

## Inhaltsverzeichnis

### 1. Einführung

### 2. Grundbegriffe

1. Spur
2. Sturz
3. Nachlauf
4. Rollzentrum
5. Schwerpunkt
6. Radlasten

### 3. Bauteile

1. Rad/Reifen
2. Stoßdämpfer/Feder
3. Stabilisator
4. Aufhängung/Radführung



## 4. Antriebskonzepte

1. Frontantrieb
2. Heckantrieb mit Frontmotor
3. Heckantrieb mit Mittelmotorantrieb
4. Allradantrieb

## 5. Fahrverhalten

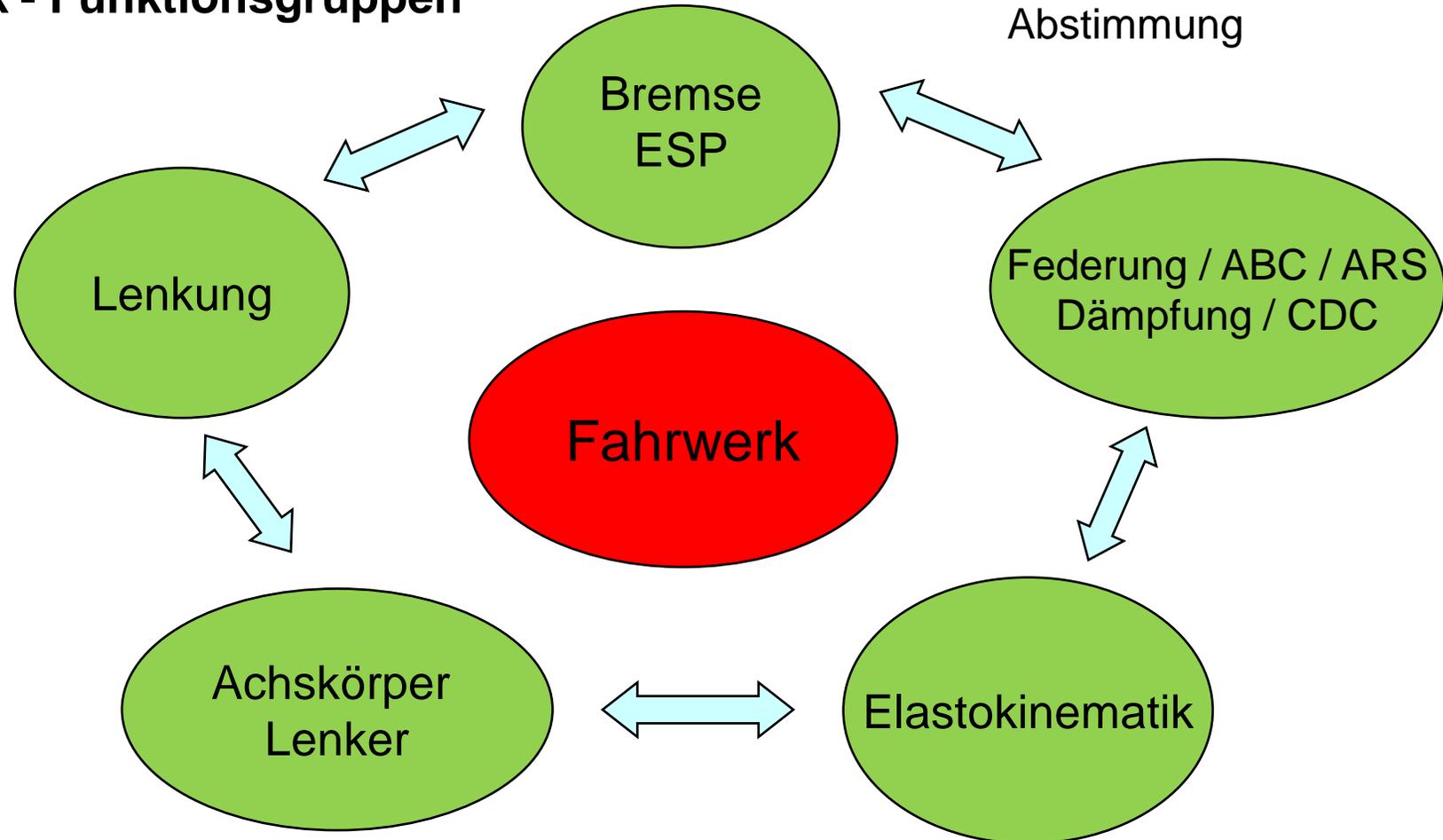
## 6. Eigenschaften beim Fahrverhalten und ihre möglichen Ursachen

1. Untersteuern
2. Übersteuern
3. Wechselndes Über- Untersteuern
4. Übersteuern in die eine Richtung, Untersteuern in die Andere
5. Unruhiges Fahrverhalten auf der Geraden und beim Bremsen.

## 7. Zusammenfassung

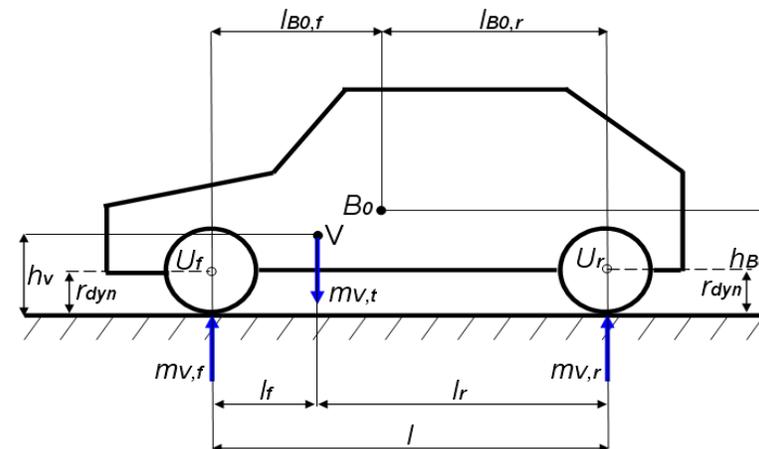


## Fahrwerk - Funktionsgruppen



## Fahrzeugschwerpunkt

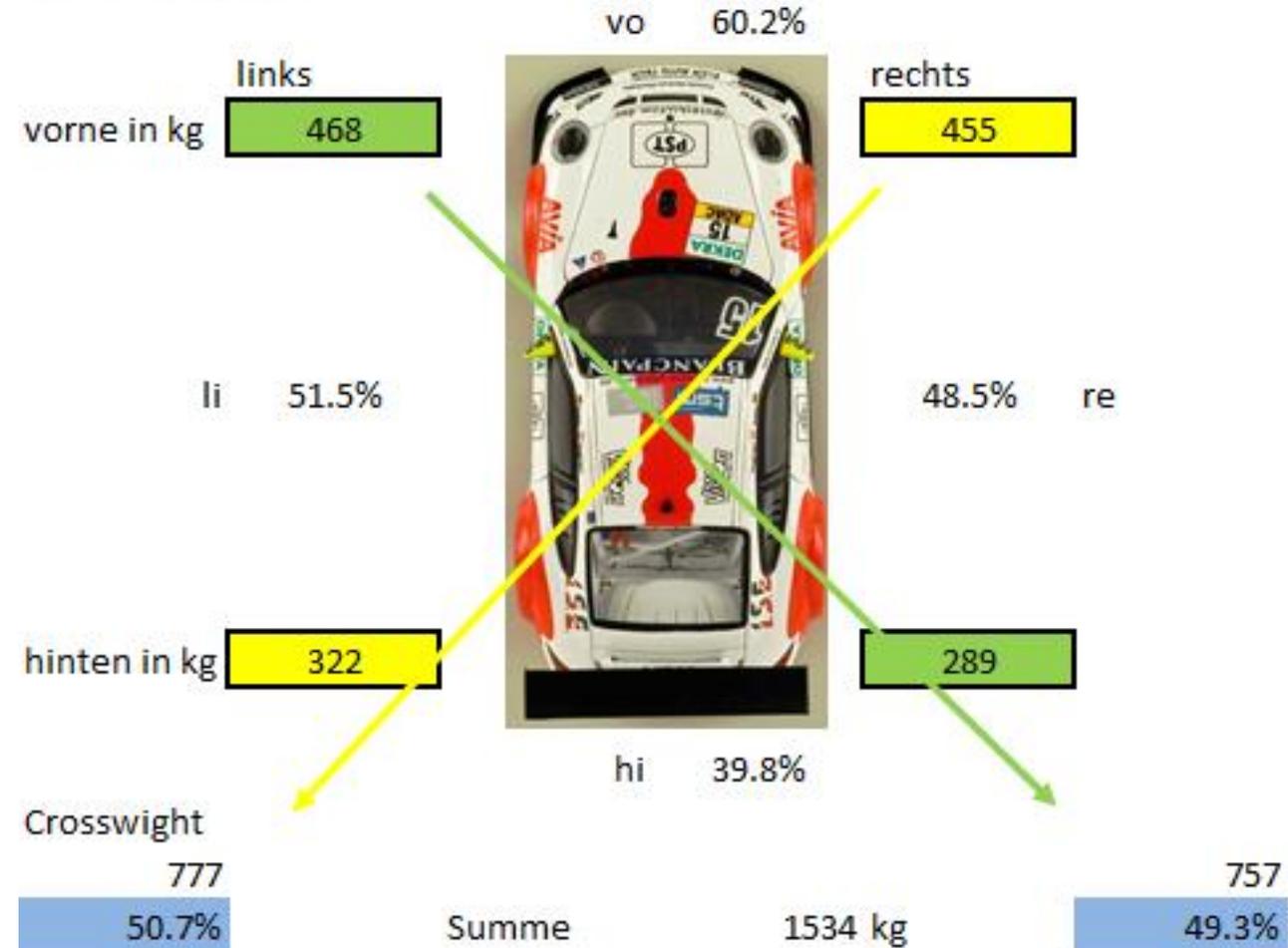
Zur Berechnung des Bremsverhaltens und des Steigvermögens (max. überwindbare Steigung) eines Fahrzeugs wird die Lage des Fahrzeugschwerpunktes  $B_0$  in  $x$ - $y$ - $z$  Richtung bezogen auf die Bodenebene, Mitte Vorderachse und seitlich zur Mitte Fahrzeug benötigt. Die Lage des Schwerpunktes ist von der Beladung abhängig, beim Einsteigen von Menschen bzw. beim Zuladen von Gepäck verlagert sich der für das Leerfahrzeug ermittelte Schwerpunkt nicht nur in Längsrichtung, sondern wandert auch geringfügig nach oben. Da ein Berechnen der Schwerpunktlage fast nicht möglich ist, wird die Ermittlung durch Wägung erreicht, was ausreichend genau ist.

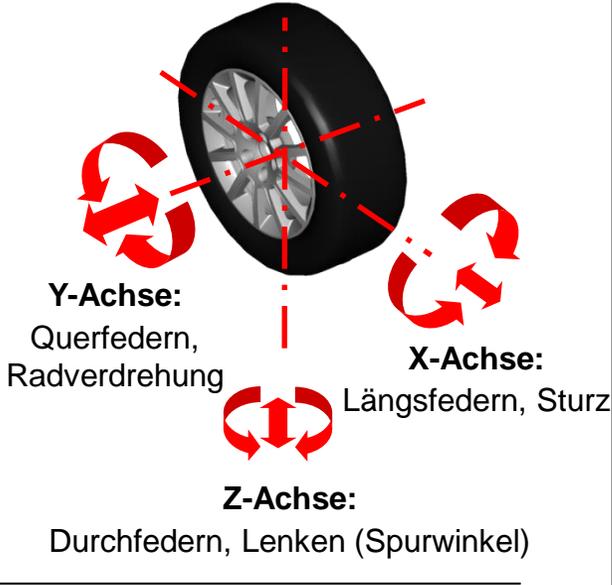
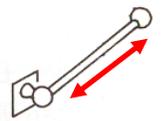
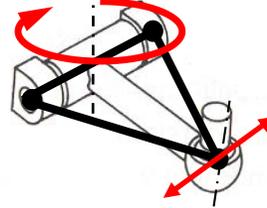
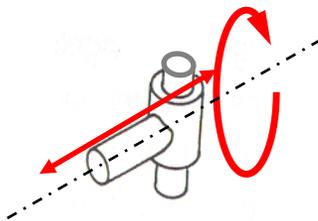
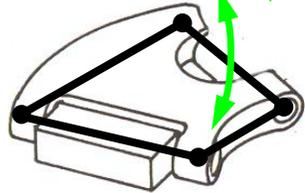


# Memo: Radlasten

## Radlasten

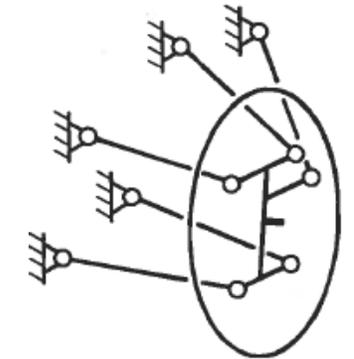
- Radlast:



<p><b>Rad mit 6 Freiheitsgrade (FG)</b> 3 x translatorisch 3 x rotatorisch</p>  <p><b>Y-Achse:</b> Querfedern, Radverdrehung</p> <p><b>X-Achse:</b> Längsfedern, Sturz</p> <p><b>Z-Achse:</b> Durchfedern, Lenken (Spurwinkel)</p> <p><b>IDEAL:</b> 5 Einfachstreben mit Kugelköpfen „fesseln“ 5 Bewegungen → vertikale Einfederung bleibt frei</p>	<p><b>Strebe</b></p> 	<p><b>Fixierung von:</b> 1FG</p>	<p><b>Beispiel:</b> Einzellenker (Zug-Druck)</p>
	<p><b>Dreieckslenker</b></p> 	<p>2 FG</p>	<p>Dreiecks-Lenker in Vorderrad-aufhängungen</p>
	<p><b>Dreh – Schub - Gelenk</b></p> 	<p>2 FG</p>	<p>Vorderachs-aufhängung mit radführendem Federbein</p>
	<p><b>Trapezlenker</b> (frei)</p> 	<p>4 FG</p>	<p>Untere Trapezlenker in Hinterrad-aufhängungen</p>

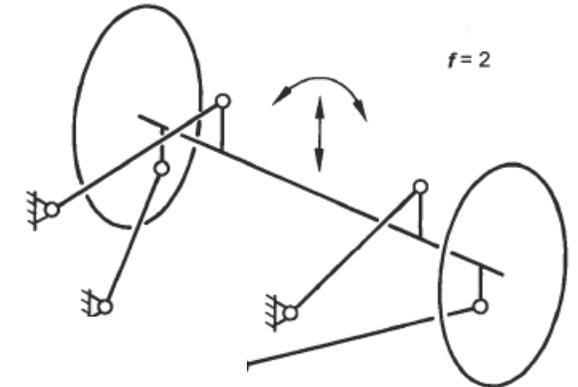
## Einzelradaufhängung

- die Räder einer Achse können sich unabhängig voneinander bewegen
- pro Rad ein Freiheitsgrad in Einfederrichtung
- restliche 5 Freiheitsgrade werden Aufhängung bzw. Lenksystem aufgenommen



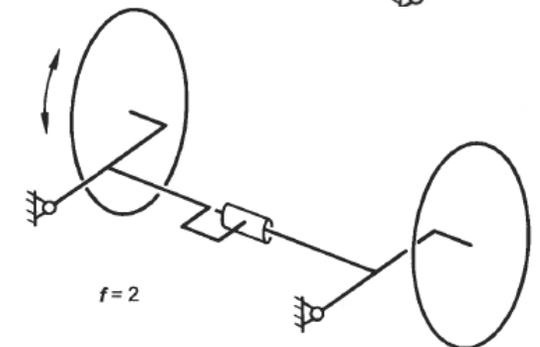
## Starrachse

- Räder einer Achse fest miteinander gekoppelt
- unterschiedliche statische Ausgangswerte der Radstellung möglich
- für gleich- und wechselseitiges Einfedern 2 Freiheitsgrade erforderlich
- Aufhängung nimmt restliche 4 Freiheitsgrade auf



## Verbundlenkerachse

- Relativbewegung zw. den Rädern der Achse möglich
- keine unabhängige Bewegung, gegenseitige Beeinflussung

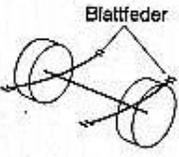
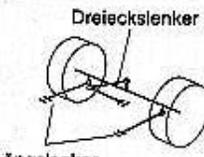
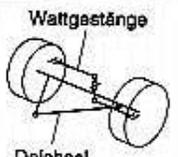
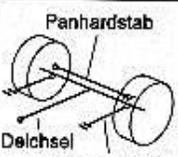
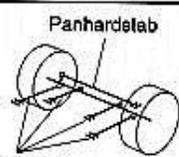
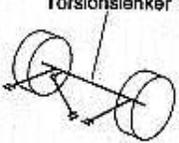
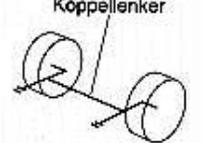
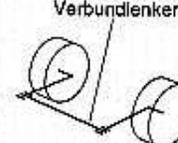


## Definition: Halbstarrachsen

Sie bestehen aus zwei biege- und torsionssteifen Längsarmen oder Lenkern, die durch ein torsionsweiches Querprofil (Achsbrücke) miteinander verbunden sind. Halbstarrachsen verhalten sich bei gleichmäßigem Einfedern ähnlich Starrachsen, Vorspur und Sturz bleiben nahezu konstant. Ein weiterer Vorteil ist die einfache und kostengünstige Herstellung sowie einfache Montage an meist nur zwei Lagerstellen

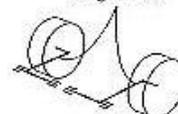
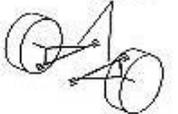
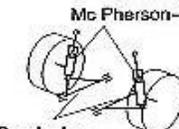
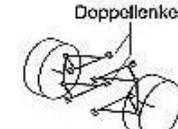
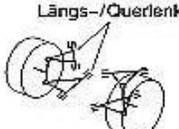


# Memo: Aufhängung/Radführung

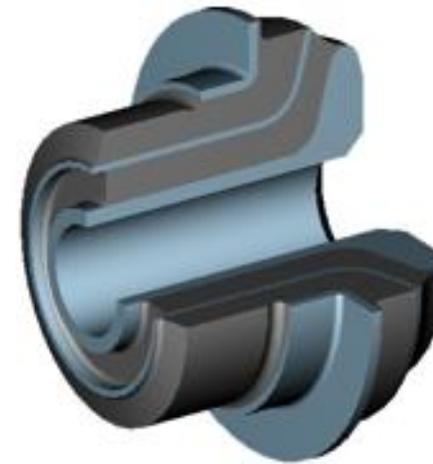
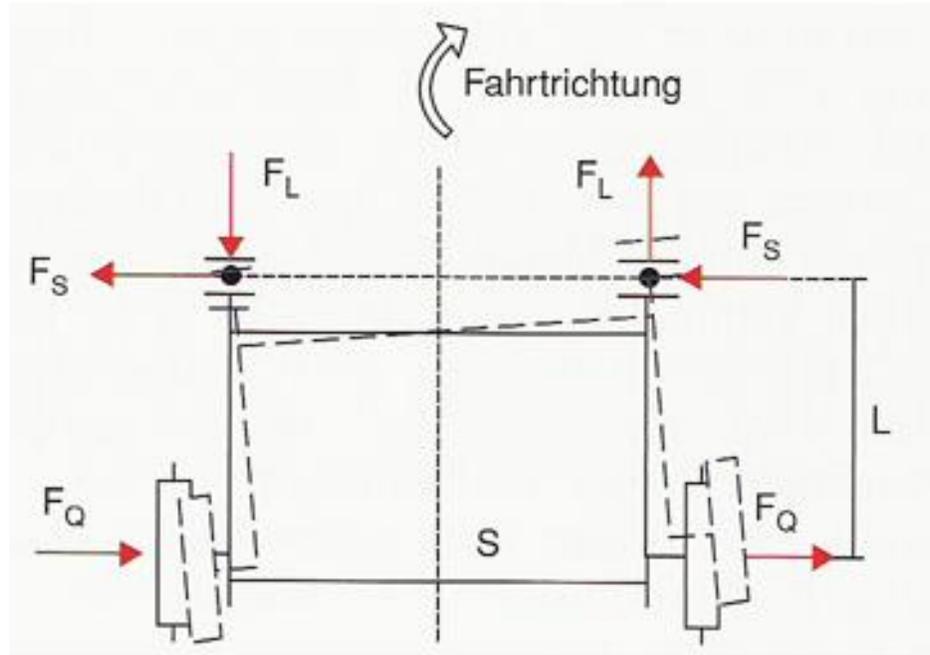
Starrachsen				
 <p>Blattfeder</p>	 <p>Dreieckslenker</p>	 <p>Wattgestänge</p>	 <p>Panhardstab</p>	 <p>Panharddelab</p>
<p>Anwendung als Hinterachse bei Standardantrieb; als Vorder- und Hinterachse bei Nutz- und Geländewagen</p> <p>Spurweite, Vorspur, Sturz stets konstant zur Fahrbahn, auch bei Aufbau-Seitenneigung, gute Spursicherheit</p> <p>Herstellkosten niedrig, Trampeln, ungefederte Massen hoch, ungünstige Verformung unter Seitenkraft und Moment</p>				
<p>keine seitlichen Aufbaubewegungen beim Federn, keine ungünstigen Radstellungen durch Quer- und Längskräfte sowie Momente, hoher Raumbedarf</p>		<p>Nickpol frei wählbar Kosten und Gewicht hoch</p>		
			<p>Panhard-Stab verursacht beim Fahren seitliche Aufbaubewegungen</p>	<p>Nickpol frei wählbar</p>
Halbstarrachsen				
 <p>Torsionslenker</p>	 <p>Koppellenker</p>	 <p>Verbundlenker</p>		
<p>Anwendung als Hinterachse bei Frontantrieb</p> <p>niedrige Karosseriekräfte durch großen Lagerbestand, günstige Kräfteinleitung außen am steifen Längsträger, einfache Herstellung, zwei Lagerstellen, einfache Montage, sehr robust, kinematische Möglichkeiten eingeschränkt</p>				
<p>WZ nach Lage des Panhardstabes über Radmitte</p>	<p>WZ unter Radmitte (je nach Koppellage)</p>	<p>WZ auf der Fahrbahn (alle WZ in der Fahrzeugmitte)</p>	<p>WZ = Wankzentrum</p>	

