

# Fahrzeugregelung

## Antrieb und Antriebsregelung



**Prof. Dr.-Ing. Steffen Müller**

**M. Sc. Osama Al-Saidi**

**Fachgebiet Kraftfahrzeuge • Technische Universität Berlin**

---

# Einleitung

## Motivation

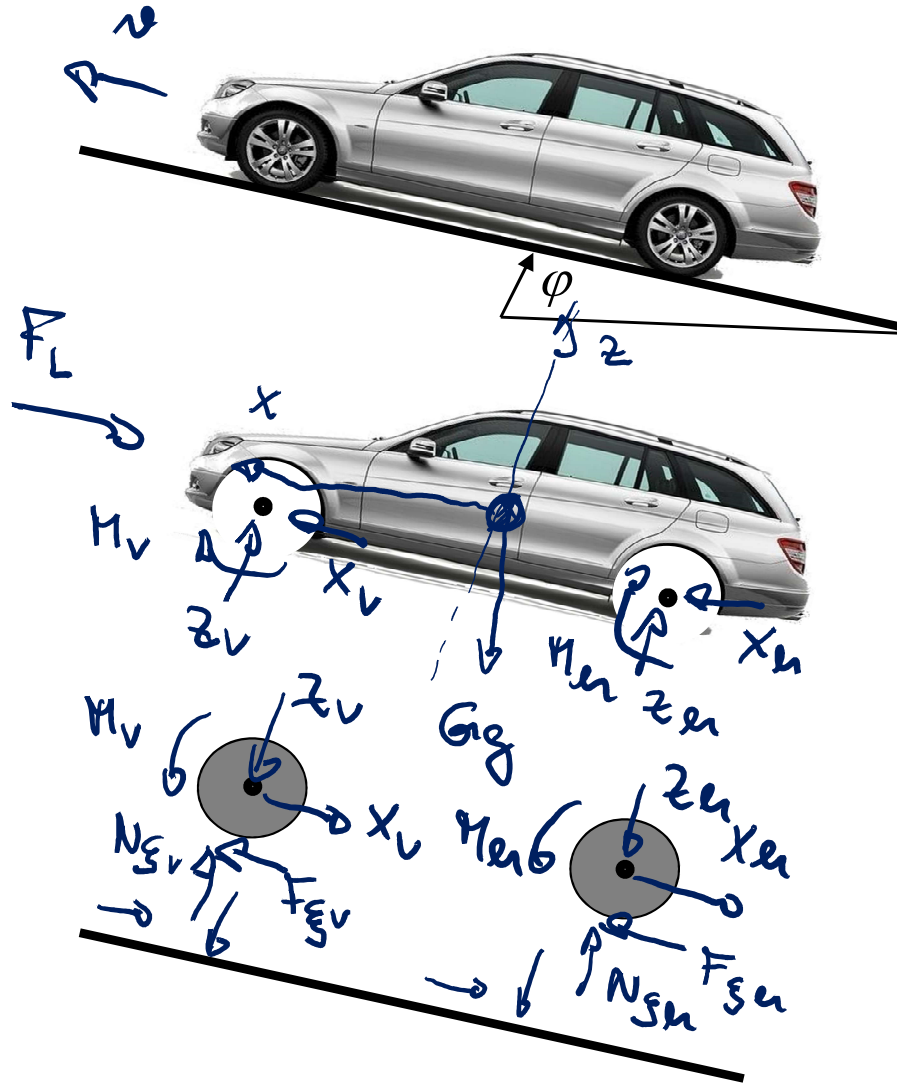
Das für den Antrieb **notwendige Drehmoment** an den Antriebsrädern und die **erforderliche Leistung** werden durch die **Fahrwiderstände** bestimmt. Diese sind bei Geradeausfahrt

- Rollwiderstand
- Luftwiderstand
- Steigungswiderstand
- Beschleunigungswiderstand

Die **maximal mögliche Leistung** wird **durch** den **Kraftschluss** an den Antriebsrädern **begrenzt** → Antriebsregelung.

