Vorlesung
Grundlagen des Kraftfahrzeugbaus

Kapitel 6

Reifen

Immer einen Trennfolie für erste Ebene Unterpunkte

- Film am Anfang dazufügen

Gliederung

6 Reifen

- 6.1 Einleitung
- 6.2 Aufbau
- 6.3 Funktionsweise
- 6.4 Tragfähigkeit
- 6.5 Gummi Haftung/Reibung
- 6.6 Reifen/Fahrbahn
- 6.7 Rollwiderstand
- 6.8 Feder-Dämpfer-Modell
- 6.9 Aquaplaning
- 6.10 Innovationen

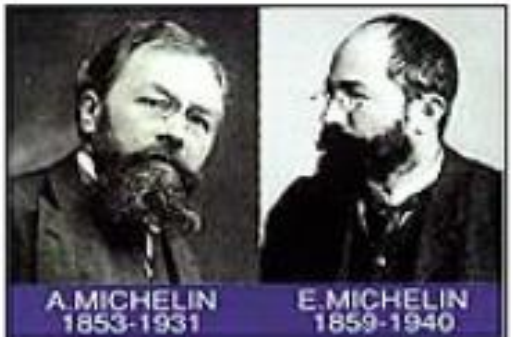
Kurzhistorie : Die Entdeckungszeit

- 1839: Charles Goodyear entdeckt zufällig die **Vulkanisation**
- 1888: J.B. Dunlop (Tierarzt aus Belfast) baut den **ersten haltbaren Luftreifen**
- 1895: Michelin baut den ersten Luftreifen für ein Auto (L‘Eclair – der Blitz)

J.B. Dunlop

L‘Eclair

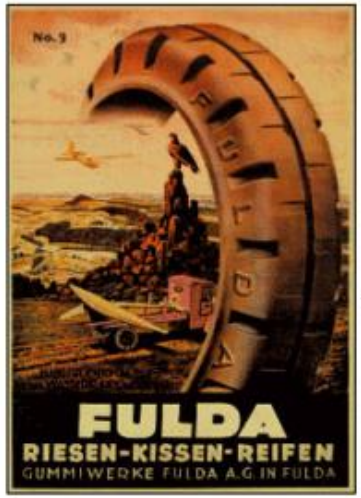
Kurzhistorie : Entwicklungsschritte

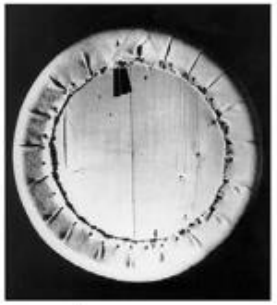


Gebrüder Michelin

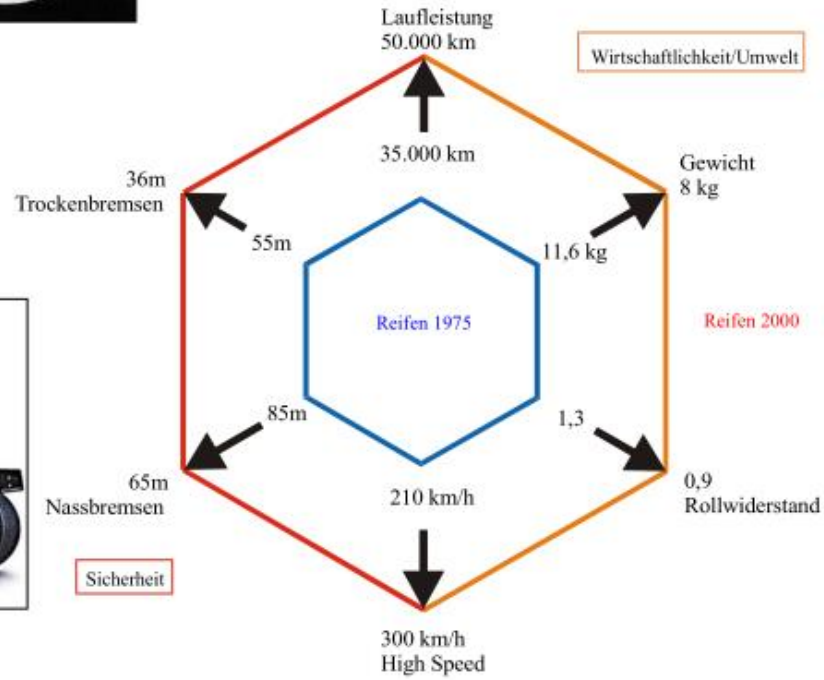
- 1943: schlauchlosen Reifen (Conti)
- 1946: Radial-Bauart (Michelin)
- 1960: Entdeckung des Aquaplaning-Effektes
- Anfang 1970er: Produktion der ersten **Stahl-Gürtelreifen** für LKW
- 1982: erste Winterreifen mit Lamellentechnik (Michelin)
- Seit 1990 : siehe Innovationen

Reifen – Gestern und Heute





4 m Außen-∅
100 t Tragfähigkeit
5 t Eigengewicht



Bezeichnung eines Pkw-Reifens

195/65 R 15 95V

Reifenbreite
→ *195 mm*

Querschnittsverhältnis H/B
→ *65%; H=127mm*

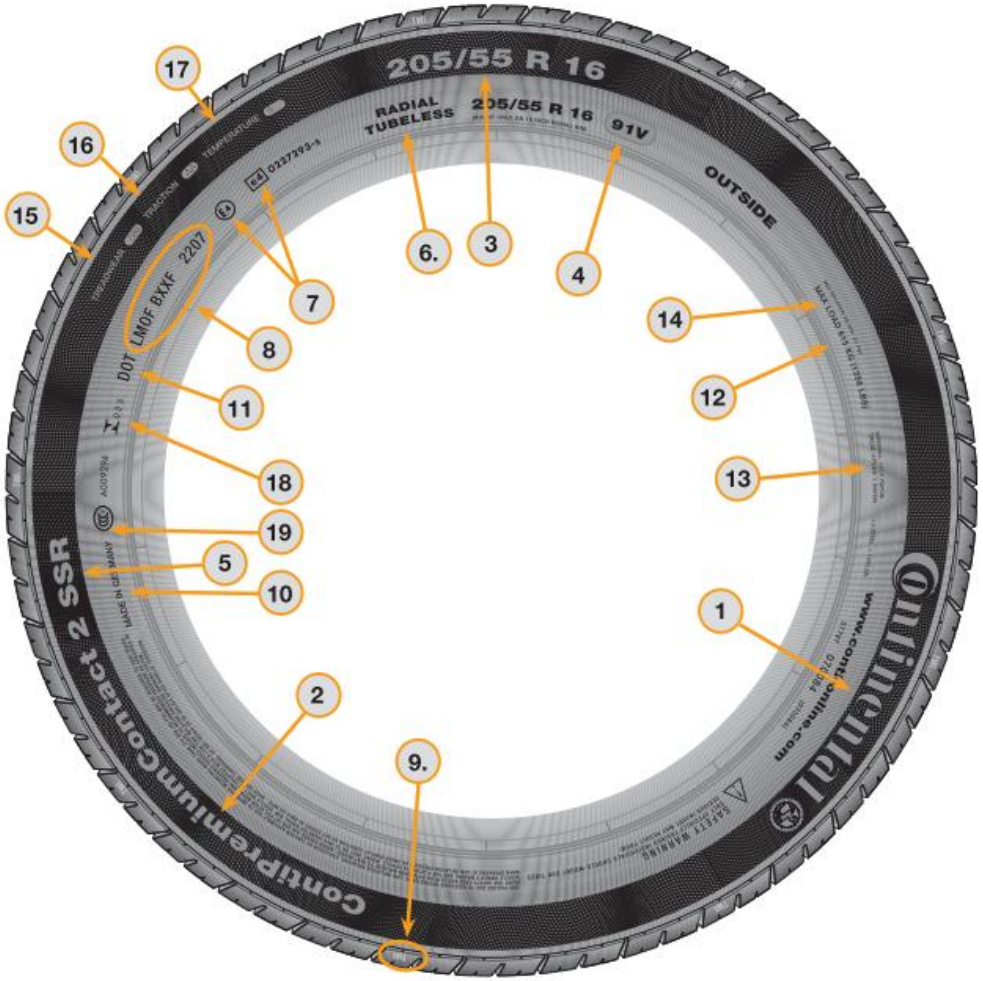
Reifenbauart
→ *radial*

Felgendurchmesser
→ *15''*

Lastindex
→ *95 = 690 kg*

Geschwindigkeitsindex
→ *V = bis 240 km/h*

Wichtige Informationen auf der Reifenseitenwand



3. Größenbezeichnung

4. Last- und Geschwindigkeitsindex

5S. SSR (Self upporting Runflat)

6. Schlauchloser Radialreifen

8. DOT-Nummer u.a. Herstelldatum (2207 bedeutet 22. Woche 2007)

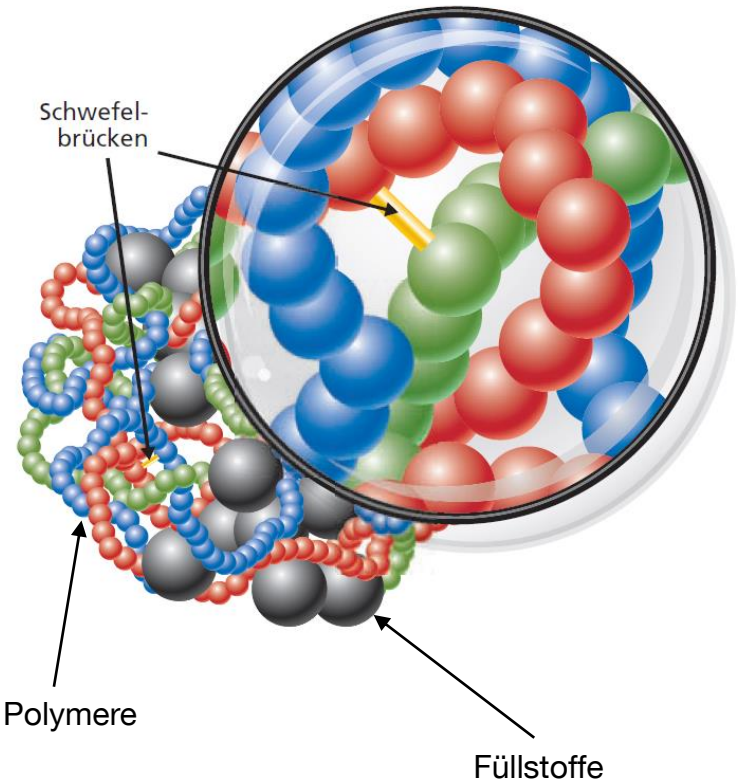
9. Verschleißindikator

Quelle: Continental

Reifenmaterialien

Bestandteile des Reifens:

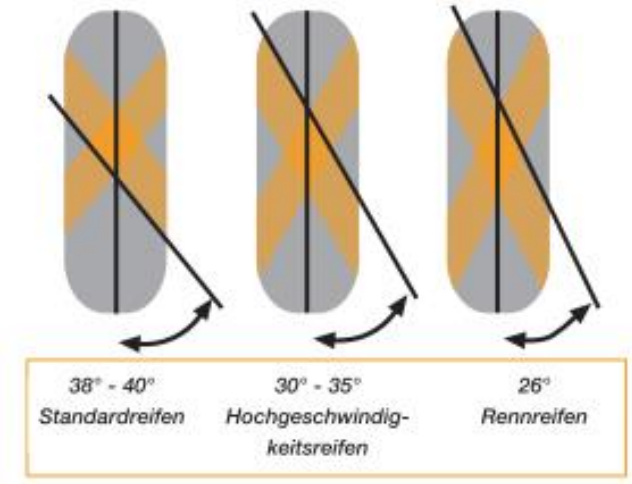
1) Kautschuk (Natur- und Synthesekautschuk)
2) Füllstoffe (Ruß, Silica, Kohlenstoff, Kreide,…)
3) Festigkeitsträger (Stahl, Rayon, Nylon)
4) Weichmacher (Harze, Öle)
5) Chemikalien für die Vulkanistation (Schwefel, Zinkoxid,…)
6) Chemikaline als Alterungsschutzmittel
7) Sonstiges



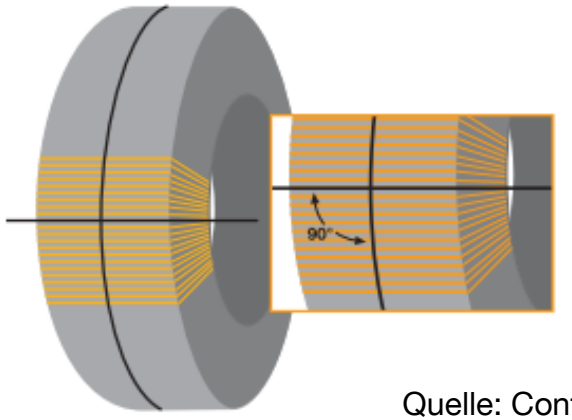
Bei der Vulkanisation werden die Kettenmoleküle (= Polymere) des Kautschuks zu einem räumlichen Netz verknüpft. Dadurch entsteht ein Visko-elastischer Körper.

Reifenbauarten

- Diagonalreifen
  - Cordfäden der einzelnen Karkass-lagen im spitzen Winkel zueinander



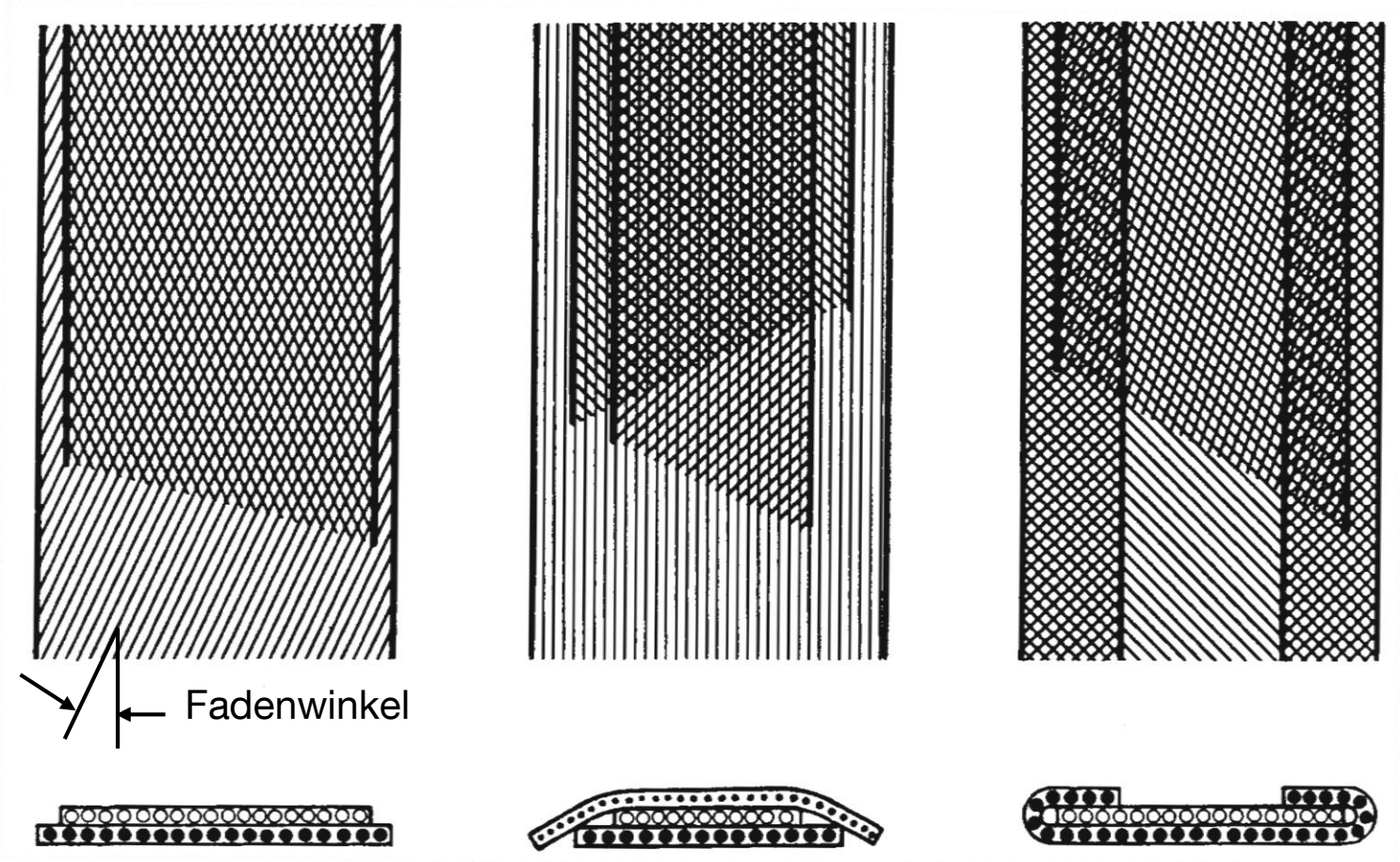
- Radialreifen
  - Cordfäden der Karkasslage im 90°-Winkel zur Laufrichtung



Quelle: Continental

Vorteile von Radialreifen :
- Höhere übertragbare Seitenkräfte.
- Die Kontaktfläche am Boden verändert sich nicht

Häufig verwendete Gürtelkonstruktionen bei Pkw-Reifen

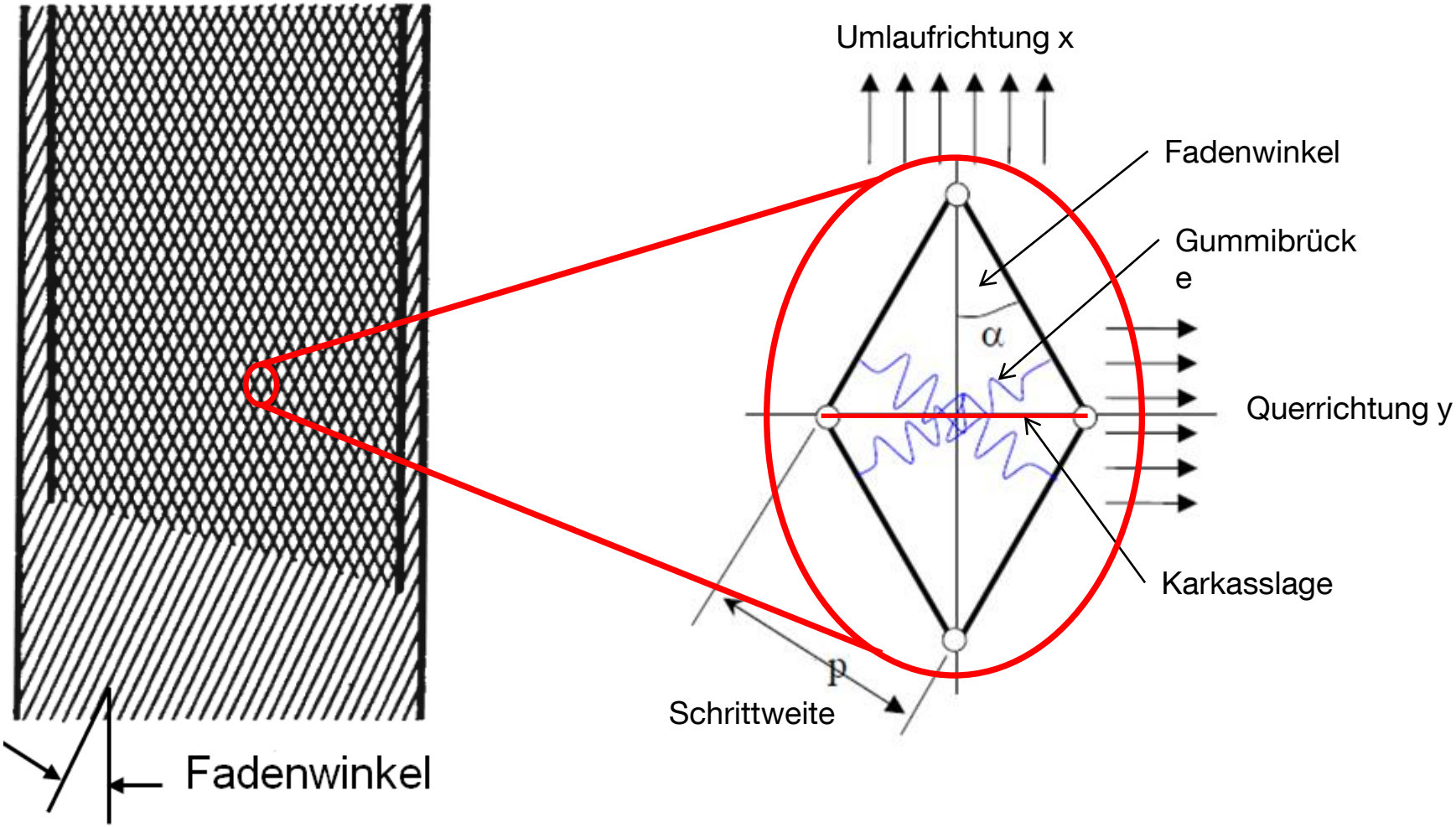


Schnittkantengürtel

Schnittkantengürtel + Bandage

Faltgürtel

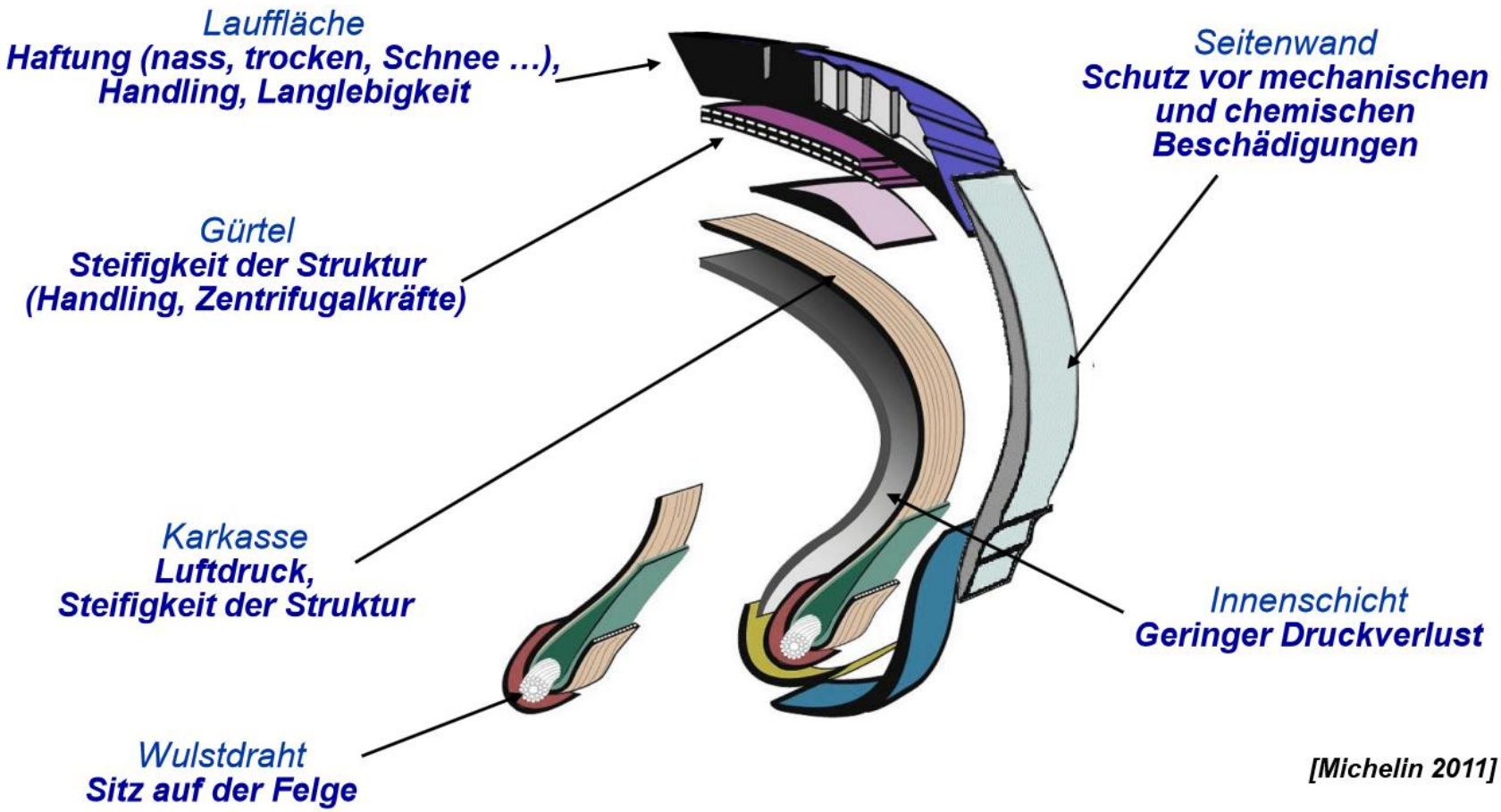
Funktionsweise eines Elements der Karkassenlagen