Quelle: Bosch Taschenbuch

# Memo: Aufhängung/Radführung

Einzelradaufhängungen				
 <p>Längslenker</p>	 <p>Schräglenker</p>	 <p>Schräglenker</p>	 <p>Pendel</p>	 <p>Pendel</p>
Anwendung als Hinterachse bei Front- oder Standardantrieb				
geringer Platzbedarf, niedrige Kosten, kinematische Möglichkeiten eingeschränkt, Sturzänderung, große Nachlaufänderung, Lage des Momentpols, hohe Beanspruchungen	niedriger Bauaufwand, günstige kinematische Möglichkeiten, elastokinematisch ungünstig, Seitenkraft- und Umfangskraftübersteuern, hohe Lenkerkräfte	niedrige Kosten, kinematisch eingeschränkte Möglichkeiten, bei Kurvenfahrt wird Aufbau durch Seitenkraft hochgedrückt, Aufstützeffekt mit positivem Sturz		
 <p>Mc Pherson-Bein</p> <p>Querlenker</p>	 <p>Doppellenker</p>	 <p>Längs-/Querlenker</p>		
Anwendung als Vorder- oder Hinterachse bei Front- oder Standardantrieb;		als Vorderachse bei Front- und Standardantrieb		
geringer Platzbedarf (Fahrzeugbreite), niedrige Karosseriekraften durch große Abstützbasis, wenig Gelenke, gute Montierbarkeit, niedriges Gewicht, Toleranzunempfindlichkeit, kinematisch eingeschränkte Möglichkeiten bezüglich Sturzänderung, Spreizwinkel, Momentan- und Nickpol, Raumbedarf für Feder, Reifenbreite, Bauhöhe		kinematisch größtmögliche Freizügigkeit, hohe Kosten durch große Gelenkanzahl, enge Bautoleranzen (ohne Fahrschemel), wegen relativ kleinem Abstand der Lagerstellen steife Lagerung erforderlich zur Vermeidung starker Radstellungsänderungen (Abnahme des Komforts)		
		Krafteinleitung des oberen Lenkers an der steifen Spritzwand		

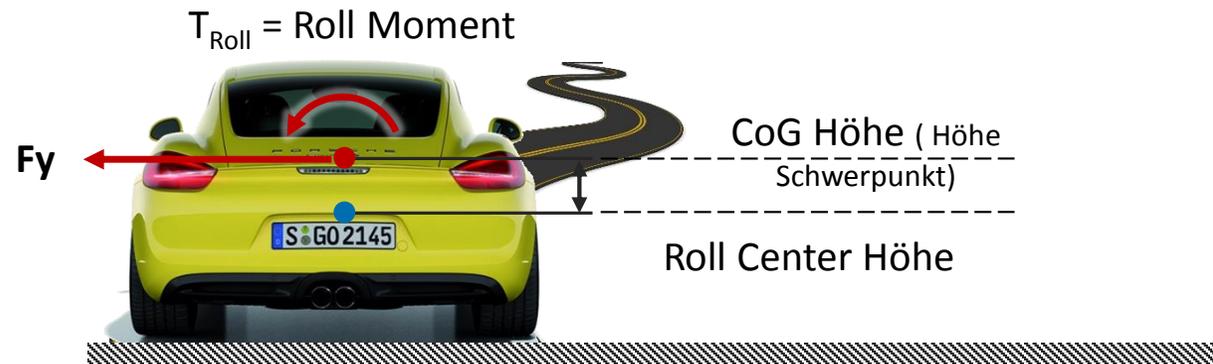
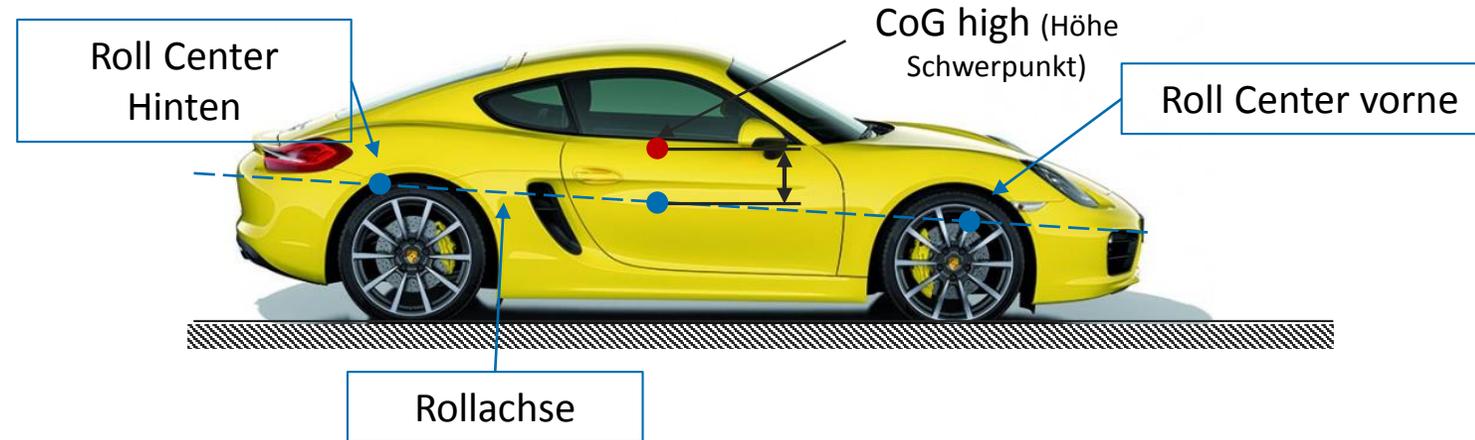
Quelle: Bosch Taschenbuch



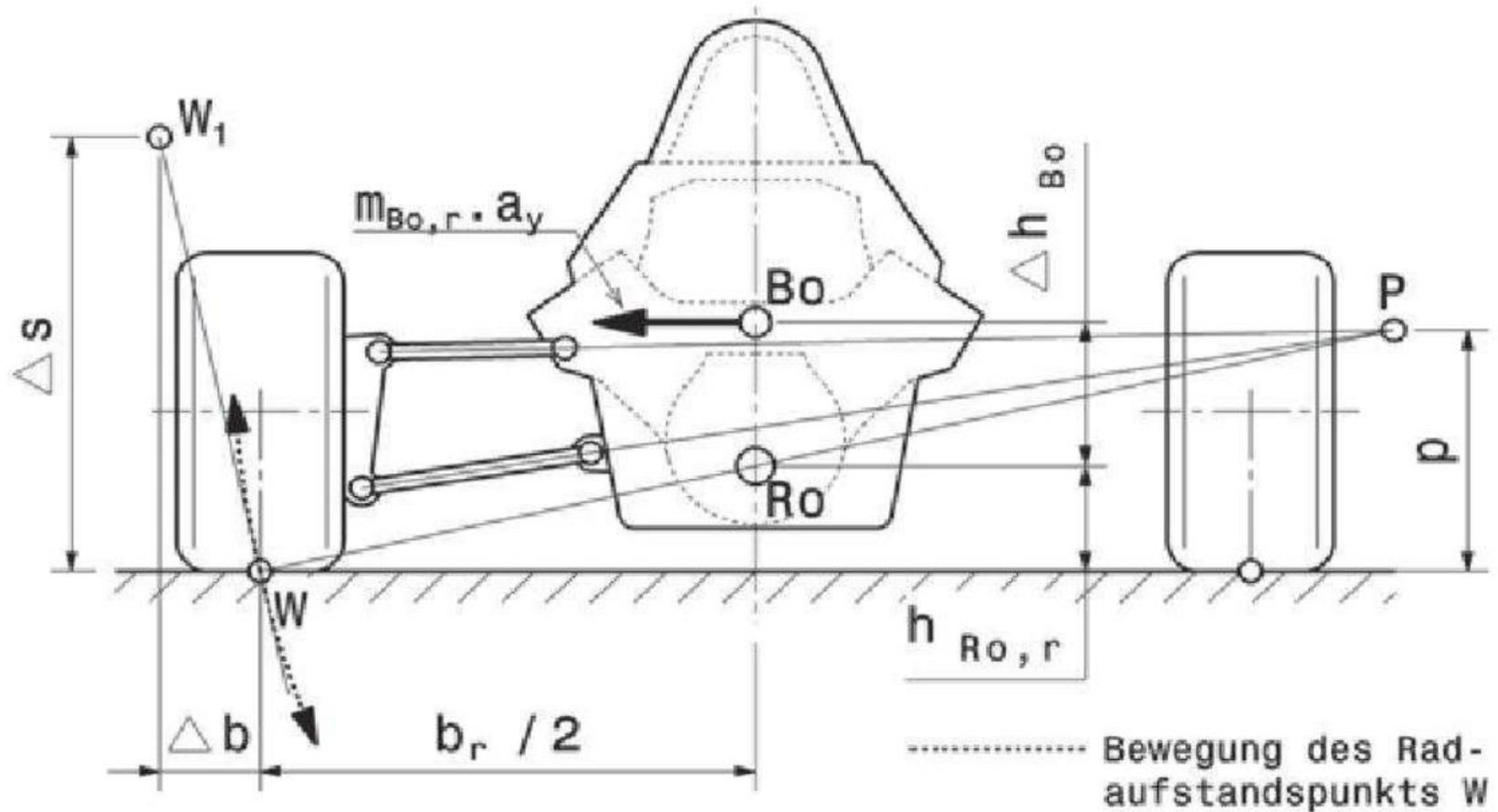
Quelle: Hoffmann/Trelleborg Automotive

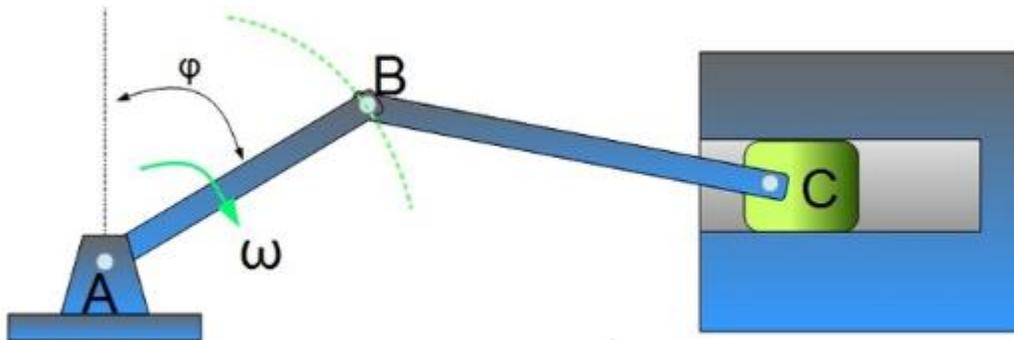


# Memo: Rollzentrum

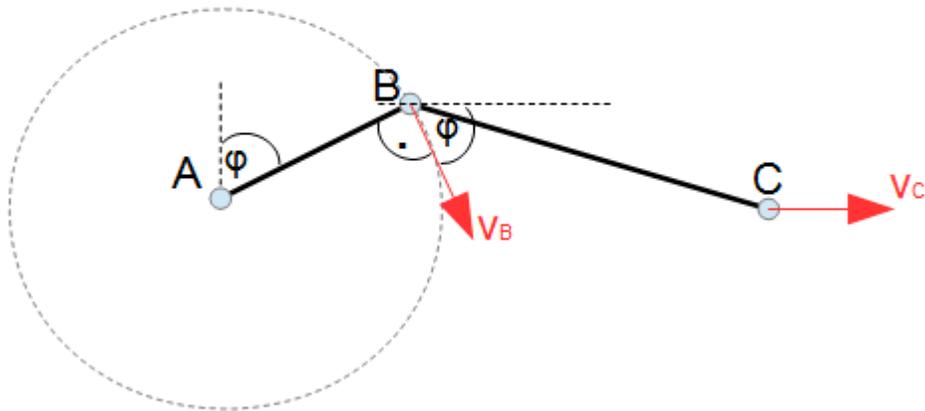


# Memo: Rollzentrum (vs. Schwerpunkt)

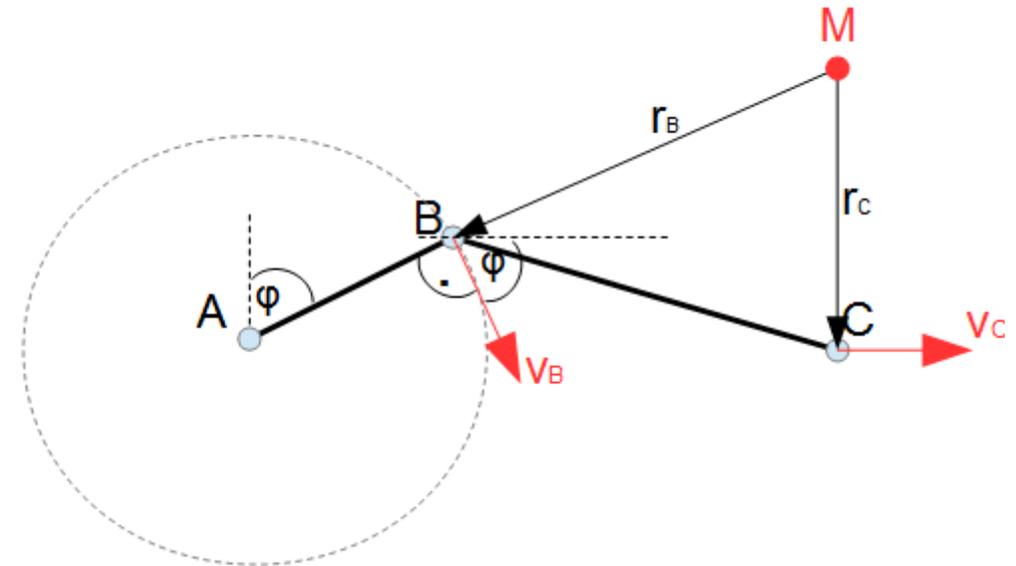




Es müssen hier die Punkte B und C und deren Geschwindigkeiten betrachtet werden um das Momentanzentrum zu bestimmen. Dazu müssen zunächst die Geschwindigkeitsrichtungen eingezeichnet werden. Es kann dann das Momentanzentrum bestimmt werden, indem der Schnittpunkt der Senkrechten zu den beiden Geschwindigkeiten gezeichnet wird. Zunächst einmal werden die Geschwindigkeitsrichtungen bestimmt. Für C ist diese ganz einfach zu bestimmen. Der Kolben kann sich nur horizontal bewegen, demnach bewegt sich auch der Punkt C horizontal. Der Punkt B hingegen führt aufgrund der Stange AB eine Kreisbewegung aus. Der Punkt A bewegt sich mit der Winkelgeschwindigkeit  $\omega$  und stellt dabei den Kreismittelpunkt dar. Die Stange AB kann als Radius aufgefasst werden und der Punkt B befindet sich am Rand des Kreises. Der Geschwindigkeitsvektor liegt tangential zur Kreisbahn und damit steht dieser senkrecht auf AB. Dies entspricht dem Winkel  $\phi$  :



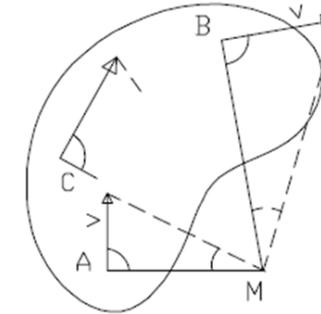
Nachdem nun die Geschwindigkeitsrichtungen bestimmt worden sind, kann mittels der Senkrechten von  $v_B$  und  $v_C$  das Momentanzentrum  $M$  bestimmt werden:



## a) Drehung eines Körpers

- Punkte des Körpers drehen sich um Drehpunkt M
- Bewegungsrichtung senkrecht auf Radius zu M
- Geschwindigkeit proportional zum Abstand von M

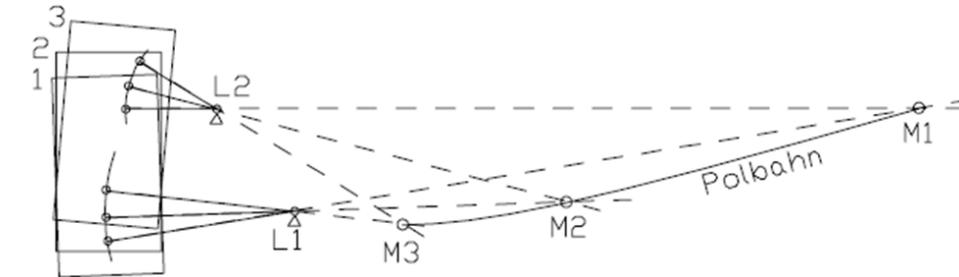
a)



## b) Befestigung mit Lenkern (Streben)

- Befestigung mit Lenker zweifach gelenkig
- Bewegung eines Anbindungspunktes senkrecht zu seinem Lenker
- Bestimmung Momentanpol M mit der Bewegungsrichtung zweier Punkte in der Ebene
- Mit Bewegung des Körpers kann sich Pol M auf Polbahn bewegen
- Bei räumlichen Gebilden: Momentan Achse

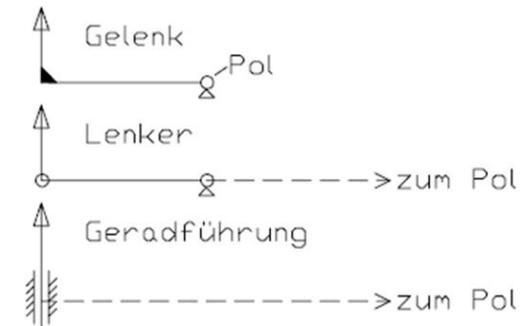
b)



## c) Führungselemente

- einseitig drehbares Gelenk: Drehpunkt ist Pol
- zweiseitig drehbarer Lenker: Pol auf Gerade durch Drehpunkte
- Geradföhrung: Pol auf senkrechter Geraden durch Föhrung

c)



## Quer Pol P

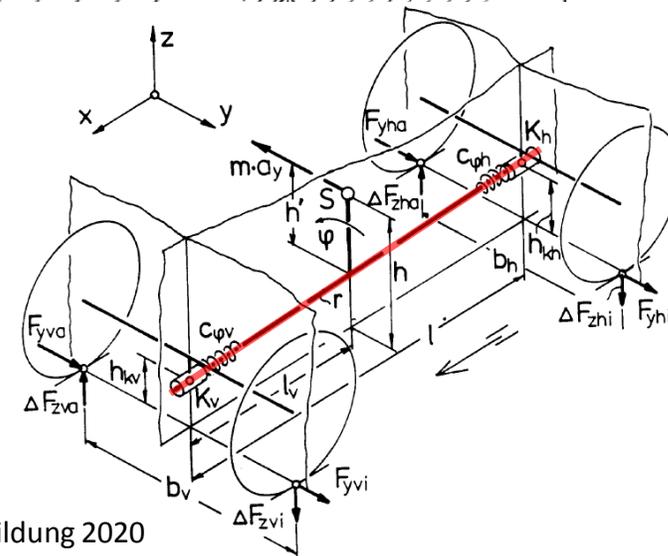
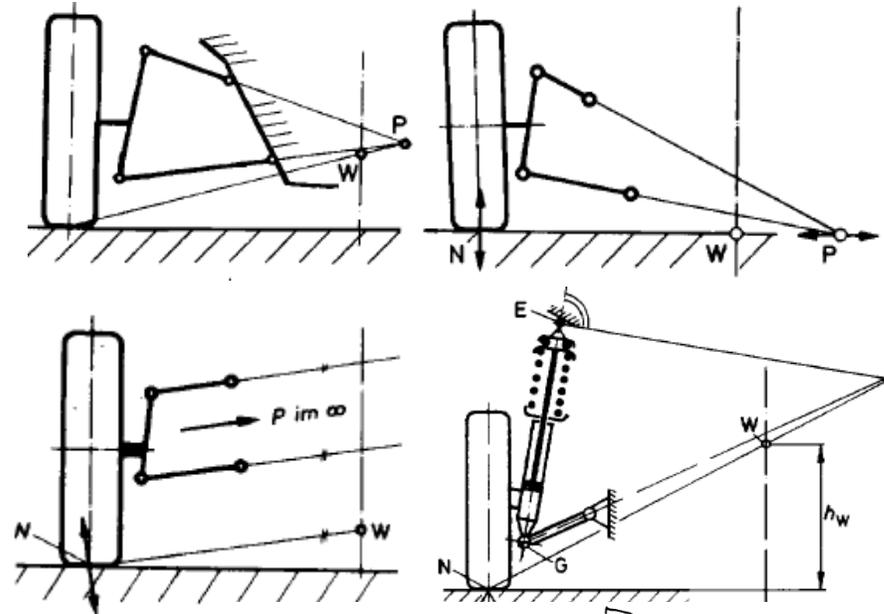
- Ermittlung in yz-Ebene auf Höhe Radmitte
- Momentanpol des Rades bzgl. Aufbau
- Relevant für Spurweiten- und Sturzänderung

