

# Fahrdynamik

*Metin Ersoy, Christoph Elbers, Daniel Wegener, Jörn Lützow, Christian Bachmann und Christian Schimmel*

- 2.1 Fahrwiderstände und Energiebedarf – 55
- 2.2 Kraftübertragung zwischen Reifen und Fahrbahn – 77
- 2.3 Längsdynamik – 96
- 2.4 Vertikaldynamik – 99
- 2.5 Querdynamik – 124
- 2.6 Allgemeine Fahrdynamik – 161
- Literatur – 167

Die Fahrdynamik beschreibt die Bewegungen des Fahrzeugs im Raum sowie die auf das Fahrzeug einwirkenden Kräfte und Momente. Fahrzeugbewegungen wie Geradeaus-, Kurvenfahrten, Brems- und Beschleunigungsvorgänge sowie Vertikal-, Gier-, Nick- und Wankbewegungen werden durch entsprechende Wege, Geschwindigkeiten, Beschleunigungen, Winkel, Drehraten und Winkelbeschleunigungen beschrieben. Hinzu kommen die dabei entstehenden Schwingungen und Kräfte des komplexen dynamischen Systems.

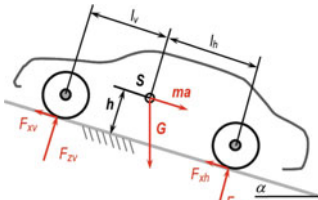
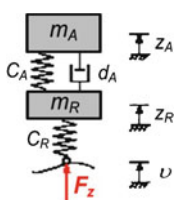
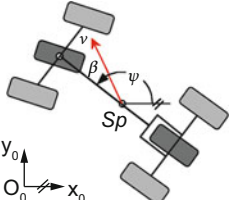
Die Kräfte, die auf das Fahrzeug wirken, sind die Trägheitskräfte, die beim Beschleunigen, Bremsen und während der Kurvenfahrt entstehen sowie das Eigengewicht des Fahrzeugs samt dessen Beladung. Diese können als am Fahrzeugschwerpunkt wirkend betrachtet werden. Hinzu kommen aerodynamische Kräfte und Motorantriebsmomente. Diese Kräfte und Momente werden über die vier Radaufstandsflächen – *Reifenlatsch* genannt – als Vertikal- und Horizontalkräfte auf die Fahrbahn übertragen.

Die Fahrdynamik von Kraftfahrzeugen wird klassisch getrennt nach den drei verschiedenen translatorischen Bewegungsfreiheitsgraden des Fahrzeugaufbaus betrachtet (s. ■ Abb. 1.21). Bei

Untersuchung der Bewegungsvorgänge in Fahrzeuginnenrichtung, also Antreiben und Bremsen, spricht man von der *Längsdynamik* des Fahrzeugs. Hierbei sind vor allem die Fahrwiderstände mit dem daraus resultierenden Leistungs- und Energiebedarf des Fahrzeugantriebs Gegenstand der Untersuchungen. Weiterhin von Interesse bei Betrachtung der Fahrzeuginnenrichtung sind die Brems- und Traktionseigenschaften auch auf verschiedenen Fahrbahnbelägen und -zuständen.

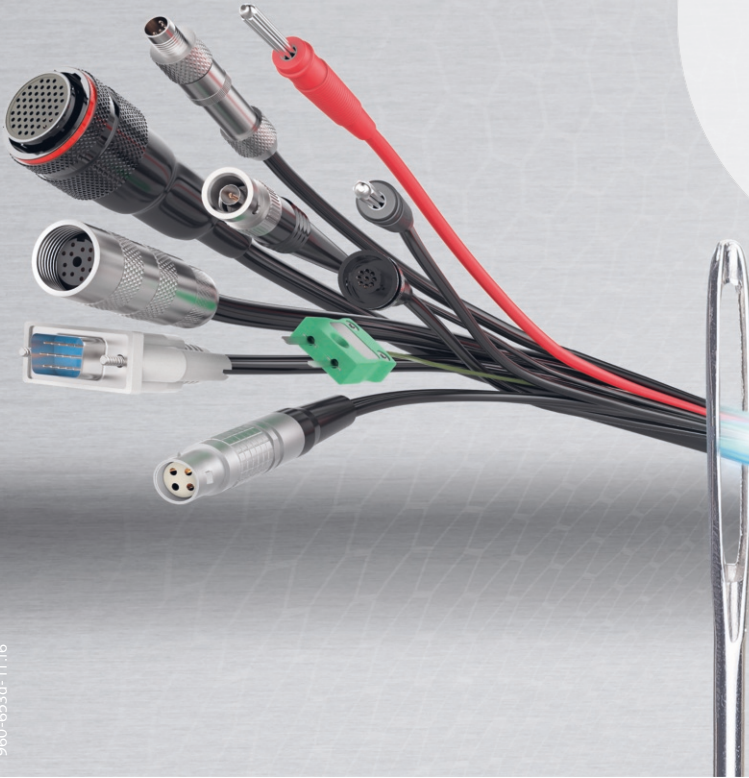
Das Schwingungsverhalten des Aufbaus in Richtung der Fahrzeughochachse wird als *Vertikaldynamik* bezeichnet. Hierbei geht es vor allem um die Abstimmung des Federungs- und Dämpfungsverhaltens, um einerseits die Aufbaubeschleunigungen gering zu halten und somit den Fahrkomfort für die Insassen zu erhöhen, auf der anderen Seite aber ebenfalls durch Reduktion der dynamischen Vertikallastschwankungen an allen vier Rädern, die Fahrsicherheit zu verbessern.

