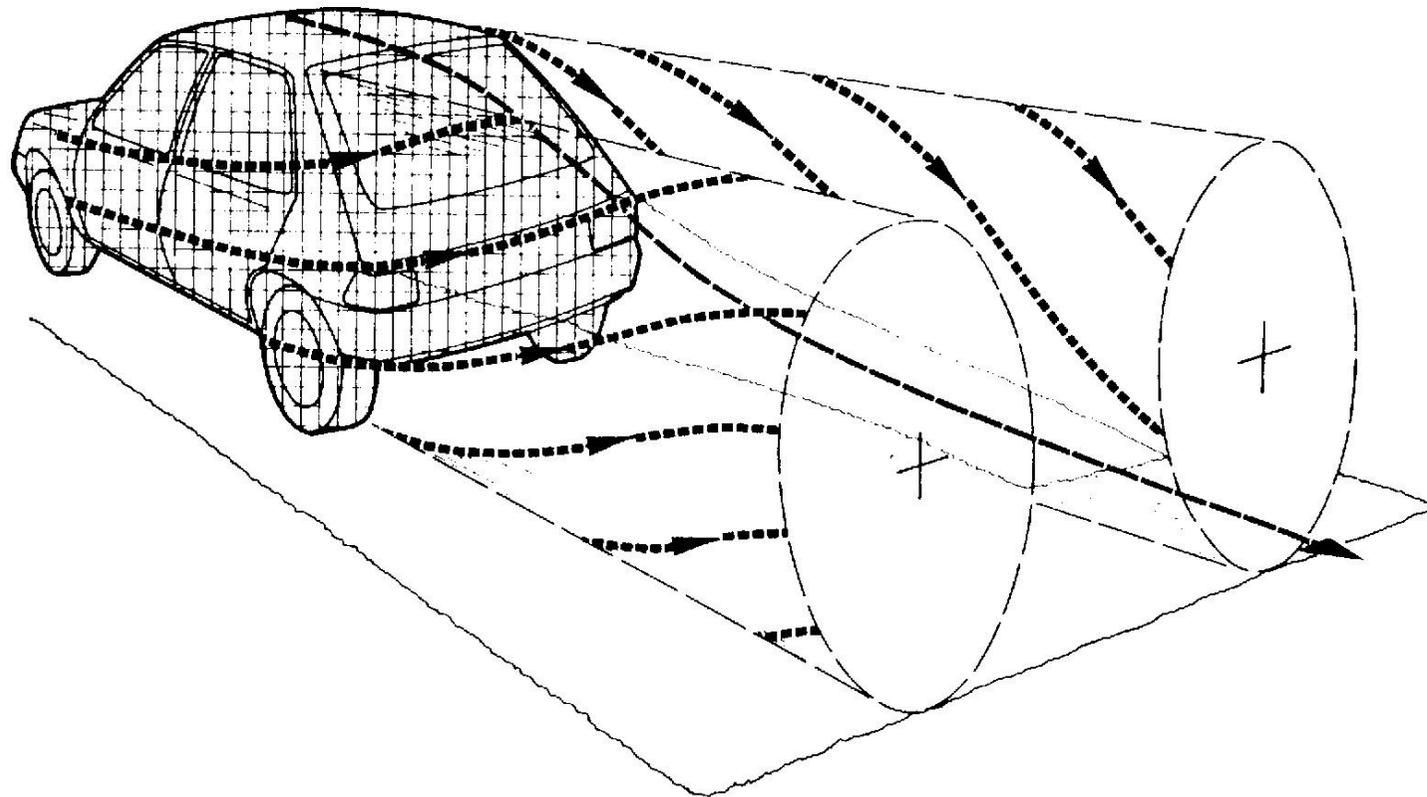
# Induzierter Luftwiderstand

---