## Wank Zentrum W

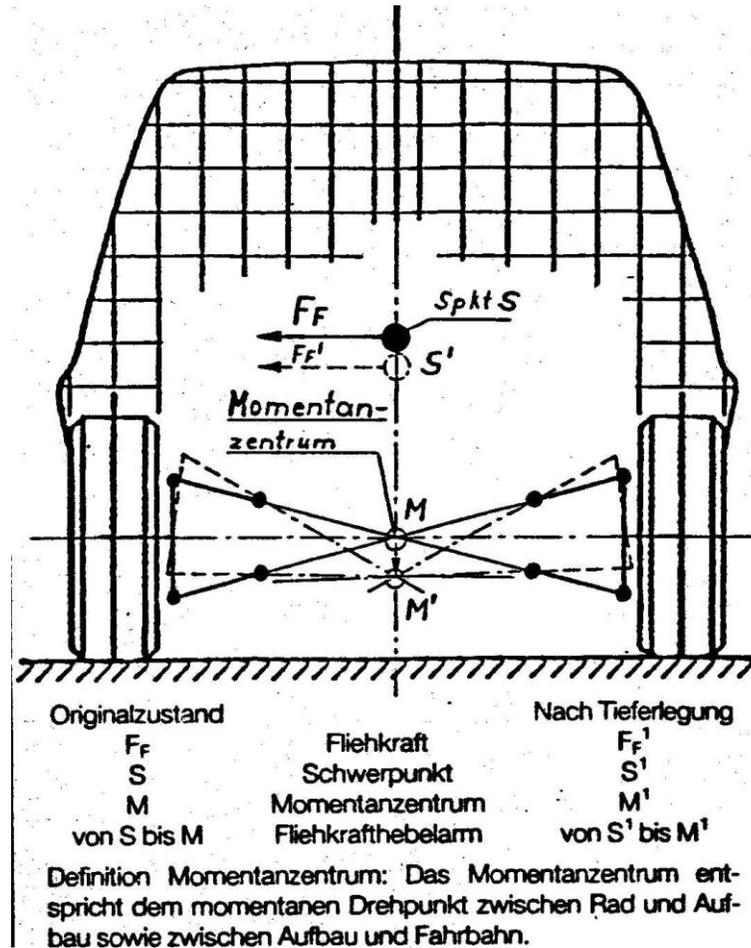
- Momentan Pol des Aufbaus zur Straße bzgl. einer Achse
- Liegt auf Schnittpunkt der beiden Verbindungsgeraden des Radaufstandspunktes mit dem zugehörigen Momentan Pol für linkes und rechtes Rad
- Ist Drehpunkt für Wankbewegungen des Aufbaus in der jeweiligen Ebene

## Wankachse

- Verbindungsgerade durch Wank Zentren von VA und HA
- Drehachse für Wank Bewegungen des Aufbaus
- Lage ist stark von Federbewegungen abhängig



# Einfluss des Momentan Zentrums

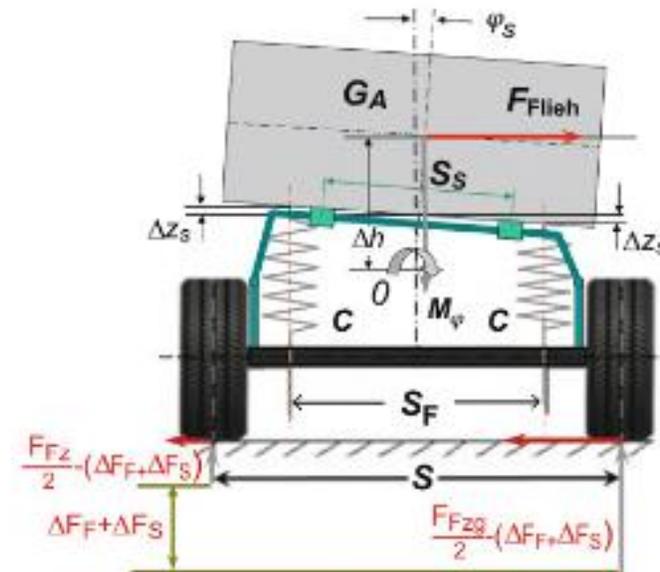
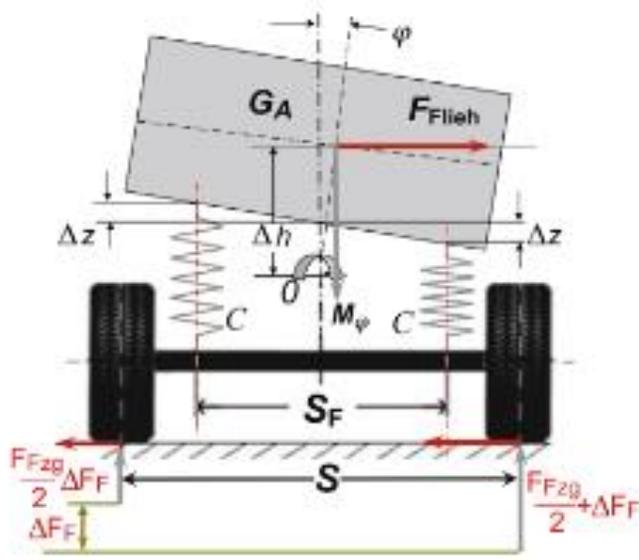


Notiz:

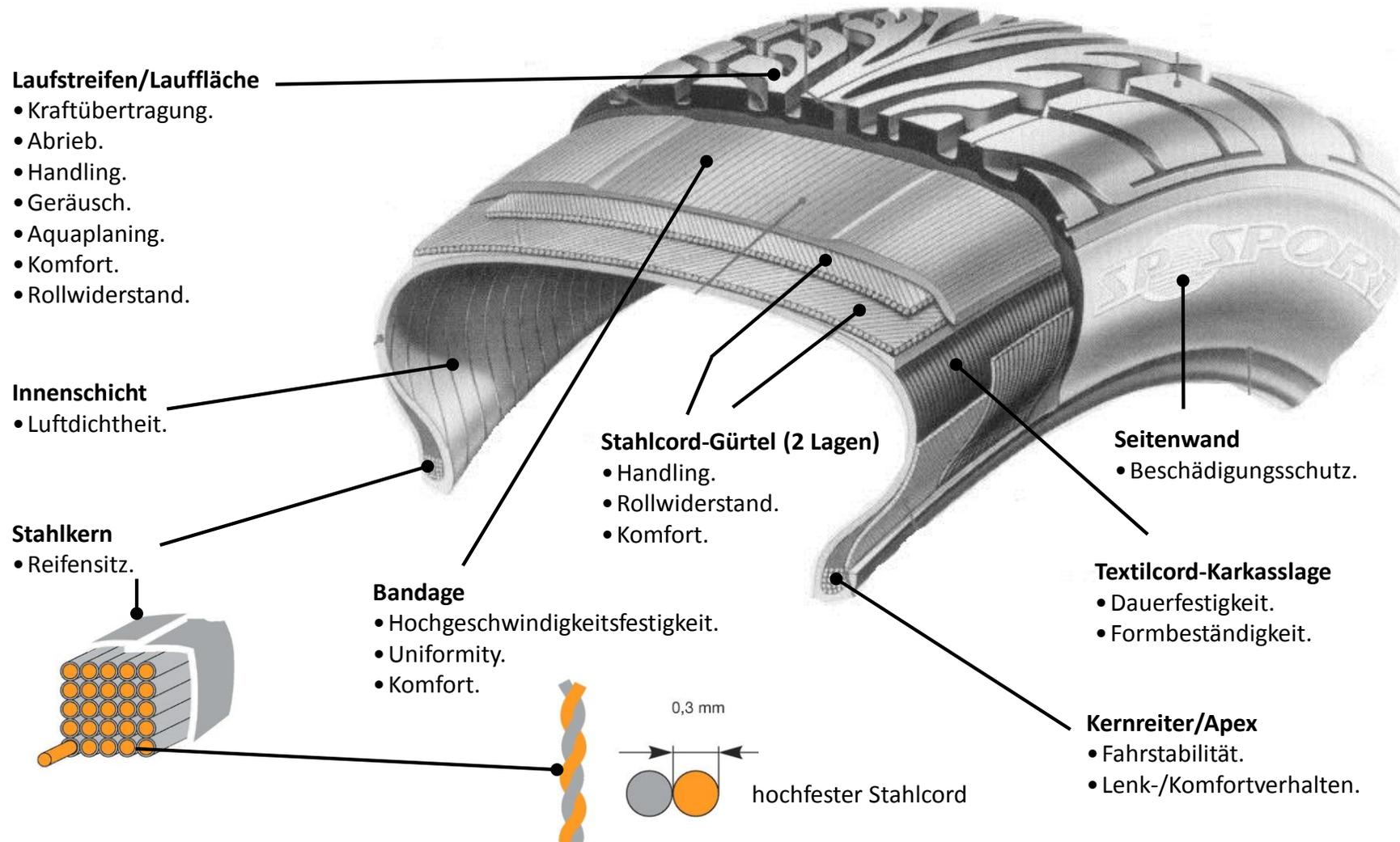
Schwerpunkt und Momentan Zentrum verändern ihre Lage unterschiedlich. Beim „Tieferlegen“ des Aufbaus kann der Hebelarm S – M sich vergrößern.



Hinterer Stabilisator eines Porsche 911 (Typ 996)



# Memo: Reifen / Räder - Reifenaufbau



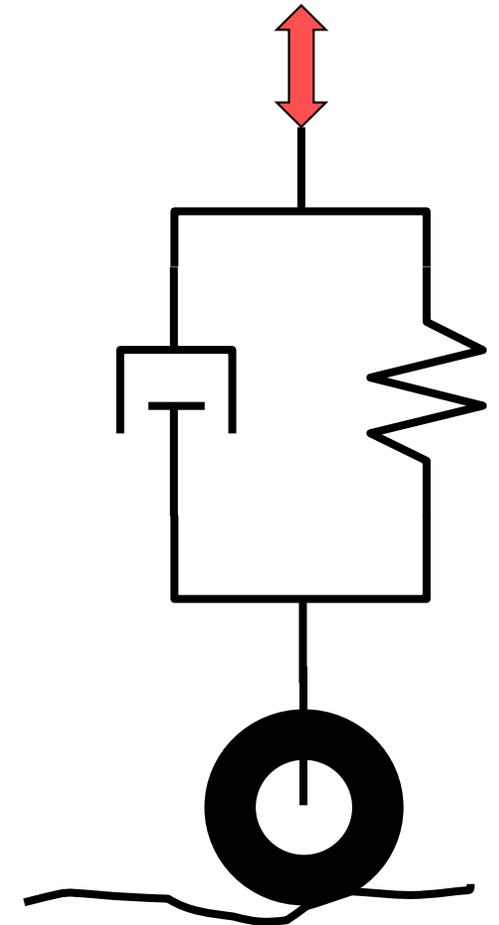
## Aufgaben des Feder- Dämpfer-Systems

**Die Federung und Dämpfung hat maßgeblichen Einfluss auf:**

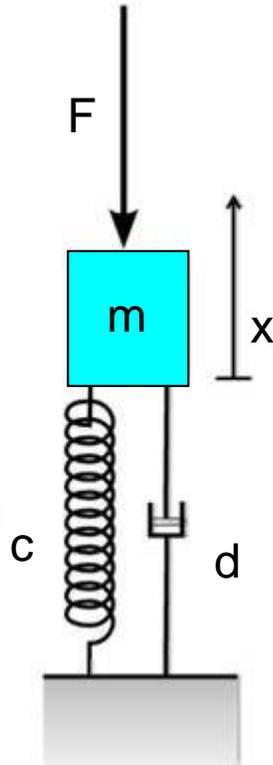
- die Fahrsicherheit (dyn. Radlastschwankungen)
- den Fahrkomfort (Beschleunigungen am Fahrzeug)
- die Beanspruchung von Fahrzeugbauteilen (Bauteilfestigkeit)
- Hierbei stehen Fahrsicherheit und Fahrkomfort im direkten Zielkonflikt zueinander.

**Die Anforderungen an Federung und Dämpfung eines Fahrzeuges sind insbesondere:**

- niedrige Eigenfrequenz (1...2 Hz, Vertikalschwingung des Aufbaus) durch weiche Federung
- kleine ungefederte Massen
- gleiche Federungseigenschaften bei unterschiedlicher Beladung



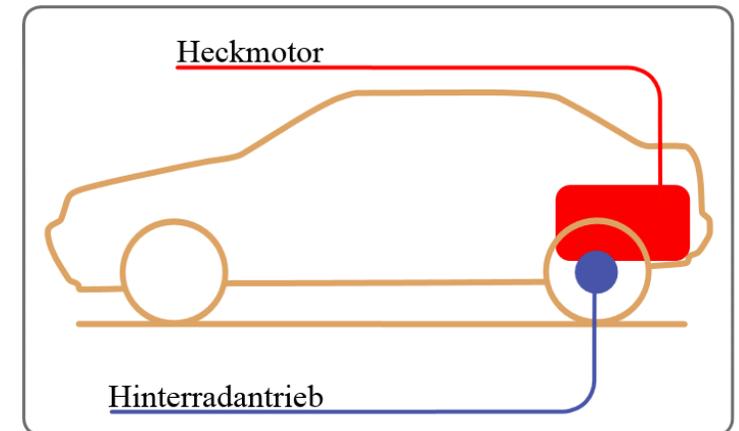
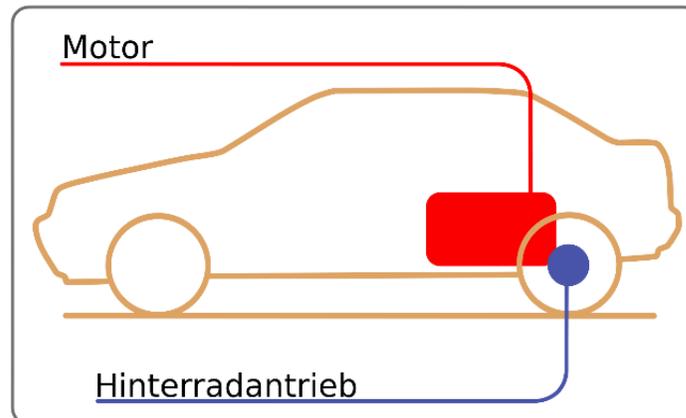
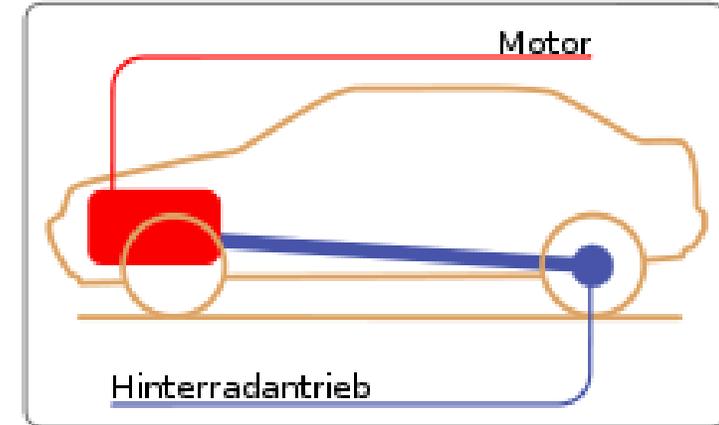
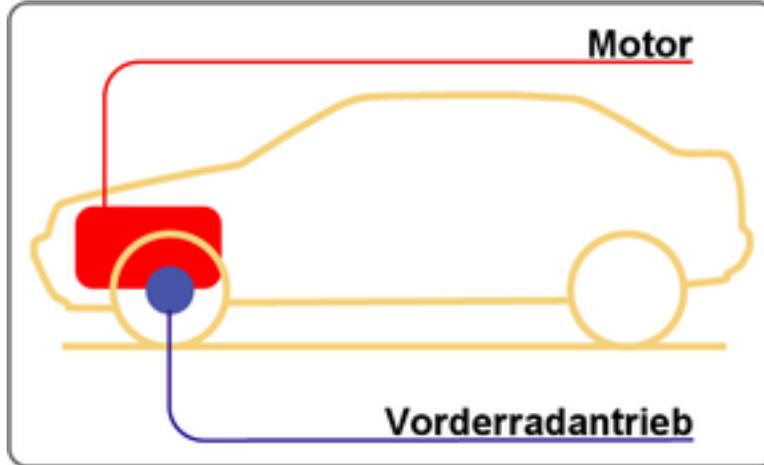
## Feder-Masse-Dämpfer System



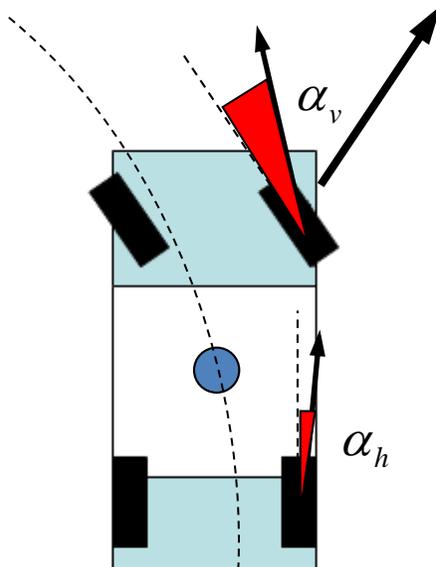
- Jedes Fahrzeug lässt sich vereinfacht als Feder-Masse-Dämpfer-System darstellen
- Das System wird durch folgende Gleichung bestimmt:  

$$c * x + d * \dot{x} + m * \ddot{x} = 0$$
- Die veränderlichen Parameter sind dabei die **Masse  $m$** , die **Federsteifigkeit  $c$**  und die **Dämpferkonstante  $d$** .

# Memo: Antriebsarten



## Übersteuern / Untersteuern Definition nach Olley



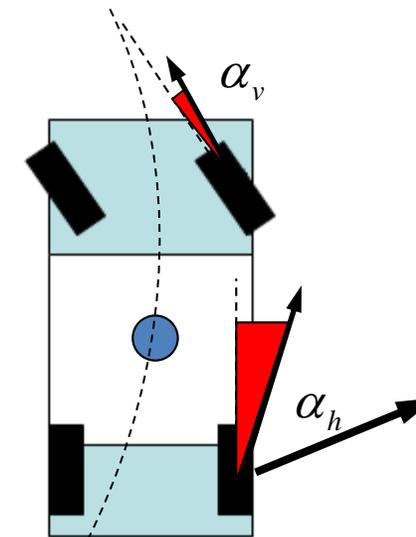
Untersteuern

- Untersteuern (understeer)
- Neutral (neutralsteer)
- Übersteuern (oversteer)

$$\alpha_v > \alpha_h$$

$$\alpha_v = \alpha_h$$

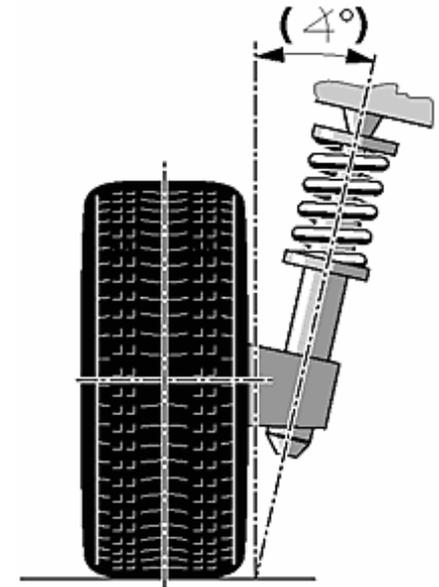
$$\alpha_v < \alpha_h$$



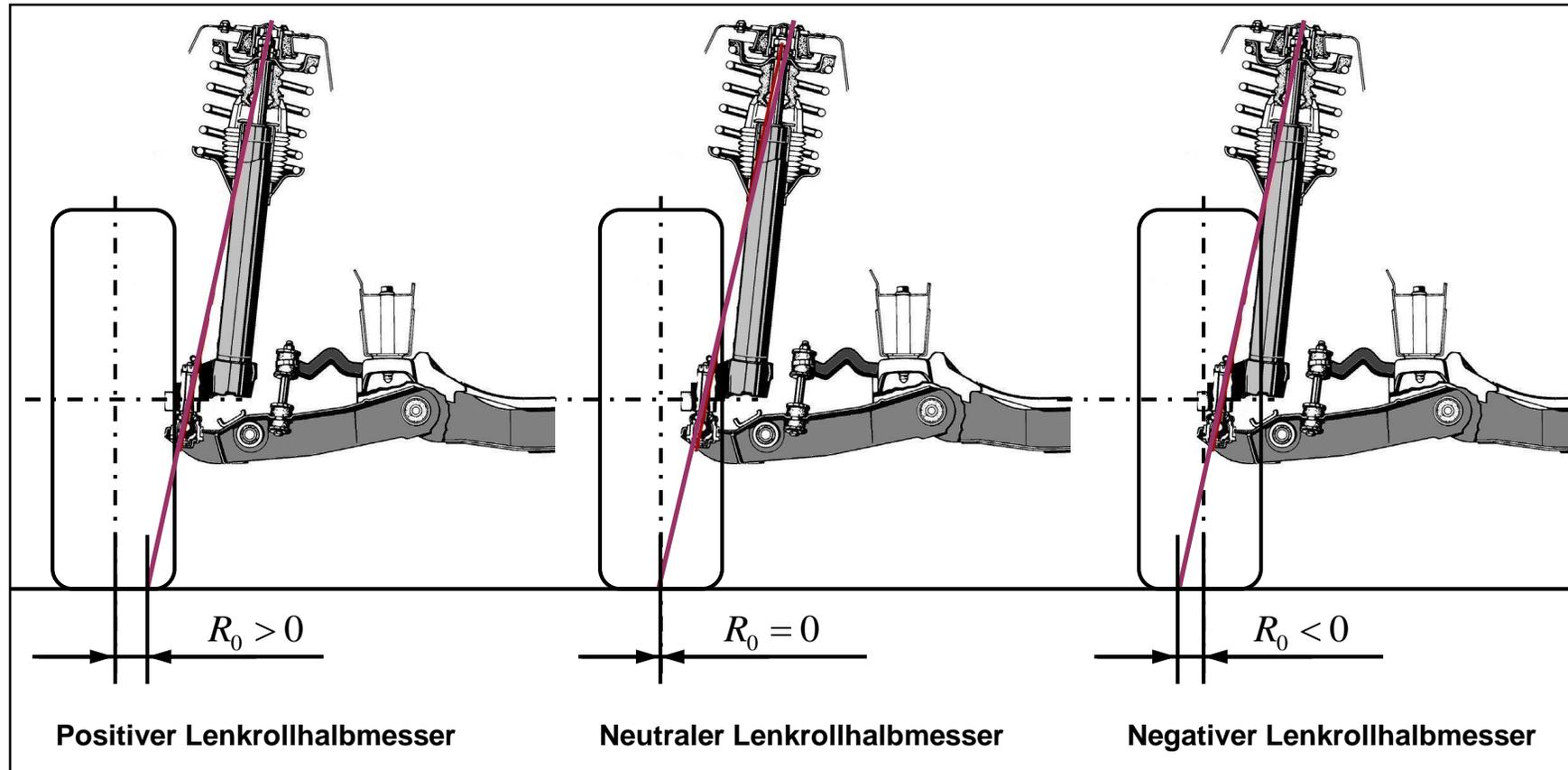
Übersteuern

## Spreizung

- Verantwortlich in Verbindung mit Nachlauf für die Rückstellkräfte der Lenkung und Sturz
- Beeinflusst zusammen mit der Einpresstiefe des Rades den Lenkrollhalbmesser
- Bestimmt das Rückstellmoment zusammen mit Lenkrollhalbmesser und Nachlauf
- Bewirkt das Anheben des Fahrzeugs bei Lenkeinschlag