Der zweite Bewegungsfreiheitsgrad des Fahrzeugs in horizontaler Ebene, die Bewegungen quer zur Fahrzeuginnenachse, wird durch den Begriff *Querdynamik* zusammengefasst. Beschrieben werden hierbei vor allem Vorgänge, die die Fahrsta-

Längsdynamik	Vertikaldynamik	Querdynamik
 <p>Ebenes Längsdynamikmodell</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Beurteilung des Beschleunigungs- und Bremsverhaltens.</li> <li>• Fahrwiderstände: Rad-, Luft-, Steigungs-, Beschleunigungswiderstand → Leistungsbedarf</li> <li>• Motorkennfelder, Getriebeabstimmung → Leistungsangebot.</li> <li>• Übertragung der Antriebs- und Bremskräfte</li> <li>• Parametereinflüsse: Masse m, Schwerpunktlage, Fahrwiderstände, Motorleistung, Getriebeabstufung, Bremsleistung</li> </ul>	 <p>Zweimassen Federungsmodell</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Beurteilung des Schwingungsverhaltens anhand der Hauptkriterien: Fahrsicherheit → (Radlastschwankungen) Fahrkomfort → (Aufbaubeschleunigung).</li> <li>• Parametereinflüsse: Aufbaumasse <math>m_A</math>, Radmasse <math>m_R</math>, Aufbaufedersteifigkeit <math>C_A</math>, Reifenedersteifigkeit <math>C_R</math>, Aufbaudämpferkonstante <math>d_A</math>.</li> </ul>	 <p>Lineares Einspurmodell</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Beurteilung des Lenkverhaltens bei Querbeschleunigungen <math>a_y &lt; 0,4g</math>.</li> <li>• Testmanöver „stationäre Kreisfahrt“: Eigenlenkverhalten, charakteristische und kritische Geschwindigkeit.</li> <li>• Testmanöver „instationäre Kreisfahrt“: Übertragungsverhalten, Lenkwinkel <math>\delta(t) \rightarrow</math> Gierwinkel <math>\psi(t)</math>.</li> <li>• Parametereinflüsse: Radstand l, Schwerpunktlage <math>l_v</math>, Masse m, Trägheitsmoment <math>J_y</math>, Reifenschräglaufsteifigkeit <math>c_T</math>.</li> </ul>

■ Abb. 2.1 Domänen und Modelle der Fahrdynamik

# Geschickt eingefädelt ...



... plug-in und messen. Mit der DTI (Digital Transducer Interface) Technologie entdecken unsere Kunden eine neue Dimension der Effizienz beim Fahrzeugtesten. Die Digitalisierung des Signals sowie die Notwendigkeit von nur noch einem Kabel für Daten, Synchronisation, Konfiguration und Stromversorgung macht die Datenerfassung nun noch schlanker, schneller und einfacher. Wo auch immer Sie fachlichen Support benötigen: Wir bieten Ihnen Komplettlösungen nach Maß und unterstützen Sie weltweit mit unserer umfassenden Servicekompetenz.



bilität, das Kurvenverhalten und die Spurführung bzw. Kurshaltung generell betreffen. Von großer Bedeutung ist das querdynamische Verhalten besonders bei der Auslegung von Fahrerassistenz- und Fahrdynamikregelsystemen.

Hauptaugenmerk liegt dabei auf dem Zusammenspiel und der gemeinsamen Abstimmung der einzelnen Fahrwerkkomponenten wie Reifen, Federung, Dämpfung, Lenkung und Lenkerkinematik, Elastokinematik sowie Fahrwerksregelsystemen (■ Abb. 2.1).

## 2.1 Fahrwiderstände und Energiebedarf

Bei der Auslegung des Antriebsstrangs eines Fahrzeugs ist die genaue Kenntnis der während des Fahrbetriebs auftretenden Fahrwiderstände notwendig. Der Energie- bzw. Leistungsbedarf und damit der Kraftstoffverbrauch sowie das Beschleunigungsvermögen werden hierdurch festgelegt.

### 2.1.1 Fahrwiderstände

Man unterscheidet zwischen Fahrwiderständen bei stationärer sowie bei instationärer Fahrt. Im stationären Fall, also bei Fahrt mit konstanter Geschwindigkeit treten Rad-, Luft- und Steigungswiderstände auf.