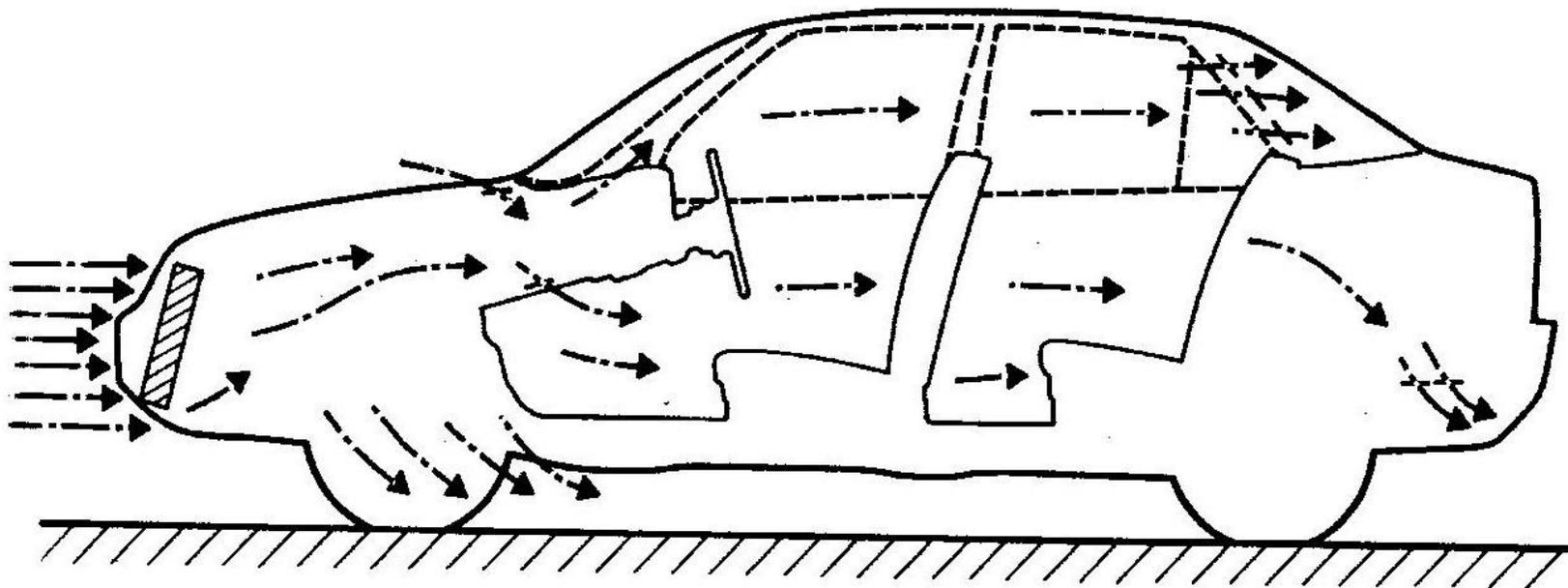
# Randwirbel infolge induzierten Widerstandes