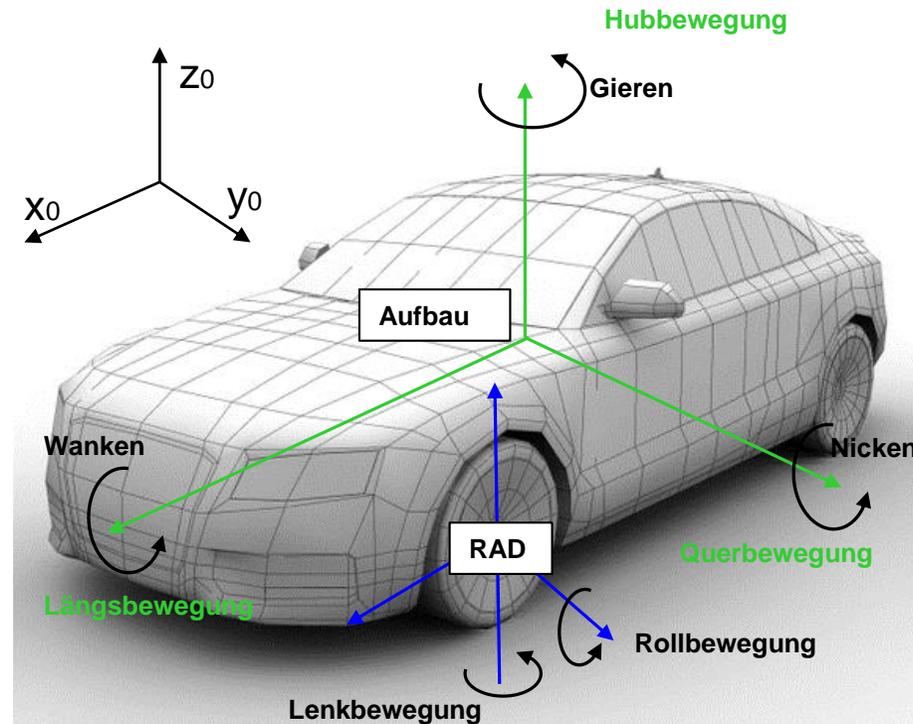


## Lenkrollhalbmesser



# Grundlagen Fahrwerk

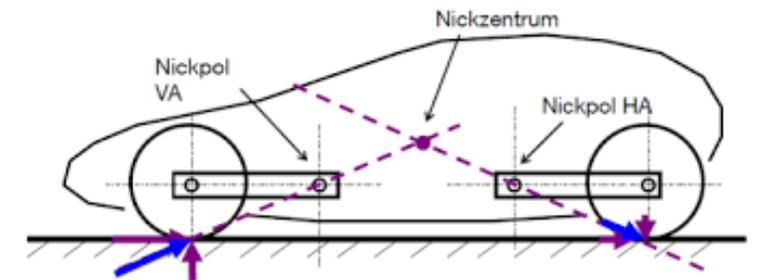
## Fahrzeugkoordinatensystem

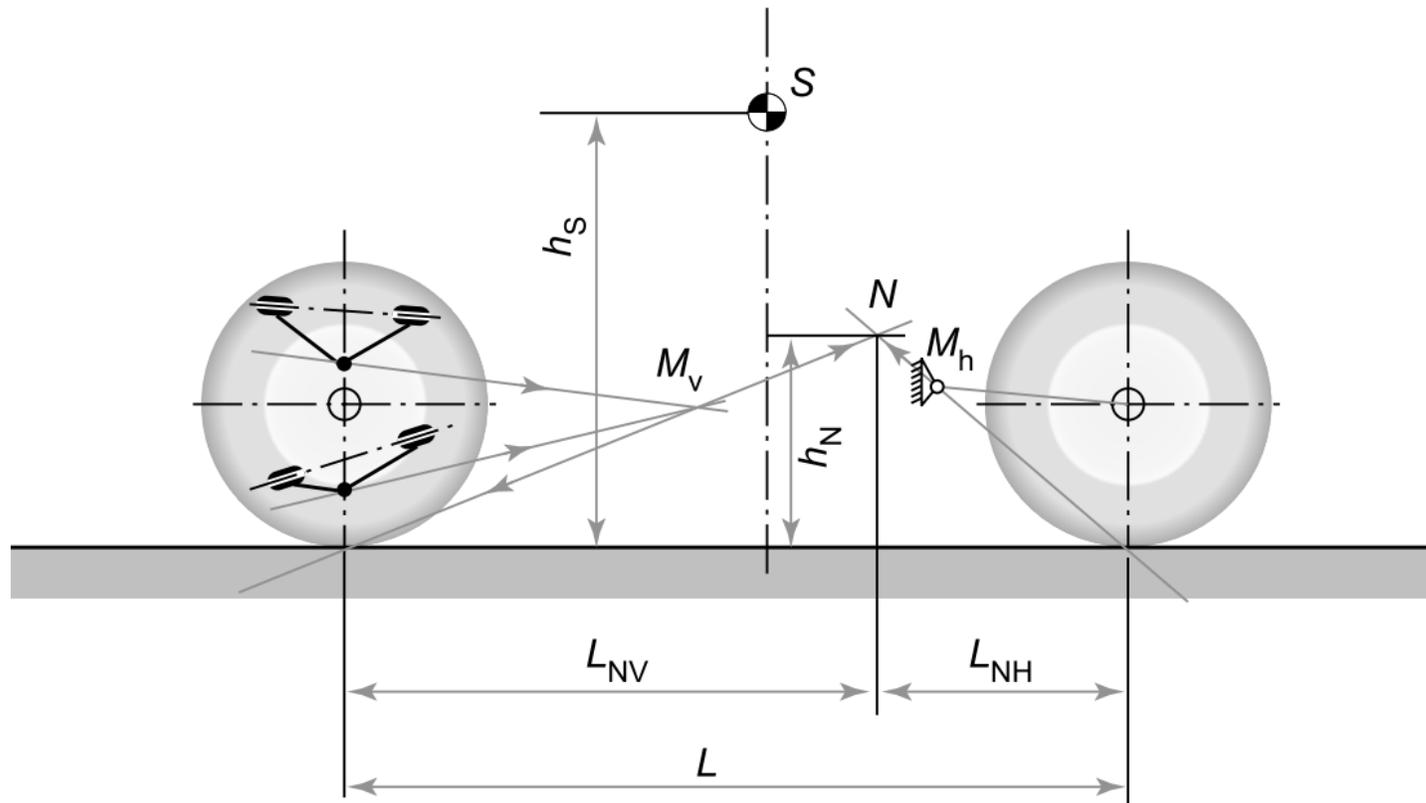


Bitte beantworten Sie folgende Fragen und bereiten Sie sich vor, die Ergebnisse kurz zu präsentieren:

1. Welche Funktionen sind für die Fahrdynamik sehr wichtig und warum?
2. Welche Möglichkeiten bestehen, um ein Momentan Zentrum zu ermitteln, beschreiben Sie bitte zwei Möglichkeiten und stellen Sie sie vor.
3. Wie beschreibe ich einen negativen Lenkrollhalbmesser und welchen Einfluss hat er bei einer angetriebenen Vorderachse?

- In der Radmittellängsebene bzw. Seitenansicht können ebenfalls Momentan Zentren für die Vorder- und Hinterachsen dargestellt werden, um die sich die Achsen relativ zum Aufbau bewegen.
- Am Schnittpunkt der Polstrahlen durch die Momentanzentren und den Radaufstandspunkt liegt das Nickzentrum, um das sich der Aufbau relativ zur Fahrbahn dreht.
- Das Nickmoment ergibt sich analog dem Wankmoment aus der im Schwerpunkt angreifenden Kraft (hauptsächlich Brems- und Beschleunigungskräfte) und dem Hebelarm, der aus dem Abstand des Nickzentrums zum Schwerpunkt ( $h_S - h_N$ ) resultiert.





- **S** Schwerpunkt
- **M<sub>v</sub>** Momentanzentrum vorn
- **M<sub>h</sub>** Momentanzentrum hinten
- **N** Nickzentrum
- **h<sub>S</sub>** Höhe des Schwerpunktes
- **h<sub>N</sub>** Höhe des Nickzentrums
- **L<sub>NV</sub>** Abstand des Nickzentrums zur Vorderachse
- **L<sub>NH</sub>** Abstand des Nickzentrums zur Hinterachse
- **L** Radstand

## Längspol L

- Ermittlung in xz-Ebene auf Höhe Radmitte
- Momentanpol des Rades bzgl. Aufbau
- Relevant für Radstandsänderung, Bremsnicken und Anfahrtauchen abhängig

## Schrägfederungswinkel $\varepsilon$ (a)

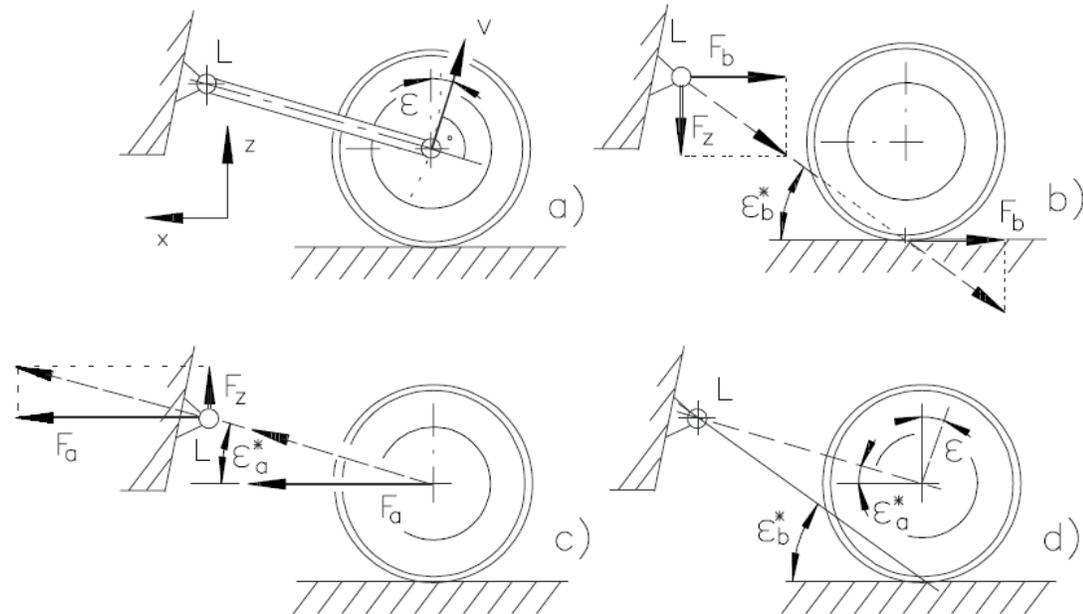
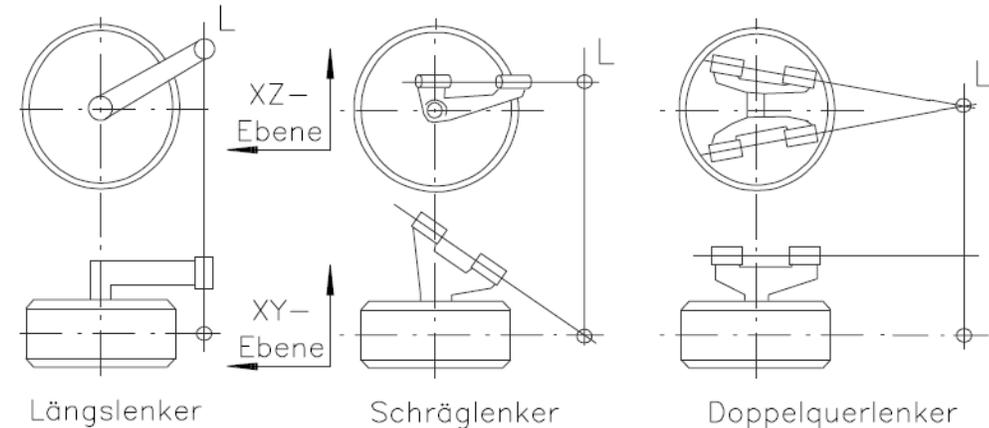
- Ausweichen des Rades bei Längsstößen
- Erhöht Abrollkomfort

## Bremsstützwinkel $\varepsilon_b^*$ (b)

- Kraftangriff im Reifenlatsch
- Längspol bestimmt Bremsstützwinkel  $\varepsilon_b^*$  und Eintauchkraft  $F_z$

## Antriebsstützwinkel $\varepsilon_a^*$ (c)

- Kraftangriff in Radmitte
- Längspol bestimmt Antriebsstützwinkel  $\varepsilon_a^*$  und Aufstellkraft  $F_z$
- $\varepsilon_a^* = \varepsilon$  (Bild d)



## Nicken

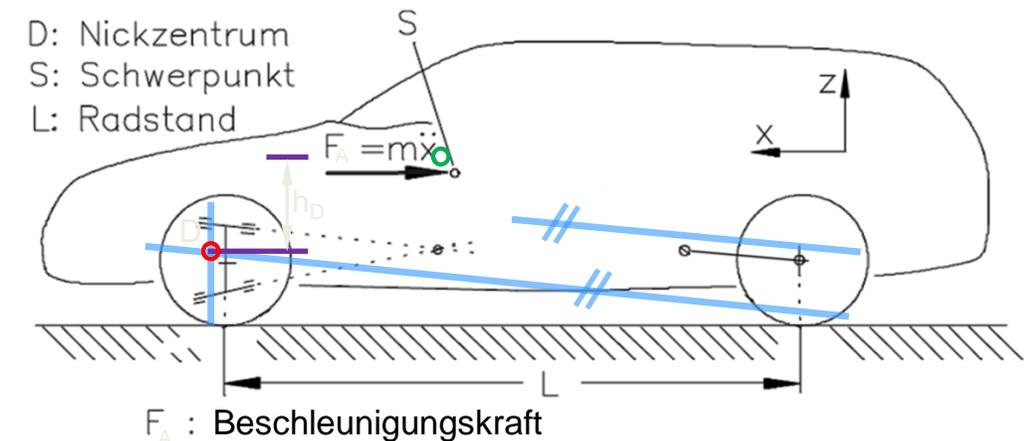
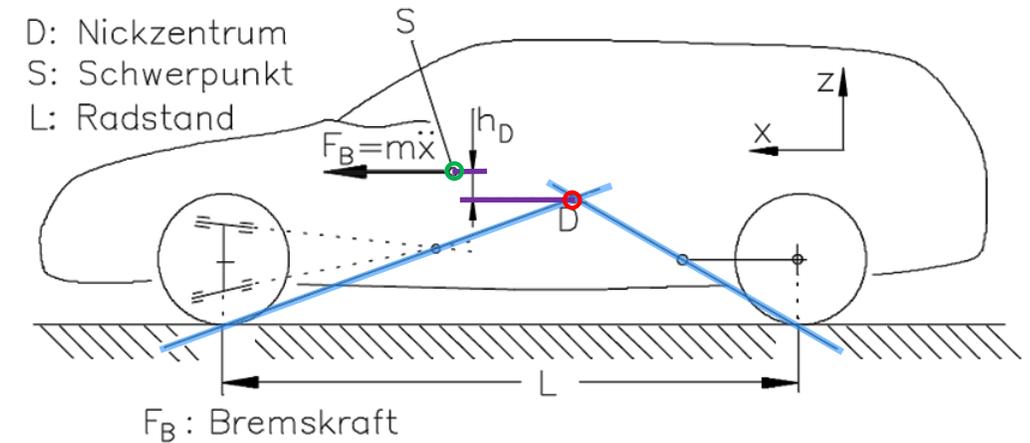
- Nicken: Drehung des Fzgs um die Nickachse D beim Beschleunigen oder Bremsen.
- Nickachse D: meist parallel zur y-Achse (Symmetrie)

## Bremsnicken

- Ermittlung des Nickzentrums D als Schnittpunkt der beiden Geraden durch Radaufstandspunkt und Längspol für VA und HA.
- Aufbaubewegung, wenn Nickzentrum D tiefer oder höher als der Schwerpunkt, d.h. wenn  $h_D \neq 0$

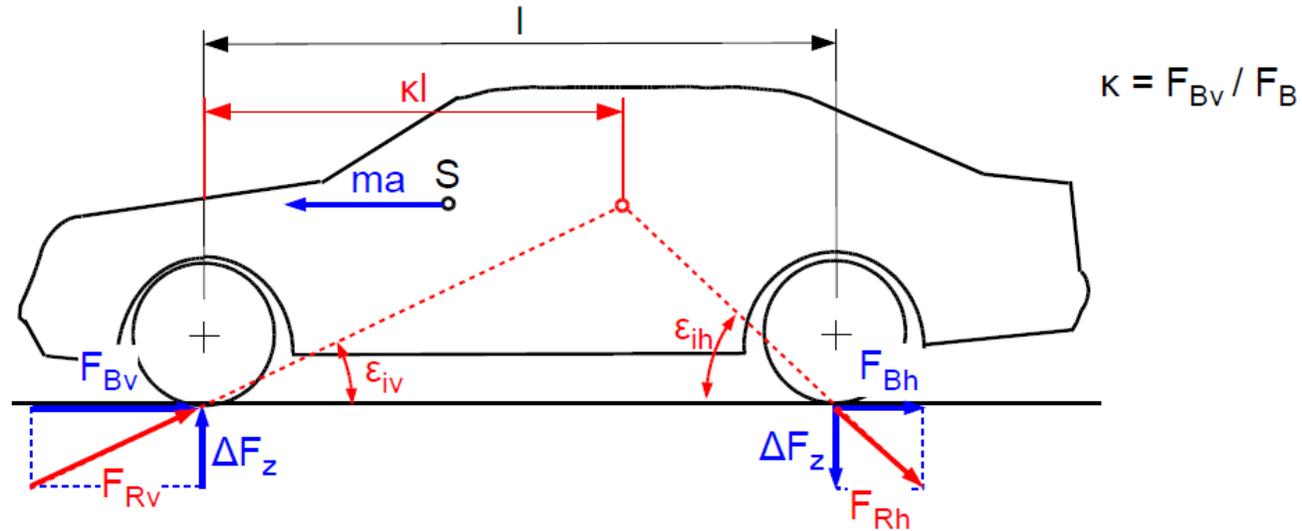
## Anfahrtauchen

- Ermittlung der Krafrichtung der angetriebenen Achse durch Längspol und Kraftangriff
- Ermittlung des Nickzentrums D als Schnittpunkt der beiden Geraden durch Radaufstandspunkt und Krafrichtung für VA und HA.
- Aufbaubewegung, wenn Nickzentrum D tiefer oder höher als der Schwerpunkt, d.h. wenn  $h_D \neq 0$



## Einfluss der Achskonstruktion auf das Nicken

Idealer Bremsabstützwinkel (Anti Dive)



$\epsilon_{iv}$  – idealer vorderer Brems-Stützwinkel  
 $\epsilon_{ih}$  – idealer hinterer Brems-Stützwinkel

## Bremsstützwinkel für vollständigen Bremsnickausgleich

$$\tan(\varepsilon_{\text{opt,v}}) = \frac{h}{l} \cdot \left(1 + \frac{1}{F_{\text{Bv}}/F_{\text{Bh}}}\right)$$

$$\tan(\varepsilon_{\text{opt,h}}) = \frac{h}{l} \cdot (1 + F_{\text{Bv}}/F_{\text{Bh}})$$

$\varepsilon_{\text{opt,v}}$  = Bremsstützwinkel vorne für vollständigen Nickausgleich

$\varepsilon_{\text{opt,h}}$  = Bremsstützwinkel hinten für vollständigen Nickausgleich

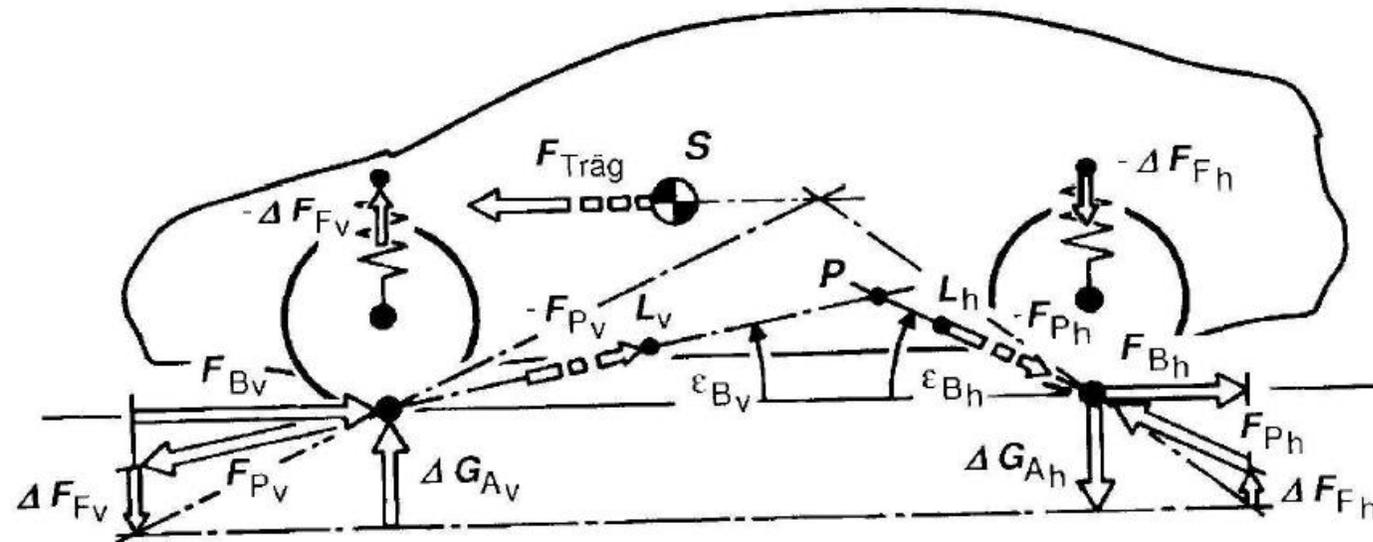
$h$  = Schwerpunkthöhe

$l$  = Radstand

$F_{\text{Bv}}/F_{\text{Bh}}$  = Bremskraftverteilung

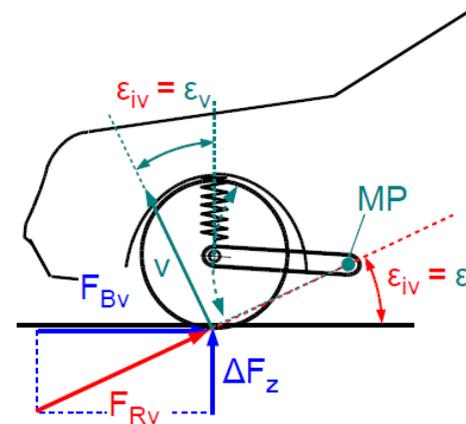
## Güte des Bremsnickausgleichs

$$\text{Bremsnickausgleich } X = \frac{\tan(\varepsilon_{\text{tats.}})}{\tan(\varepsilon_{\text{opt}})} \cdot 100\%$$

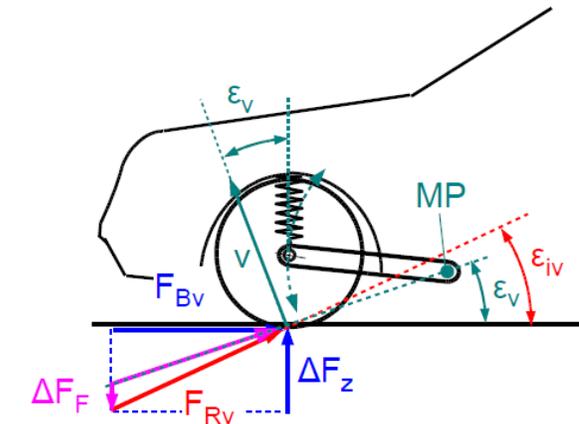


## Bremsnickausgleich

Das Eintauchen des Fahrzeugs wird durch konstruktive Maßnahmen verhindert, eine Kompensation zu 100% ist rein konstruktiv nicht möglich. Der Nickausgleich wird, ergänzt durch das Einwirken der Federkraftkomponente, verstärkt.