Im instationären Fall, also bei beschleunigter Fahrt, kommen Widerstandskräfte aufgrund der Massenträgheiten des Fahrzeugs hinzu. Die stationären Fahrwiderstände wirken hier weiter (■ Tab. 2.1).

Der vom Antrieb des Fahrzeugs zu überwindende Gesamtfahrwiderstand  $F$  entspricht einer Bedarfskraft  $F_{\text{Bed}}$ , die an den angetriebenen Rädern des Fahrzeugs zur Verfügung gestellt werden muss, damit die Fahrt in dem entsprechenden Betriebszustand ermöglicht werden kann:

$$F = F_{\text{Bed}} = F_L + 4F_R + F_{\text{St}} + F_C \tag{2.1}$$

mit den Anteilen:

- Gesamtfahrwiderstand  $F$ ,

■ **Tabelle 2.1** Übersicht der Fahrwiderstände

Fahrwiderstände	
Stationär	Instationär
Radwiderstände (► Abschn. 2.1.1.1) Rollwiderstand (Reifen Anteile) Walkwiderstand Reibwiderstand Lüfterwiderstand Fahrbahnwiderstand (Fahrbahn Anteile) unebene Fahrbahn plastisch verformbare Fahrbahn nasse Fahrbahn Schräglaufwiderstand Lagerreibung und Restbremsmomente	Beschleunigungswiderstand (► Abschn. 2.1.1.4) Translatorische Anteile Rotatorische Anteile
Luftwiderstand (► Abschn. 2.1.1.2)	
Steigungswiderstand (► Abschn. 2.1.1.3)	

- Bedarfskraft der Antriebsräder  $F_{\text{Bed}}$ ,
- Luftwiderstand  $F_L$ ,
- Radwiderstand eines Rades  $F_R$ ,
- Steigungswiderstand  $F_{\text{St}}$ ,
- Beschleunigungswiderstand  $F_C$ .

Nachfolgend werden die vier Fahrwiderstände im Einzelnen detaillierter betrachtet.

#### 2.1.1.1 Radwiderstände

Der Radwiderstand  $F_R$  fasst die am rollenden Rad entstehenden Widerstandskräfte  $F_{R,i}$  zusammen. Der Gesamtradwiderstand  $F_R$  setzt sich aus den folgenden Anteilen zusammen:

- Anteil des Reifens (Rollwiderstand)  $F_{R,T}$ ,
- Anteil durch die Fahrbahn  $F_{R,Tr}$ ,
- Anteil durch Schräglauf  $F_{R,\alpha}$ ,
- Anteil durch Lagerreibung und Restbremsmomente  $F_{R,fr}$ .

Gemäß den vorausgegangenen Betrachtungen berechnet sich der Gesamtradwiderstand  $F_R$  aus der Summe seiner Teilwiderstände:

$$F_R = F_{R,T} + F_{R,Tr} + F_{R,\alpha} + F_{R,fr} \tag{2.2}$$

Der Reifen-Rollwiderstand  $F_{R,T}$  seinerseits setzt sich wiederum aus drei Anteilen zusammen [1]:

- Walkwiderstand  $F_{R,T,Walk}$ ,
- Lüfterwiderstand  $F_{R,T,L}$  und
- Reibungswiderstand  $F_{R,T,fr}$ .

Für den Reifen-Rollwiderstand  $F_{R,T}$  ergibt sich:

$$F_{R,T} = F_{R,T,Walk} + F_{R,T,L} + F_{R,T,fr} \quad (2.3)$$

Bei Geradeausfahrt auf trockener Straße – Grundlage der meisten Fahrwiderstandsberechnungen – kann der Radwiderstand  $F_R$  dem Reifen-Rollwiderstand  $F_{R,T}$  gleichgesetzt werden [1], da einerseits die Lagerreibwiderstände vergleichsweise gering ausfallen und andererseits davon ausgegangen wird, dass sich weder die Fahrbahn plastisch verformt noch das Rad unter Einfluss von Schräglauf- oder Sturzwinkel läuft.

Die Anteile des Gesamtradwiderstandes  $F_R$  werden nachfolgend detaillierter beleuchtet.

#### ■ Anteil des Reifens $F_{R,T}$

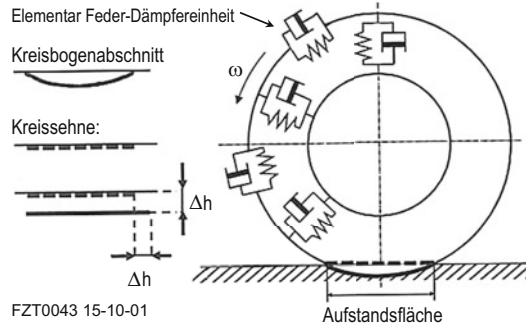
Rollt das luftbereifte Rad auf einer idealen Fahrbahn (eben und trocken) im Geradeauslauf, so entsteht eine Widerstandskraft entgegen der Laufrichtung [1]. Diese Widerstandskraft wird als Reifen-Rollwiderstand  $F_{R,T}$  bezeichnet.