# Antrieb

## Bewegungsgleichung eines 2-achsigen Fahrzeugs



SPS für den Aufbau

$$m \ddot{u}_x = X_v + X_h - F_L - G_g \sin \varphi \quad (1)$$

$$0 = G_g \cos \varphi + N_{g_v} + N_{g_h} \quad (1a)$$

SPS für die vordere u. hintere Achse

$$m_v \ddot{u}_{x_v} = -X_v + F_{g_v} \quad (2)$$

$$m_h \ddot{u}_{x_h} = -X_h + F_{g_h} \quad (3)$$

DS für die vordere u. hintere Achse

$$J_v \ddot{\varphi}_v = M_v - F_{g_v} r - N_{g_v} e_v \quad (4)$$

$$J_h \ddot{\varphi}_h = M_h - F_{g_h} r - N_{g_h} e_h \quad (5)$$

# Antrieb

## Grundgleichung für die Antriebskraft

Mit  $\ddot{u}_x = \ddot{u}_{xv} = \ddot{u}_{xe}$

ergibt sich aus (1) mit (2) und (3)

$$(m + m_v + m_e) \ddot{u}_x = -F_L - G_y \sin \varphi + F_{Fv} + F_{Fe} \quad (6)$$

Aus (4) und (5) folgt

$$-F_{Fv} = \frac{1}{r} (J_v \ddot{\varphi}_v - M_v + N_{Fv} e_v)$$

$$-F_{Fe} = \frac{1}{r} (J_e \ddot{\varphi}_e - M_e + N_{Fe} e_e)$$

Für  $\dot{\varphi}_{v,e}$  kann man schreiben

$$\dot{\varphi}_{v,e} = \frac{\dot{u}_x}{R^*} \Rightarrow \ddot{\varphi}_{v,e} = \frac{\ddot{u}_x}{R^*} \approx \frac{\ddot{u}_x}{r_{dyn}} \approx \frac{\ddot{u}_x}{r}$$

$\in (0, r_{dyn}]$

Hiermit ergibt sich mit (7) und (8) für (6)

$$(m + m_v + m_e + \frac{J_v}{r^2} + \frac{J_e}{r^2}) \ddot{u}_x = \text{Beschleunigungswiderstand } F_B$$

$$- G_y \sin \varphi \quad \text{Steigungswiderstand } F_{St}$$

$$+ \frac{M_v}{r} + \frac{M_e}{r} \quad \text{Antriebskraft } F_A$$

$$- N_{Fv} \frac{e_v}{r} - N_{Fe} \frac{e_e}{r} \quad \text{Rollwiderstand } F_R$$

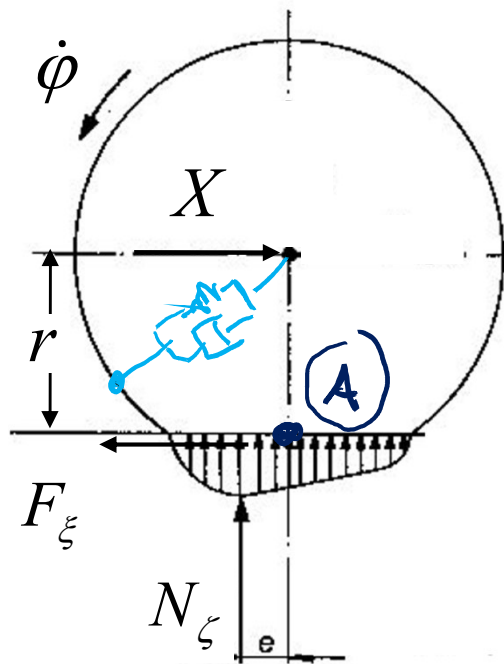
$$- F_L \quad \text{Luftwiderstand } F_L$$

# Antrieb

## Rollwiderstand

### Physikalische Ursache

Formänderungsarbeit im Reifen beim Abrollen auf ebener Fahrbahn.  
Bei weichem Untergrund geht auch die Bodenverformung ein.



Newton-Gesetze für  $\dot{\varphi} = \text{const}$  und  $M = 0$  um (A)

$$\sum M^{(A)}: N_{\xi} e + X r = 0 \Rightarrow -X = \frac{e}{r} N_{\xi}$$

Def. Rollwiderstandskraft  $F_R$

$$F_R = k_R N_{\xi} \quad \text{mit } k_R = \frac{e}{r} \text{ „Rollwiderstands-} \\ \text{zahl“}$$

Für  $e_v \approx e_h$  gilt

$$-N_{\xi v} \frac{e_v}{r} - N_{\xi h} \frac{e_h}{r} = -(N_{\xi v} + N_{\xi h}) k_R = -G \cos \varphi k_R$$