Detaillierter Aufbau eines Gürtelreifens

[Michelin 2011]

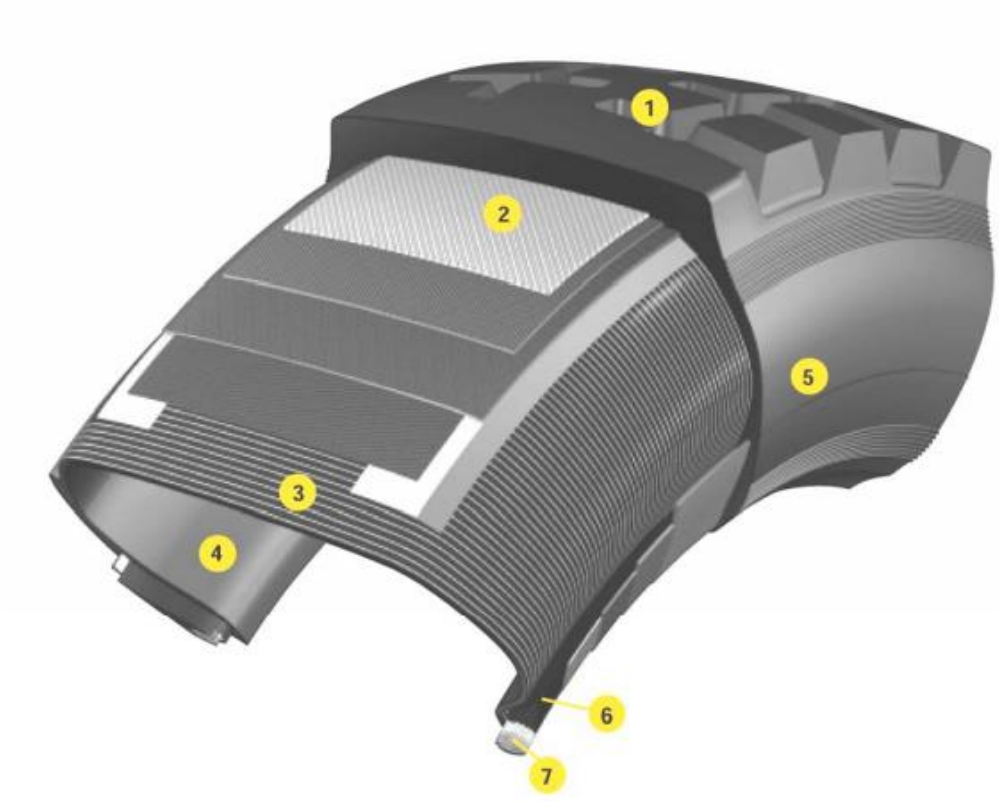
Detaillierter Aufbau eines Gürtelreifens



[Michelin 2011]

Nutzfahrzeugreifen mit nachschneidbarem Profil

Lkw-Reifen



Funktionselemente
(mit wichtigen Aufgaben)

1. Laufstreifen (Rollwiderstand, Abrieb, Kraftübertragung)
2. Stahlgürtel, **mehrlagig** (Fahrstabilität, Rollwiderstand, Festigkeit)
3. Stahlkarkasse (Festigkeit)
4. Innenschicht (Luftdichtheit)
5. Seitenwand (mech. Schutz)
6. Wulstverstärker (Bindung der Lagenenden, Scherkraftaufnahme)
7. Wulstkern (Felgensitz)

Quelle: Continental

PKW-Felge

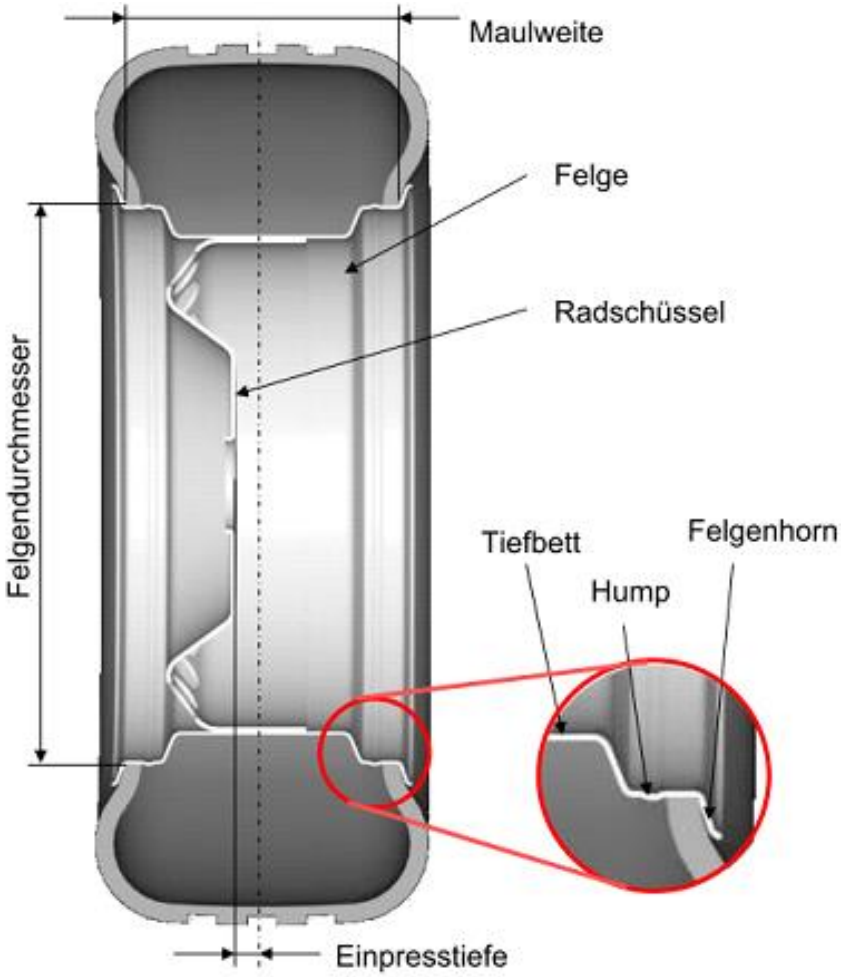
Stahlrad

Leichtmetallrad

Speichenrad

6 J × 14 H2 ET 42

- ET 42 — Einpreßtiefe
- H2 — Art der Sicherheitsschulter
- 14 — Felgendurchmesser in Zoll
- × — Tiefbett
- J — Hornform
- 6 — Felgenmaulweite in Zoll



Reifenauslegung

4 große Einflussfaktoren zur Eigenschaftsoptimierung:

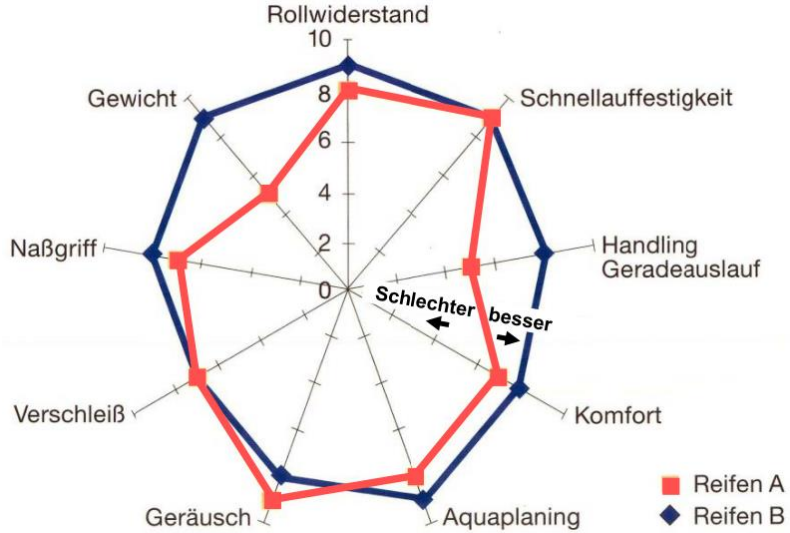
- Kontur (H/B)
- Profil
- Material
- Konstruktion

Zielkonflikte zwischen den Eigenschaften

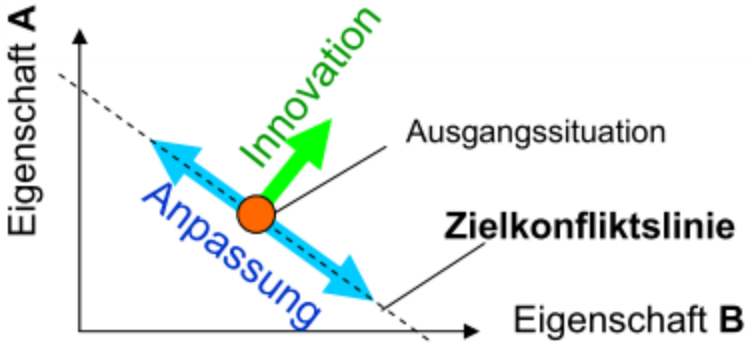
gezielte Auslegung hinsichtlich einer bestimmten Eigenschaft führt meist unmittelbar zu einer Verschlechterung einer anderen Eigenschaft.

Notenskala

bis 3	sehr schlecht
4	schlecht
5	Verbesserung erforderlich
6	an der Grenze
7	Befriedigend
8	Gut
9	Sehr gut
10	Ausgezeichnet

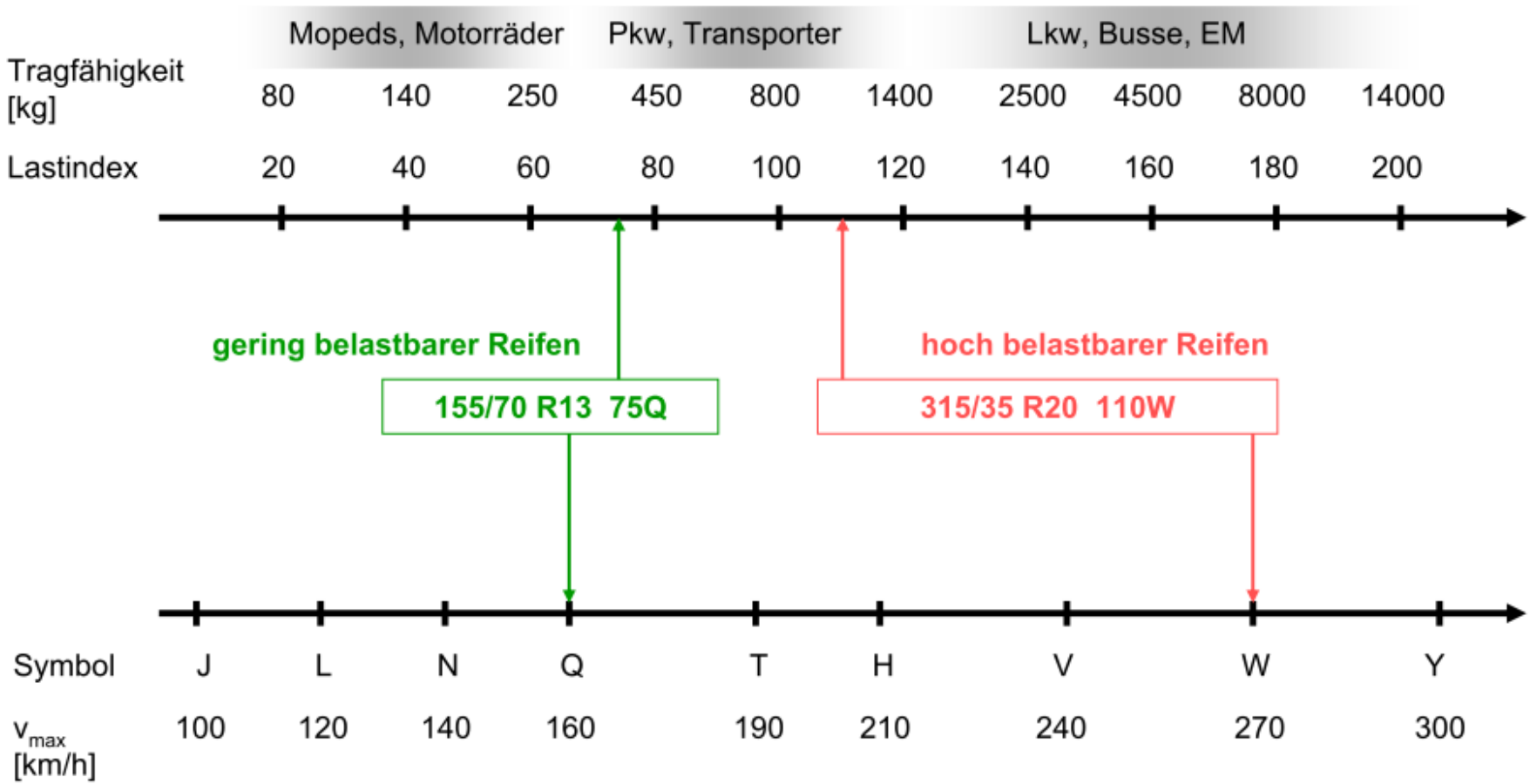


Eigenschaftsspinne für Rollgeräuschoptimierung



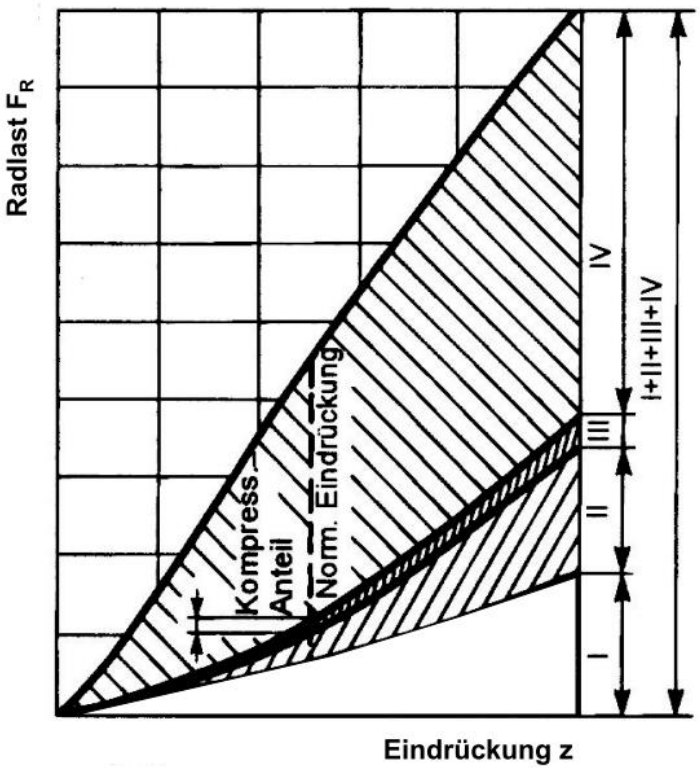
Quelle: BMW

Last- und Geschwindigkeitsindex



Trageigenschaften des Reifens

- Für einen gegebenen Reifen



I Tragkraft des luftleeren Reifens
II Rundhaltekraft der Pressluft
III Kompressionsanteil der Pressluft
IV Tragkraft der Pressluft

Tragkraft der Pressluft:

$$F_R = p_i \cdot A$$

F_R	Radlast
p_i	Innenüberdruck
A	Aufstandsfläche

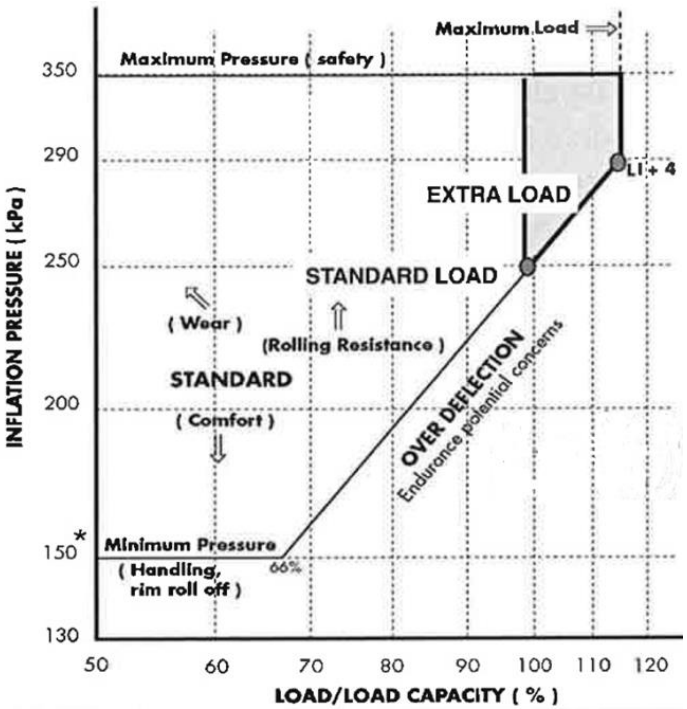
Quelle: Wallentowitz

Tragfähigkeit und Reifendimensionierung

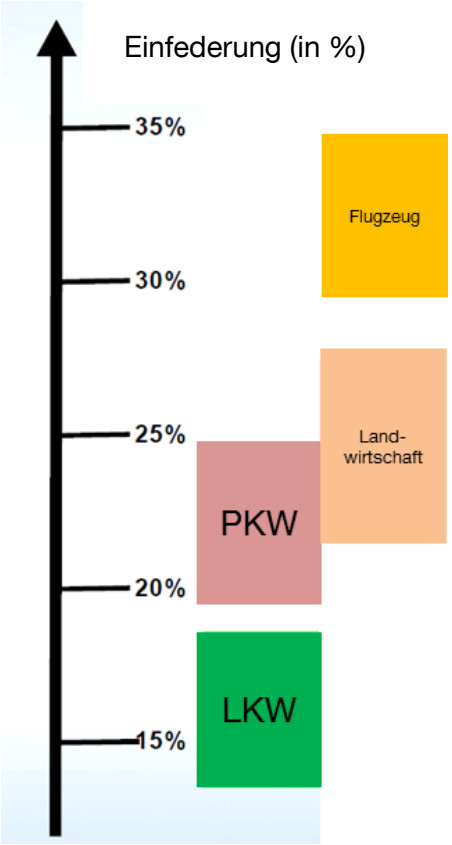
- Empirische Formel für die Dimensionierung

$$F_R = K \cdot p^{\alpha} \cdot F^{\beta} \cdot (D \cdot B)^{\gamma}$$

p Luftdruck
F Einfederung
D Reifendurchmesser
B Reifenbreite



Quelle: ETRTO

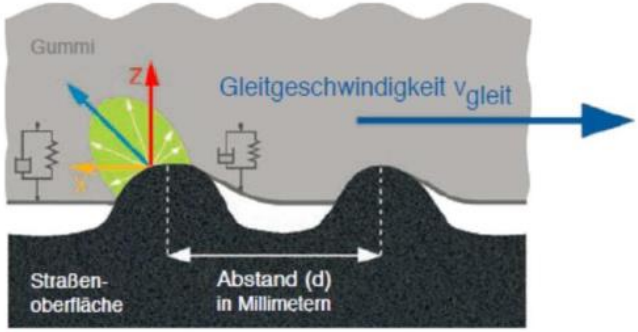


Quelle: Michelin

Ursachen der Reibung zwischen Gummi und Boden

Hysteresereibung („verzahnen“)

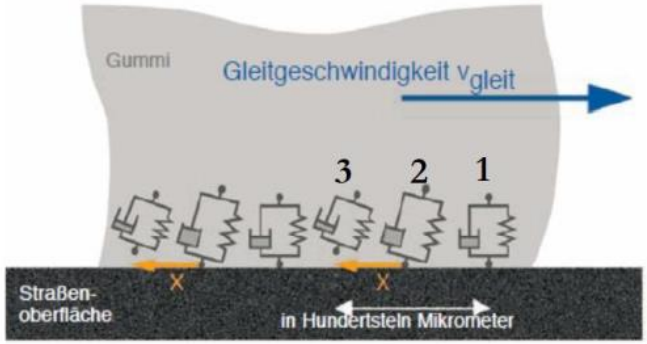
Kraft durch mechanische Verzahnung des Reifens in der Rauhigkeit der Straße
Größenordnung: 1 mm
Frequenz: zw. 10^2 und 10^6 Hz