Die Rollwiderstandskraft  $F_{R,T}$  des Reifens hängt im Wesentlichen von seinem konstruktiven Aufbau und den Werkstoffeigenschaften ab.

#### ■ Walkwiderstand $F_{R,T,Walk}$

Auf befestigten Straßen ergibt sich der Rollwiderstand fast ausschließlich aus der Reifen-Walkverlustarbeit [2]. Er beträgt ca. 80 bis 95 % des Gesamtradwiderstands [3]. Maßgebend sind hierbei die Walkamplitude, bestimmt durch die Einfederung  $s_T$ , die Radlast  $F_{Z,W}$  und den Innendruck  $p_T$  sowie die Walkfrequenz, bestimmt durch die Radumfangsgeschwindigkeit  $v_W$  [4].

Hauptursache für die Entstehung des Rollwiderstands aus der Walkverlustarbeit sind dabei die viskoelastischen Eigenschaften des Reifengummis, vergleichbar mit denen eines mechanischen Feder-Dämpfer-Systems: Nach Verformung kehrt ein viskoelastischer Körper zwar in seine Ursprungsform zurück, benötigt hierfür jedoch eine gewisse Zeit.



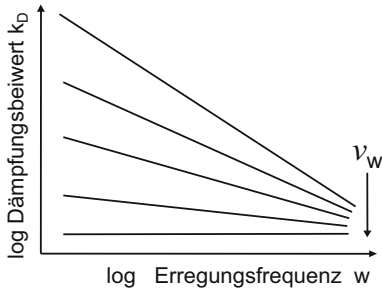
■ Abb. 2.2 Radersatzmodell zur Darstellung der viskoelastischen Feder-Dämpfereigenschaften der Reifenstruktur [1]

Dieses Phänomen wird als „Hysterese“ bezeichnet. (Hysterese: *Wirkungsfortdauer nach Beendigung der Ursache* [3]). Dieser zeitliche Verzug der Verformungsrückstellung ist direkt an einen Energieverlust gekoppelt [3].

Die viskoelastischen Eigenschaften der Gummi-Werkstoffe sind auf der anderen Seite aber hauptverantwortlich für gute Haftungseigenschaften eines Reifens auf der Fahrbahnoberfläche. Daher muss für jeden Reifen ein Kompromiss zwischen geringem Rollwiderstand einerseits und guten Kraftübertragungscharakteristiken andererseits gefunden werden.

Unter Einwirkung äußerer Kräfte verformt sich ein Reifen. Rollt das Rad unter dieser Belastung mit der Drehzahl  $\omega$ , wiederholt sich der Vorgang des Ein- und Ausfederns kontinuierlich für jeden Punkt des Reifenumfangs. Neben einer Einfederung  $\Delta h$  in radialer Richtung kommt es dabei auch zu einer Stauchung des Umfangs um die Länge  $\Delta s$ . Zur Veranschaulichung dient das Radersatzmodell aus ■ Abb. 2.2, dessen Umfang durch lineare Feder-Dämpfer-Elemente gegen die Felge abgestützt ist. Zusätzlich kann man sich auch den Reifengürtel aus Elementarfedern und -dämpfern zusammengesetzt vorstellen. Diese Feder-Dämpfer-Elemente repräsentieren die viskoelastischen Hysterese-Eigenschaften des Reifengummis sowie seines Strukturaufbaus [1].

Beim Umlauf des Ersatzmodells mit der Drehzahl  $\omega$  wird in jedem „Elementar-Schwingungsdämpfer“ ein Teil der Einfederungsarbeit aufgrund der viskoelastischen Werkstoffeigenschaften



■ **Abb. 2.3** Dämpfungsbeiwerte Abhängig von der Erregungsfrequenz und der Fahrgeschwindigkeit [1]

als Dämpfungsarbeit in Wärme umgewandelt. Im Gegensatz zur elastischen Verformungsarbeit, die beim Reifenausfedern zurückgewonnen wird, muss die irreversible Umwandlung der Dämpfungsarbeit in Wärme als Verlust gewertet werden. Der dadurch hervorgerufene Walkwiderstand  $F_{R,T,Walk}$  des Reifens entspricht dem Quotienten aus geleisteter Dämpfungsarbeit  $W_{D,T,Walk}$  und zurückgelegter Wegstrecke  $s_T$ :

$$F_{R,T,Walk} = F_{R,T,Walk,radial} + F_{R,T,Walk,Umfang}$$

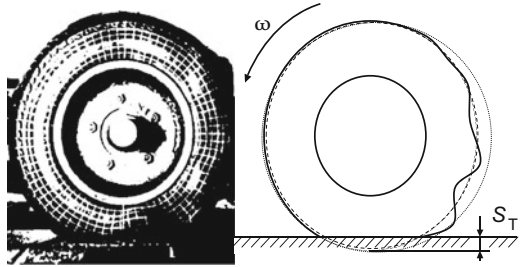
mit

$$\begin{aligned} F_{R,T,Walk,radial} &= \frac{W_{D,T,Walk,radial}}{\Delta h} \\ F_{R,T,Walk,Umfang} &= \frac{W_{D,T,Walk,Umfang}}{\Delta s} \end{aligned} \quad (2.4)$$

Im Allgemeinen weist bei der Gegenüberstellung von Reifen aus gleichen Lagenmaterialien, der Reifen mit der größeren Lagenzahl die höhere Dämpfung  $k_D$  auf, da die Relativbewegungen der Lagen gegeneinander Dämpfungsarbeit und somit Wärme erzeugen.