$\approx 1$  für  $\varphi < 30^\circ$

# Antrieb

## Rollwiderstandszahl

### Abhängigkeit von Reifenluftdruck und Hochkraft

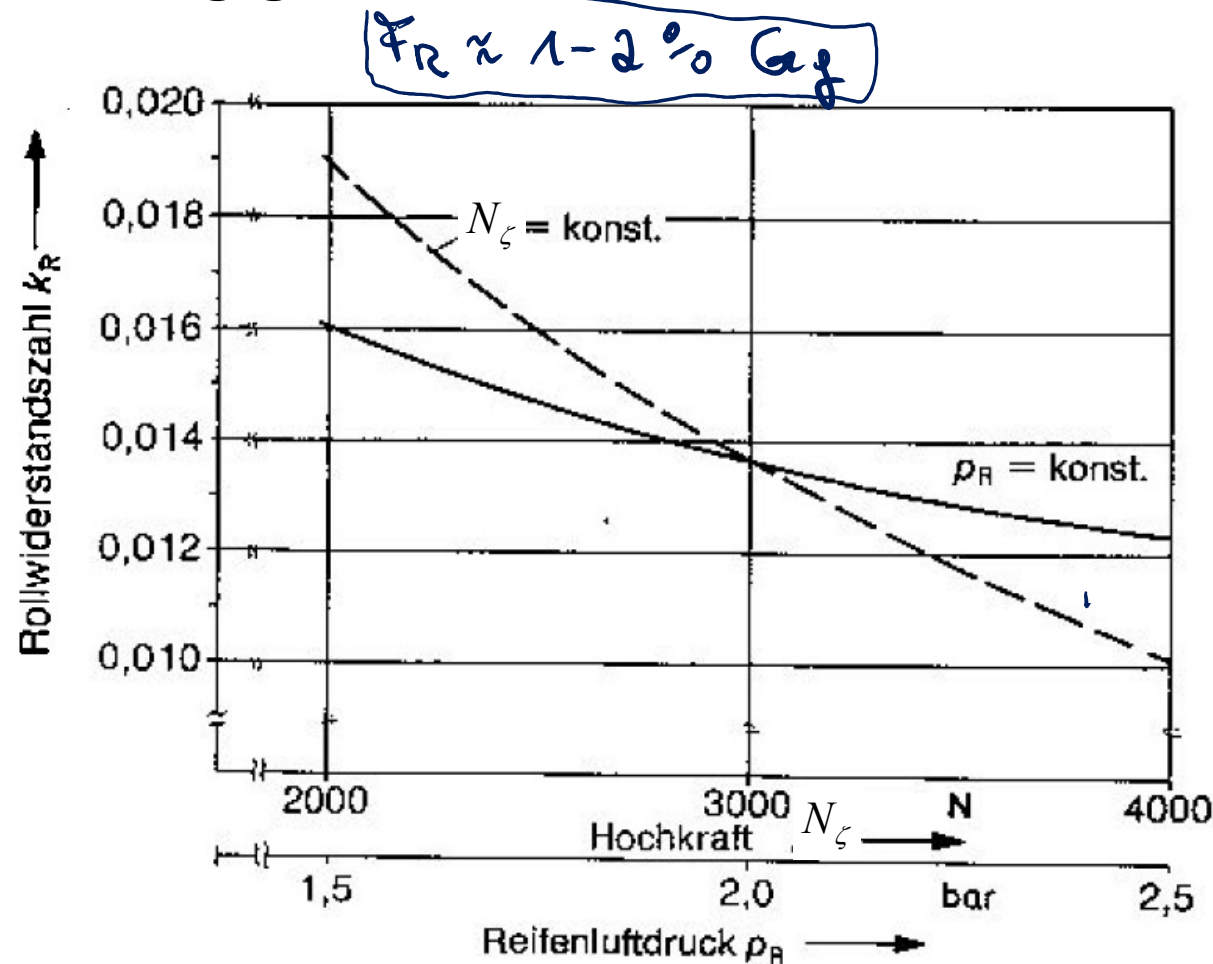