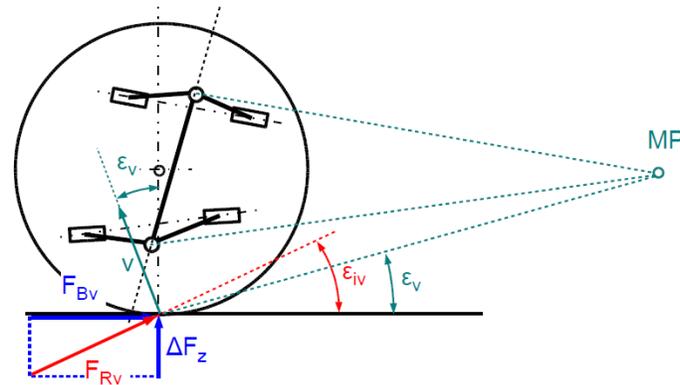


$\epsilon_v = \epsilon_{iv}$ :  
vorderer Brems-Stützwinkel ist ideal  
--> 100% Bremsnickausgleich

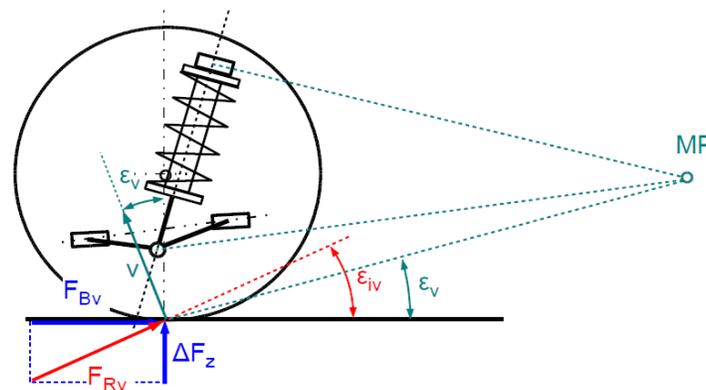


$\epsilon_v \neq \epsilon_{iv}$ :  
vorderer Brems-Stützwinkel ist kleiner  
als der ideale Brems-Stützwinkel  
--> Federkraftkomponente  $\Delta F_f$   
--> Einfederung  
--> Bremsnicken

## Bremsnickausgleich / Nachlaufzunahme



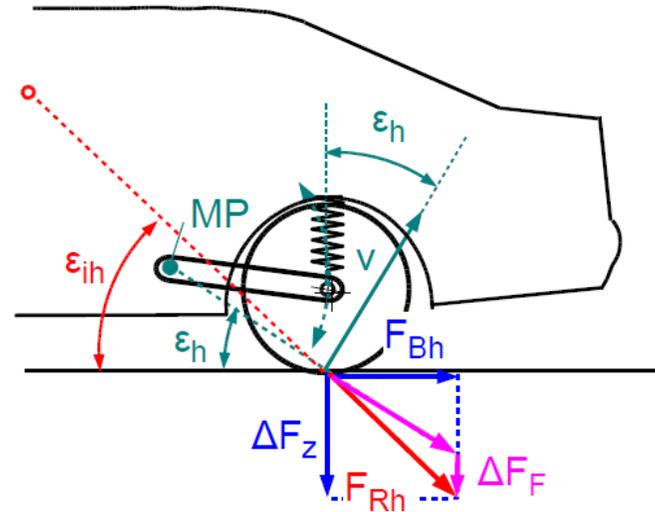
**Nickausgleich bei  
Doppelquerlenkerachsen**



**Nickausgleich bei  
McPherson Achsen**

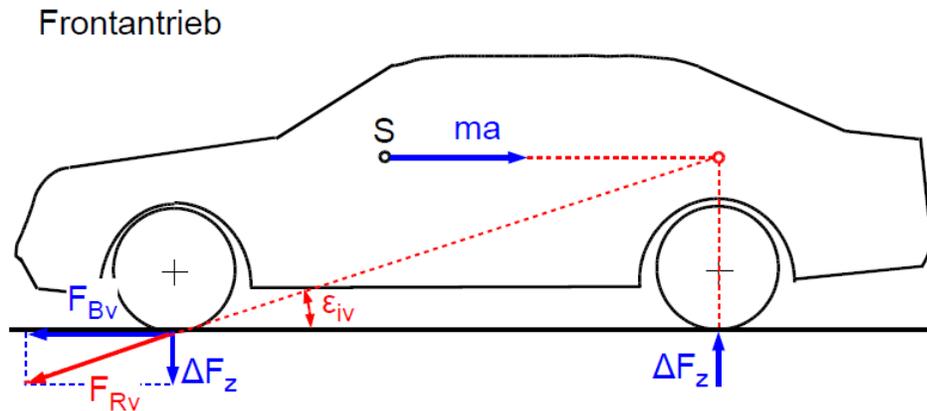
# Kräfte am Fahrwerk

## Bremsnickausgleich an der Hinterachse



$\epsilon_h \neq \epsilon_{ih}$ :  
 hinterer Brems-Stützwinkel ist kleiner  
 als der ideale Brems-Stützwinkel  
 --> Federkraftkomponente  $\Delta F_F$   
 --> Ausfederung  
 --> Bremsnicken

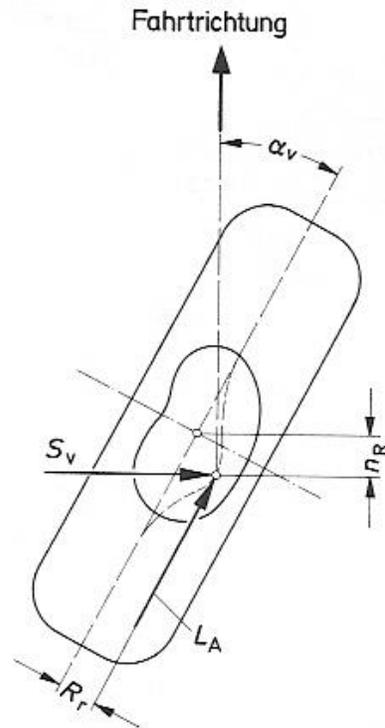
## Nickausgleich beim Anfahren



**Nickausgleich  
beim Anfahren  
(Anti squat)**

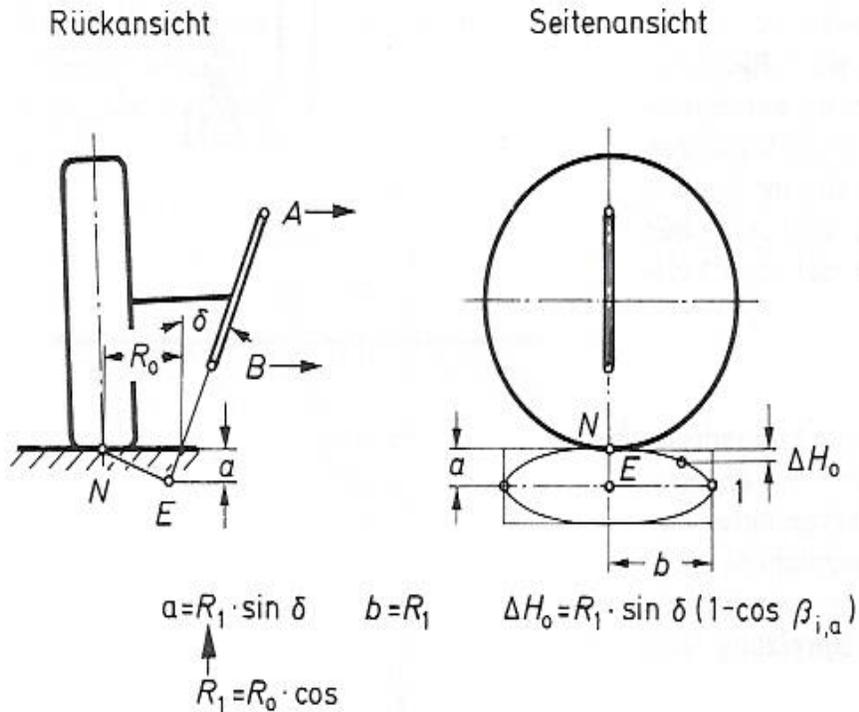
$\epsilon_{iv}$  – idealer vorderer Anfahr-Stützwinkel  
 $\epsilon_{ih} = 90^\circ$  – „idealer“ hinterer Anfahr-Stützwinkel,  
 nicht ausführbar!

## Die Kräfte im Reifenlatsch



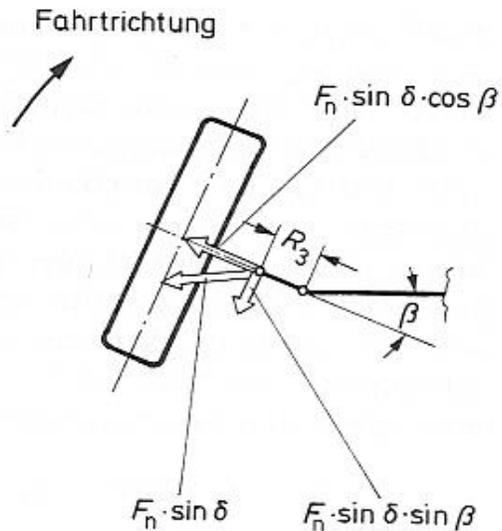
Bei Kurvenfahrt wird die Reifenaufstandsfläche verformt und der Angriffspunkt der Kräfte hinter die Radmitte verlagert. Hierdurch bekommt die parallel aus der Radmittelebene heraus seitlich verschoben Antriebs-Längskraft  $L_A$  den Hebelarm  $R_r$  und verstärkt über diesen die Lenkrückstellung.

## Hochkrafthebelarm

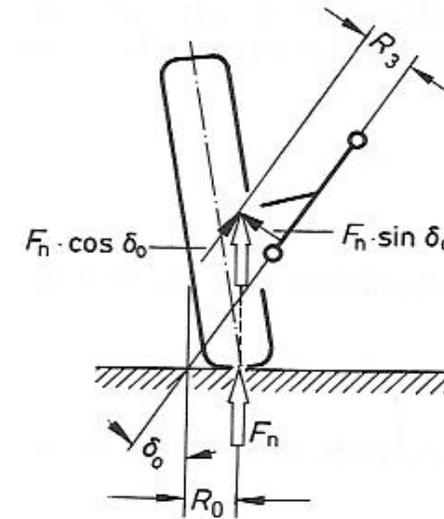


Beim Lenkeinschlag beschreibt der Radaufstandspunkt in der Seitenansicht eine angenäherte Ellipsenbahn; ist kein Nachlauf vorhanden, wird das Fahrzeug um den Betrag  $\Delta H_0$  angehoben

## Einfluss des Lenkrollhalbmessers



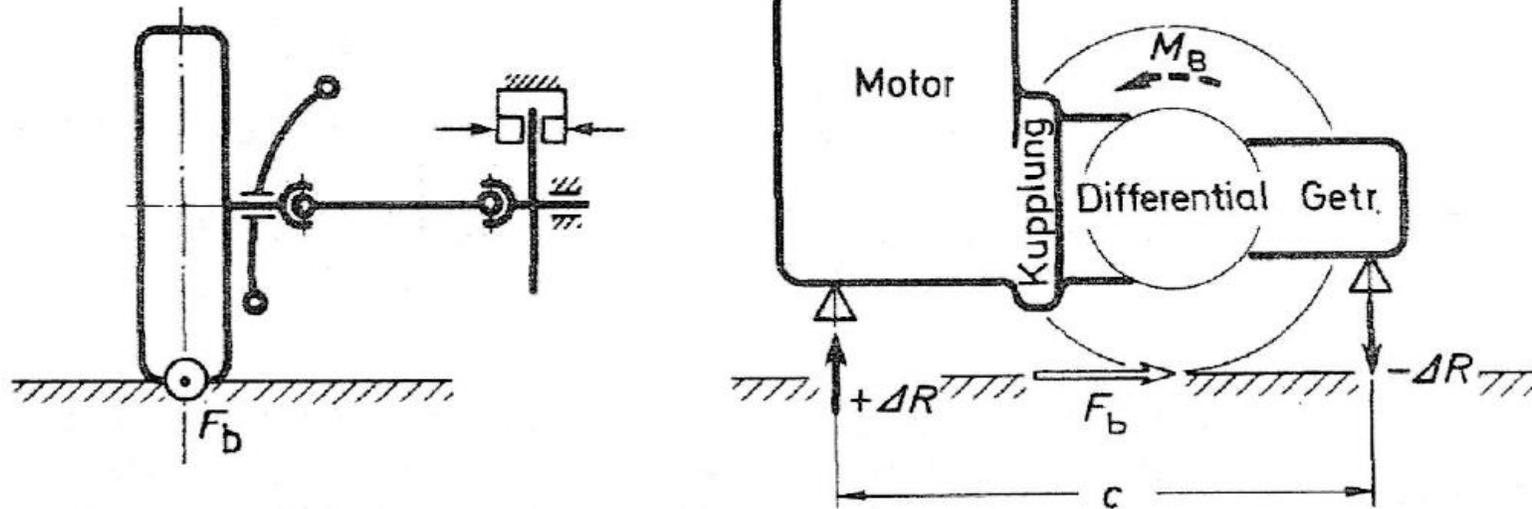
Beim Lenkeinschlag um den Winkel  $\beta$  ergibt die Hochkraftkomponente  $F_n \cdot \sin \delta$  das Rückstellmoment  $M_{L2}$ ; die Größe dieser sogenannten „Gewichtsrückstellung“ hängt vom Spreizungswinkel  $\delta$ , Hebelarm  $R_3$  und der Vorderachslast  $m_v$  ab.



Ein negativer Lenkrollhalbmesser verkleinert den Hochkrafthebelarm  $R_3$ . Dessen Länge ist jedoch mitbestimmend für das Lenkungsrückstellmoment  $M_{L2}$  und, um dieses in seiner Stärke beibehalten zu können, muss der Spreizungswinkel  $\delta$  vergrößert werden.

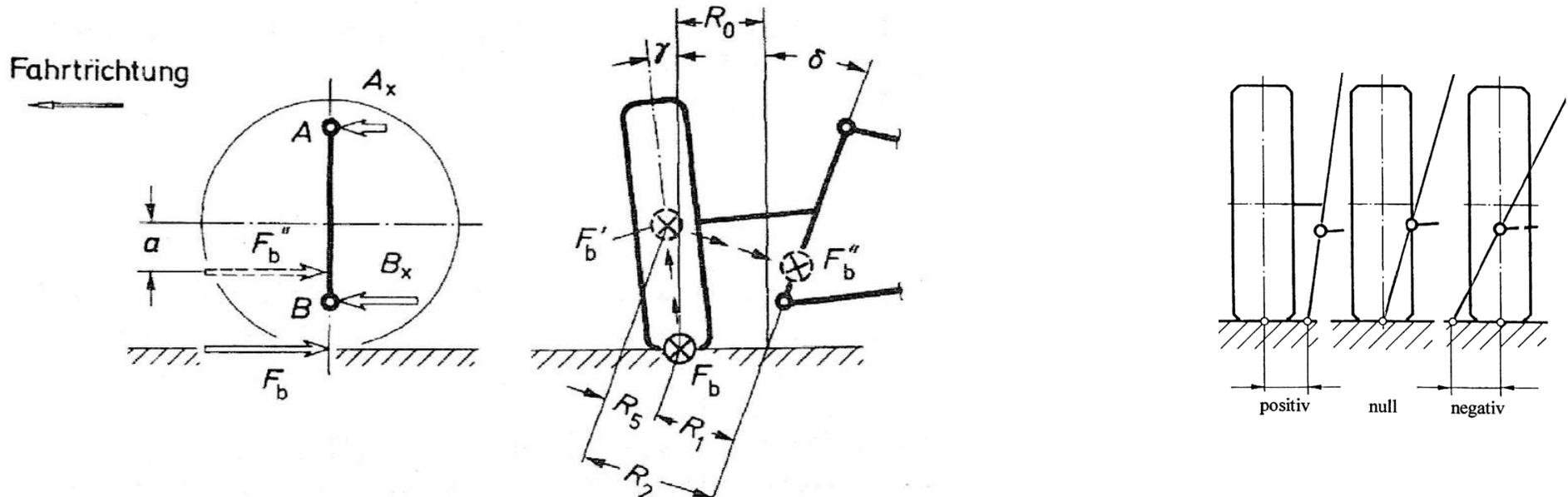
## Bremsmomentabstützung bei innenliegender Bremse

Bei innenliegender Bremse muss das Bremsmoment von der Motoraufhängung aufgenommen werden; es entstehen in den Gummipuffern die Reaktionskräfte  $\pm R_1$ , deren Größe vom Wirkabstand „c“ abhängig ist.



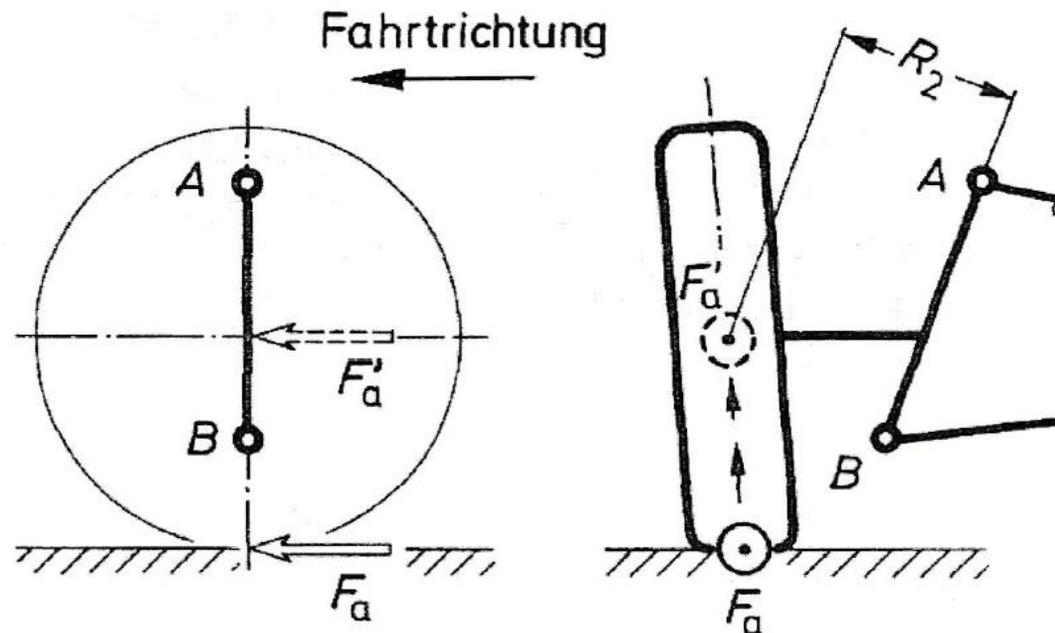
## Angriffspunkt der Bremskraft bei innenliegender Bremse

Bei innenliegender Bremse ist die „ $F_b$ “ als „ $F_b''$ “ in der Radmitte zu betrachten; es entsteht das Moment  $M_B = F_b R_2$ . Die Bestimmung der Kräfte „ $A_x$ “ und „ $B_x$ “ in den Radgelenken erfordert ein weiteres Verschieben senkrecht zur Spreizachse; „ $F_b''$ “ kommt dadurch das „ $F_b$ “ um den Betrag  $a = R_1 \cdot \sin\delta$  unter der Radmitte „ $r_{dyn}$ “ zu liegen. Auf die gleiche Weise sind die Rollwiderstandskräfte zu bestimmen.