Verzahnungseffekt [MIC05]

Adhäsionsreibung („kleben“)

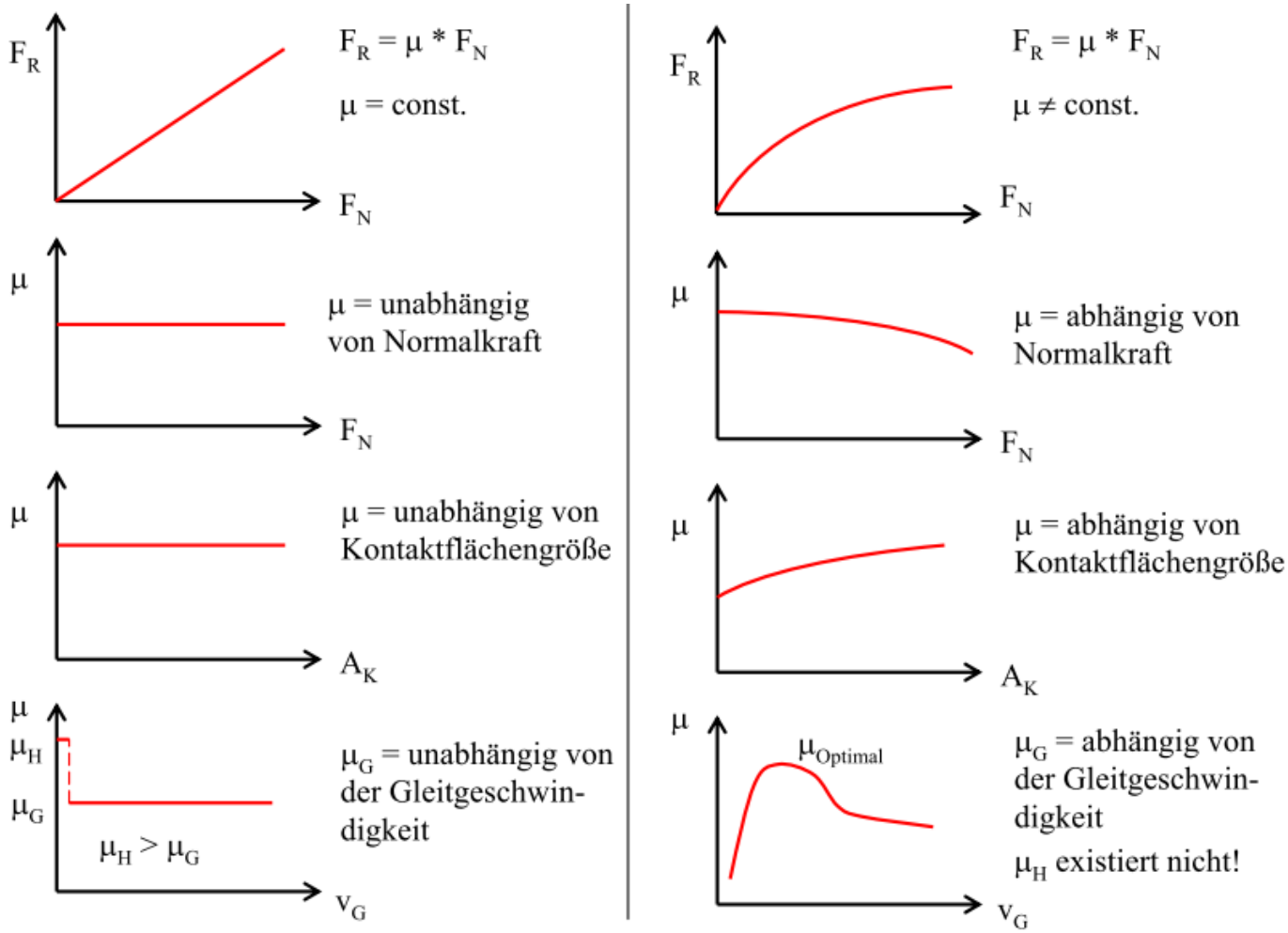
Kraft durch molekulare Anziehung zwischen Reifen- und Straßenoberfläche
Größenordnung: 0,01 mm
Frequenz: zw. 10^6 und 10^9 Hz



Molekulare Haftung [MIC05]

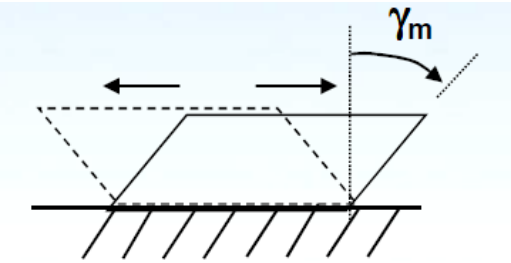
[Michelin 2005]

Vergleich Coulomb'sche Reibung – Gummireibung

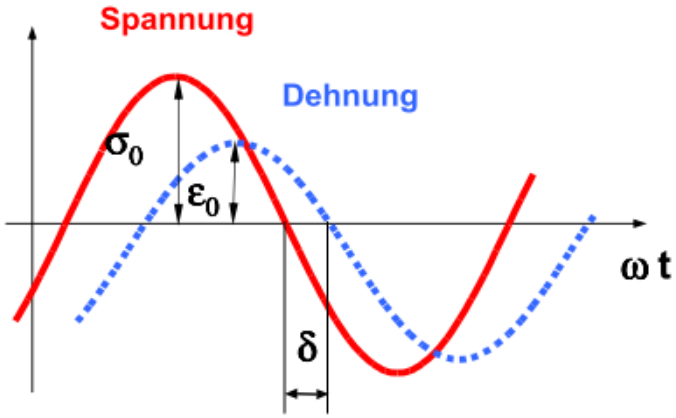


Die Viskoelastizität des Reifenwerkstoffs

- Periodische Scherung/Dehnung eines visko-elastisch Materials



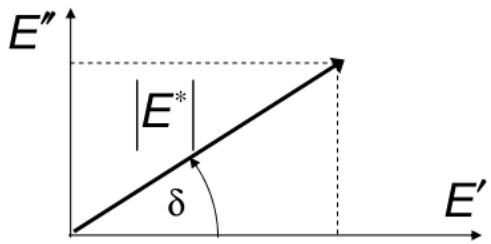
- Die Dehnung kommt mit der Phasenverschiebung δ. Ursache ist innere Reibung zwischen den mit Schwefelbrücken verbundenen Polymerketten



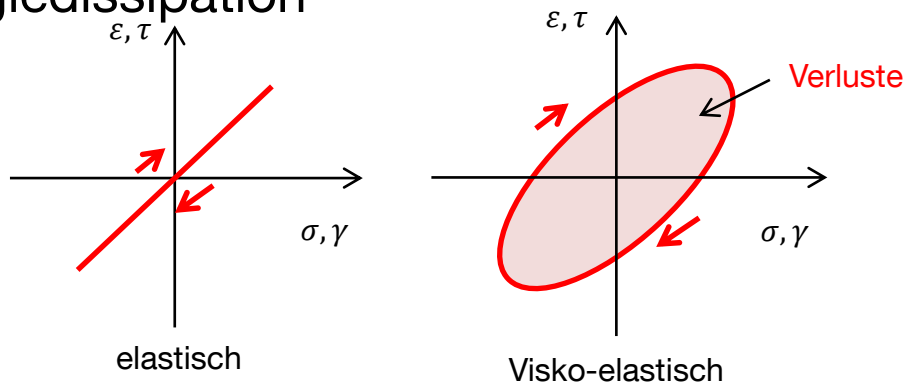
Lineare Viskoelastizität

- Mathematische Modellierung
  - $\varepsilon = \varepsilon_m \cos \omega t$ und $\sigma = \sigma_m \sin(\omega t + \delta)$
  - In Komplex, $\sigma^* = \sigma'_m \cos \omega t + i \cdot \sigma''_m \sin \omega t$ mit σ'_m „in-phase“ Spannung
    σ''_m „out-of-phase“ Spannung

- Charakterisierung
  - Speichermodul $E' = \frac{\sigma'_m}{\varepsilon_m}$
  - Verlustmodul $E'' = \frac{\sigma''_m}{\varepsilon_m}$



- Konsequenz : Energiedissipation
  - $W_{Zyklus} = \oint \sigma \, d\varepsilon \neq 0$



Nicht-Lineare Viskoelastizität - Einfluss der Lastfrequenz

Ansteigende Frequenz: Höhere Verformungsgeschwindigkeit

- Ausrichtung der Moleküle wird erschwert
- Ansteigende Steifigkeit
- Ansteigende Hysterese

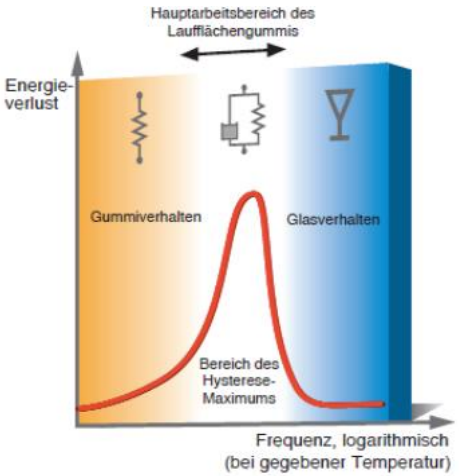
Hohe Frequenzen: Gummi-Viskosität sinkt

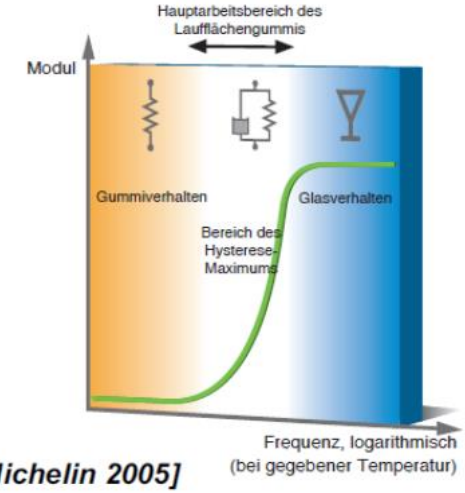
- Abfallende Hysterese
- Steifigkeit nimmt Maximum an, Gummi versprödet

Optimaler Arbeitsbereich im Hysterese-Maximum dazwischen

Gummi-Eigenschaften abhängig von Anregungsfrequenz

→ Schlupfgeschwindigkeit und Rauhigkeit



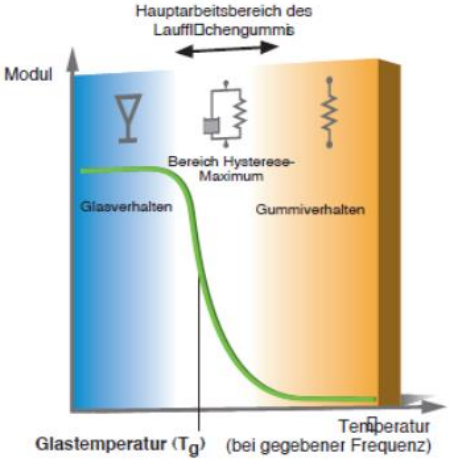


[Michelin 2005]

Nicht-Lineare Viskoelastizität - Temperatureinfluss

Verhalten gegenläufig zur Frequenz

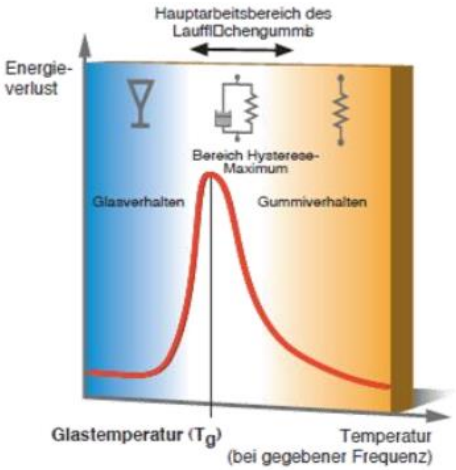
- Niedrige Temperaturen: sprödes, steifes Verhalten
- Bei Glasübergangstemperatur: maximale Viskosität → maximale Hysterese
- Hohe Temperaturen: flexibles, elastisches Verhalten



Gleicher Einfluss von Frequenz und Temperatur auf das Gummiverhalten bei:

- Frequenzerhöhung um den Faktor 10
- Temperaturabsenkung von 7 – 8 °C

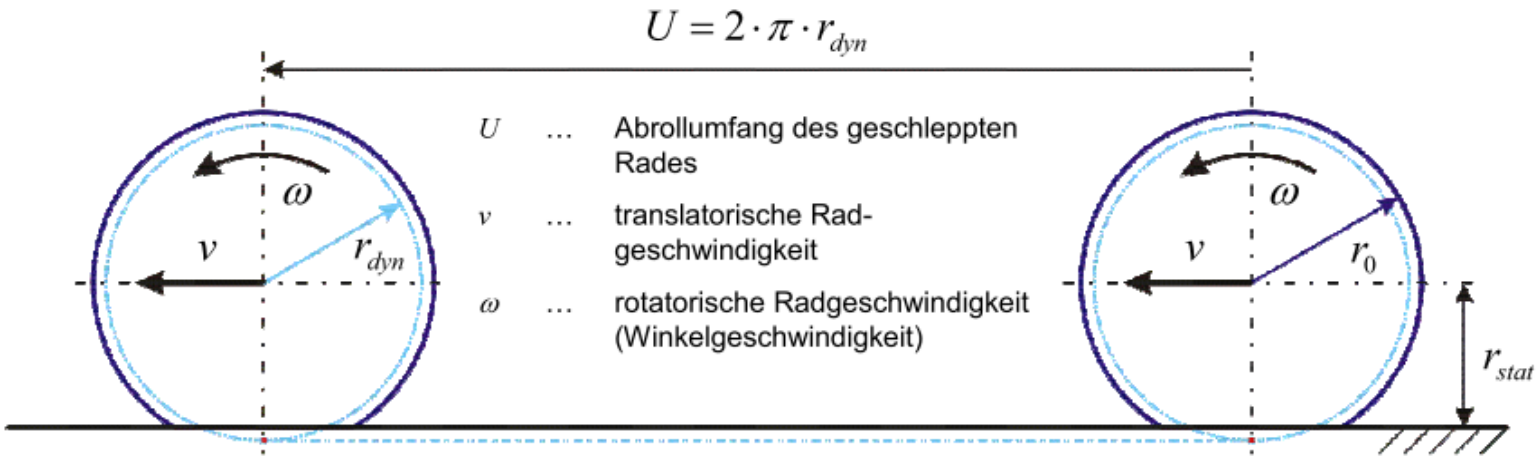
(Für Niederfrequenzbereich bei 10 – 10^5 Hz)



[Michelin 2005]

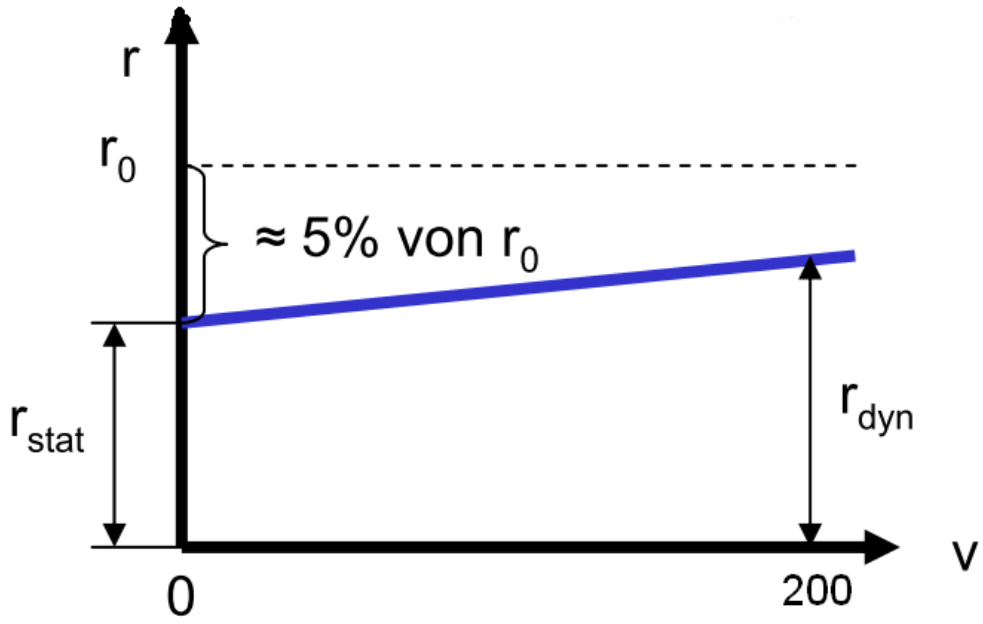
Radhalbmesser

- Ermittlung des dynamischen Radhalbmessers
  - Geschlepptes Rad bei 60 km/h nach DIN 70020
- Definition wichtiger Halbmesser
  - r_0 - Radius des unbelasteten Rades
  - r_{stat} - statischer Radhalbmesser (ruhendes, belastetes Rad)
  - r_{dyn} - dynamischer Rollradius (mit Umfangsgeschwindigkeiten)



Dynamischer Radhalbmesser

- Zunahme ca. 1,5 bis 2% bei 200 km/h
  - Tachoauslegung
  - Platzbedarf im Radhaus



Schlupfdefinition

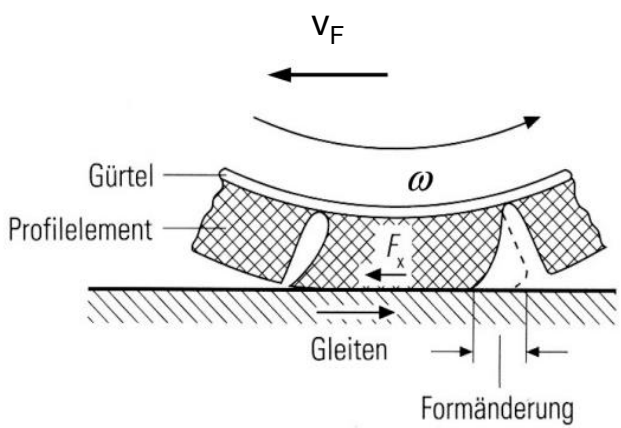
Antriebsschlupf

$$s = \frac{v_U - v_F}{v_U} \cdot 100\%$$

Bremsschlupf

$$s = \frac{v_F - v_U}{v_F} \cdot 100\%$$

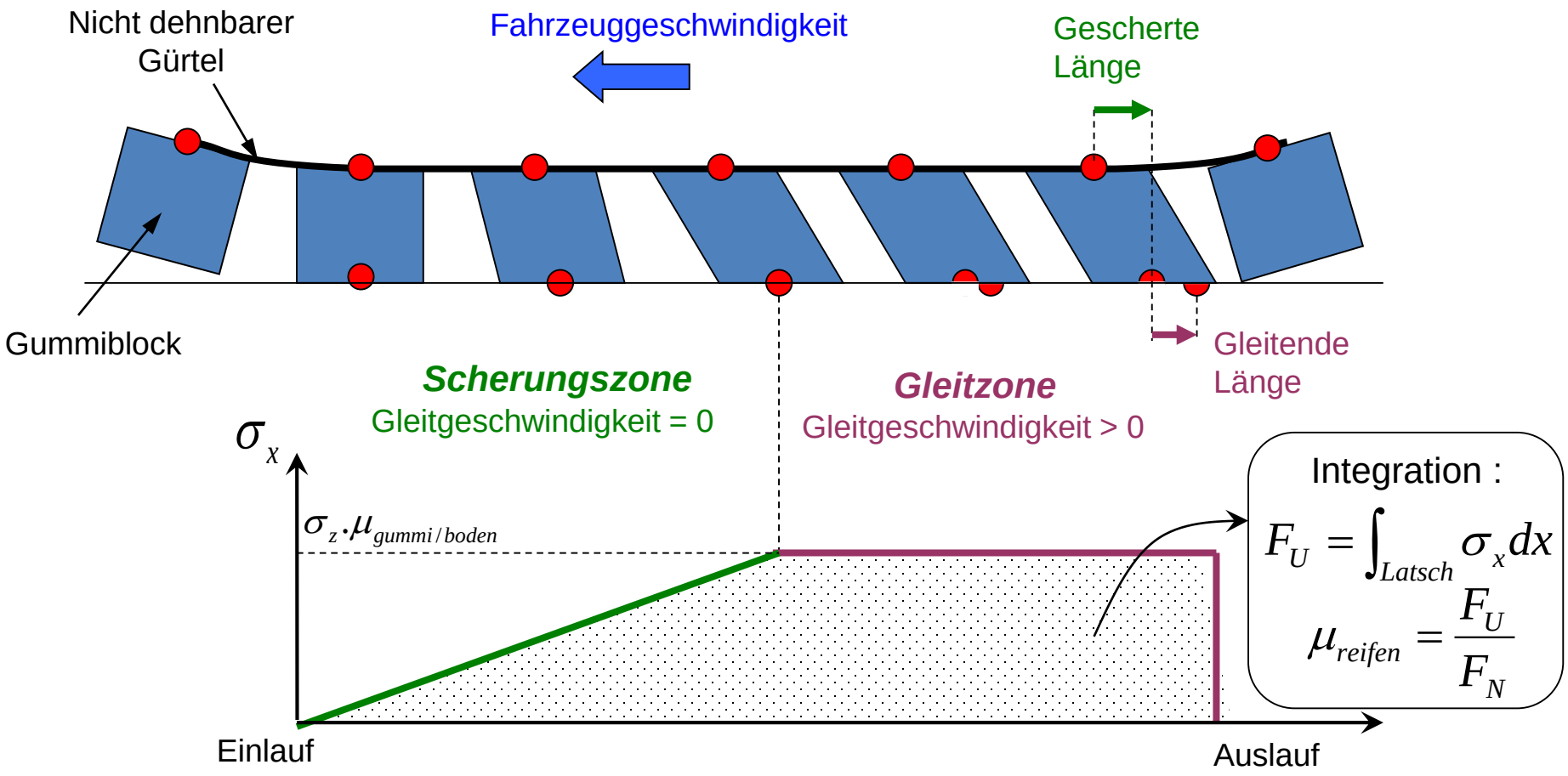
v_U...Umfangsgeschwindigkeit des Rades; v_F...Fahrgeschwindigkeit