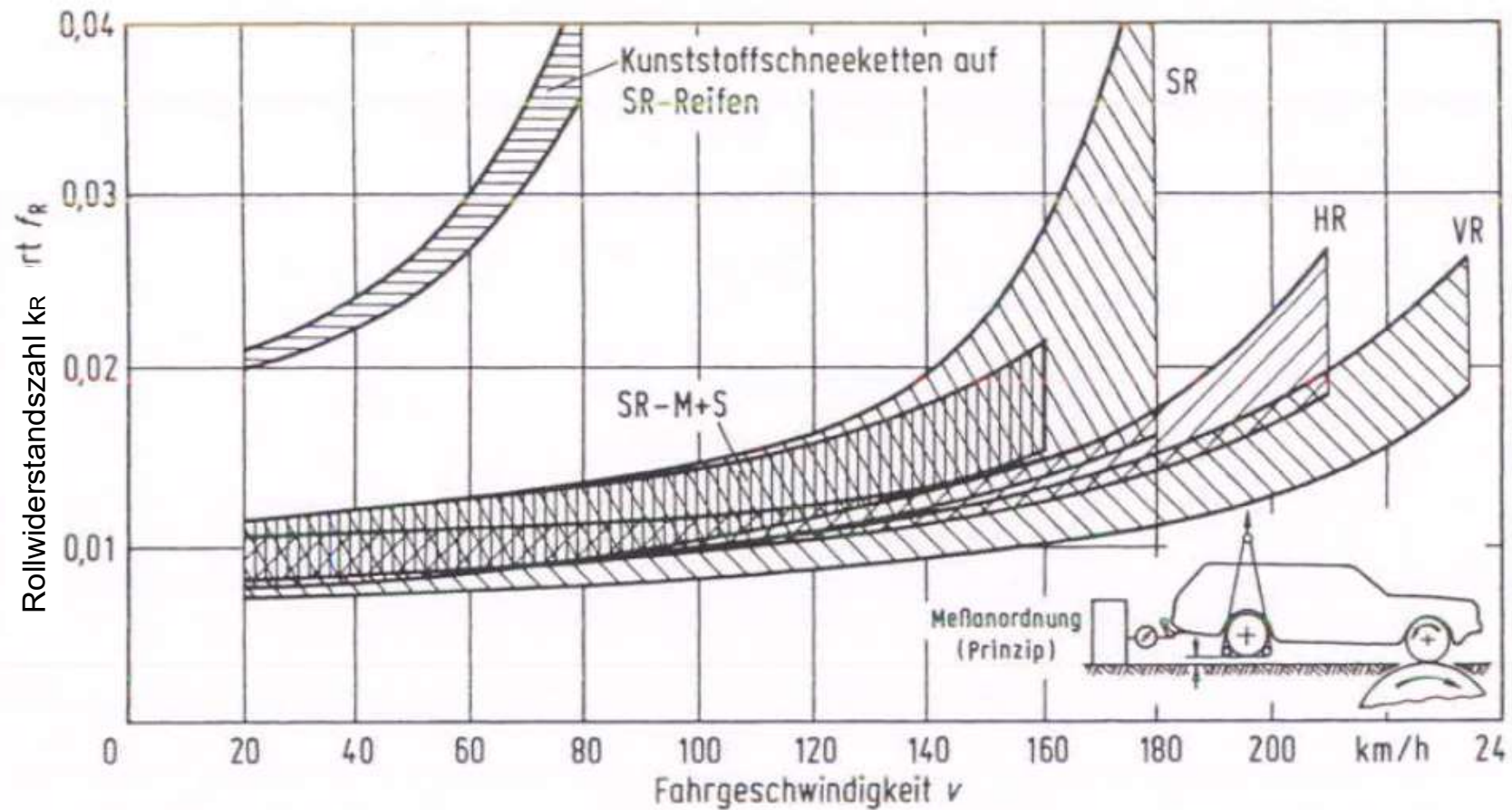
Bild 2.2 Abhängigkeit der Rollwiderstandszahl  $k_R$  vom Reifenluftdruck  $p_R$  und von der Hochkraft  $F_z$  für die Reifengröße 145 R 13 75 S