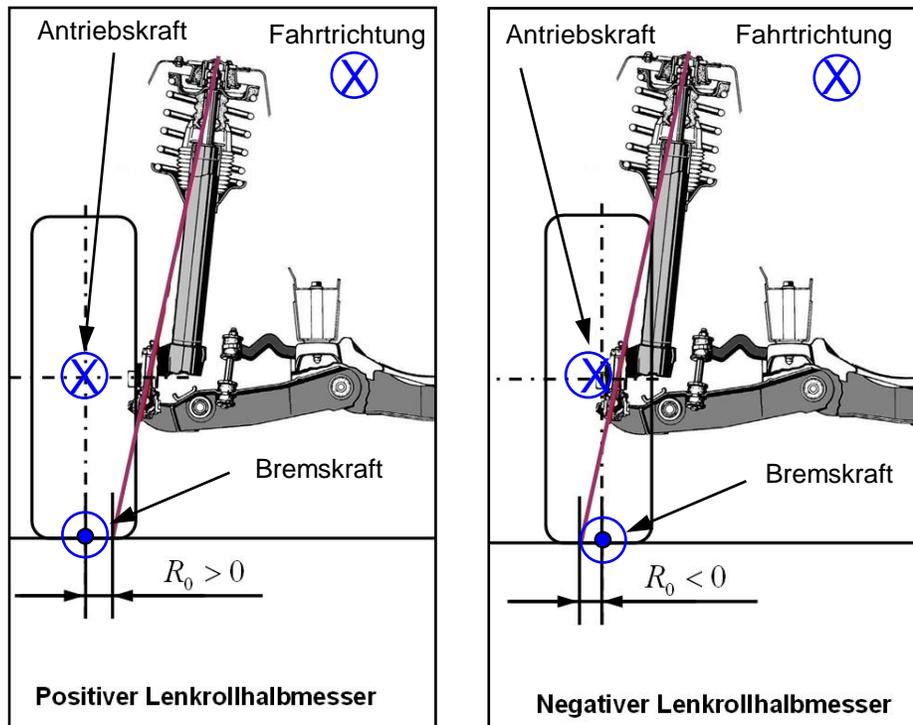


## Angriffspunkt der Antriebskraft

Die am rollenden Rad vorhandene Antriebskraft „ $F_a$ “ ist zur Kräftebestimmung in die Radmitte zu verschieben.



## Angriffspunkte der Längskräfte (Bremsen / Beschleunigen)



### Lenkrollhalbmesser ist abhängig von

- Einpresstiefe des Rades
- Spreizung des Federbeins
- Konstruktion der Achse (z.B. Drehachse des Federbeins Drehmittelpunkt Domlager, Radträger)

### Negativer Lenkrollhalbmesser

- Beschleunigen Vorspur
- Bremsen Vorspur
- Bremsen bei  $\mu$ -Splitt:

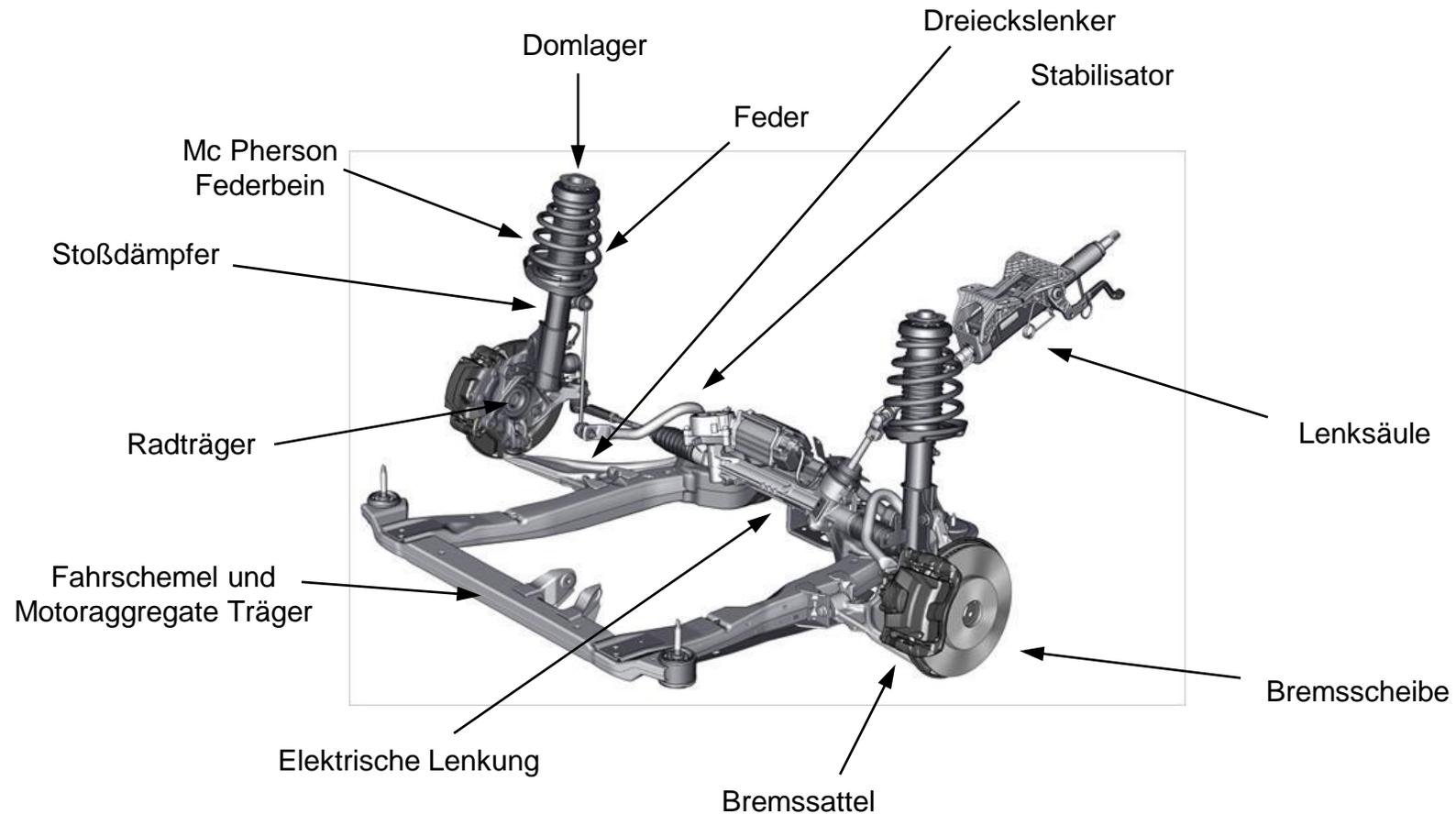
Fahrzeug lenkt in die Richtung des schlupfbehafteten Rades!!!

### Positiver Lenkrollhalbmesser

- Beschleunigen Vorspur
- Bremsen Nachspur
- Bremsen bei  $\mu$ -Splitt:

Fahrzeug lenkt in Richtung des Rades mit mehr Grip!!!

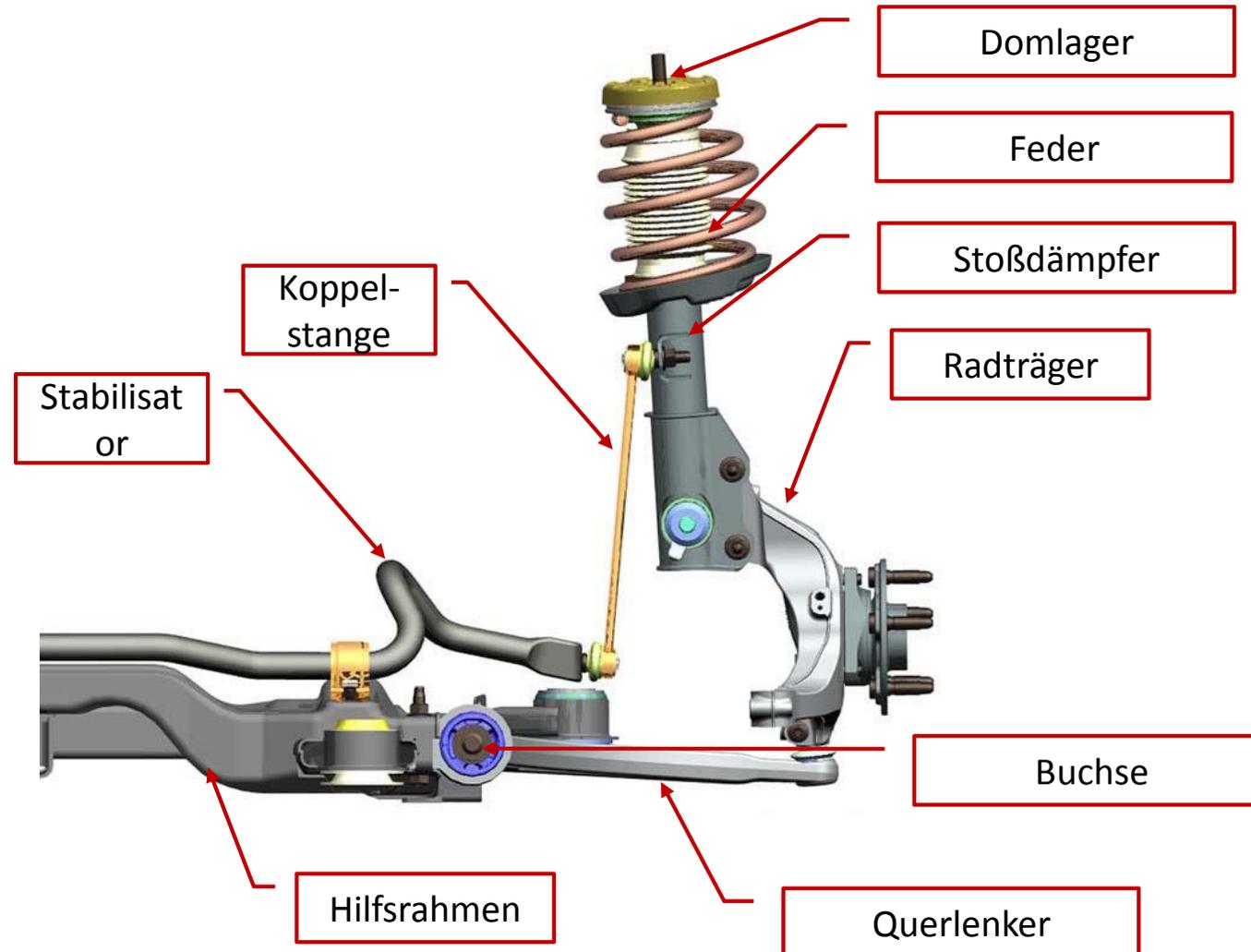
## MC Pherson Vorderachse Opel Astra J



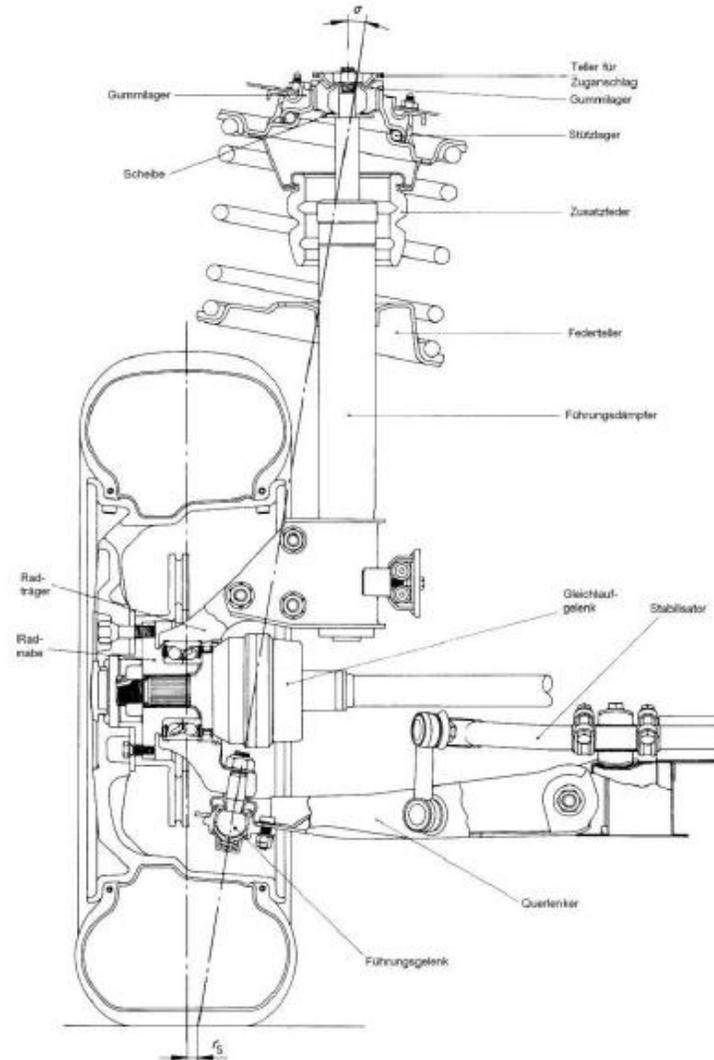
## Notiz - Mc Pherson Achse

- Aus der Doppelquerlenkerachse entstanden: Der obere Querlenker wird durch den
- Teleskopstoßdämpfer ersetzt. Dessen Gehäuse ist fest mit dem Radträger verbunden.
- Die Stoßdämpferstange übernimmt die Aufgabe der Radführung
- Geringer Bauaufwand und geringer Raumbedarf
- Hat sich als Vorderachsstandard bei Frontrieblern durchgesetzt (selten als Hinterachse z.B. Porsche Boxter)
- Weniger Spielraum zur Auslegung der Radführungskinematik bei Doppelquerlenkerachse
- Die Radführungskräfte auf die Stoßdämpferstange verursachen erhöhte Reibung, was den Fahrkomfort mindert (Haftreibung)
- Schwierige Isolation von Schwingungen und Körperschall am oberen Federbein-Stützlager (Domlager)