mit $v_u = \omega \cdot r_{dyn}$

- Längs

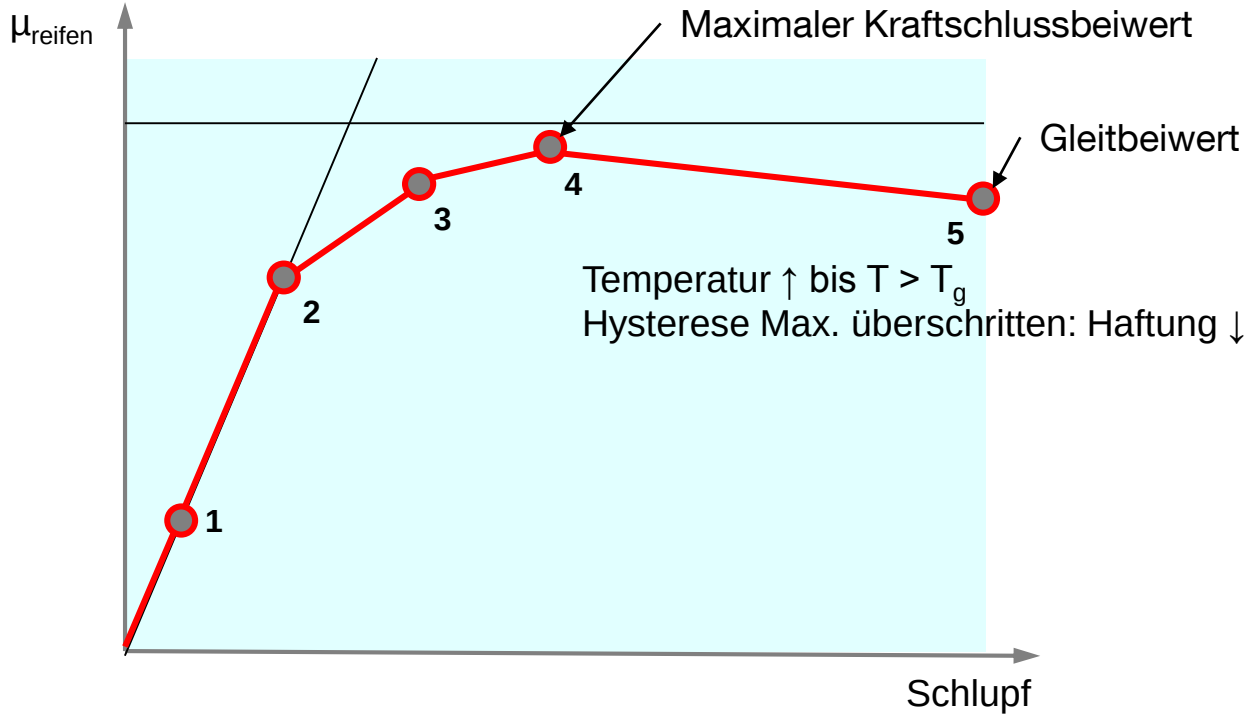
Längskraftanalyse: beim Bremsen

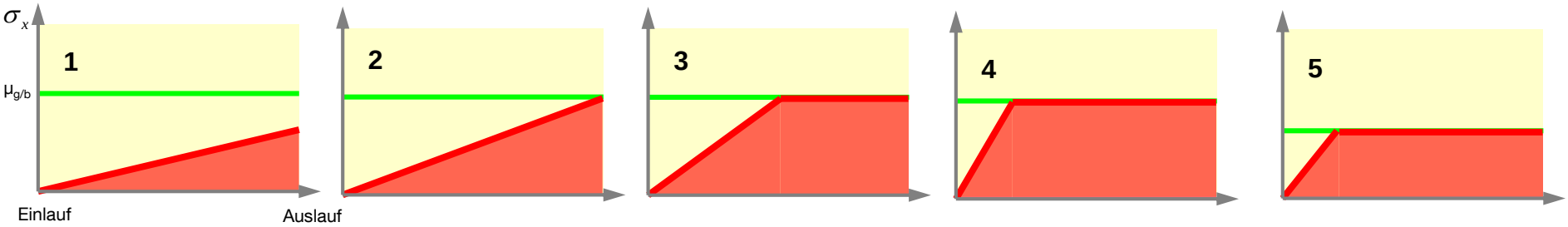


Quelle : Michelin

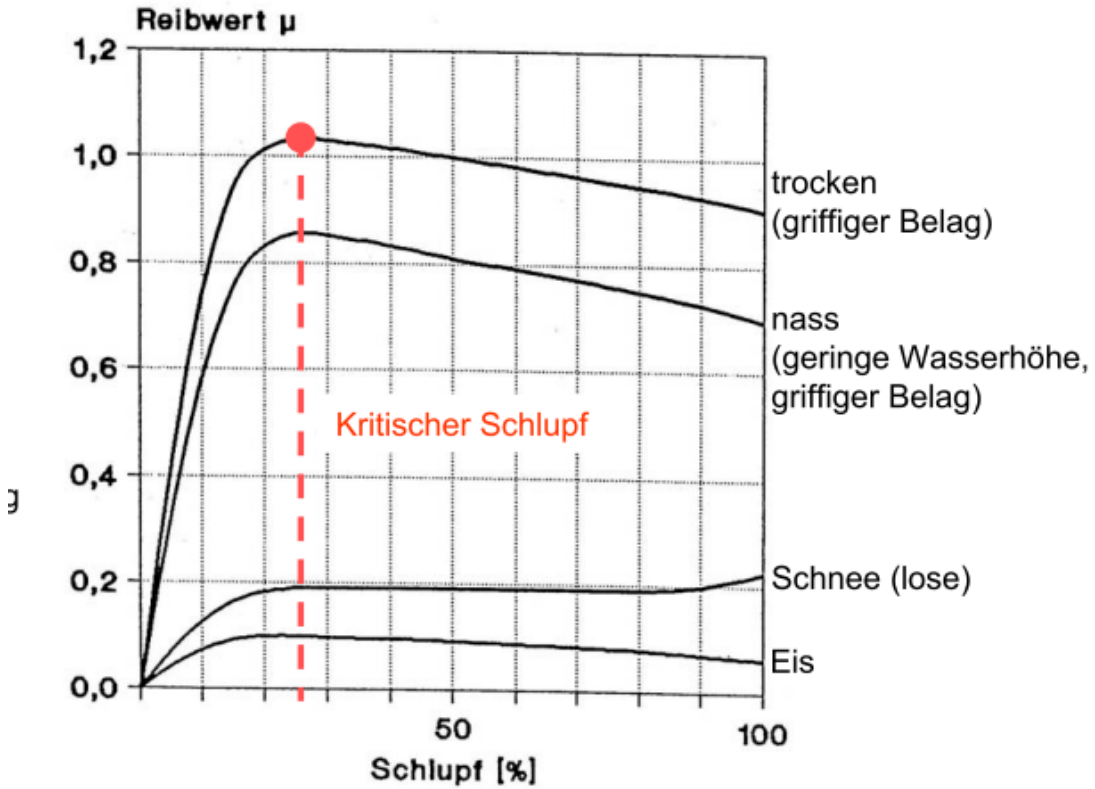
Längs-Kraftschluss-Schlupf-Kurve

Das Verhältnis Gleitung/Scherung wächst mit dem Schlupf.





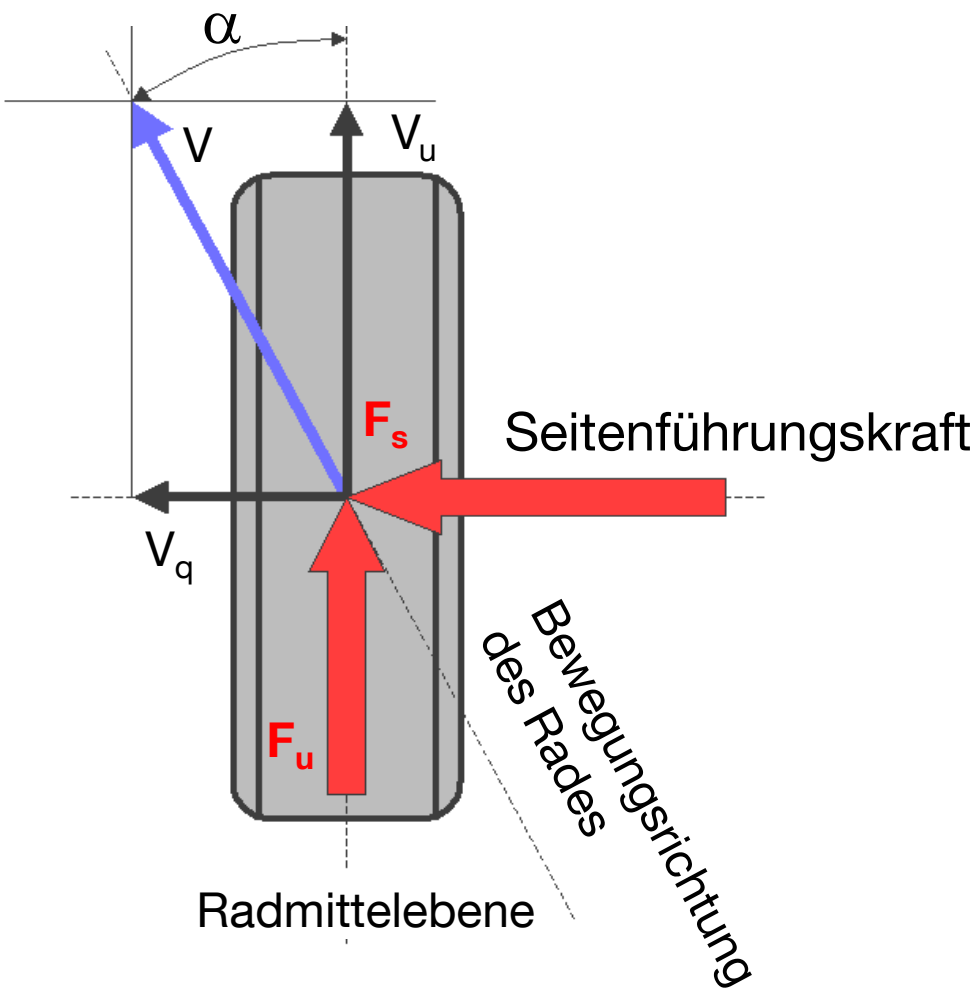
Längs-Kraftschluss-Schlupf-Kurve für diverse Fahrbahnzustände



Diese Zustände vermindern den Gummi/Boden Reibungswert, so dass den integrierten Reifen-Reibungswert auch verhindert wird.

- Quer

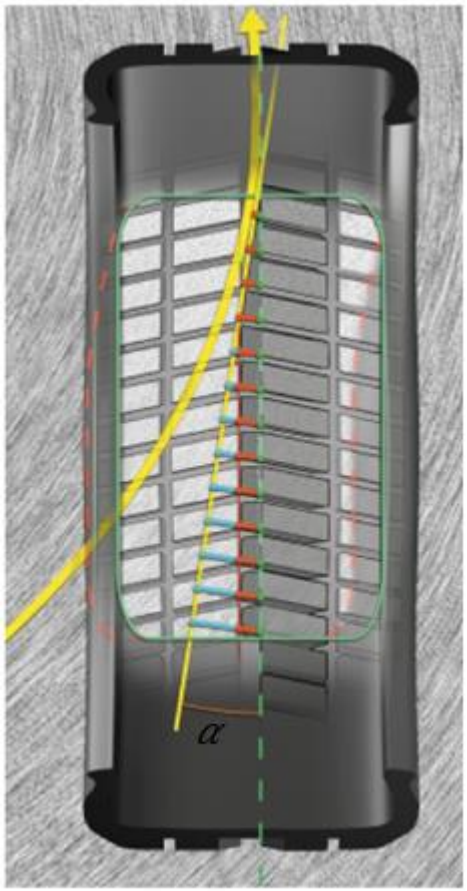
Entstehung des Schräglaufwinkels

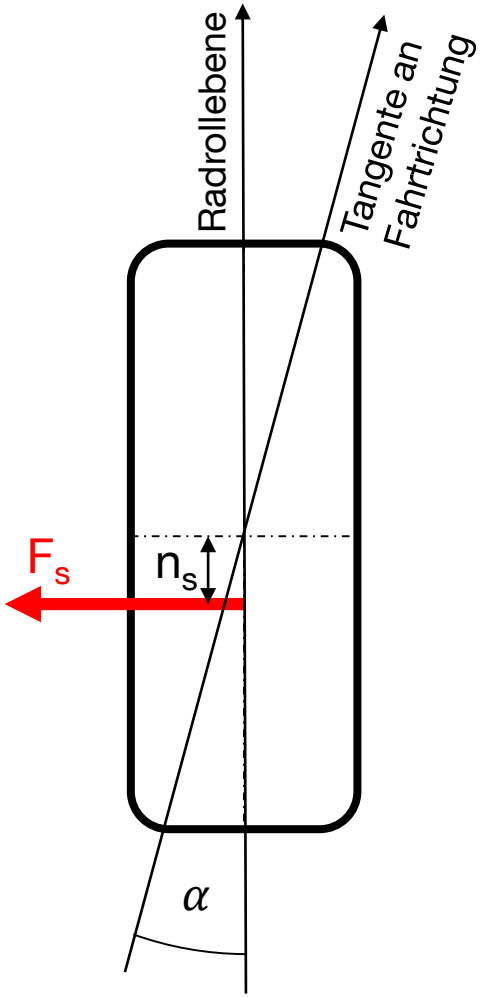


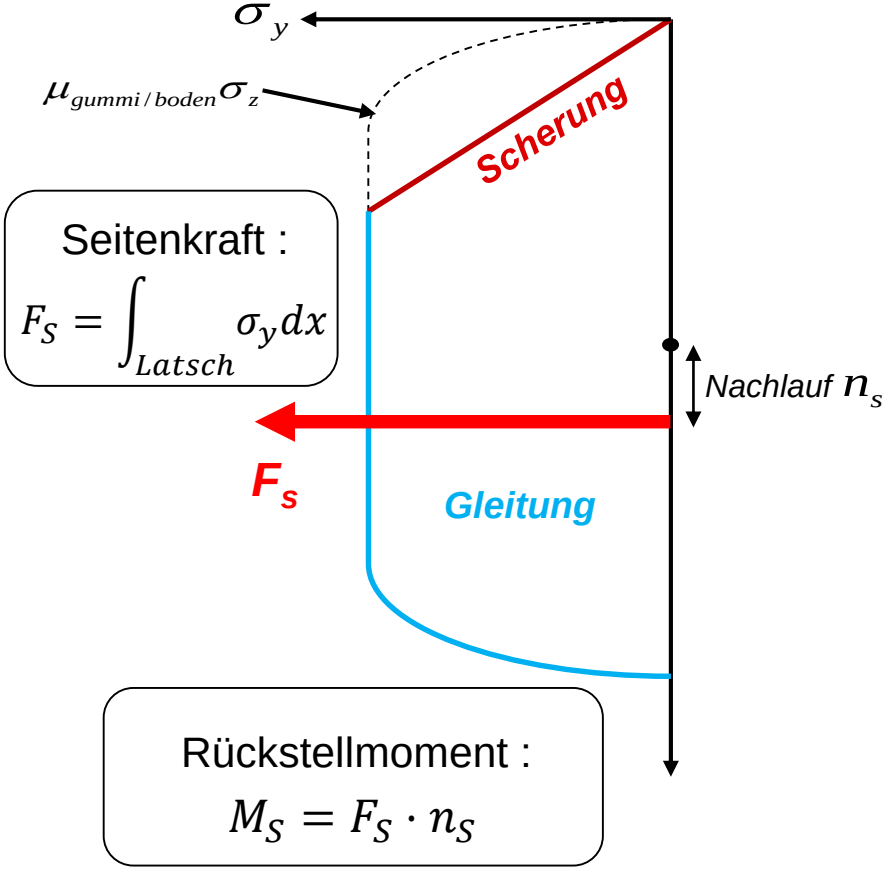
α = Schräglaufwinkel
V = Radgeschwindigkeit
V_u = Umfangsgeschwindigkeit
V_q = Quergeschwindigkeit
F_s = Seitenführungskraft
F_u = Umfangskraft

Quer-Seitenkraftmessung über Schräglaufwinkel

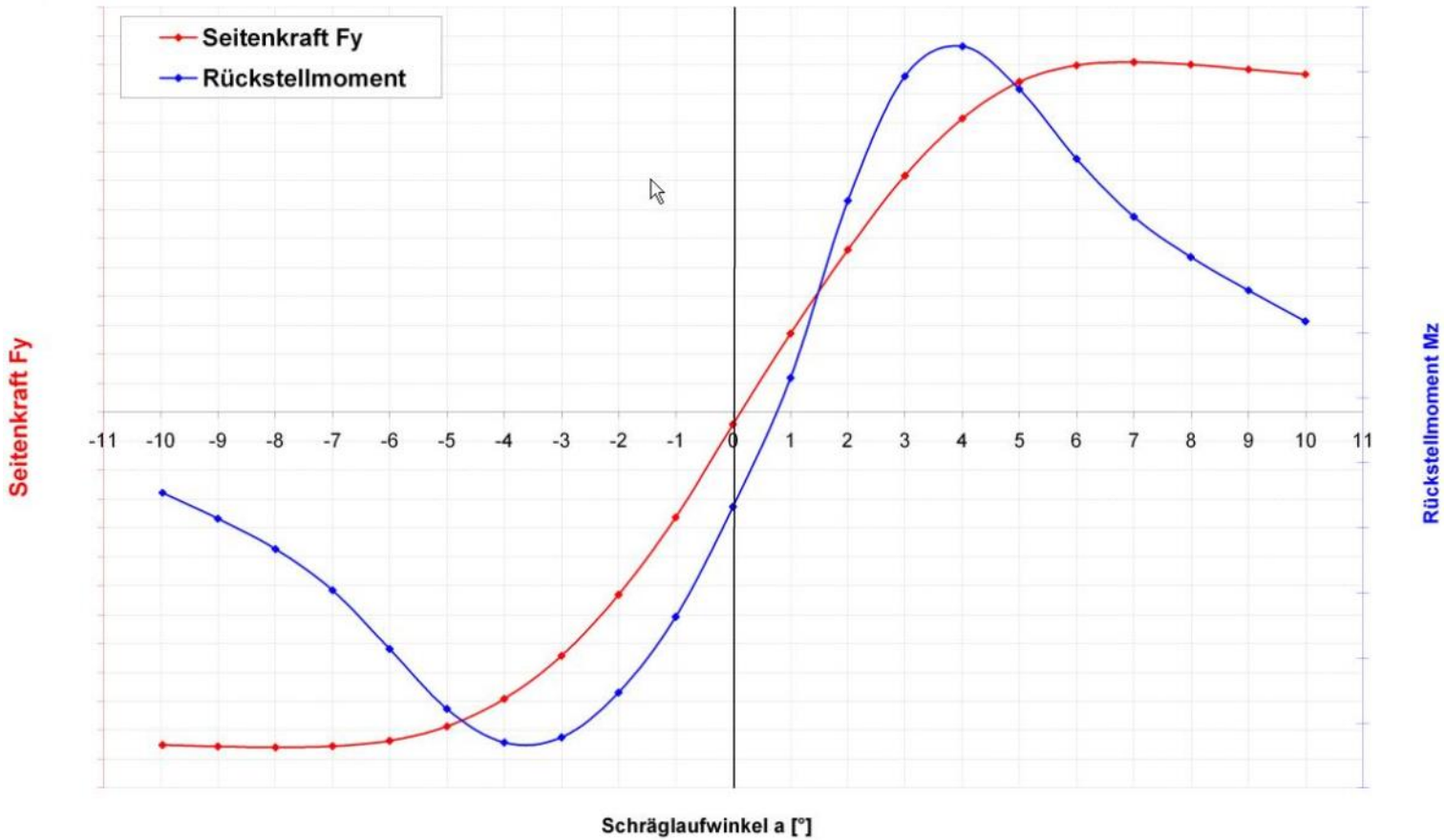
Entstehung der Seitenführungskraft und Rückstellmoment