Untersuchungen zur Reifendämpfung  $k_D$  bei verschiedenen Rollgeschwindigkeiten  $v_W$  haben ergeben, dass der Dämpfungsbeiwert  $k_D$  mit steigender Geschwindigkeit  $v_W$  abnimmt (■ **Abb. 2.3**) [1].

Diesem walkwiderstandsenkenden Effekt überlagert sich allerdings bei steigender Geschwindigkeit  $v_W$  eine entgegengesetzte Wirkung: Die Einfederung  $s_T$  sowie die Verzweigung der Profilstollen im Reifenlatsch des unter Last rollenden Rades verursachen wegen der mit der Geschwindigkeit zunehmenden Bedeutung der Massenkkräfte



■ **Abb. 2.4** Deformationswellenbildung [1]

ein Nachschwingen des Reifengürtels  $C_R$  auf der Latschaustrittsseite. Dieses Phänomen wird als Deformationswellenbildung bezeichnet. Das Abklingen dieser Schwingung infolge der Reifendämpfung  $k_D$  erzeugt Wärme, wodurch der Walkwiderstand  $F_{R,T,Walk}$  weiter zunimmt (■ **Abb. 2.4**).

Der Vorgang der Ausbildung der Deformationswelle außerhalb der Reifenaufstandsfläche überwiegt dabei den Effekt der sinkenden Reifendämpfung  $k_D$  in seinem Einfluss auf den geschwindigkeitsabhängigen Verlauf des Walkwiderstands  $F_{R,T,Walk}$ . Er steigt mit zunehmender Geschwindigkeit mit geringer Progressivität linear an, um ab etwa 35 m/s Fahrgeschwindigkeit stark progressiv zuzunehmen. Der Walkwiderstand  $F_{R,T,Walk}$  ist, wie bereits erwähnt, der wesentlichste Teil des Reifenrollwiderstandes  $F_{R,T}$  [1].

#### ■ **Reibwiderstand $F_{R,T,fr}$**

In dem in ■ **Abb. 2.2** gezeigten Radersatzmodell durchlaufen die Feder-Dämpfer-Elemente des Laufstreifens den Reifenlatsch. Dabei wird der Kreisbogenabschnitt des Reifenumfangs auf die Länge seiner Sehne, die Aufstandsflächenlänge, gestaucht. Dadurch kommt es im Reifenlatsch zu Relativbewegungen zwischen Fahrbahn und Laufstreifen, dem sogenannten Teilgleiten, sowohl in Längs- als auch in Querrichtung. Dieses Teilgleiten verursacht Abrieb. Dabei wird Energie umgesetzt, die vom Antrieb als zusätzlicher Reibwiderstand  $F_{R,T,fr}$  überwunden werden muss [1].

#### ■ **Lüfterwiderstand $F_{R,T,L}$**

Die Luftwiderstandskraft  $F_L$ , die auf einen sich in einem Fluid (Gas oder Flüssigkeit) bewegenden Körper einwirkt, nimmt mit dem Quadrat der Re-



lativgeschwindigkeit  $v_{\text{Rel}}$  zwischen Körper und dem ihn umgebendem Medium zu.

$$F_L \sim v_{\text{Rel}}^2 \quad (2.5)$$

Gleiches gilt für einen Reifen. Durch die Abrollbewegung des Reifens während der Fahrt ergeben sich Strömungsverluste, die jedoch sinnvolle Weise nur im Zusammenhang mit der Luftumströmung des gesamten Fahrzeugs betrachtet werden. Sie werden deshalb meist dem Gesamtluftwiderstand zugeschlagen.