# Fahrwerkstypen: MacPherson Vorderachse

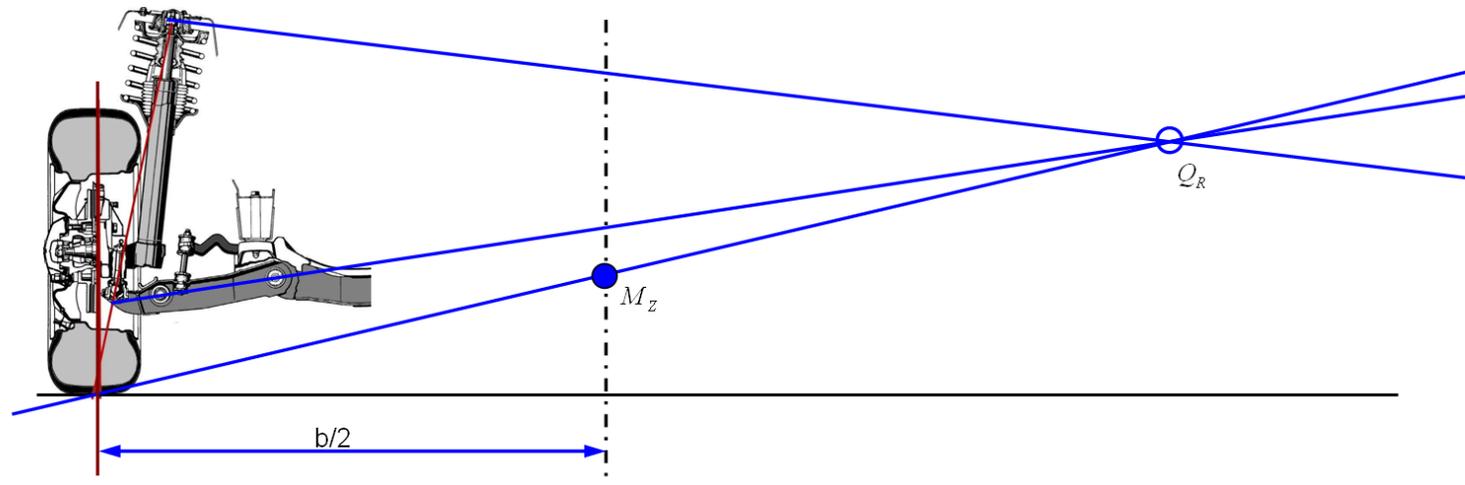


# McPherson-Achse (Lancia)



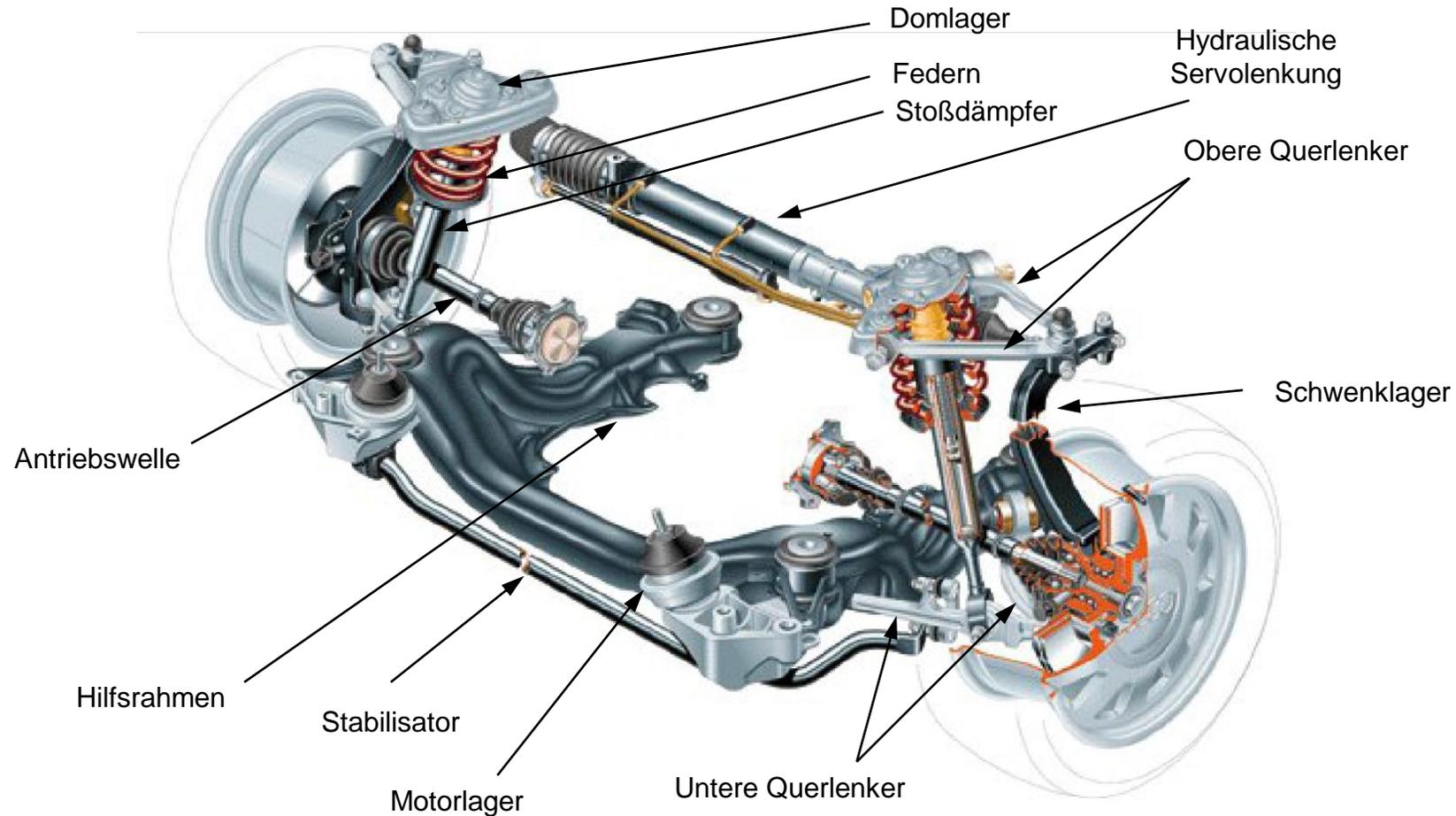
Quelle: Reimpell

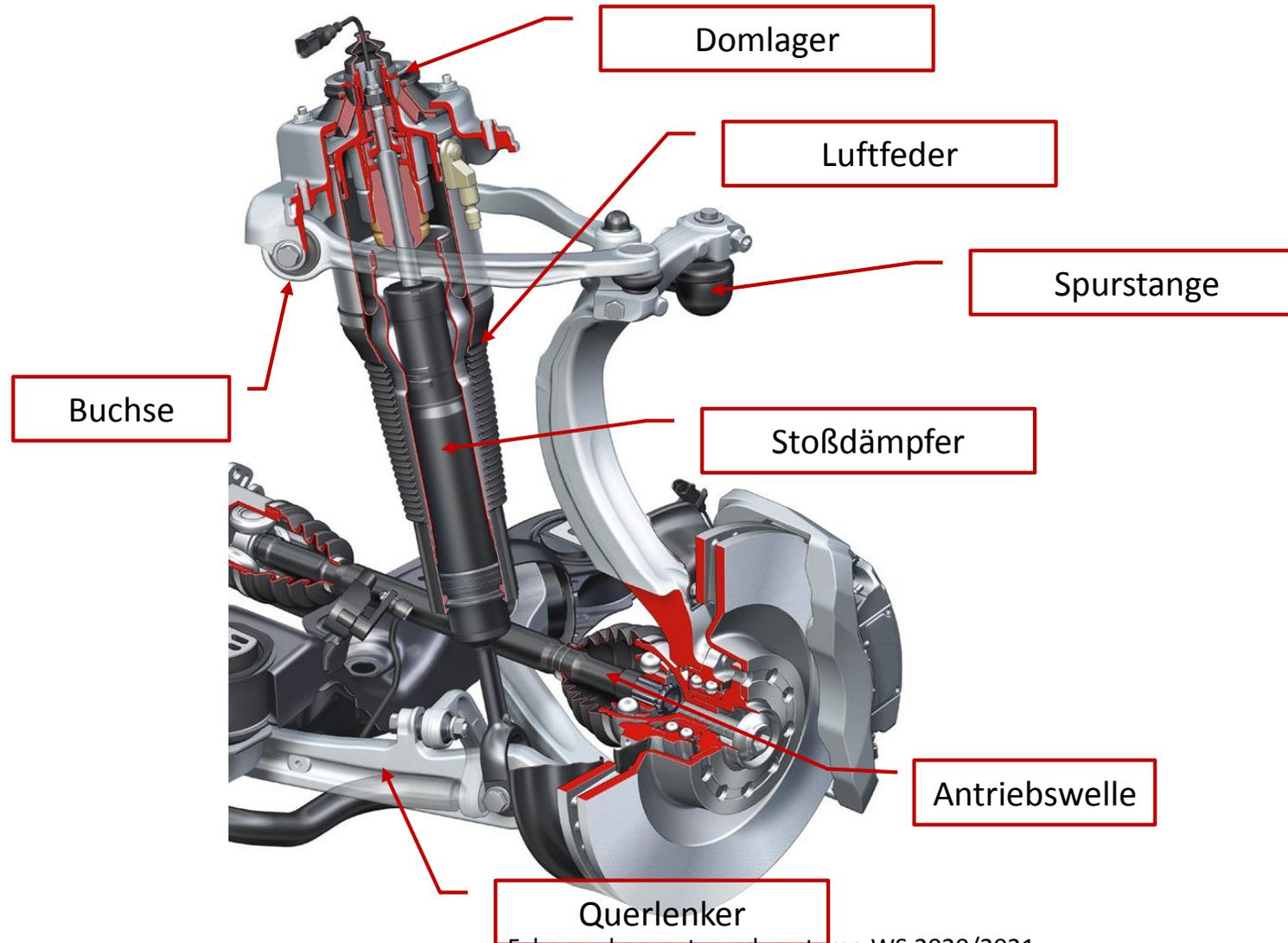
## Mc Pherson Vorderachse



$M_z$  - Momentanzentrum  
 $Q_R$  - Momentanpol  
 $b$  - Spurweite

## Doppelquerlenker Vorderachse Audi A6 Bj.2000



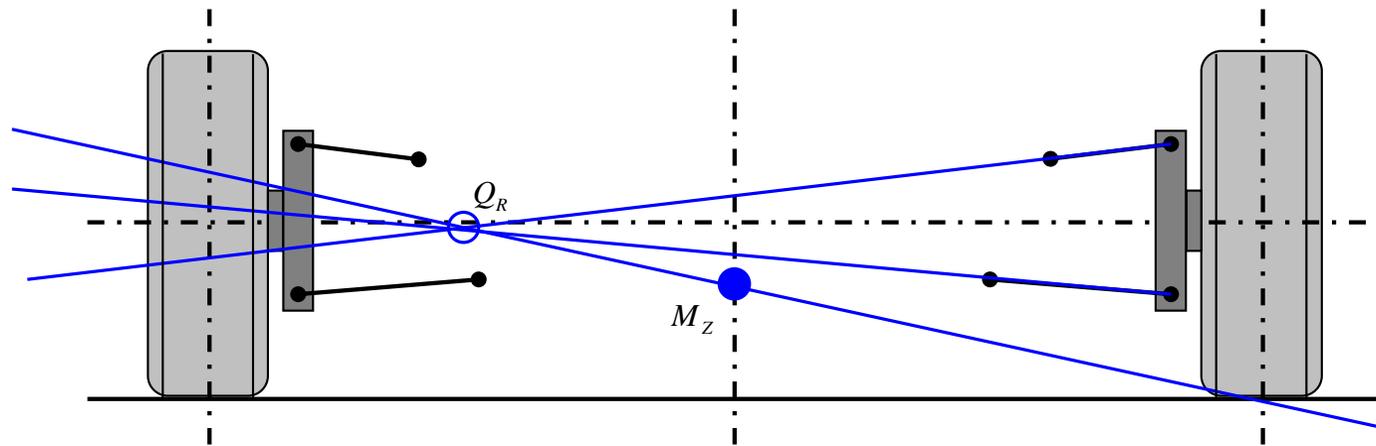


## Notiz – Doppelquerlenkerachse

- Kinematisch sehr flexibel auslegbar
  - parallele Drehachsen: ebene Radaufhängungen
  - sich schneidende Drehachsen: sphärische Radaufhängung
  - schief zueinander verlaufende Drehachsen: räumliche Radaufhängung
- Lage des Wankzentrums, Sturz- und Spuränderung können in weiteren Grenzen variiert werden
- Relativ große Gelenkkräfte
- Viele Gelenke
- Großer Raumbedarf

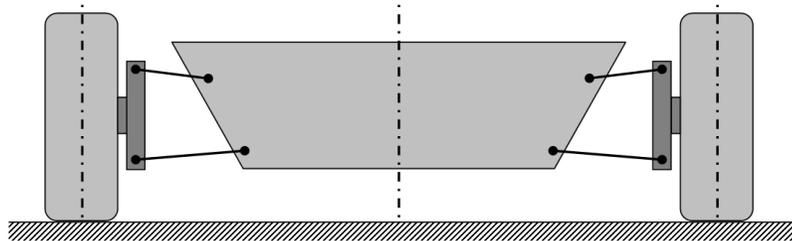


## Doppelquerlenker Achse

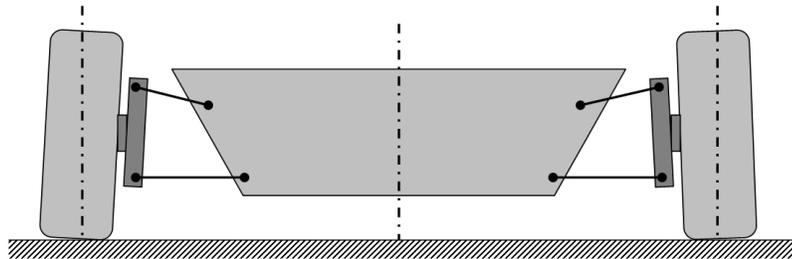


$M_Z$  - Momentanzentrum  
 $Q_R$  - Momentanpol

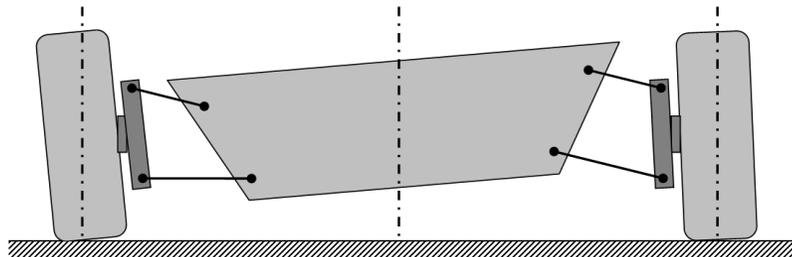
## Doppelquerlenkerachse: Sturzänderung durch Einfedern



- Konstruktionslage

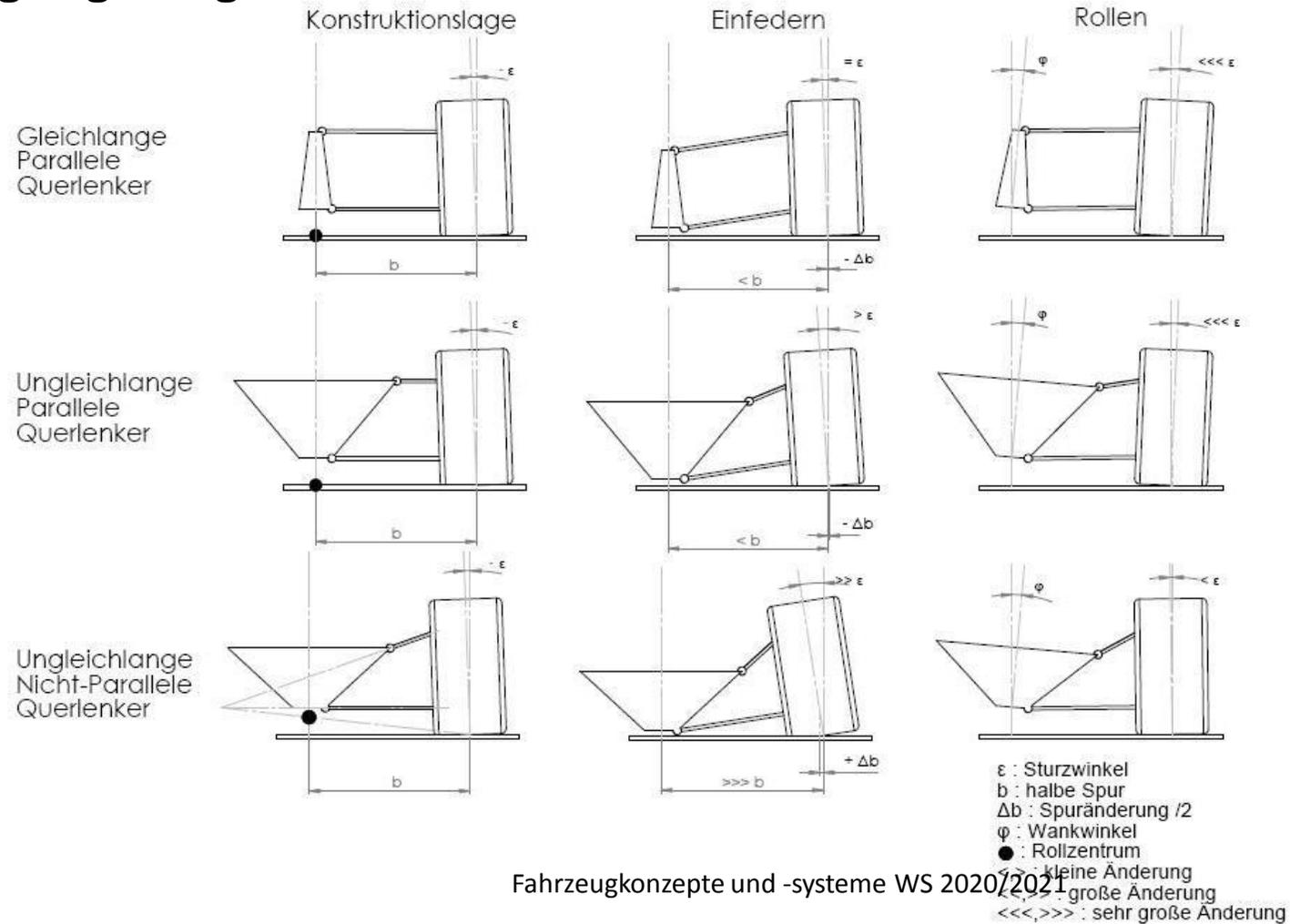


- **Beidseitiges Einfedern**
- Sturzzunahme Richtung negativ

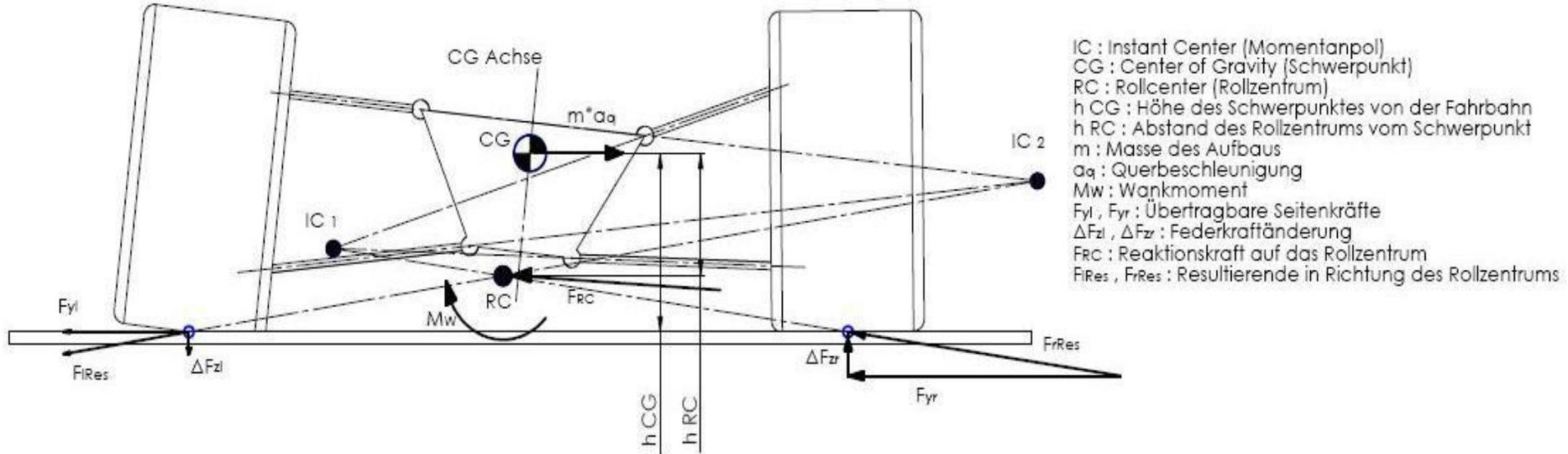


- **Kurvenfahrt mit einseitigem Einfedern** unterstützt durch Wanken des Aufbaus
- Sturzzunahme Richtung positiv am kurvenäußeren Rad, Richtung negativ am kurveninneren Rad

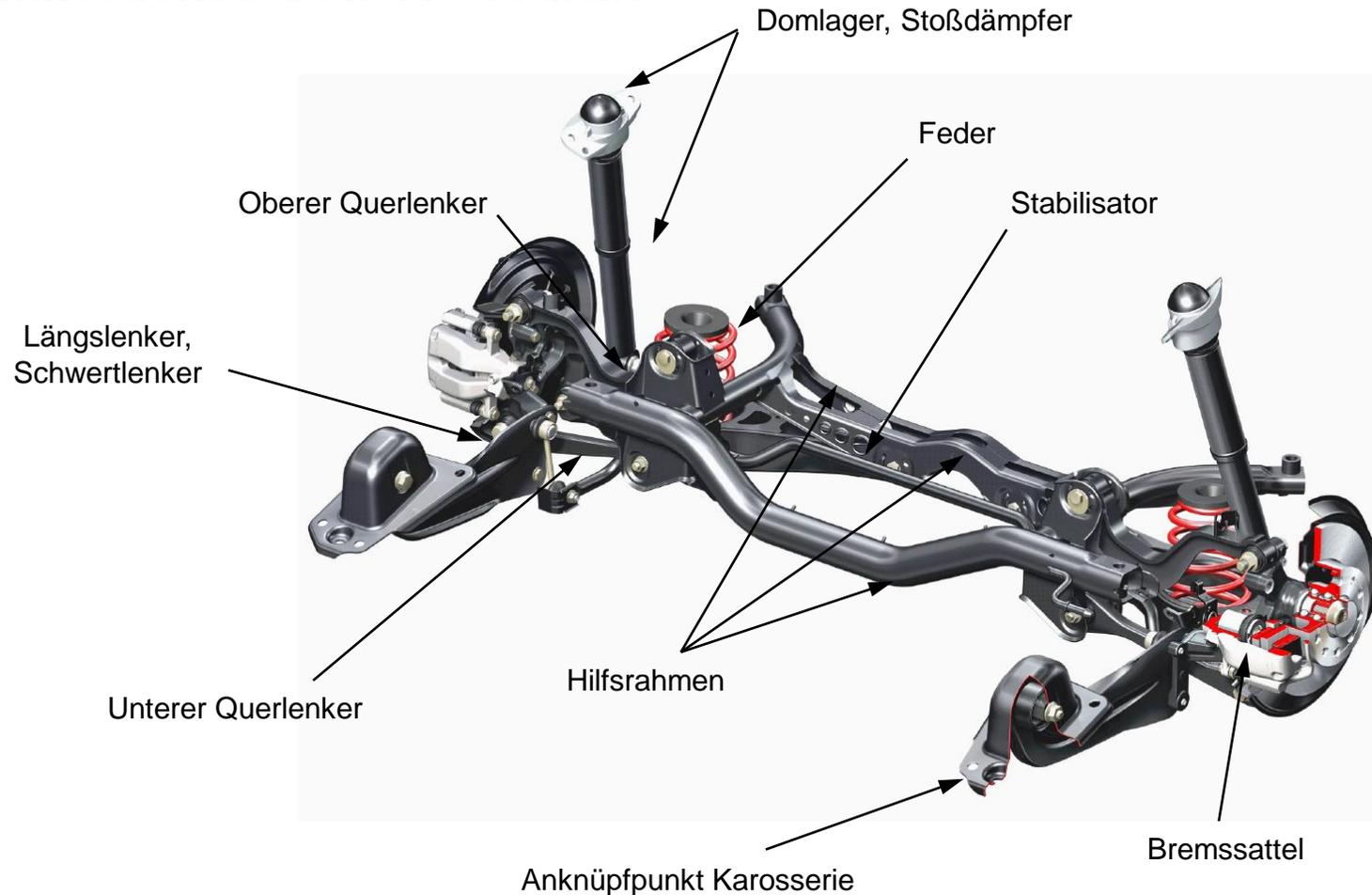
## Auslegungsmöglichkeiten



## Schwerpunkt / Rollachse



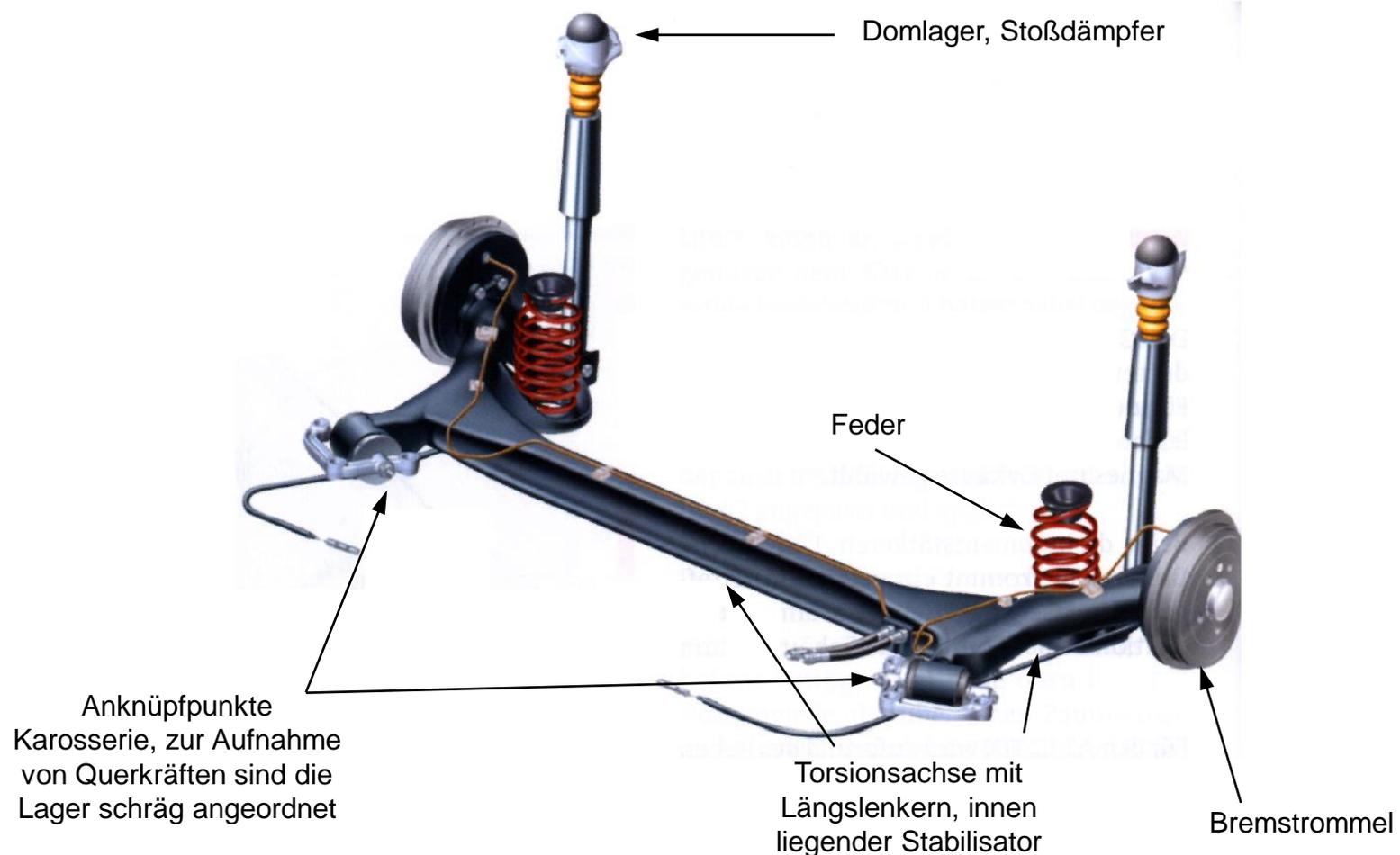
## Mehrlenkerhinterachse Golf VI / Touran



## Notiz – Mehrlenkerhinterachse

- Weite Auslegungsmöglichkeiten für die Radführungskinematik (Spur- und Sturzverlauf, Lage des Wankzentrums)
- Individuelle Konstruktion, teuer
- Hoher Platzbedarf
- Meist unter Verwendung eines Fahrschemels eingebaut (Vormontage, akustische Isolierung)