---



# Fahrzeugdurchströmung

---



# Berechnung des Luftwiderstandes

---

$$\text{Luftwiderstand } F_L = c_w \cdot A \cdot \frac{\rho_L}{2} \cdot v_F^2$$

$c_w$  = Luftwiderstandsbeiwert

$A$  = projizierte Fahrzeugquerschnitts-  
fläche

$\rho_L$  = Dichte der Luft

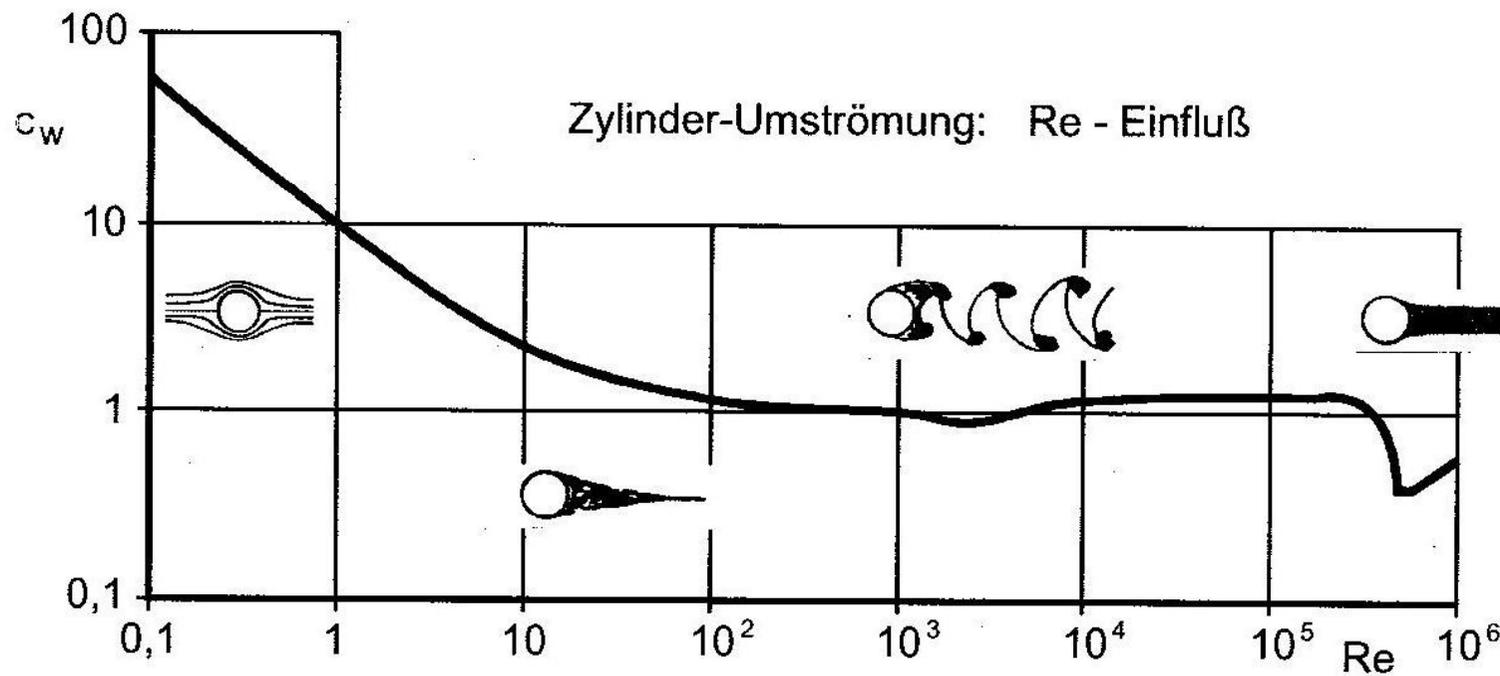
# Luftwiderstandsbeiwerte im Vergleich

---

| Objekt                     | $C_w$ -Wert |
|----------------------------|-------------|
| Kugel                      | 0,45        |
| Halbkugel                  | 0,34        |
| Tragflügel eines Flugzeugs | 0,08        |
| VW-Käfer                   | 0,48        |
| VW-Golf                    | 0,33        |
| Audi A2                    | 0,25        |
| Formel 1 Fahrzeug          | ca. 1,2     |