# Antrieb

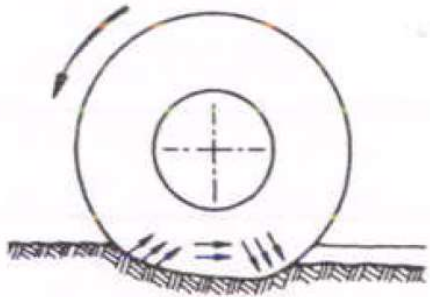
## Rollwiderstandszahl

### Abhängigkeit von Fahrgeschwindigkeit



# Antrieb

## Rollwiderstandszahl bei weichem Untergrund



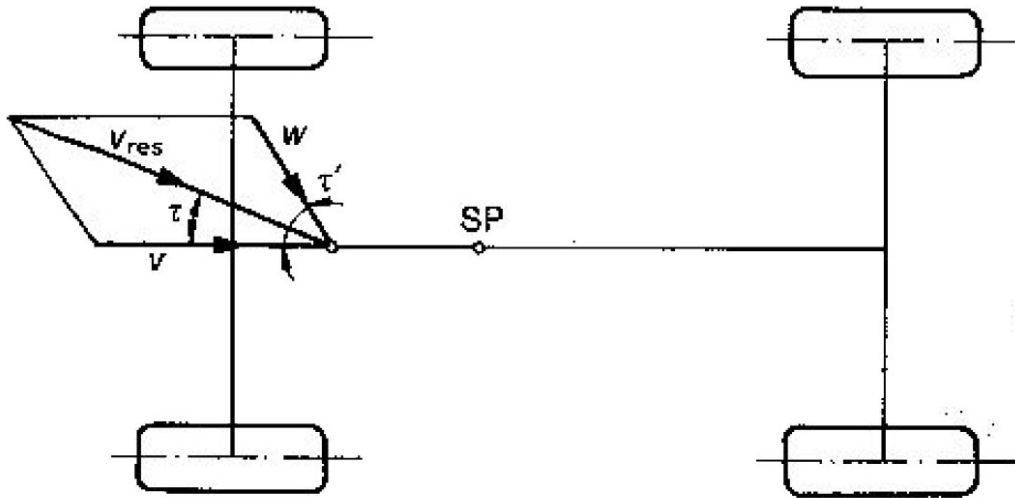
**Tabelle 4.1.** Rollwiderstandsbeiwerte  $k_R$  von Baumaschinen- und Ackerschlepperreifen auf verschiedenem Untergrund. (Kühn, G.: Der gleislose Erdbau. Berlin, Göttingen, Heidelberg: Springer 1956)

Fahrbahn	Kennzeichnung	$k_R$
fester Erd- und Feldweg, Grasnarbe	praktisch kein Einsinken des Reifens, kaum bleibende Verformung des Untergrundes	0,05
nasser, aufgeweichter, schwerer Boden	starkes Einsinken, starke Verformung	0,35
weicher, schwammiger Untergrund		1,9



# Antrieb

## Luftwiderstand



Ohne Herleitung

$$v_{res}^2 = w^2 + v^2 + 2wv \cos \tau$$

$$\cos \tau = \frac{(v^2 + v_{res}^2 - w^2)}{2v v_{res}}$$

Für den Luftwiderstand gilt

$$F_L = \underbrace{c_w}_{\text{Luftwiderstands-}} \underbrace{\frac{\rho}{2}}_{\text{beiwert } (\tau=0)} \underbrace{A}_{\text{Proportions-}} \underbrace{v^2}_{\text{bzw. Stirnfläche}} \text{ bzw. } \underbrace{c_T}_{\text{Tangentialkraft-}} \underbrace{\frac{\rho}{2}}_{\text{beiwert}} \underbrace{A_f}_{\text{bzw. Stirnfläche}} v_{res}^2$$

Luftwiderstands-  
beiwert ( $\tau=0$ ) | Tangentialkraft-  
beiwert

Proportions-  
bzw. Stirnfläche

Luftdichte  $\rho$ :

Funktion von Luftdruck und  
Temperatur, Anhaltswert für  $T=20^\circ\text{C}$

$$\rho = 1,22 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

# Antrieb

## Luftwiderstandsbeiwerte $c_w$ - Beispiele

Fahrzeugtyp	Aufbau	$c_w$	$A \text{ [m}^2\text{]}$	$c_w \cdot A \text{ [m}^2\text{]}$
Alfa Romeo 33 16 V	KL	0,34	1,74	0,592
Audi 80 1,8 l	Li	0,29	1,91	0,554
Audi 90 Quattro	Li	0,31	1,91	0,592
Audi 100	Li	0,30	2,05	0,615
Audi 200	Li	0,34	2,06	0,700
BMW 316i	Li	0,29	1,94	0,563
BMW 320i/325i	Li	0,32	1,94	0,621
BMW M3	Li	0,33	1,89	0,624
BMW 318i/325i Cabrio	Ca	0,37	1,86	0,688
BMW 520i/525i	Li	0,31	2,07	0,642
BMW 535i/M5	Li	0,32	2,07	0,662
BMW 735i	Li	0,33	2,11	0,696
BMW Z1	Ro	0,36	1,83	0,659
BMW 850i	Co	0,29	2,07	0,600