#### ■ Rollwiderstandsbeiwert $k_R$

Der durch den Reifen verursachte Rollwiderstand  $F_{R,T}$  ist die Summe aus Walkwiderstand  $F_{R,T,\text{Walk}}$ , Reibwiderstand  $F_{R,T,\text{fr}}$  und Lüfterwiderstand  $F_{R,T,L}$ .

$$F_{R,T} = F_{R,T,\text{Walk}} + F_{R,T,L} + F_{R,T,\text{fr}} \quad (2.6)$$

Diese Zusammenfassung ist zweckmäßig, da die einzelnen Anteile von Walk- und Reibwiderstand in der Praxis ohnehin nicht getrennt gemessen werden können. Im Allgemeinen wird der gesamte Radwiderstand  $F_R$  dem Reifenrollwiderstand  $F_{R,T}$  gleichgesetzt:

$$F_R \approx F_{R,T} \quad (2.7)$$

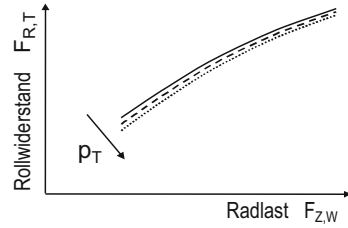
Angesichts eines nahezu linearen Verlaufs der Rollwiderstandskraft  $F_R$  über der Radlast  $F_{Z,W}$  kann eine lastbezogene Kennzahl definiert werden, der dimensionslose Rollwiderstandsbeiwert  $k_R$ :

$$k_R = \frac{F_R}{F_{Z,W}} \quad (2.8)$$

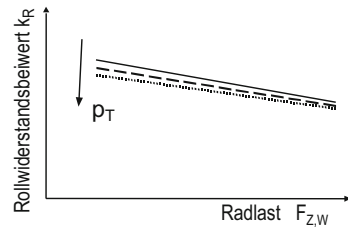
$$F_{R,T} = k_{R,T} \cdot F_{Z,W} \approx F_R = k_R \cdot F_{Z,W} \quad (2.9)$$

Im Rahmen üblicher Berechnungen wird dieser Rollwiderstandsbeiwert  $k_R$  als konstant über Radlast  $F_{Z,W}$  und Fahrgeschwindigkeit  $v_W$  angenommen.

Die genauere Betrachtung verdeutlicht, dass sowohl eine Last-, eine Innendruck-, eine Zeit-, eine Temperatur- als auch eine Geschwindigkeitsabhängigkeit vorliegen. ■ Abb.2.5 zeigt einen degressiv ansteigenden Verlauf der Rollwiderstandskraft  $F_R$  über der Radlast  $F_{Z,W}$  für einen Radialreifen.



■ Abb. 2.5 Abhängigkeit der Reifenrollwiderstandskraft von der Radlast und dem Reifenfülldruck  $p_T$

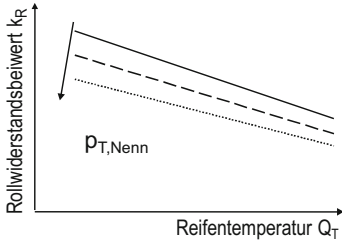


■ Abb. 2.6 Rollwiderstandsbeiwert von Radialreifen als Funktion von der Radlast  $F_{Z,W}$  und dem Innendruck  $p_T$

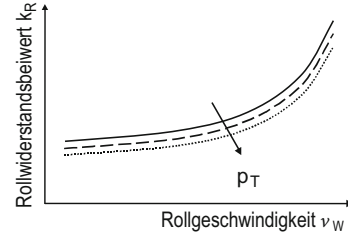
Daraus resultiert ein mit steigender Radlast  $F_{Z,W}$  sinkender Rollwiderstandsbeiwert  $k_R$ , (■ Abb.2.6). In diesem Bild ist auch der Einfluss des Reifendruckes  $p_T$  auf den Rollwiderstandsbeiwert  $k_R$  dargestellt. Es ergibt sich ein mit steigendem Luftdruck  $p_T$  sinkender Rollwiderstandsbeiwert  $k_R$ . Der Grund hierfür ist folgender: Da erhöhter Innendruck  $p_T$  zu einer Versteifung des Reifens führt, nimmt die Einfederung bei gleich bleibender Radlast  $F_{Z,W}$  ab. Dies verringert die zur Drehung des Rades aufzuwendende Walkarbeit und reduziert wegen der kleineren Reifenlatschfläche ebenfalls den Reibwiderstandsanteil [1].

Im direkten Zusammenhang mit der Innendruckabhängigkeit des Rollwiderstandsbeiwertes  $k_R$  stehen sowohl der Einfluss der Reifentemperatur  $\theta_T$  als auch dessen Abhängigkeit von Fahrzeit  $t_T$  und Fahrtstrecke  $s_T$ . Infolge der viskoelastischen Walkarbeit und der damit verbundenen Umwandlung von Antriebsenergie in Wärme heizen sich die Reifenstruktur und die eingeschlossene Druckluft mit zunehmender Fahrzeit  $t_T$  und -strecke  $s_T$  auf; der Innendruck  $p_T$  und die Reifentemperatur  $\theta_T$  steigen. Da mit zunehmendem Innendruck  $p_T$  der Rollwiderstandsbeiwert  $k_R$  abnimmt, führt auch eine Steigerung der Reifentemperatur  $\theta_T$  (bei





■ **Abb. 2.7** Rollwiderstandsbeiwert  $k_R$  gegen Reifentemperatur mit Einfluss des Nenn-Innendrucks  $p_{T,Nenn}$



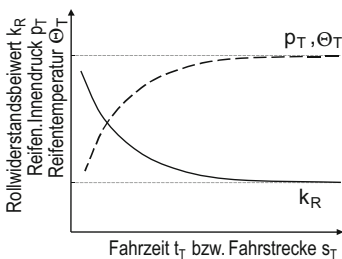
■ **Abb. 2.9** Rollwiderstandsbeiwert  $k_R$  gegen Rollgeschwindigkeit mit Einfluss des Reifeninnendrucks  $p_T$

ungeregeltem Fülldruck!) zu sinkendem Rollwiderstand (■ **Abb. 2.7**).