# Zylinder-Umströmung in Abhängigkeit von der Reynoldszahl

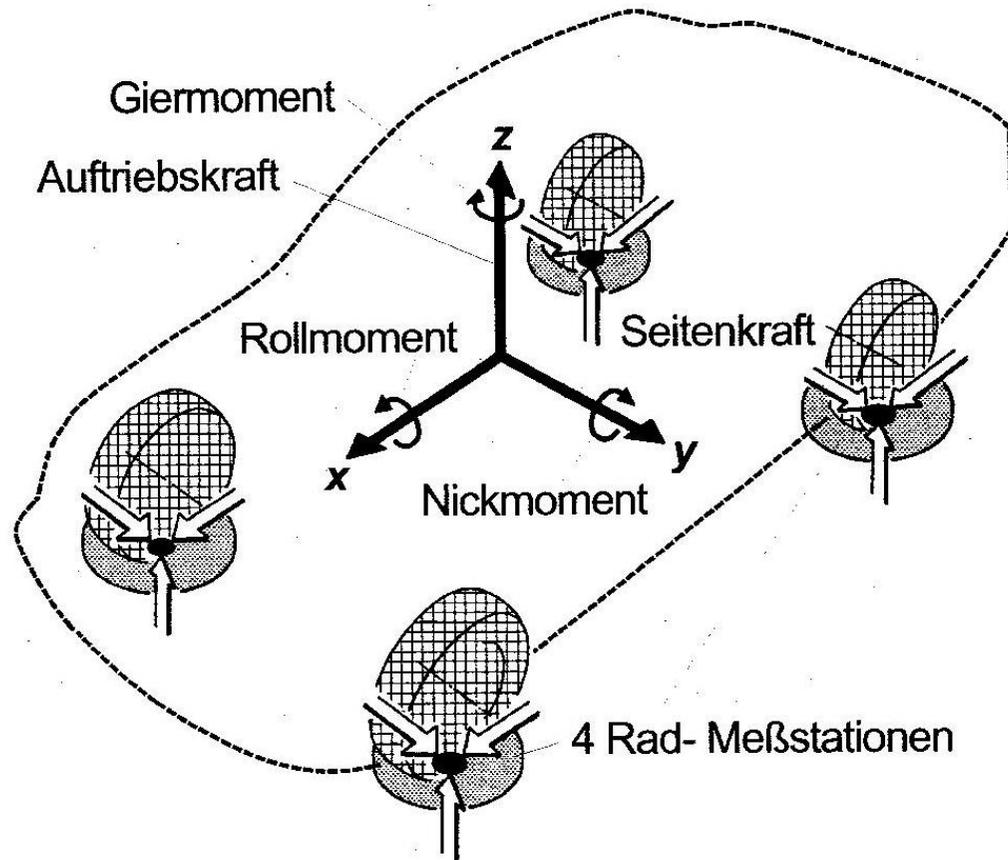
---



Quelle: ika

# Messung aerodynamischer Kräfte

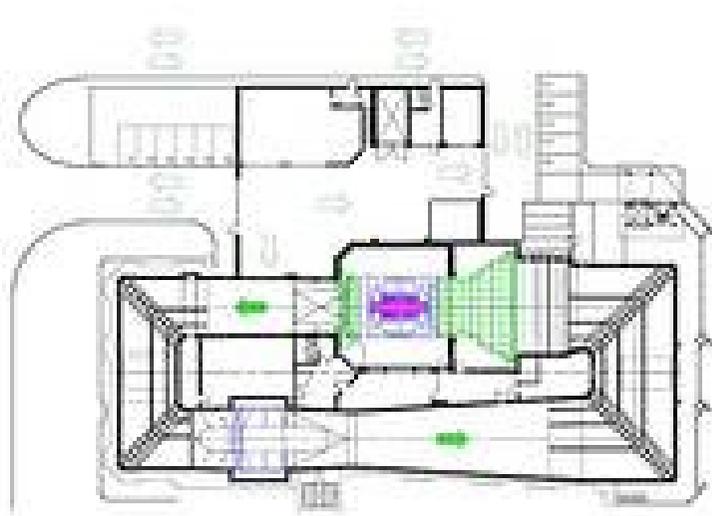
---



Quelle: ika

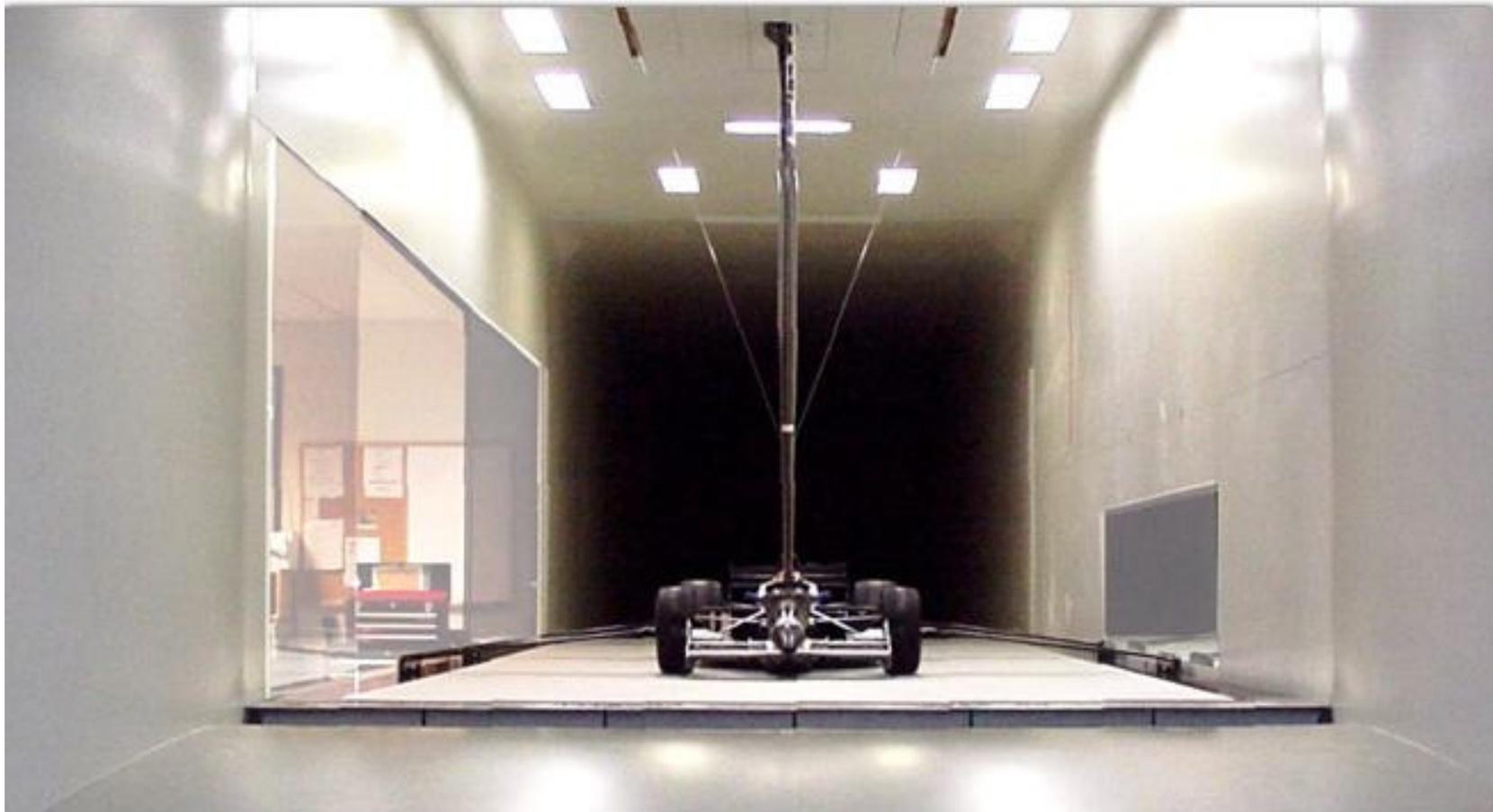