# Antrieb

## Tangentialkraftbeiwerte $c_T$ - Beispiele

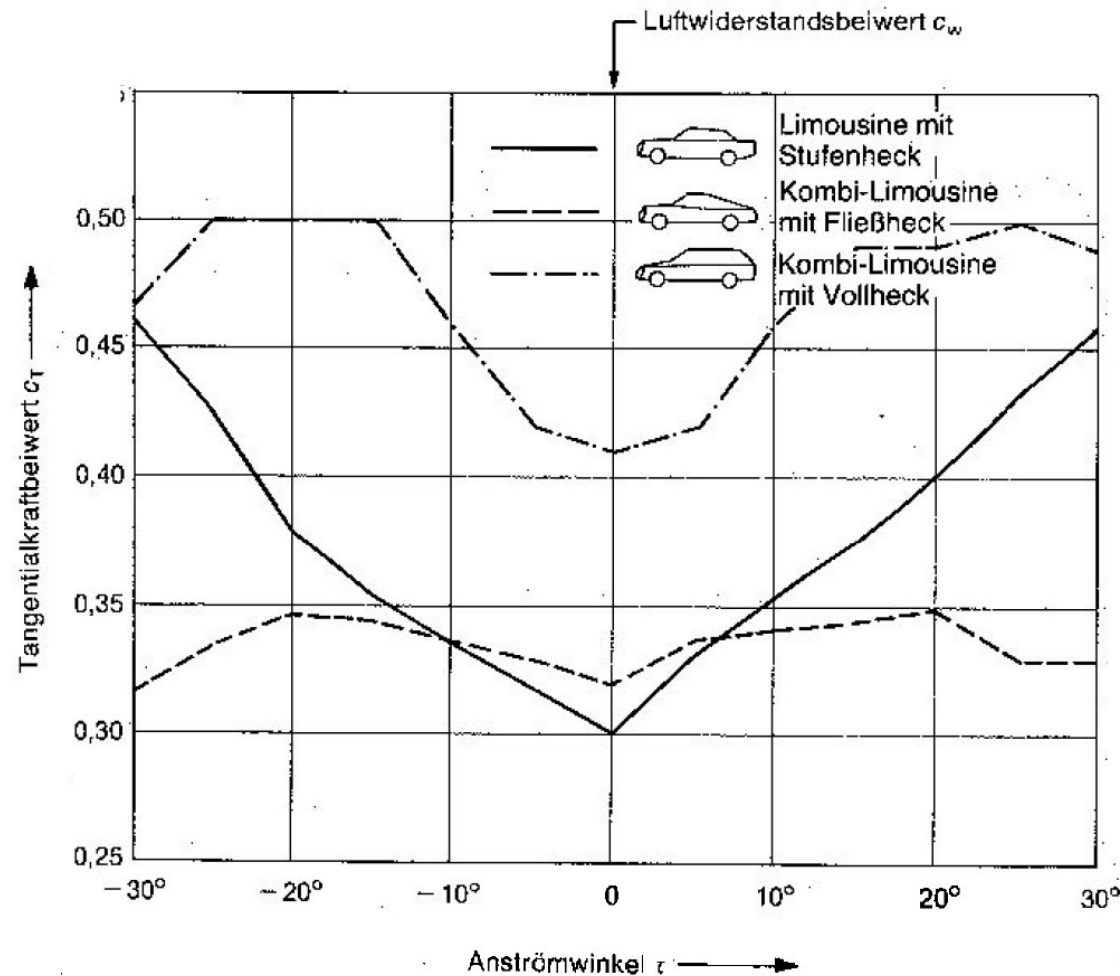
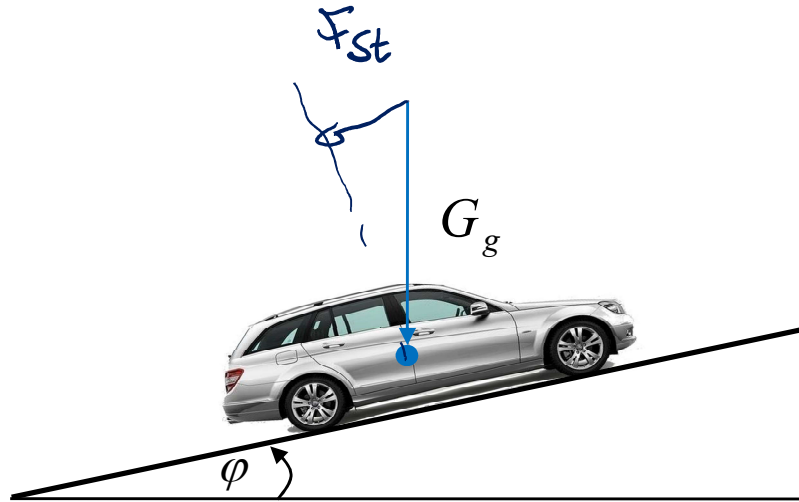


Bild 2.11 Verlauf des Tangentialkraftbeiwertes über dem Anströmwinkel für drei typische Fahrzeugkarosserieformen. Der  $c_w$ -Wert kann bei  $\tau = 0$  abgelesen werden.  $c_w = c_{T(\tau=0)}$  (Messungen im Mercedes-Benz-Windkanal.)