Je nach Betriebszustand, charakterisiert durch Radlast  $F_{Z,W}$ , Fahrgeschwindigkeit  $v_W$ , (im kalten Zustand eingestellten) Reifen-Nennndruck  $p_{T,Nenn}$  und Umgebungstemperatur  $\theta_U$  stellt sich nach einer bestimmten Fahrzeit  $t_T$  bzw. Fahrstrecke  $s_T$  ein Gleichgewicht zwischen zugeführtem Wärmestrom (Walkarbeit) und abgeführtem Wärmestrom ein:

$$\dot{Q}_{zu} = \frac{dW_{D,T,Walk}}{dt} = \dot{Q}_{ab} \quad (2.10)$$

Die Wärmeabfuhr erfolgt dabei über die Straße, die Felge und die Umgebungsluft bzw. den Kühlluftstrom des Fahrtwindes. Dieser Gleichgewichtszustand führt dazu, dass sich bei Konstantfahrt ebenfalls ein konstanter Rollwiderstandsbeiwert  $k_R$ , ein konstanter Innendruck  $p_T$  und eine konstante Reifentemperatur  $\theta_T$  ausbilden. Diese sind charakteristisch für den Reifen in dem jeweiligen Betriebszustand (■ **Abb. 2.8**).



■ **Abb. 2.8** Einfluss von Fahrzeit und Fahrstrecke auf Rollwiderstand, Reifentemperatur und Reifeninnendruck

Beim Messen des Reifen-Rollwiderstands ohne Verfälschung ist es von großer Bedeutung, zunächst eine Konditionierungsphase zu durchlaufen, nach der sich der jeweilige Gleichgewichtszustand eingestellt hat.

Den Geschwindigkeitseinfluss auf den Rollwiderstandsbeiwert  $k_R$  gibt ■ **Abb. 2.9** wieder.

Der zunächst nur langsam steigende Verlauf des Rollwiderstandsbeiwertes  $k_R$  mit zunehmender Rollgeschwindigkeit  $v_W$  ist auf die mit der Geschwindigkeit wachsende Auswirkung der Deformationswellenbildung (s. ■ **Abb. 2.4**), auf den Walkwiderstand  $F_{R,T,Walk}$  und somit den gesamten Rollwiderstand  $F_R$  zurückzuführen. Der Einfluss des mit zunehmender Rollgeschwindigkeit  $v_W$  kleiner werdenden Reifendämpfungsbeiwertes  $k_D$  auf den Gesamtrollwiderstand  $F_R$  wird durch den Effekt der *Deformationswellenbildung* überkompensiert.

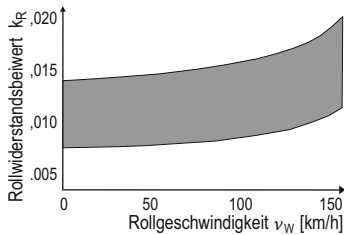
Der Zusammenhang zwischen Fahrgeschwindigkeit  $v_W$  und Rollwiderstandsbeiwert  $k_R$  kann rechtechnisch durch ein Polynom 4. Ordnung angenähert werden [1, 2]:

$$k_R = k_{R0} + k_{R1} \cdot \left( \frac{v_W}{100 \text{ km/h}} \right) + k_{R4} \cdot \left( \frac{v_W}{100 \text{ km/h}} \right)^4 \quad (2.11)$$

Bei niedrigen Geschwindigkeiten  $v_W < 80 \text{ km/h}$  entspricht  $k_R$  in etwa dem Wert  $k_{R0}$ . Dieser liegt im Allgemeinen bei  $k_{R0} \approx 0,01$ .

Typische Rollwiderstandsbeiwerte  $k_R$  und deren Streuband für verschiedene Typen von Pkw-Radial- sowie Diagonalreifen in Abhängigkeit der Fahrgeschwindigkeit  $v_W$  zeigt die ■ **Abb. 2.10**.