# Windkanal der Universität Stuttgart

---



# Modellwindkanal der Firma Swift

---



# Aerodynamische Simulationen (CFD)

---



Quelle: ATZ

# Übungsaufgabe

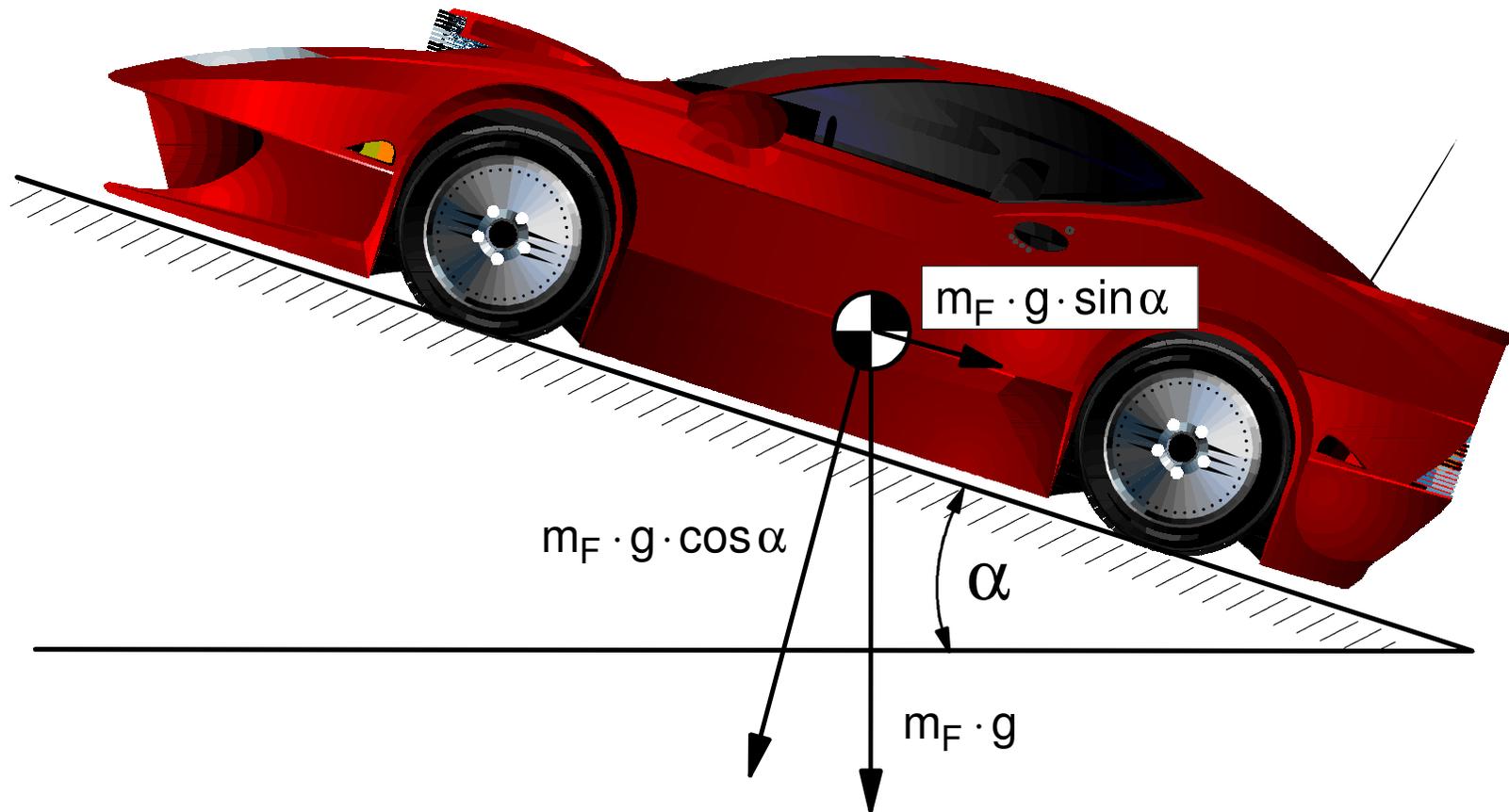
---

Berechnen Sie für ein Fahrzeug mit den folgenden Daten den Rollwiderstand und den Luftwiderstand in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit. Stellen Sie den Luftwiderstand in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit grafisch dar. Bei welcher Geschwindigkeit sind Luft- und Rollwiderstand gleich groß?