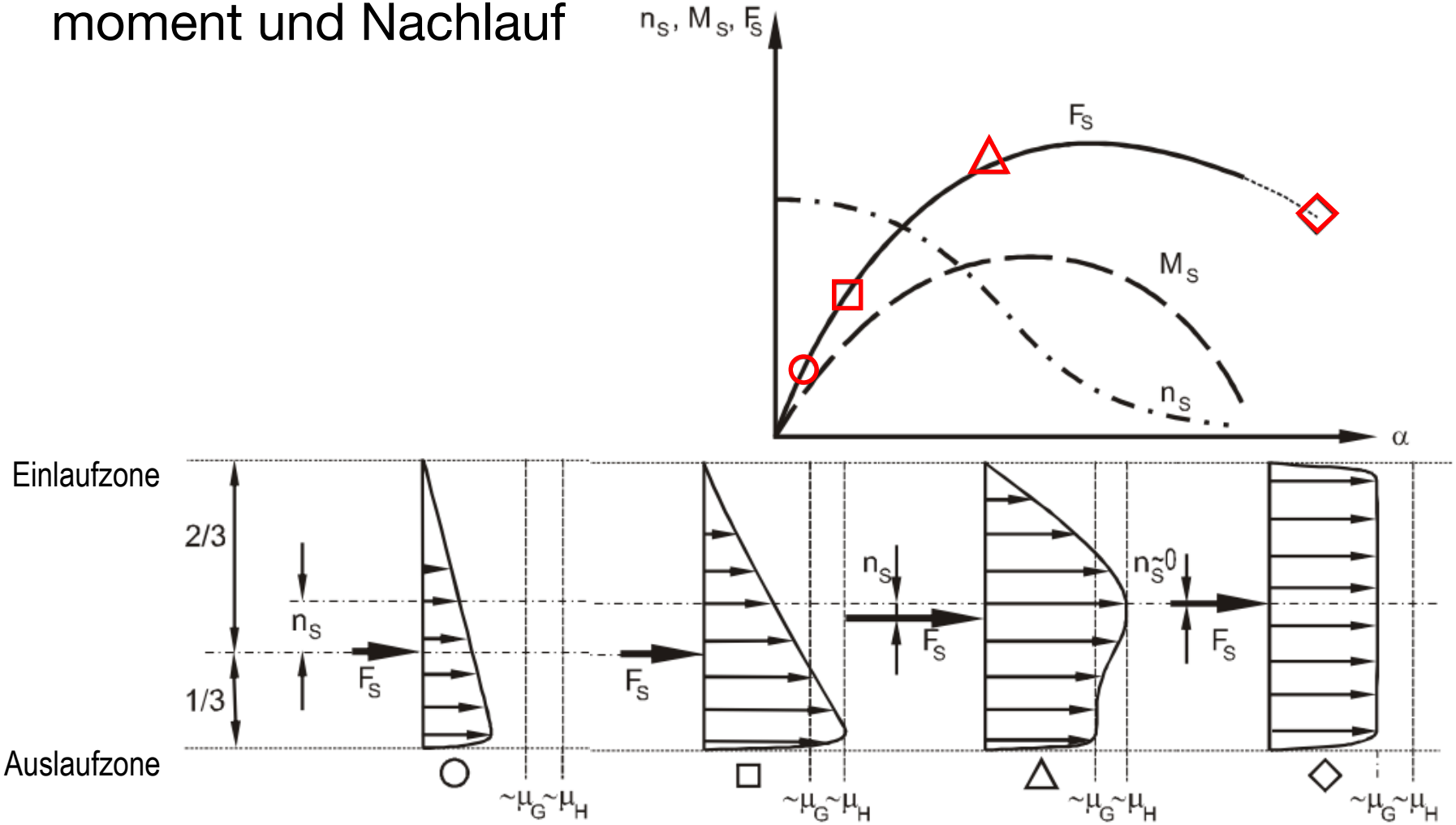




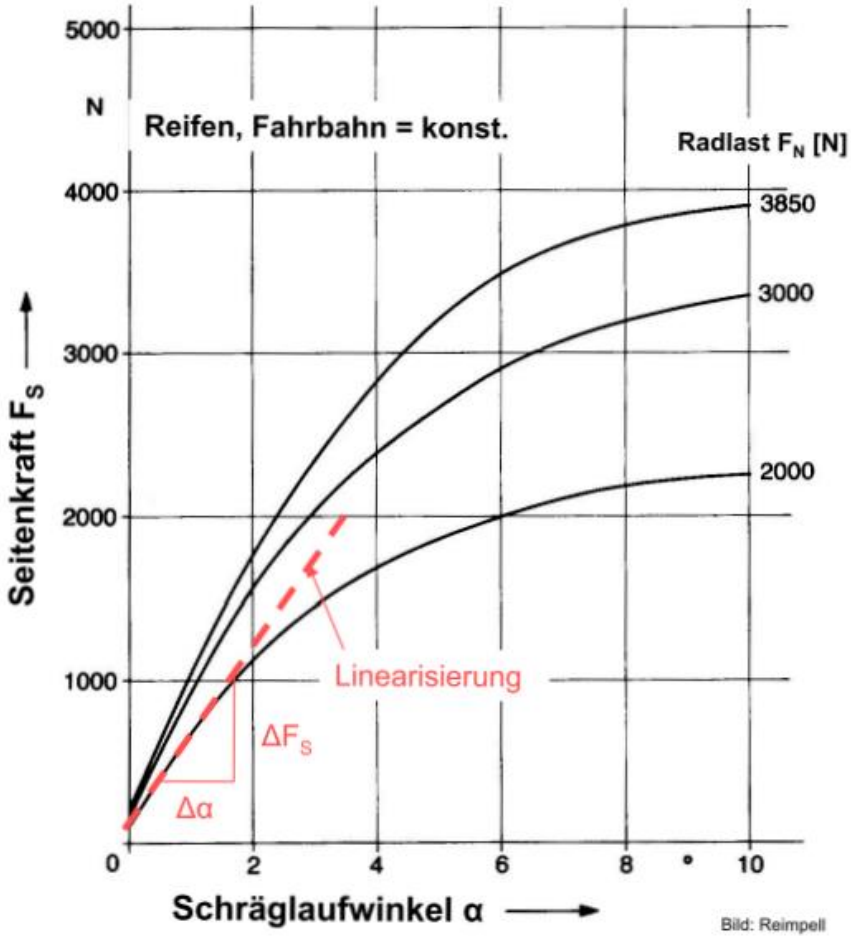
Zusammenhang Seitenkraft und Rückstellmoment



Zusammenhang Seitenkraft, Schräglaufwinkel, Rückstellmoment und Nachlauf



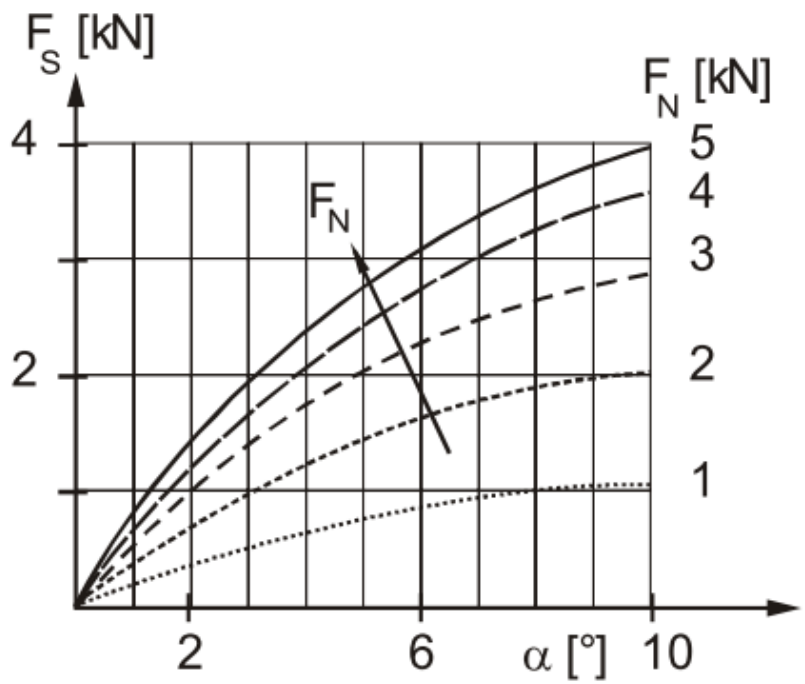
Seitenkraft-Schräglaufwinkel-Kurve

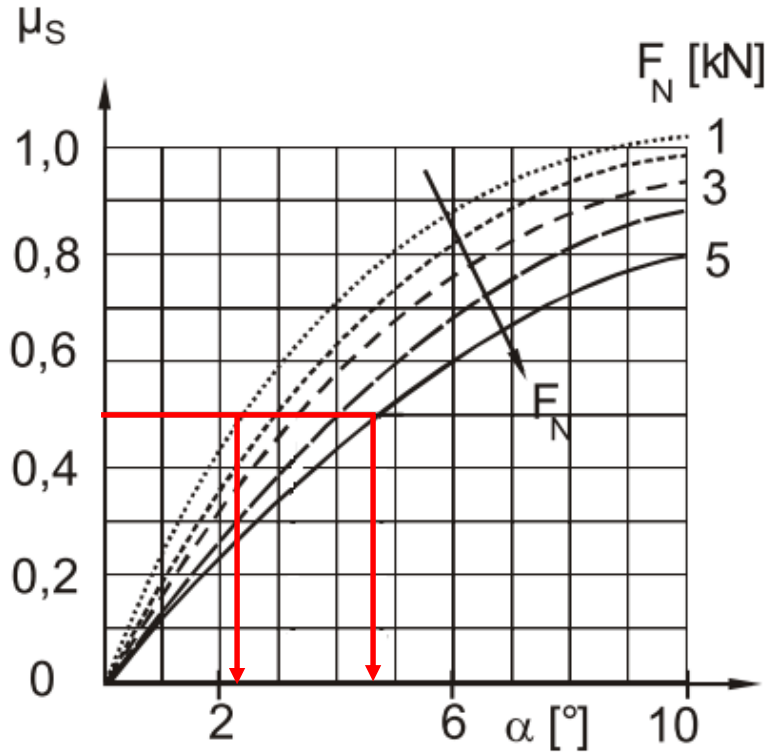


Für kleine Schräglaufwinkel ist eine Linearisierung zulässig.

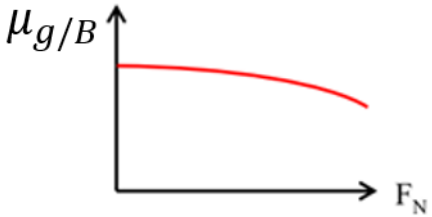
Schräglaufsteifigkeit: $c_S = \frac{\Delta F_S}{\Delta \alpha}$

Einfluss der Radlast auf den seitlichen Kraftschlussbeiwert



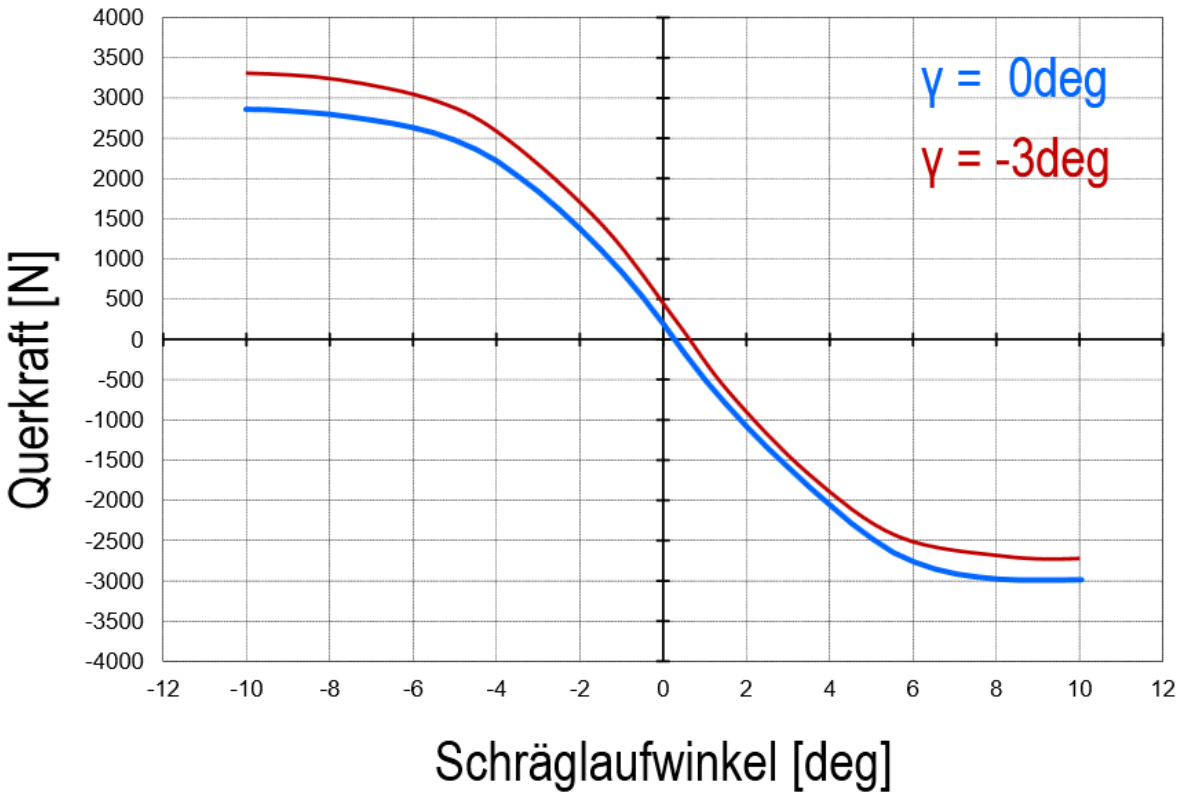


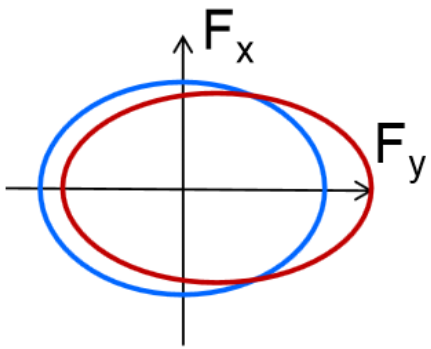
Seitlicher Kraftschlussbeiwert: $\mu_s = \frac{F_S}{F_N}$



$\mu_{g/B}$ ist abhängig von Normalkraft

Sturzeinfluss

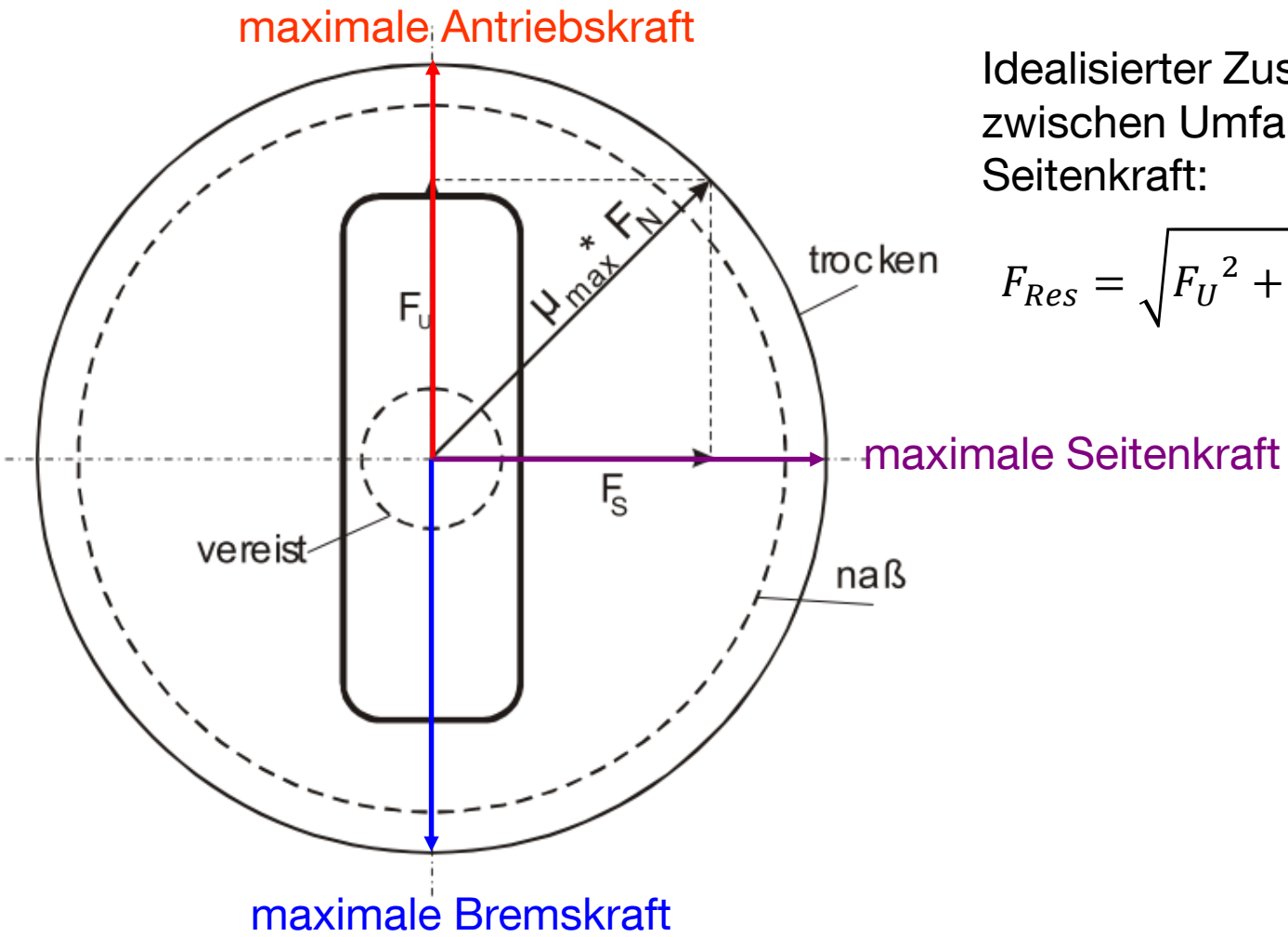




Mehr Sturz steigert Querkraftmaximum, verringert allerdings gleichzeit Potential Längskraft zu übertragen.

- Längs + Quer

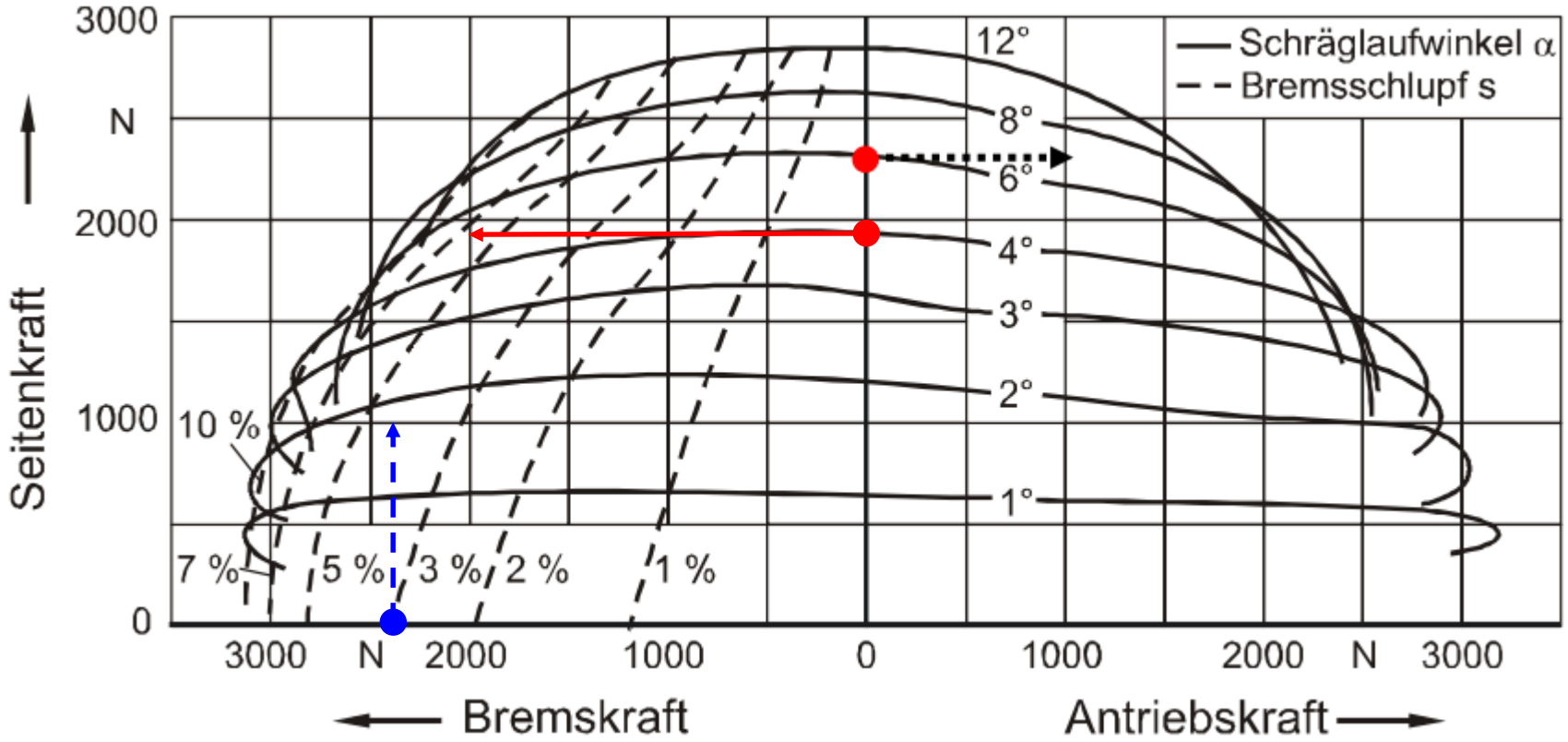
Kamm'scher Kreis



Idealisierter Zusammenhang zwischen Umfangskraft und Seitenkraft:

$$F_{Res} = \sqrt{{F_U}^2 + {F_S}^2} \leq \mu_{max} \cdot F_N$$

Realer Zusammenhang Umfangskraft – Seitenkraft



Anstieg des Schräglaufwinkels wenn zur Seitenkraft zusätzlich Bremskraft angefordert wird

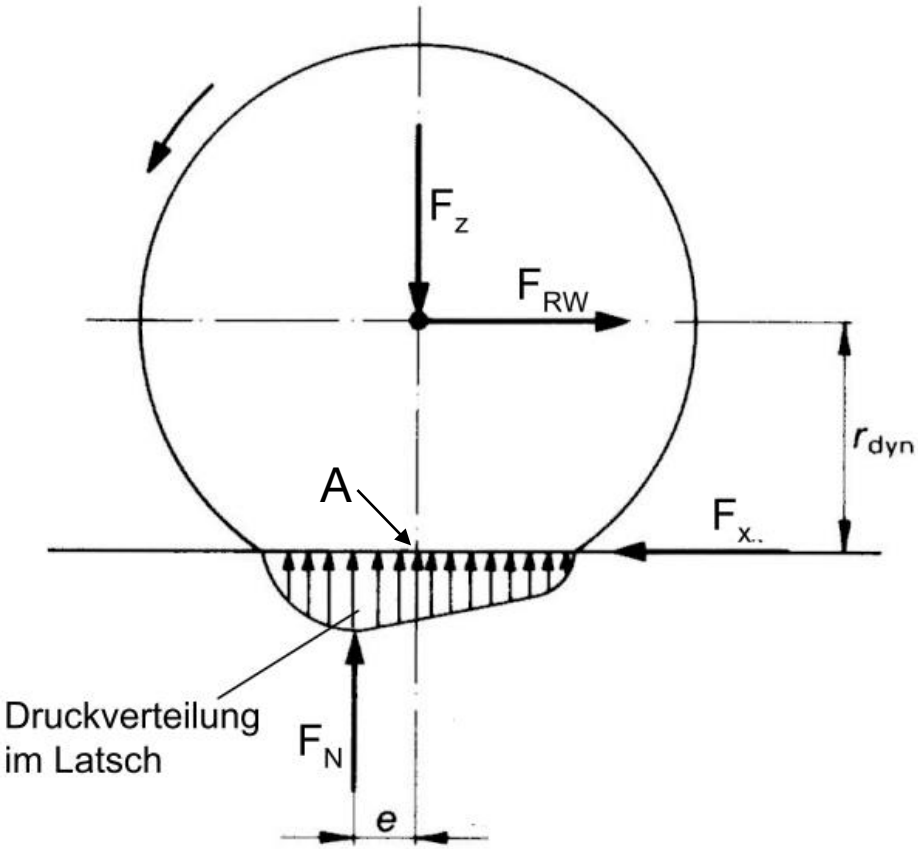
Anstieg des Längsschlupfs wenn zur Bremskraft zusätzlich Seitenkraft angefordert wird