Neue rollwiderstandsoptimierte Reifen (■ **Abb. 2.11**) erreichen im unteren Geschwindigkeitsbereich

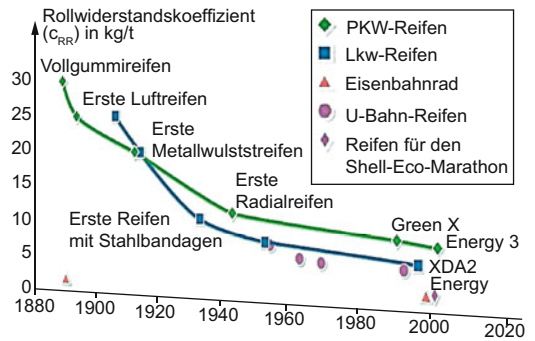


■ **Abb. 2.10** Streuband Rollwiderstandsbeiwerte Abhängig der Fahrgeschwindigkeit für Pkw-Reifen [4]

durchaus Werte von  $k_R = 0,008$  mit dem Ausblick 0,004 im 2030 [5]. Bei höheren Geschwindigkeiten um  $v_W = 150$  km/h werden dagegen bereits Werte von  $k_R = 0,017$  erreicht [4].

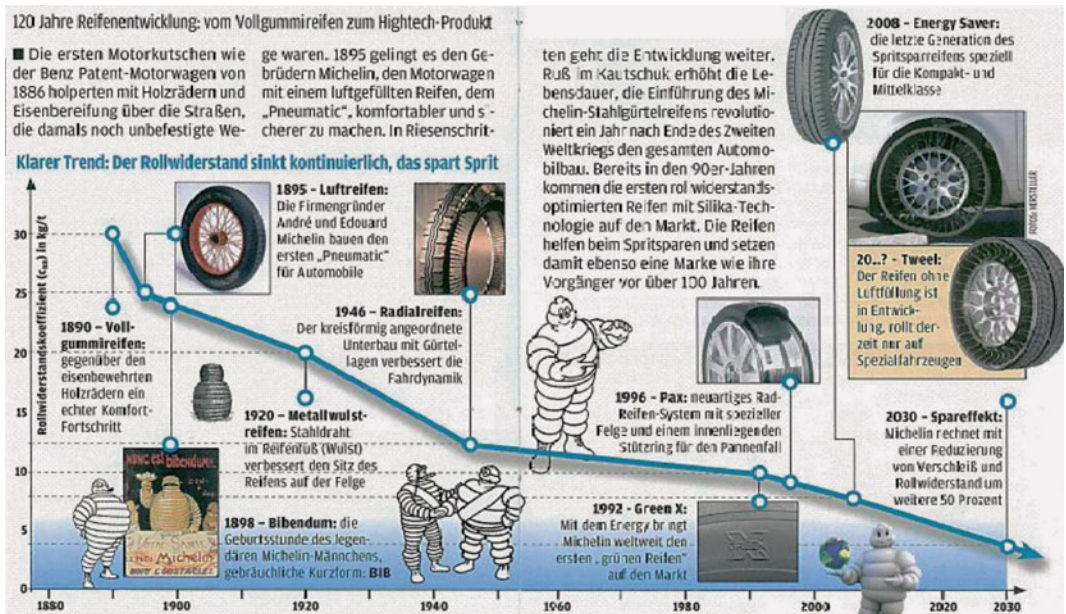
Der Rollwiderstandsbeiwert  $k_R$  von Fahrzeugreifen ist im Laufe der letzten 120 Jahre deutlich reduziert worden. ■ **Abb. 2.12** zeigt diese Entwicklung für Pkw- und Lkw-Reifen. Zum Vergleich ist der Rollwiderstandsbeiwert  $k_R$  von Eisen- und U-Bahnreifen aufgetragen.

Spezialreifen für Verbrauchswettfahrten beispielsweise liegen heute auf dem Niveau von Eisenbahnstahlrädern ( $k_R \approx 0,001$ ) [3].



■ **Abb. 2.12** Entwicklung der Rollwiderstandsbeiwerte  $k_R$  von Reifen im Laufe der letzten 120 Jahre [3]

Reifenrollwiderstände  $F_{RT}$  bzw. deren Beiwerte  $k_{R,T}$  werden auf speziellen Prüfständen (s. ■ **Abb. 13.75**) experimentell ermittelt. Im Allgemeinen handelt es sich hierbei um Außentrommel-Reifenprüfstände mit Durchmessern von 1,5 m bis 3,0 m. Die Prüftrommeln verfügen dabei über glatte bzw. definiert texturierte Laufbahnen. Neben der Umgebungstemperatur  $\theta_U$  sind die thermische Konditionierung, die Aufwärmphase sowie die Prüfgeschwindigkeiten  $v_W$  exakt festgelegt. Der



■ **Abb. 2.11** Entwicklung der Rollwiderstandsbeiwerte  $k_R$  von Reifen bis zum Jahre 2030 [5]

Fahrwerkhandbuch

Grundlagen - Fahrdynamik - Fahrverhalten -

Komponenten - Elektronische Systeme -

Fahrerassistenz - Autonomes Fahren- Perspektiven

Ersoy, M.; Gies, S. (Hrsg.)

2017, XXXVII, 1024 S. 1397 Abb. in Farbe., Hardcover

ISBN: 978-3-658-15467-7