|                            |          |   |                       |
|----------------------------|----------|---|-----------------------|
| Fahrzeugmasse              | $m_F$    | = | 1200 kg               |
| Rollwiderstandsbeiwert     | $f_R$    | = | 0,015                 |
| Luftwiderstandsbeiwert     | $c_w$    | = | 0,33                  |
| Projizierte Fahrzeugfläche | $A$      | = | 2,15 m <sup>2</sup>   |
| Dichte der Luft            | $\rho_L$ | = | 1,2 kg/m <sup>3</sup> |

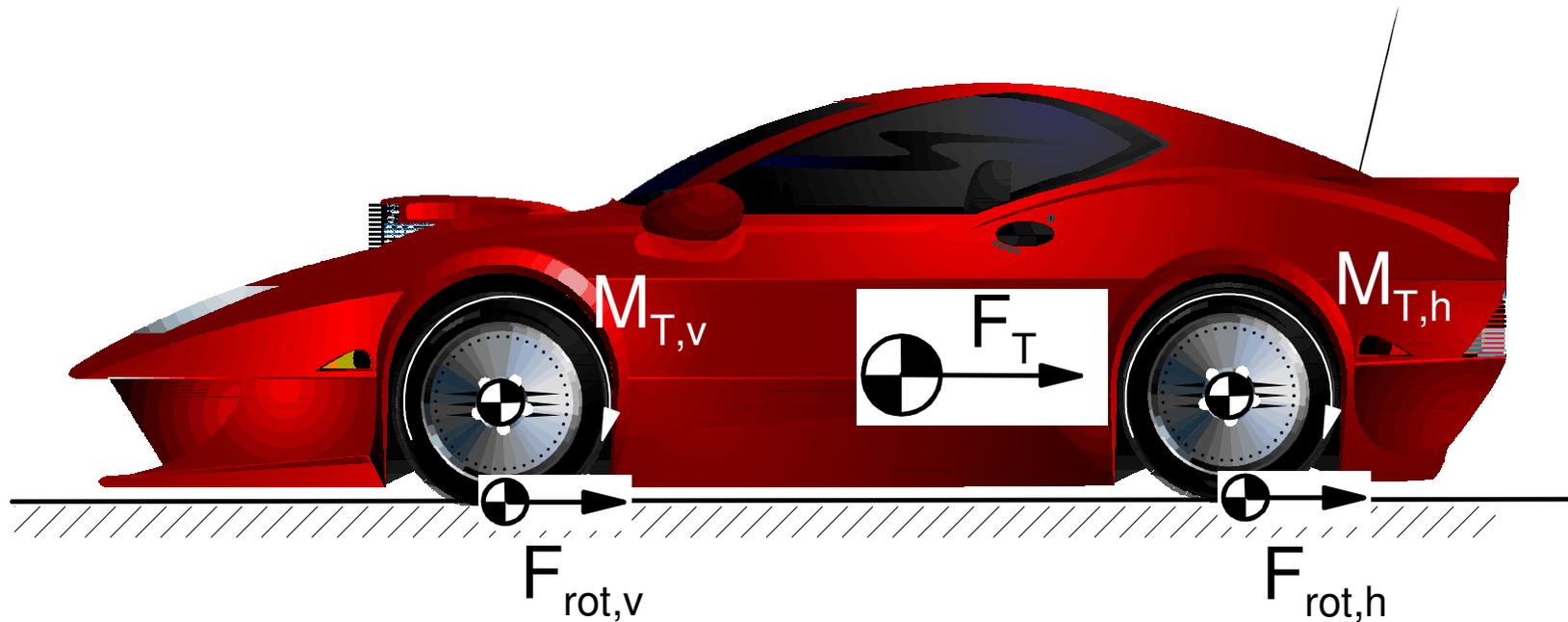
## 2.3 Steigungswiderstand

---



## 2.4 Beschleunigungswiderstand

---



# Massenträgheitskräfte resultierend aus rotierenden Massen

---

aus rotierenden Massen resultierende  
Trägheitskraft

$$F_{\text{rot}} = \frac{-M_T}{r_{\text{dyn}}} = \frac{J_{\text{red}} \cdot \ddot{\phi}}{r_{\text{dyn}}}$$