Quelle: Zomotor

Ursachen des Rollwiderstands

Was?	Reifenoberfläche und Umgebungsluft	Lauffläche			Seitenwand und Wulstbereich	
Wie?	Luft-verwirbelungen	Schlupf auf Untergrund	Durch wiederholte Verformung ausgelöster Energieverlust			
			Biegung	Stauchung	Scherung	Biegung	Scherung
Anteil am Rollwiderstand	< 15 %	60 bis 70 %				20 bis 30 %	

Berechnung des Rollwiderstandsbeiwerts



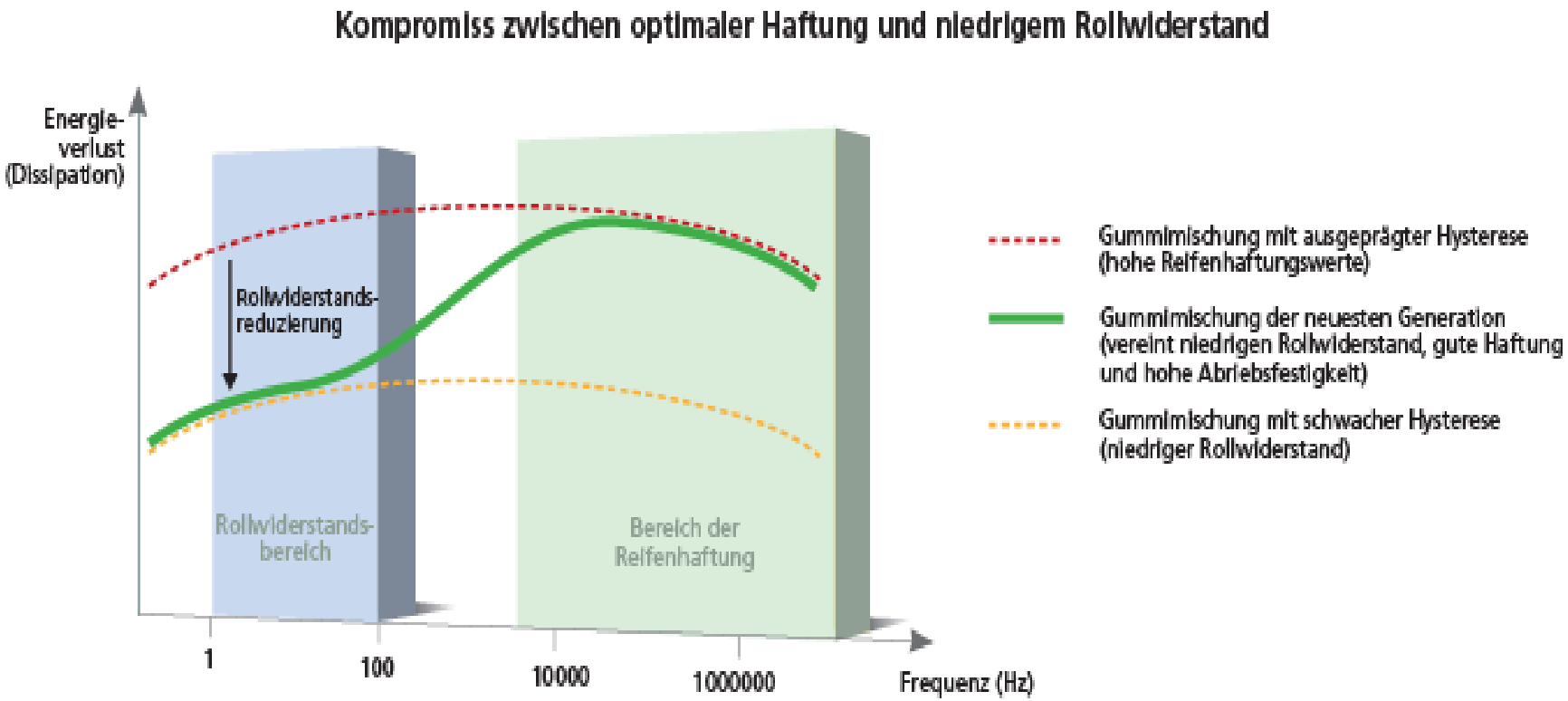
Höhe des Rollwiderstandsbeiwerts f_R:

- Glatter Asphalt/Beton 0,007 bis 0,015
- gute Pflasterstraße 0,02
- Erdweg 0,05
- Sand 0,3

$$\Sigma M_i^{(A)} = 0 \longrightarrow F_{RW} = F_N \cdot \frac{e}{r_{dyn}} = f_R$$

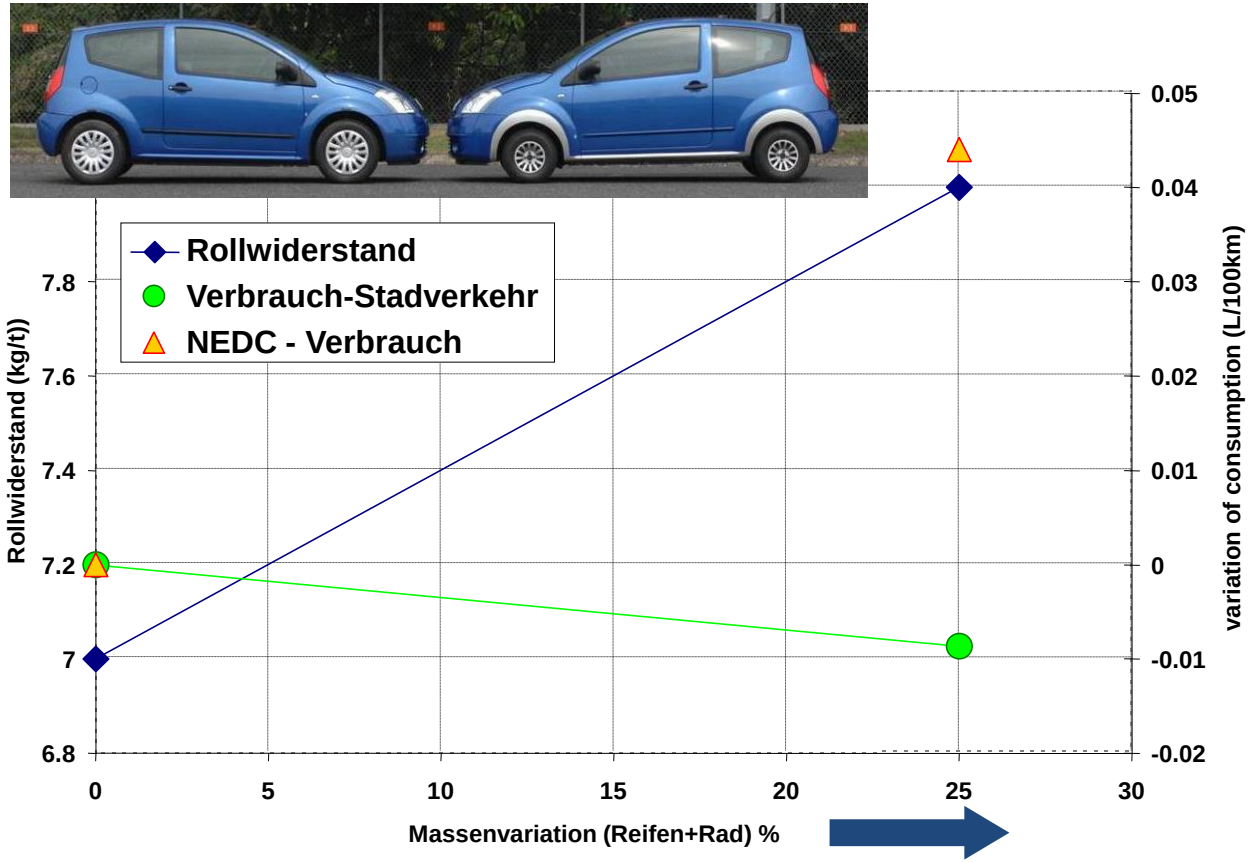
F_N	Radlast
F_{RW}	Rollwiderstandskraft
e	Hebelarm der Normalkraft
r_{dyn}	dynamischer Radhalbmesser
f_R	Rollwiderstandsbeiwert

Grüne Reifen



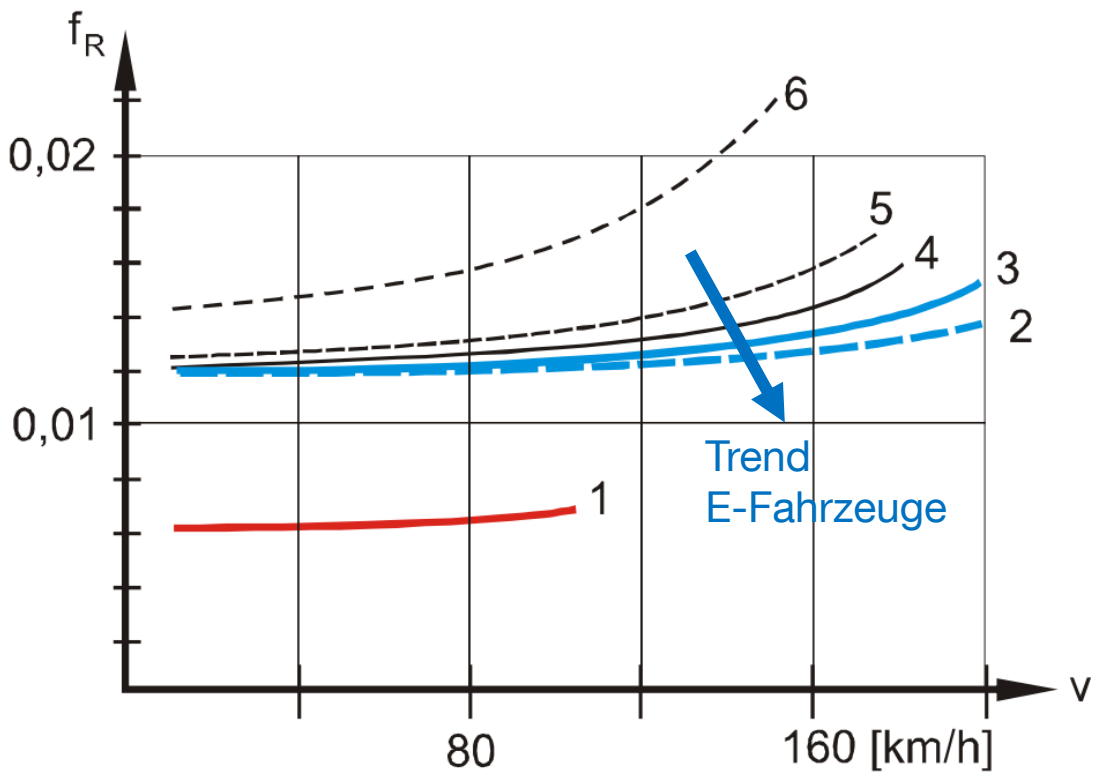
Fahrprofil bei der Reifenwahl berücksichtigen!

- 175/65 R14 vs. 175/70 R10 im Stadtverkehr



Quelle: Michelin

Rollwiderstand und Reifenbauart



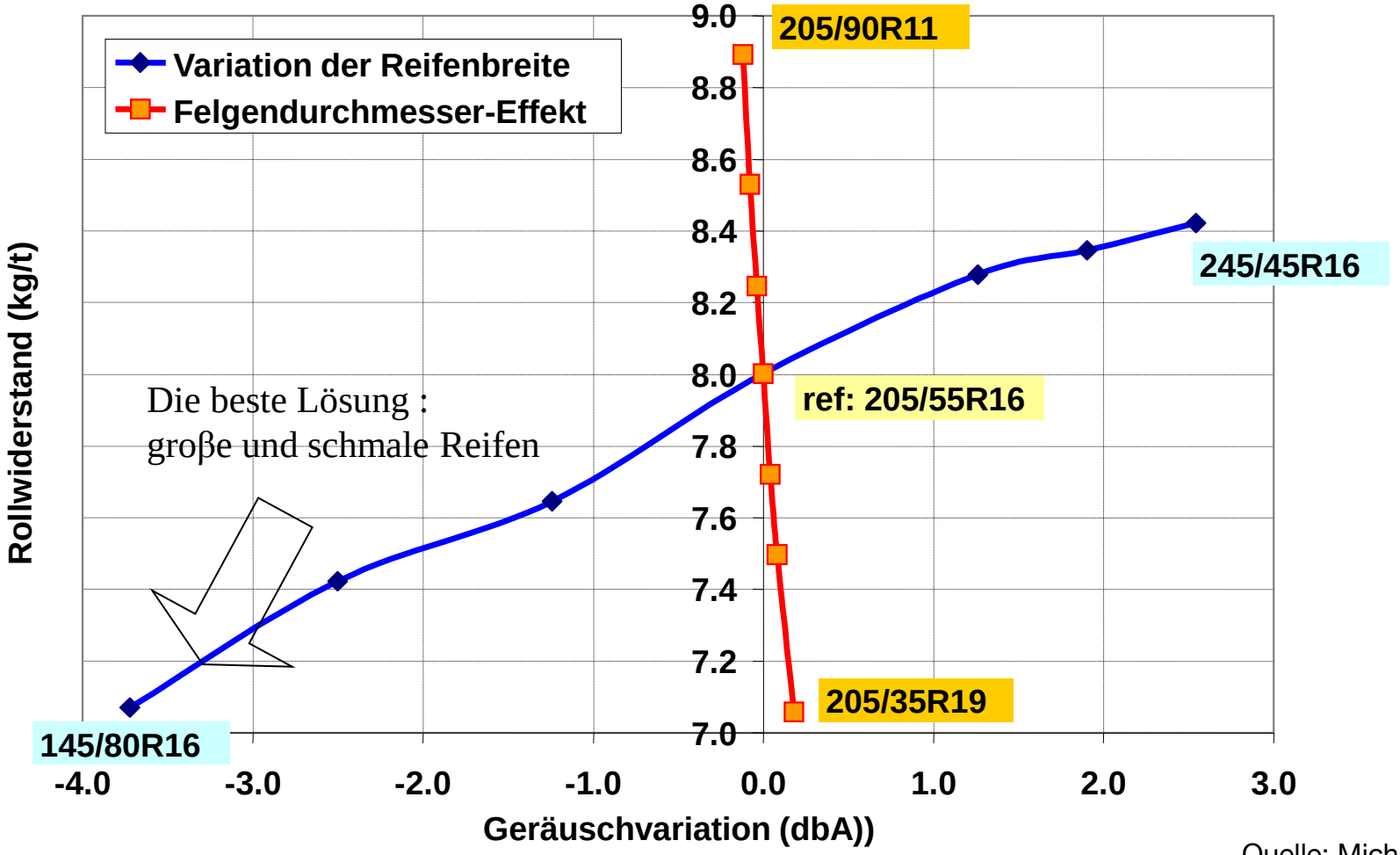
1 Lkw-Stahlgürtelreifen

2 Pkw-Stahlgürtelreifen (VR/50)
3 " (HR/70)
4 " (SR/80)

5 Pkw-Textilgürtelreifen (SR/80)

6 Pkw-Diagonalreifen

Einfluss der Größe auf Rollwiderstand und Rollgeräusch



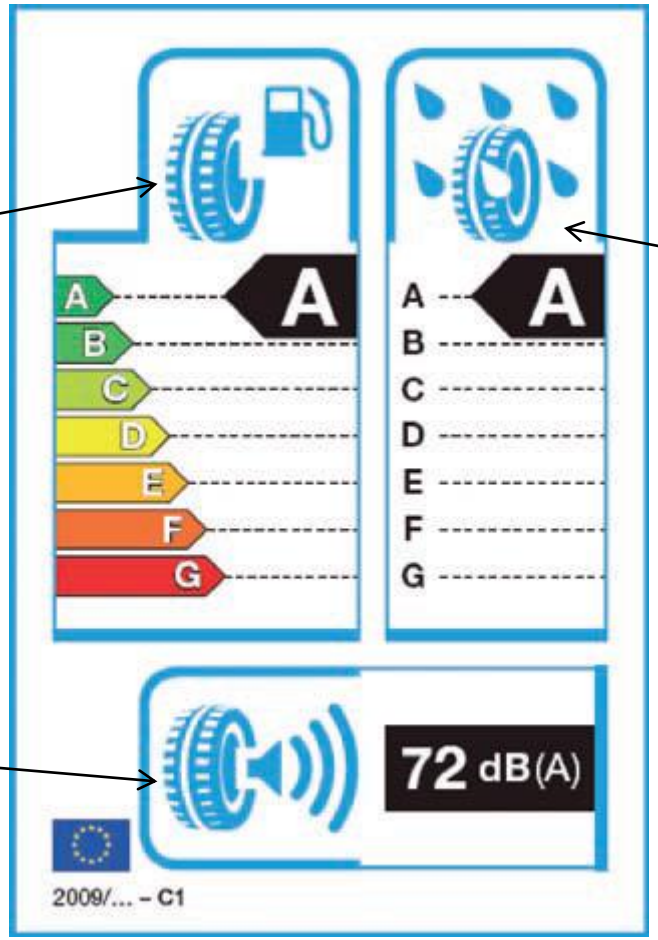
Quelle: Michelin

Neue Reifen „Grading“ nach europäische Regulierung

Verbrauchindex (Rollenwiderstand)

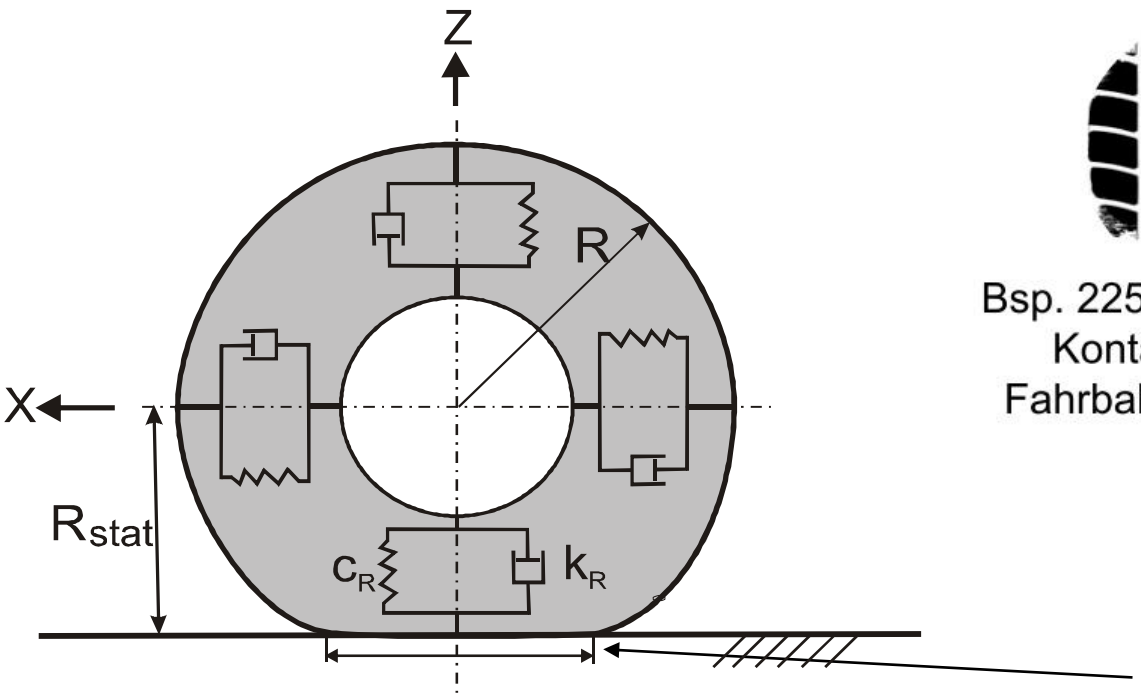
Nassgriff

Rollgeräusch



Feder-Dämpfer-Modell des Reifens

- c_R: Federkonstante des Ersatzelements
- k_R: Dämpfungskonstante des Ersatzelements
- $F_{Dämpfer} = k_R \cdot v_{Einfederung}$

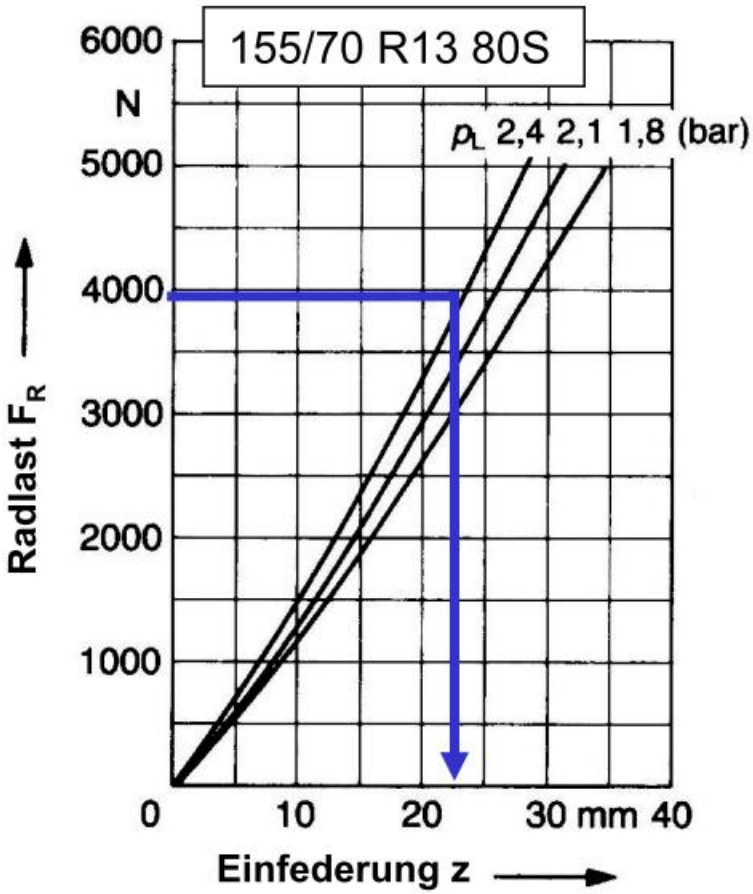


Reifenlatsch

Bsp. 225/45 R17; 2,0 bar
Kontaktfläche zur
Fahrbahn: ca. 1,3dm² !