# Antrieb

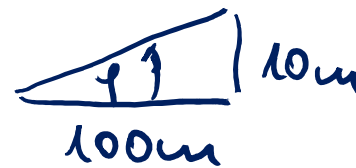
## Steigungswiderstand



Es gilt

$$F_{St} = G_g \sin \phi$$

Straßensteigungen werden in  
‰ angegeben



Steigung  $q$

$$q = \frac{10}{100} \text{ in } \text{‰} = \tan \phi$$

Für Steigungen bis 30‰, gilt hinreichend genau  
 $\tan \phi \approx \sin \phi$ . Somit

$$\boxed{F_{St} = G_g q} \quad \text{bis 30‰ Steigung}$$

# Antrieb

## Steigungswiderstand - Fahrbahnneigungen

1. Aus „Richtlinien für die Anlage von Straßen, Teil: Linienführung, RAS-L“ der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen 1995 (gilt für Neu-, Um- und Ausbau von Straßen)

Entwurfsgeschwindigkeit [km/h]	$q_{\max}$ [%] für anbaufreie Straßen	
	außerhalb bebauter Gebiete	im Vorfeld und innerhalb bebauter Gebiete
50	9,0	12,0
60	8,0	10,0
70	7,0	8,0
80	6,0	7,0
90	5,0	6,0
100	4,5	5,0
120	4,0	—

2. Höchste Steigung auf europäischen Alpenstraßen etwa 30 %



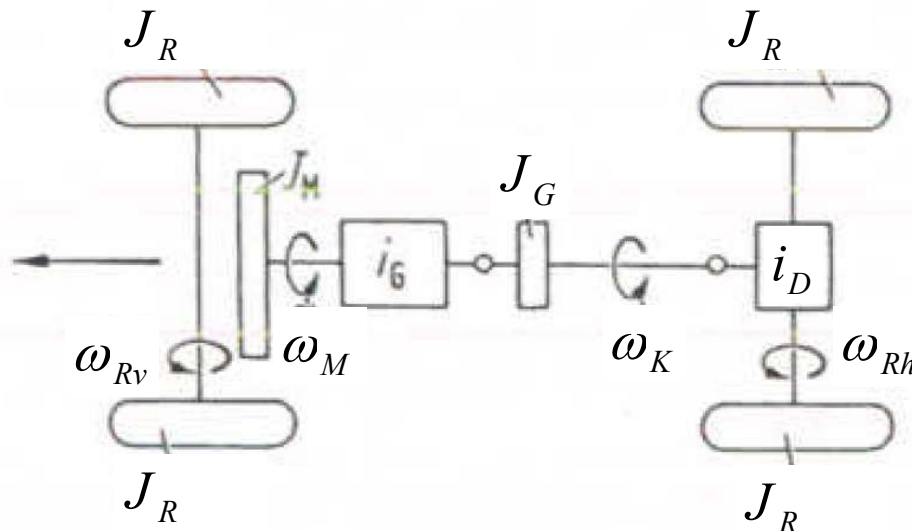
# Antrieb

## Beschleunigungswiderstand

*2 J<sub>R</sub> für Hinterradantrieb*

$$F_B = \left( m + m_v + m_h + \frac{J_v}{r^2} + \frac{J_h}{r^2} \right) \ddot{u}_x$$

### Übersetzungsverhältnisse am **Beispiel Hinterradantrieb**



*Es gilt*

$$\omega_H = i_D \omega_R \quad (\text{Differential})$$

$$\omega_H = i_G i_D \omega_R \quad (\text{Getriebe})$$

# Antrieb

## Beschleunigungswiderstand

bezogen auf das Rad/  
die Achse bzw.

Für  $J_{er}$  gilt:  $J_{er} = 2 J_R + J_{GR} + J_{MR}$  „reduziertes Trägheitsmoment“

Mit Hilfe des Energiesatzes folgt

$$\frac{J_{GR}}{2} \omega_R^2 = \frac{J_G}{2} \omega_K^2 = \frac{J_G}{2} i_D^2 \omega_R^2$$

Analog folgt  $J_{MR} = J_M (i_G i_D)^2$

Summe

$$F_D = \frac{G_g}{g} \left( 1 + \underbrace{\frac{4 J_R + J_G i_D^2 + J_M (i_G i_D)^2}{m r^2}}_{k_{tr}} \right) \ddot{x}$$