$r_{\text{dyn}}$  = dynamischer Rollradius

$v_F$  = Fahrzeuggeschwindigkeit

$\ddot{\phi}$  = Winkelbeschleunigung

# Reduziertes Massenträgheitsmoment

---

$$J_{\text{red}} = J_{\text{R}} + i_{\text{sek}}^2 \cdot J_{\text{Antr}} + i_{\text{sek}}^2 \cdot i_{\text{g}}^2 \cdot (J_{\text{mot}} + J_{\text{K}} + J_{\text{g}})$$

$J_{\text{R}}$  = Massenträgheitsmoment aller Räder

$i_{\text{sek}}$  = Sekundärübersetzung

$J_{\text{Antr}}$  = Massenträgheitsmoment des Achsantriebs

$i_{\text{g}}$  = Gangübersetzung

$J_{\text{mot}}$  = Massenträgheitsmoment des Motors

$J_{\text{K}}$  = Massenträgheitsmoment der Kupplung

$J_{\text{g}}$  = Massenträgheitsmoment des Getriebes für den entsprechenden Gang

# Reduzierte Fahrzeugmasse und Massenfaktor

---

reduzierte Fahrzeugmasse

$$m_{F,red} = m_F + \frac{J_{red}}{r_{dyn}^2}$$

gangabhängiger Massenfaktor

$$e_i = \frac{m_{F,red,i}}{m_F} = 1 + \frac{J_{red,i}}{m_F \cdot r_{dyn}^2}$$

# Massenfaktoren

---

|                          | 1.Gang | 2.Gang | 3.Gang | 4.Gang | 5.Gang |
|--------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Kleinwagen<br>(Beispiel) | 1,32   | 1,15   | 1,10   | 1,07   | 1,06   |
| Omnibus<br>(Beispiel)    | 1,61   | 1,18   | 1,08   | 1,06   | 1,03   |

# Übungsaufgabe

---

Berechnen Sie für ein Fahrzeug mit den nachfolgenden Daten für jeden Gang die reduzierte Fahrzeugmasse und den Massenfaktor. Die Massenträgheitsmomente von Getriebe, Antriebswellen und Kupplung können vernachlässigt werden.

|                                   |  |
|-----------------------------------|--|
| Fahrzeugmasse                     | $m_F = 1200 \text{ kg}$                            |
| Massenträgheitsmoment pro Rad     | $J_r = 1,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$            |
| Massenträgheitsmoment Kurbeltrieb | $J_{\text{mot}} = 0,1 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ |
| Dynamischer Rollradius            | $r_{\text{dyn}} = 0,315 \text{ m}$                 |
| Achsübersetzung                   | $i_{\text{sek}} = 3,60$                            |
| Übersetzungen 1. bis 6. Gang      | 2,90; 2,33; 1,83; 1,50; 1,27; 1,14                 |

# Allgemeine Fahrwiderstandsgleichung

---

$$\begin{aligned} F_W = & (e_i \cdot m_F + m_{zu}) \cdot a_F \\ & + f_R \cdot (m_F + m_{zu}) \cdot g \cdot \cos(\alpha) \\ & + (m_F + m_{zu}) \cdot g \cdot \sin(\alpha) \\ & + c_w \cdot A \cdot \frac{\rho_L}{2} \cdot (v_F - v_w)^2 \end{aligned}$$

$m_{zu}$  = Zuladungsmasse

$a_F$  = Fahrzeugbeschleunigung

$v_w$  = Windgeschwindigkeit