Reifenaufstandsfläche
("Reifenlatsch")

Statische Federsteifigkeit



Federsteifigkeit: $c_R = \frac{dF}{dz}$

$c_R \uparrow$ Fahrstabilität ↑
$c_R \downarrow$ Komfort ↑

$$c_R = \frac{dF}{dz} = \frac{\Delta F}{\Delta z} = \frac{4000\ N}{22\ mm} = 182\ \frac{N}{mm}$$

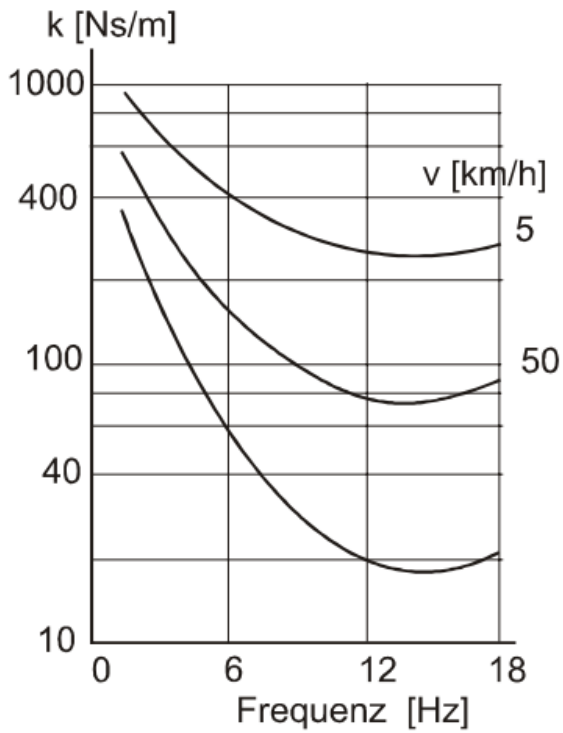
PKW: $c \approx 200\ \frac{N}{mm}$
LKW: $c \approx 700\ \frac{N}{mm}$

$$K_{statZZ} = 4 \cdot p \cdot (B \cdot D)^{0,5}$$

Quelle: Reimpell

Reifendämpfung

- Reifendämpfung k_R
  - bei $\omega < 15$ Hz: $\omega \cdot k_R$ const.
  - bei höherer Frequenz steigt k_R an



Größenordnung der Reifendämpfung:

$$D = \frac{k_R}{2 \cdot m_R \cdot \omega_{eR}}$$

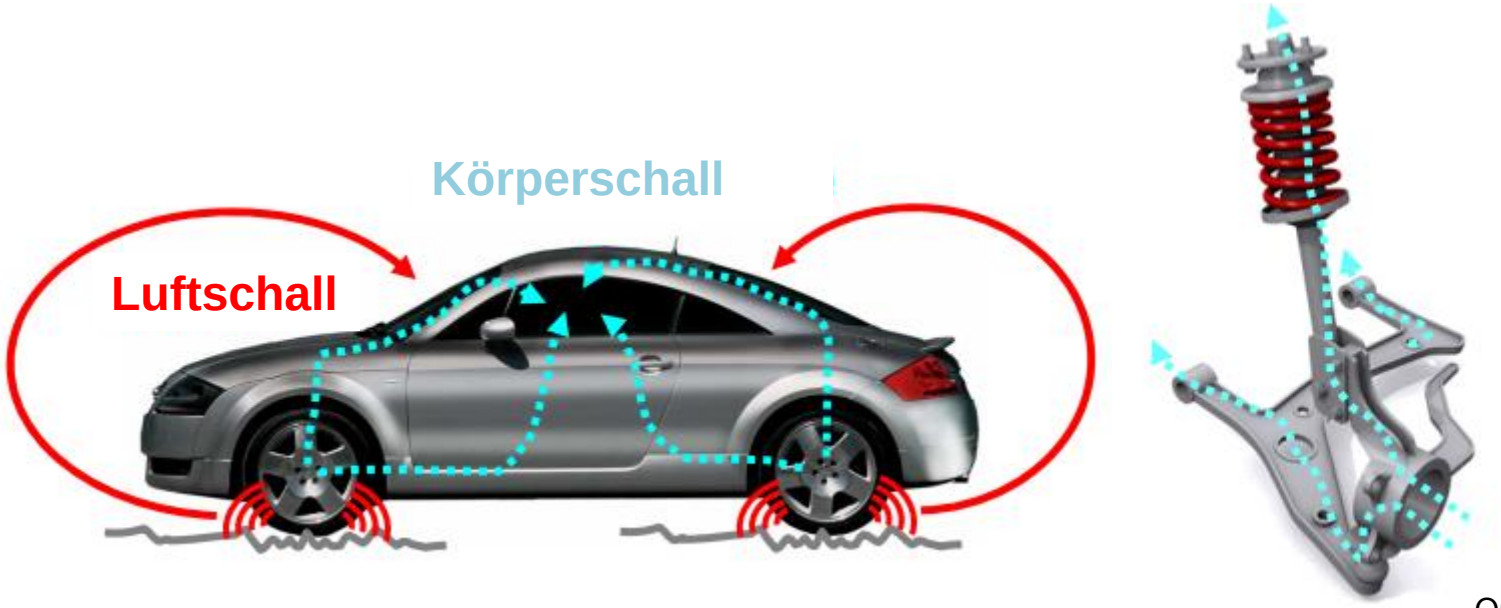
$$D \approx 0{,}5$$

Nicht ausreichend für die Bedämpfung der Radmassen (angestrebt D ≈ 0,4)

Zusätzlicher Schwingungsdämpfer erforderlich

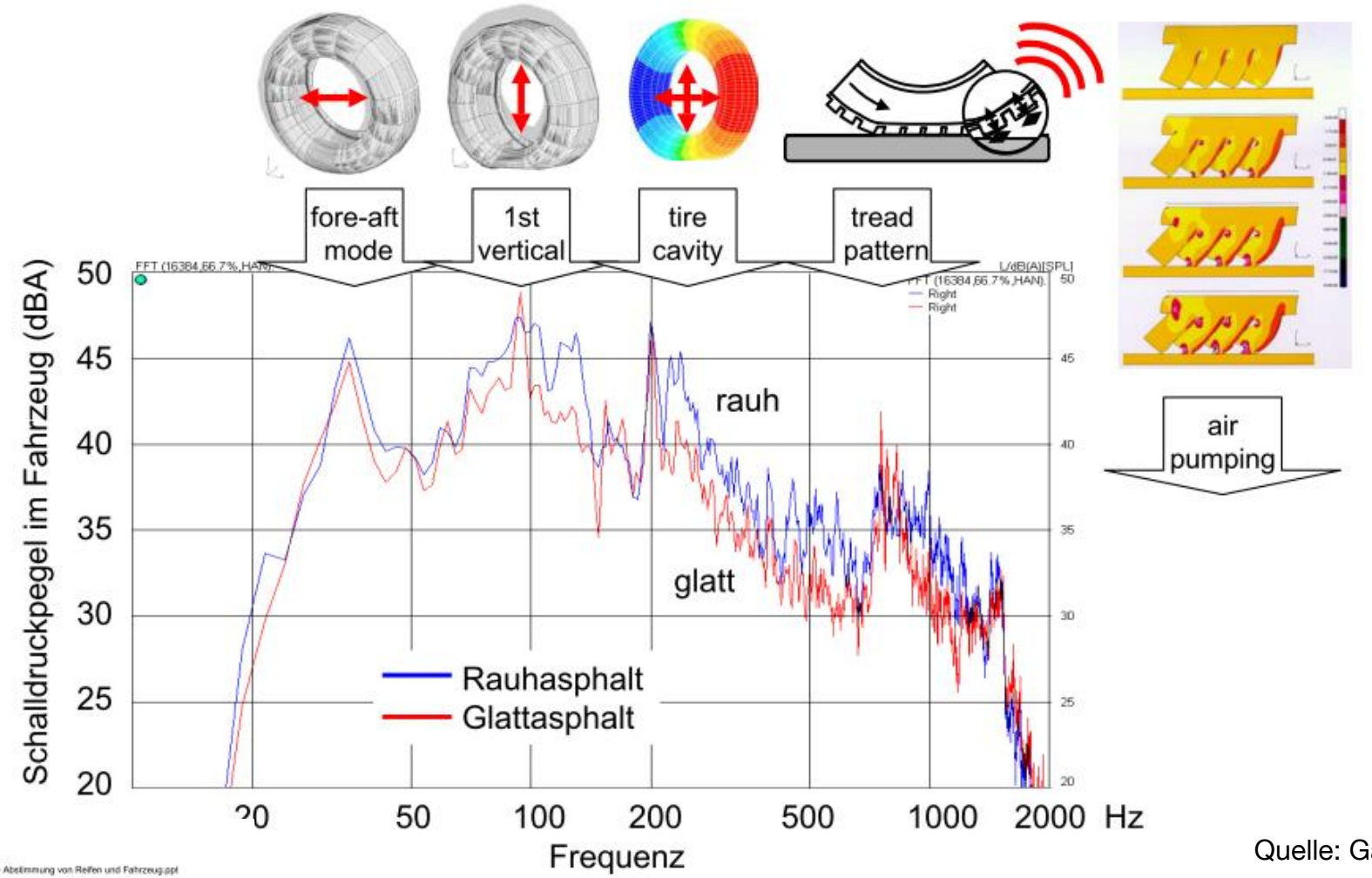
Übertragungswege des Rollgeräusches in den Innenraum

- Körperschall-Übertragung (unter 400 Hz)
  - Reifenschwingungen werden über das Fahrwerk in den Innenraum eingeleitet
- Luftschall-Übertragung (über 400 Hz)
  - Reifenschwingungen werden über die Luft in den Innenraum eingeleitet



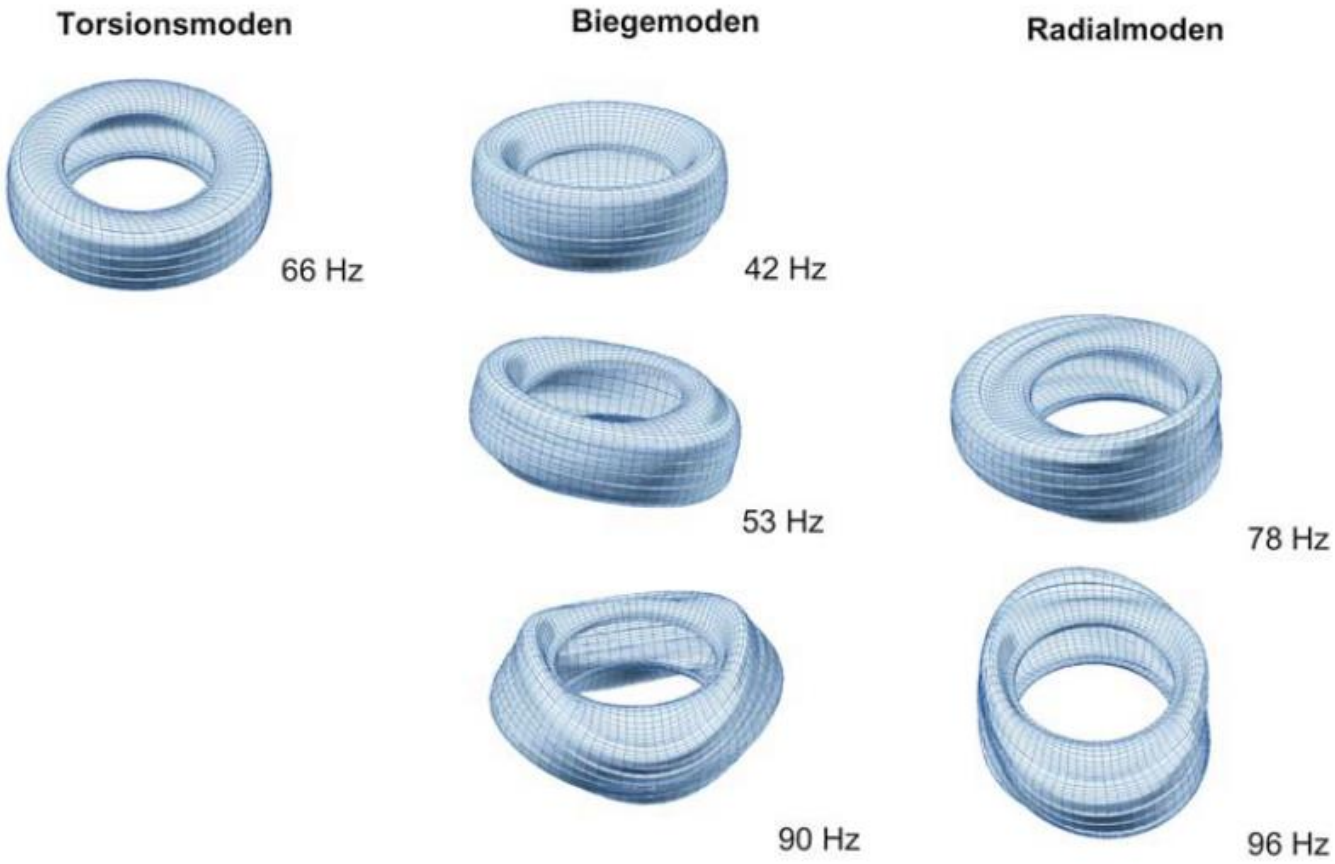
Quelle: Kindt

Ursachen für Rollgeräusch



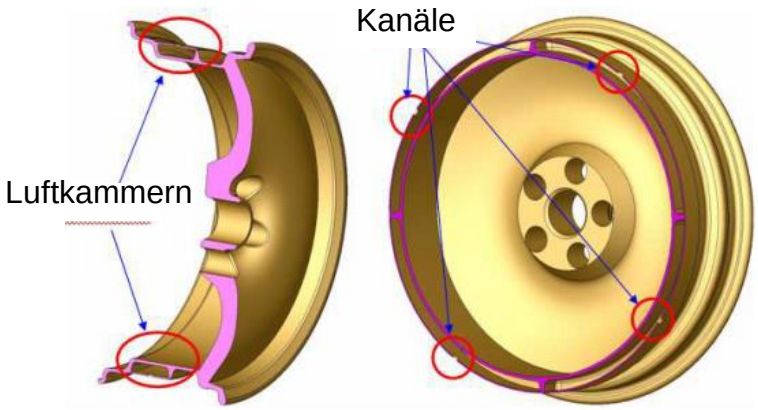
Quelle: Gauterin

Beispiele für Eigenschwingformen des Reifens



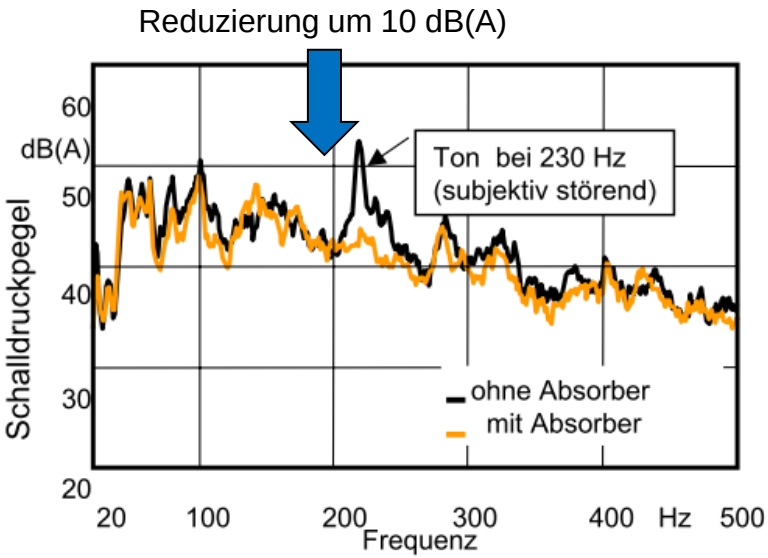
Quelle: Continental

Geräuschminimierung im Bereich der Kavitätsschwingung



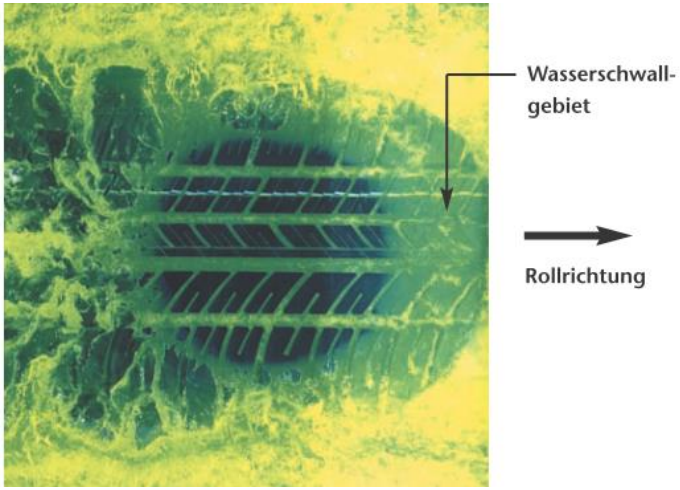
Felgen mit Helmholtz-Resonator Prinzip

Anbringen von Absorbern



Fahrzeuginnengeräusch
Quelle: Bridgestone, Continental

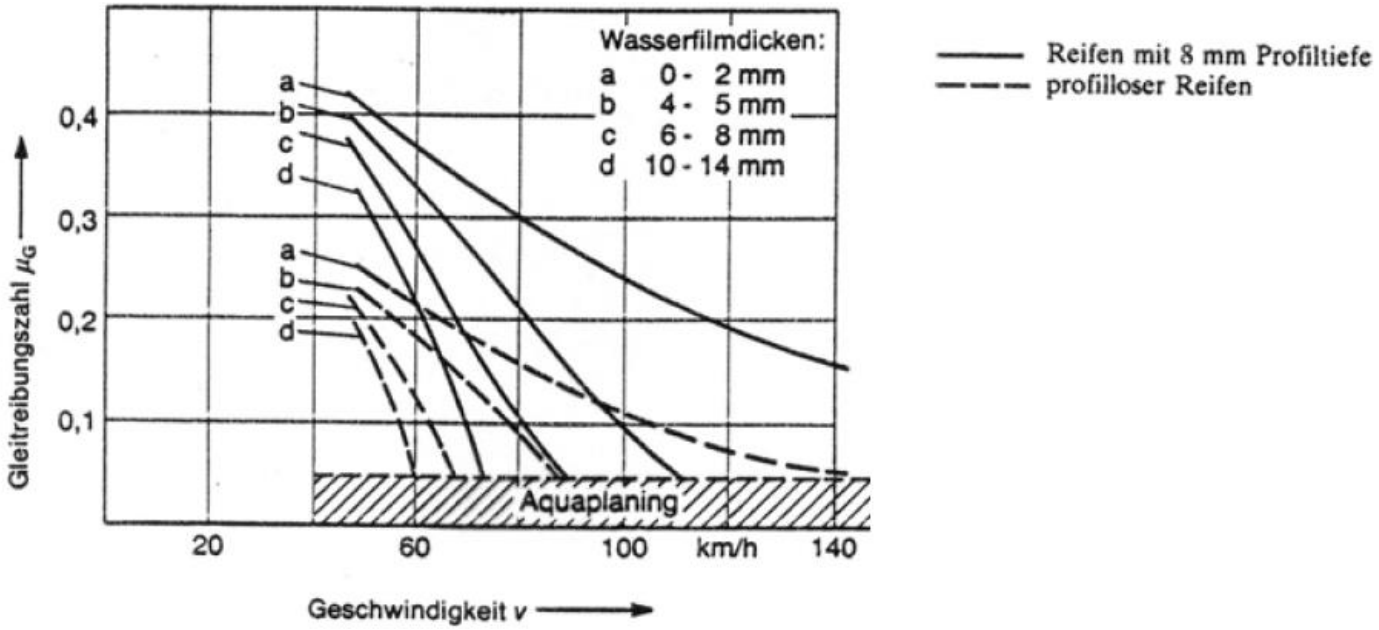
Aquaplaning



Quelle: Goodyear

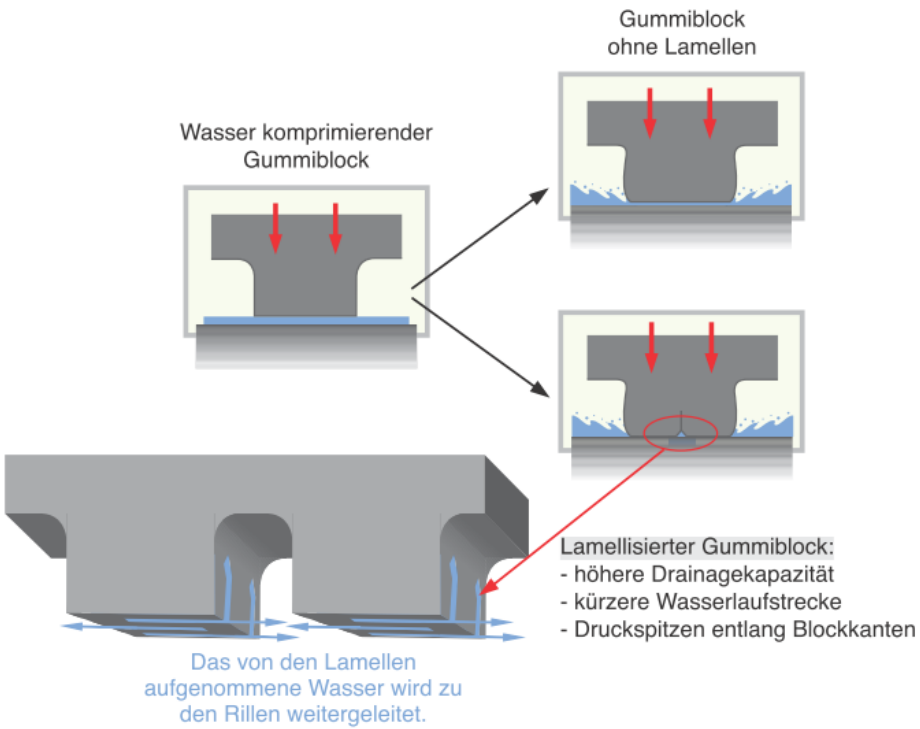
Entstehung von Aquaplaning

- Kleinere Kontaktfläche zwischen Latsch und Fahrbahn
  - Mit zunehmender Wasserfilmdicke und Fahrgeschwindigkeit
- Aufschwimmen → Aquaplaning
  - Wasserdruck höher als Druck zwischen Latsch und Fahrbahn



Abführung des Wassers

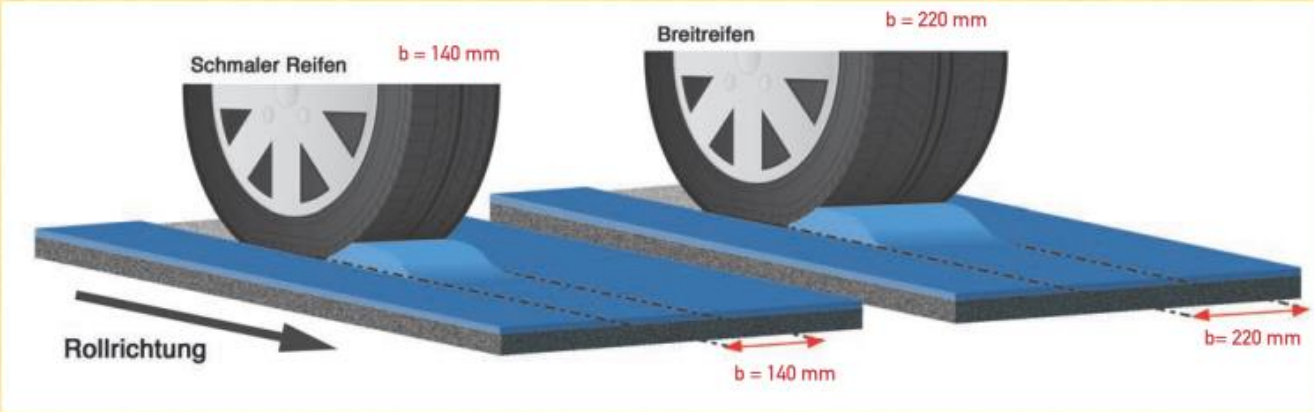
- Querorientierte Laufflächenrillen
- Zusätzliche Lamellen



Quelle: Michelin

Breitreifenproblematik

Ein Breitreifen muss so konstruiert sein, dass er erheblich größere Wassermengen aufnehmen kann!