# Antrieb

## Antriebskraft und Antriebsleistung

Zur Überwindung des Fahrwiderstandes ist folgende Antriebskraft nötig

$$F_A = k_R G_g + c_T A \frac{\rho}{2} v_{res}^2 + G_g \left( q + \frac{v_{un}^2}{g} \right)$$

bzw. folgendes Antriebsmoment (Hinterradantrieb)

$$M_h = F_A r$$

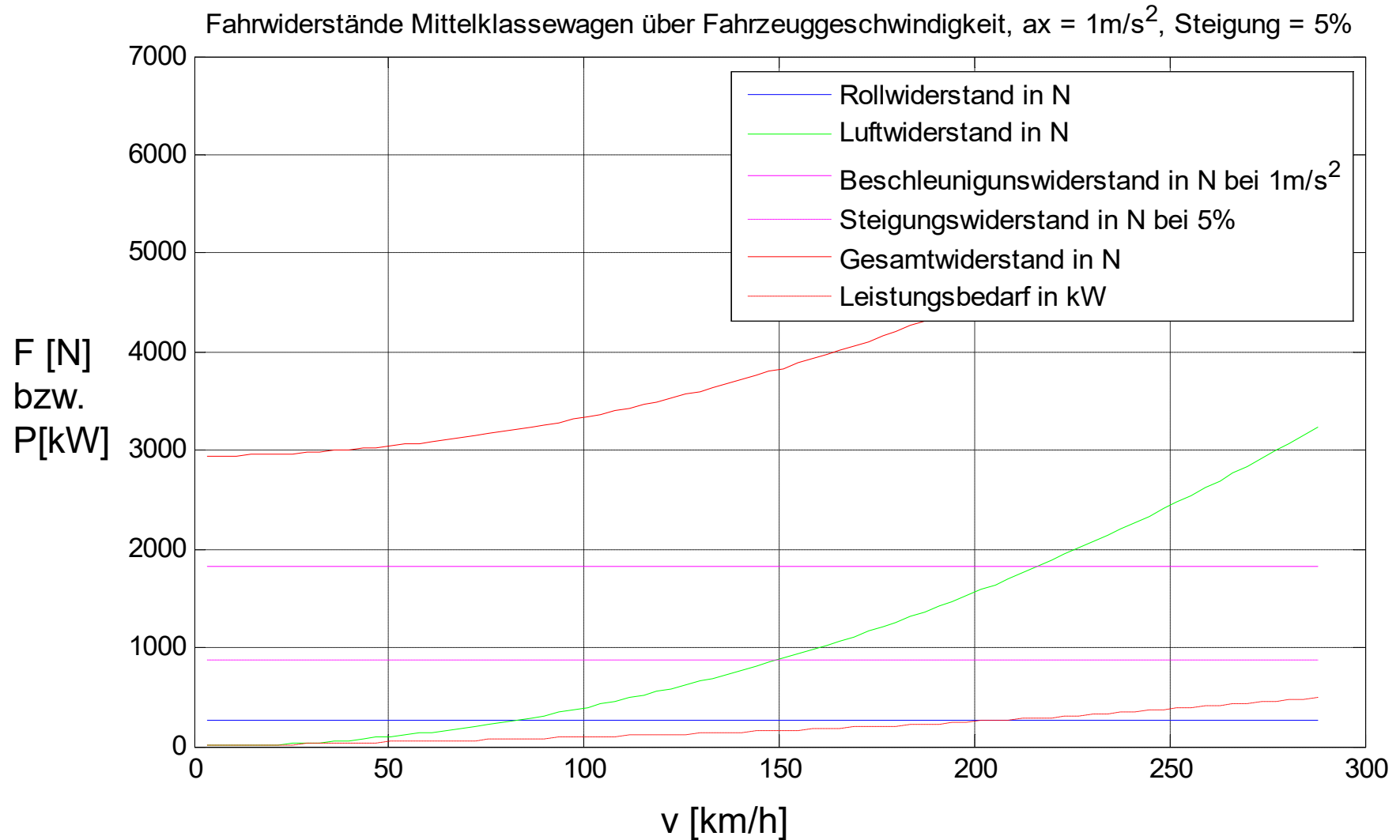
Für die notwendige Antriebsleistung, um das Fzg gegen die Fahrwiderstände mit einer Geschw.  $v$  zu bewegen, gilt

$$P_A = F_A v$$

gew. Geschw.  
Steigungs- und Besch.-reserve

# Antrieb

## Fahrwiderstände eines Mittelklassefahrzeuges



# **Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!**