Volumenstrom Q = v · **b** · h, in l/s (Liter/Sekunde)

Rechenbeispiel:
Geschwindigkeit v = 80 km/h
Wasserhöhe h = 3 mm

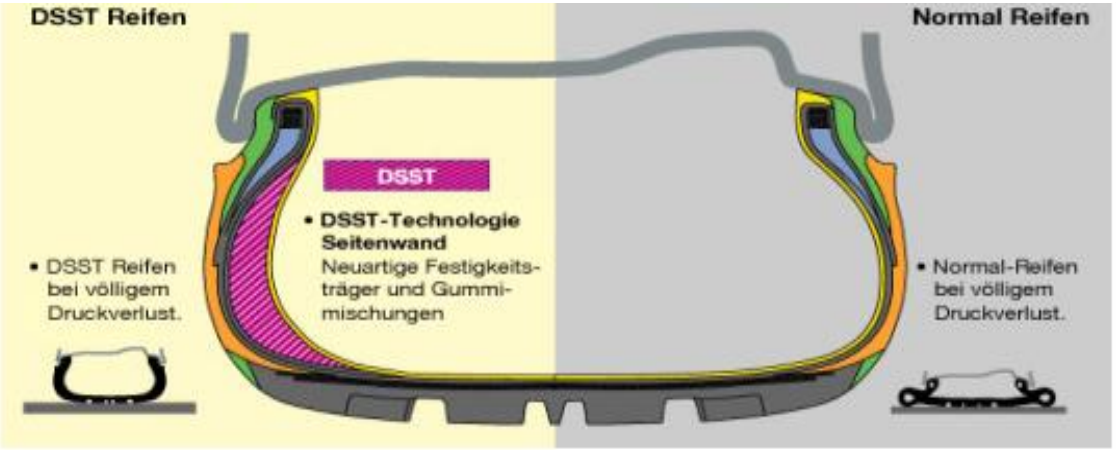
Q = 9,2 l/s — Q = 14,5 l/s

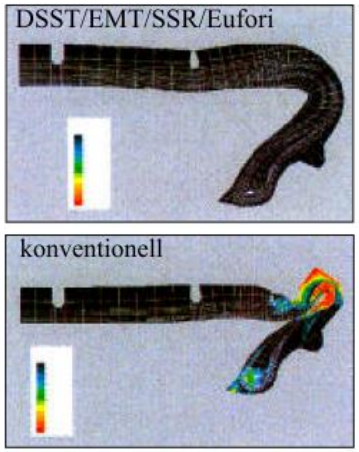
Δ = + 57 %

Quelle: Michelin

Reifen mit Notlaufeigenschaften

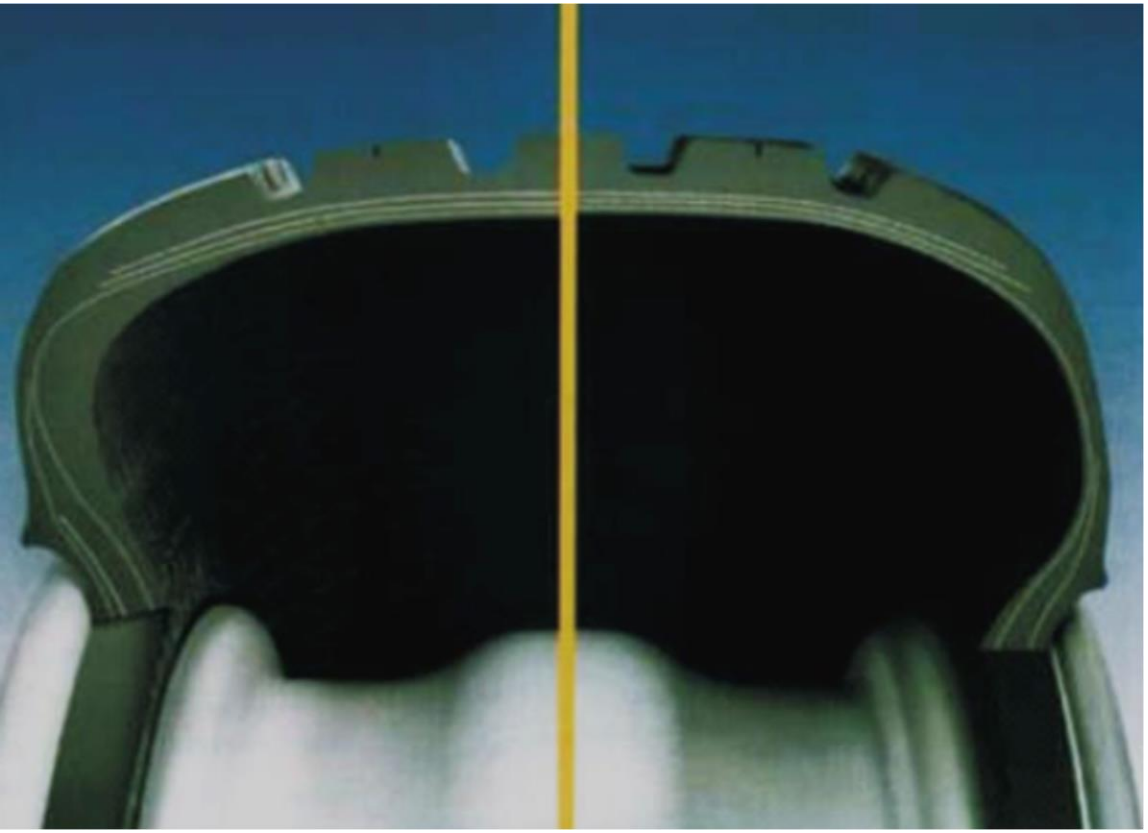
- Tragbarkeit des Fahrzeuggewichts trotz vollständigen Druckverlusts
  - Überhitzung durch Walken wird verhindert
  - Mobilität bleibt erhalten
  - Akzeptables Brems-, Lenk- und Antriebsverhalten
- Kein Reifenabwurf, keine kritischen Radwechsel (z.B. Autobahn)
- Komforteinbußen durch höhere Seitenwandsteifigkeit
  - Nicht bei Verwendung von Stützelementen





Quelle: Dunlop

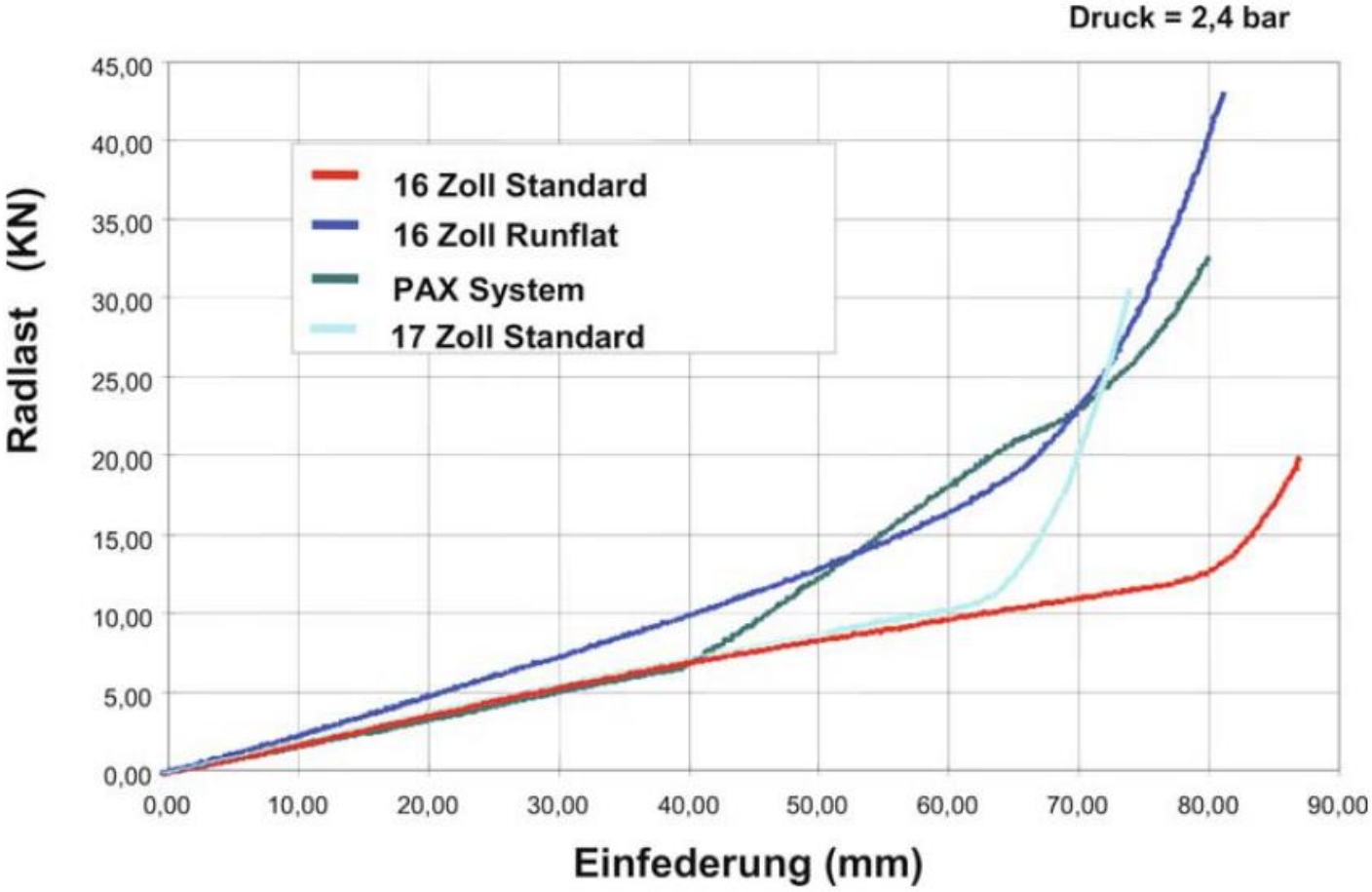
Ausführung von Runflat-Systemen



Conti

- selbsttragend
- Besonders dicke Seitenwände
- spezielle Gummimischung wegen starker Erwärmung im Notlauf

Komforteigenschaften



Quelle: Pirelli

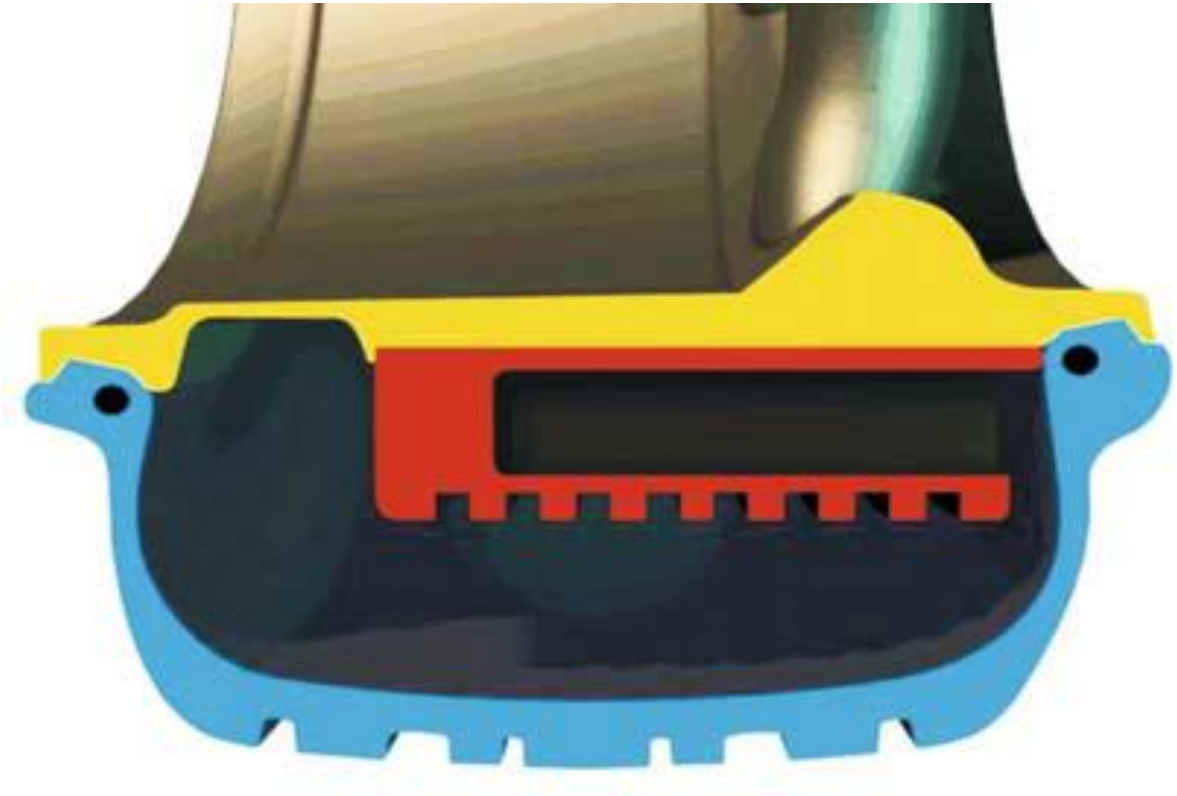
Kommentarfolie

Ein klassisches Komfortmaß eines Reifens ist die Einfederkennlinie.

Vergleicht man die Kennlinien eines 16 Zoll Reifens mit einem 17 Zoll Reifen erkennt man deutlich den Unterschied.

Man erkennt auch deutlich, dass ein System mit einem Stützelement bis zum Kontakt hervorragende Komforteigenschaften hat und in dieser Disziplin besser als ein selbsttragender Runflat-Reifen ist.

Ausführung von Runflat-Systemen



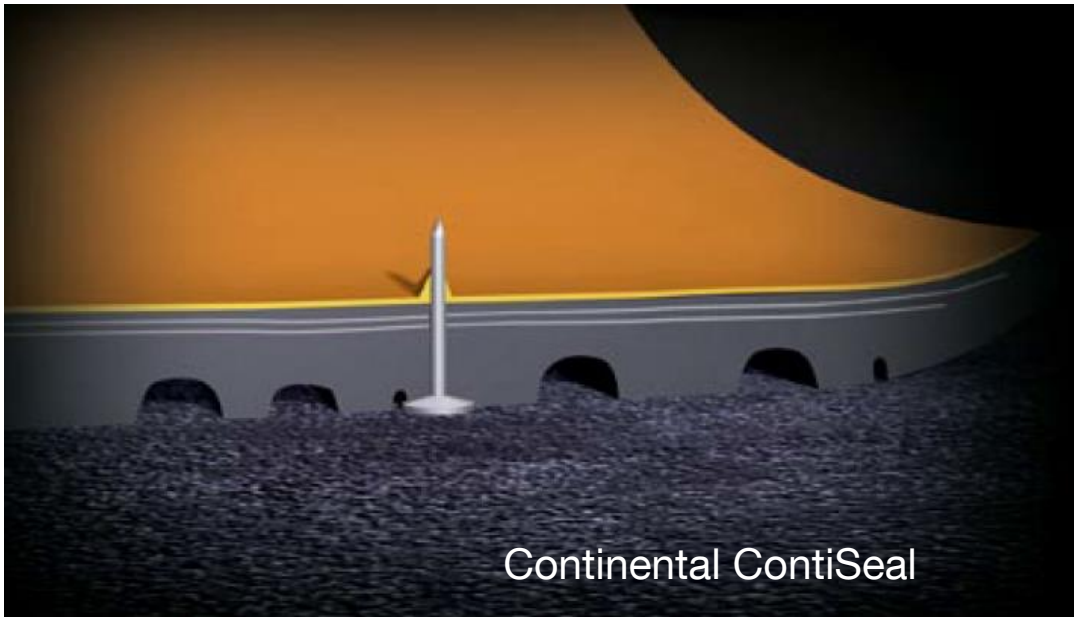
- mit Stützelement
- sichere Verankerung des Reifens
  → spezielle Felge nötig
- Stützring sorgt für Stabilität im Notlauf

PAX-System (Michelin)

Reifen mit Self-Sealing-Funktion

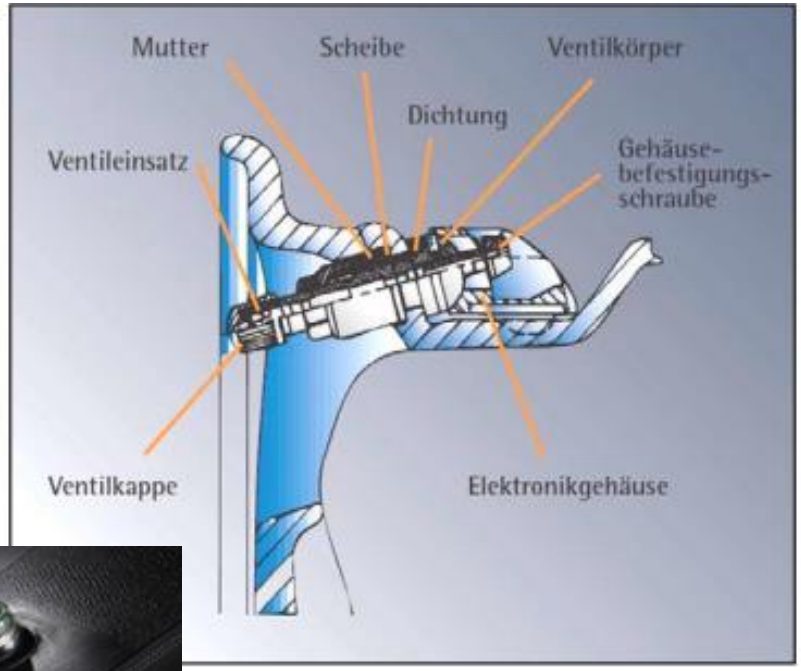
- Hochelastisches Elastomer an der Laufstreifeninnenseite
  - + Geringes Zusatzgewicht
  - + Abdichtung gegen Durchstiche (90% aller Schäden)
  - + Dichtheit auch nach Entfernung des Fremdkörpers
  - + Kompatibel zu herkömmlichen Felgen
  - – Beschädigungen der Seitenwand führen weiter zu Undichtigkeiten
  - – Das System verhindert Pannen unbemerkt

Quelle: Continental



Fülldrucküberwachung (Ende 2014 Pflicht)

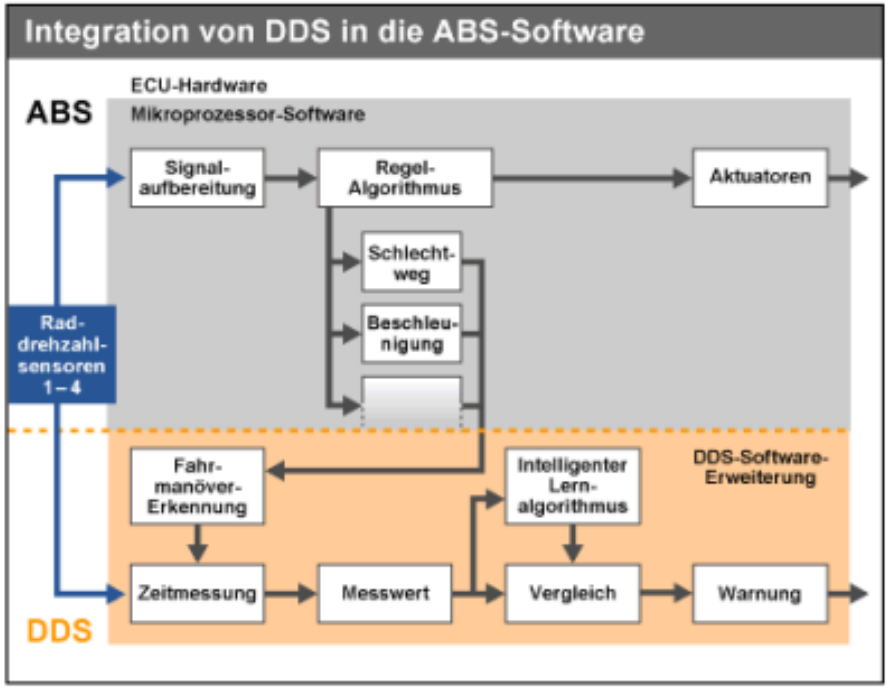
- Direkt messende Systeme
  - Erfassung des Luftdrucks über Sensoren im Reifen
  - Übertragung zur Steuereinheit



Tire Safety System (Beru)

TPMS (Conti)

- Indirekt messende Systeme
  - Beobachtung des dynamischen Rollradius
  - Auswertung der ABS-Sensoren
  - Verarbeitung im ABS-Steuergerät



Bsp. Deflation Detection System (Teves)

Luftfreie Reifen

Michelin „Tweel“

University of Wisconsin-Madison „Humwee“