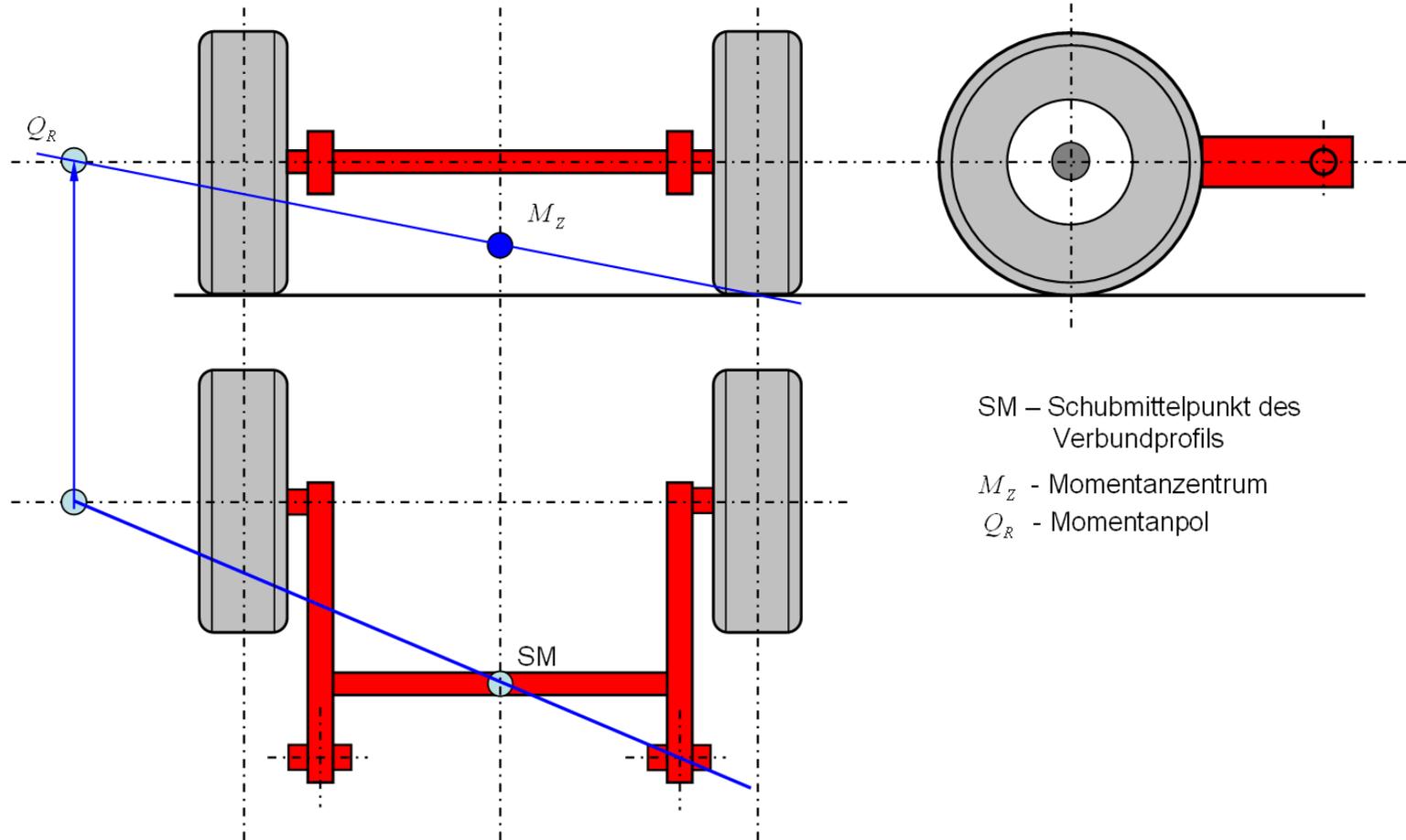
## Verbundlenkerachse - Audi A2 Bj.2000



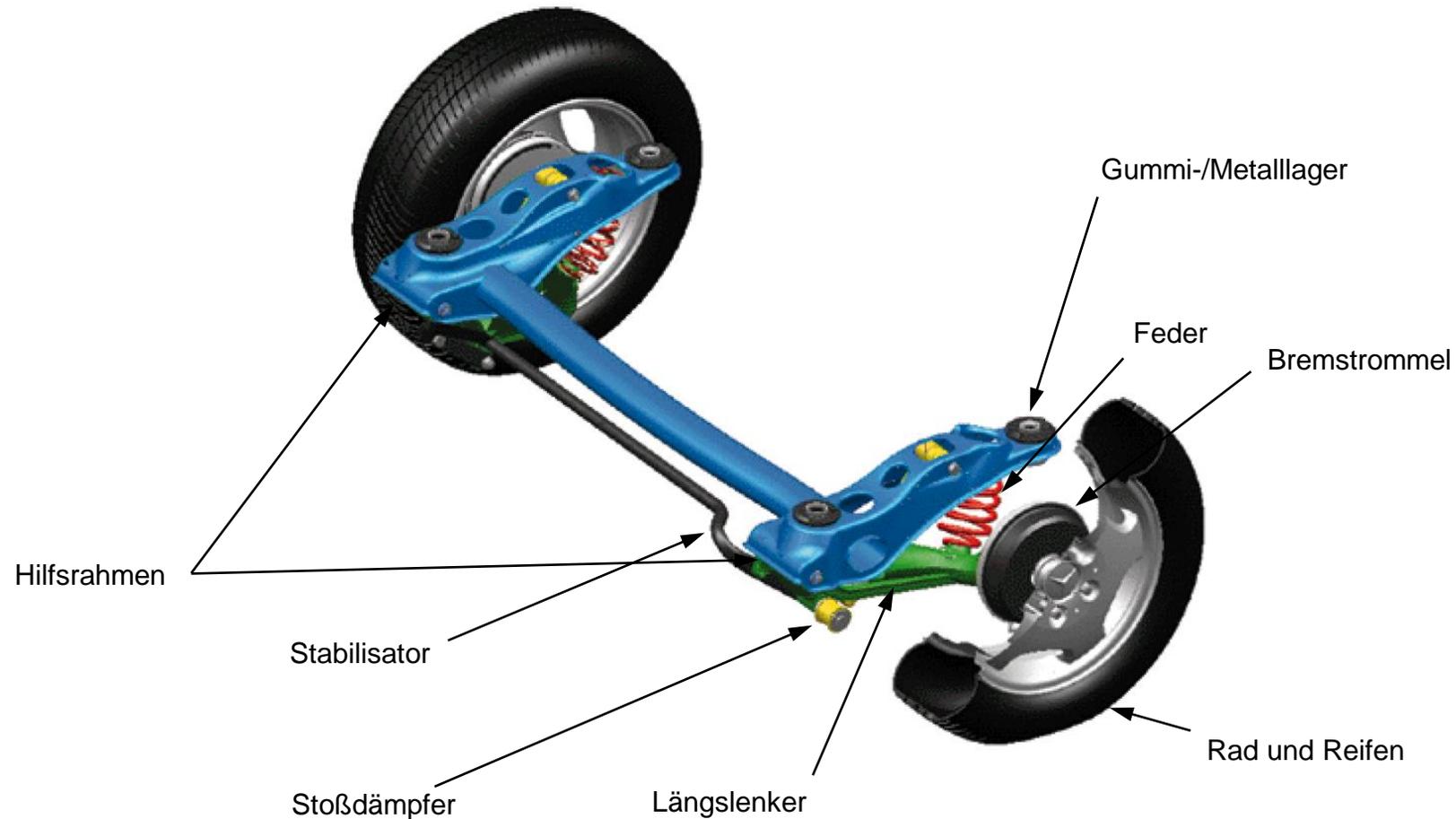
## Notiz – Verbundlenkerachse

- Sehr verbreitet als Hinterachse bei Fahrzeugen mit Frontantrieb
- Keine Änderung von Spur und Sturz beim Einfedern
- Stabilisatorwirkung des Verbunds
- Einfache Konstruktion
- Geringerer Raumbedarf
- Ungeeignet als angetriebene Achse
- Liegt das Verbindungsprofil hinter den Lenkeranlenkpunkten an der Karosserie, so spricht man auch von Koppellenkerachsen:
- Diese Auslegung zeigt günstige kinematische Eigenschaften und ist heute fast der Standard bei Fahrzeugen mit Frontantrieb im Kleinwagensegment. Bei Fahrzeugen der Mittelklasse gewinnt das Konzept der Mehrlenkerachsen immer mehr an Bedeutung.

## Verbundlenker Hinterachse



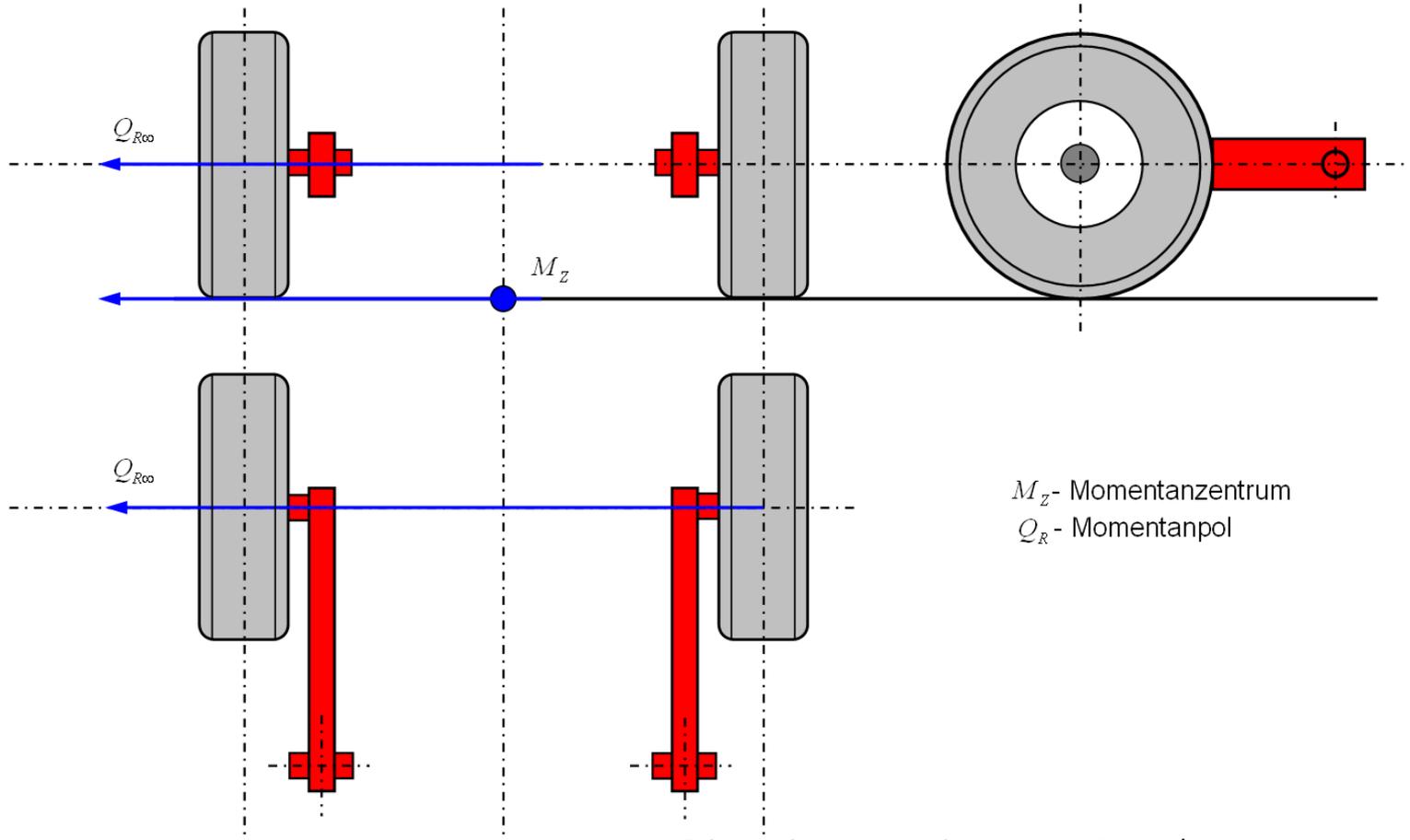
## Längslenkerachse - Mercedes A-Klasse Bj.2000



## Notiz – Längslenkerachse

- Einfache Konstruktion
- Viel Platz zwischen den Lenkern für Tank oder Reserverad
- Bei Drehachsen parallel zur Fahrbahn: keine Spur-, Spurweiten- und Sturzänderung beim Federn
- Beanspruchung der Lenker auf Biegung und Torsion
- Tief liegender Wankpol auf der Fahrbahnoberfläche: große Wankwinkel bei Kurvenfahrt

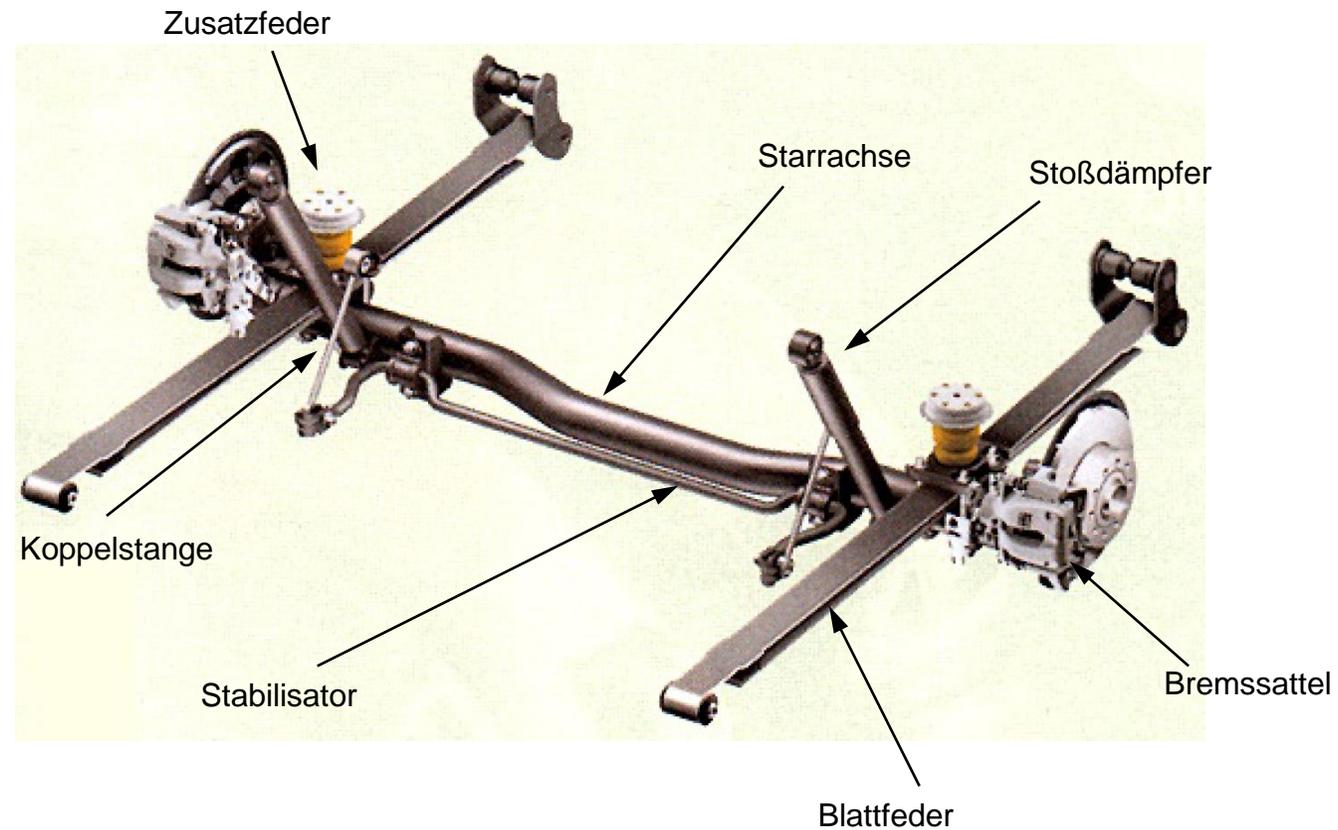
## Längslenker Hinterachse



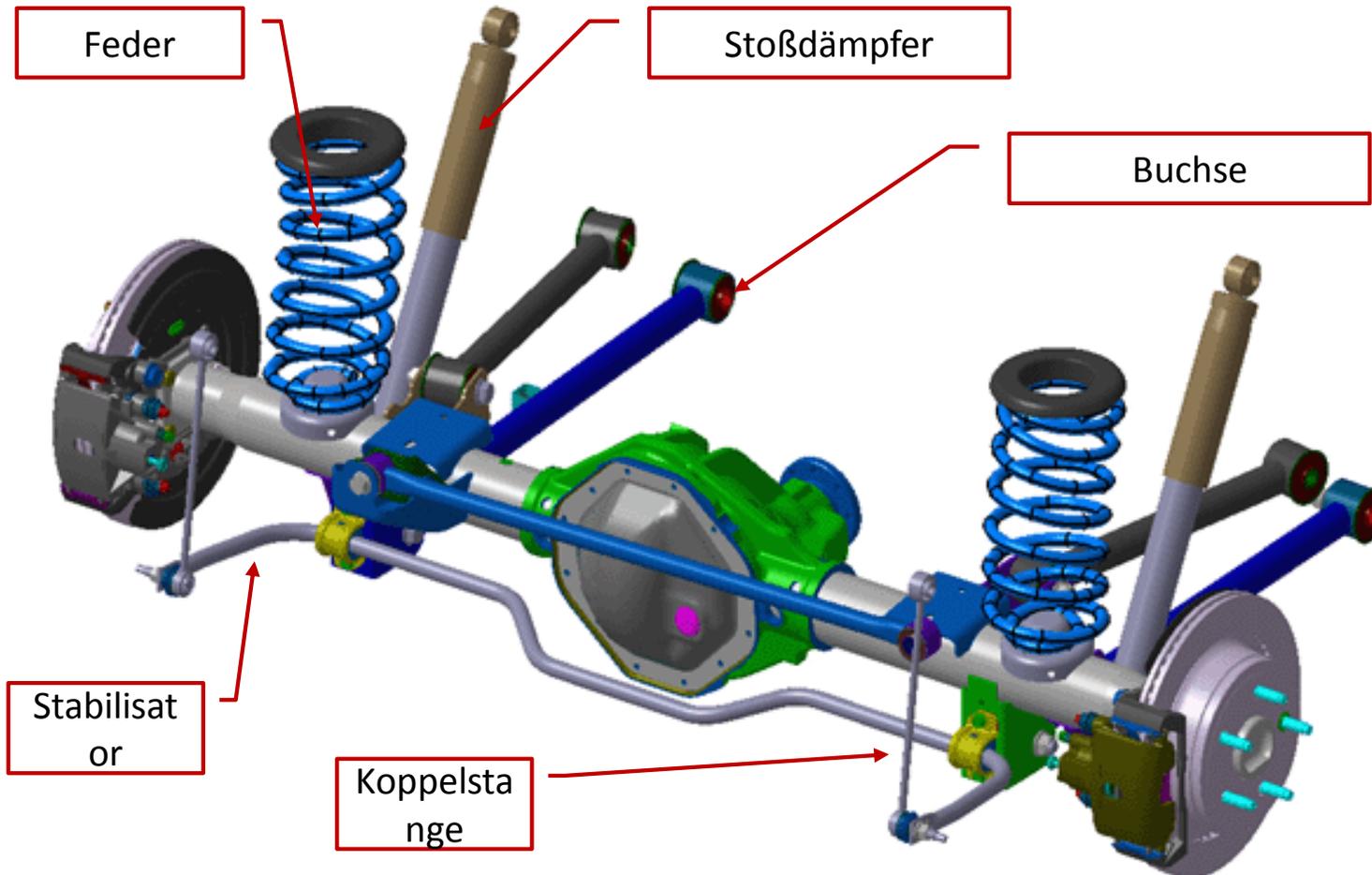
# Das passiert.....!



## Starrachse VW Caddy



# Achstyp Starrachse



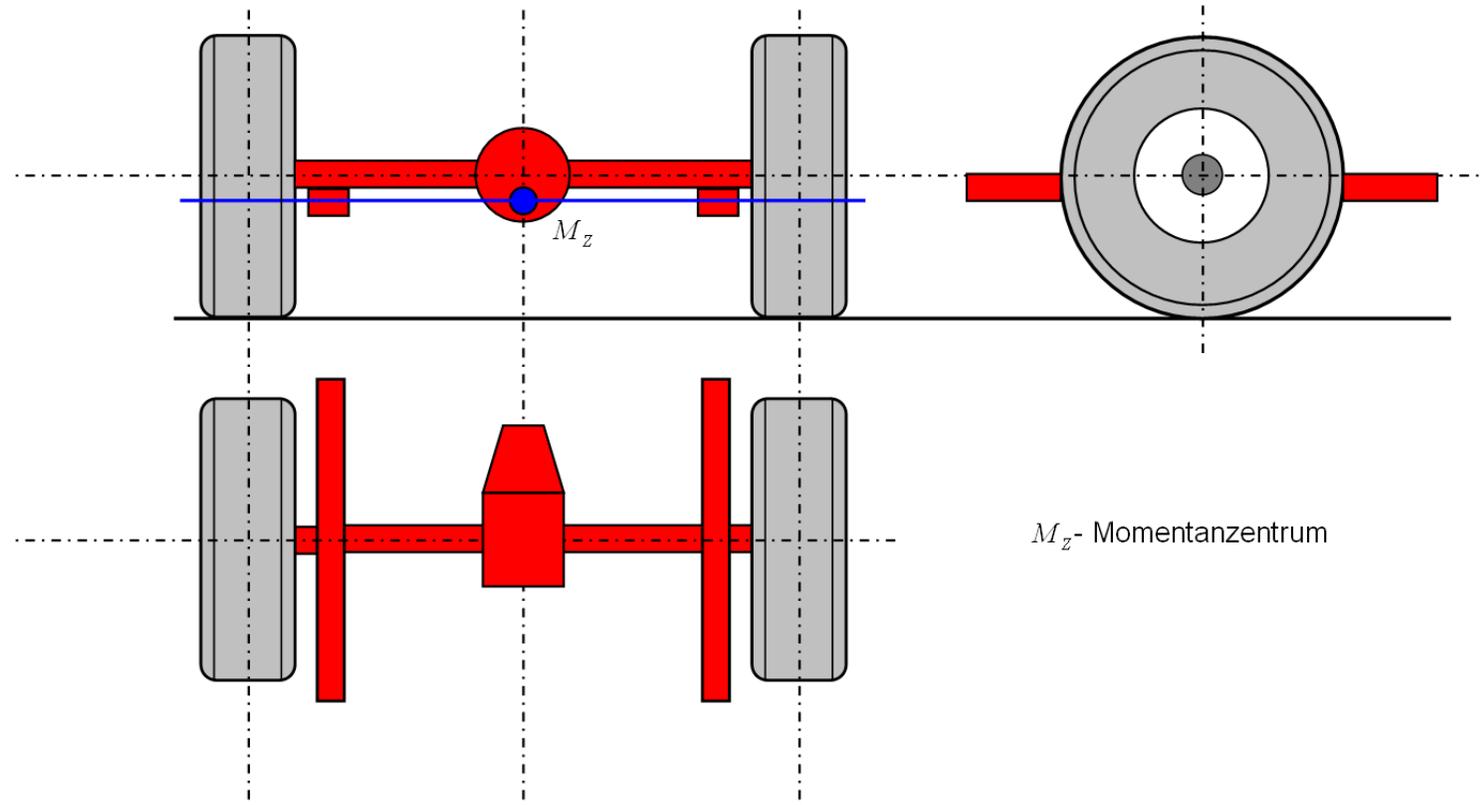
## Notiz – Starrachsen

- Keine Sturz- und Spuränderung beim Einfedern
- Großer Bauraum
- Große ungefederte Massen: schlecht für Komfort und
- Radlastschwankung (Fahrsicherheit)
- Querversatz beim Federn bei zu kurzem Panhardstab

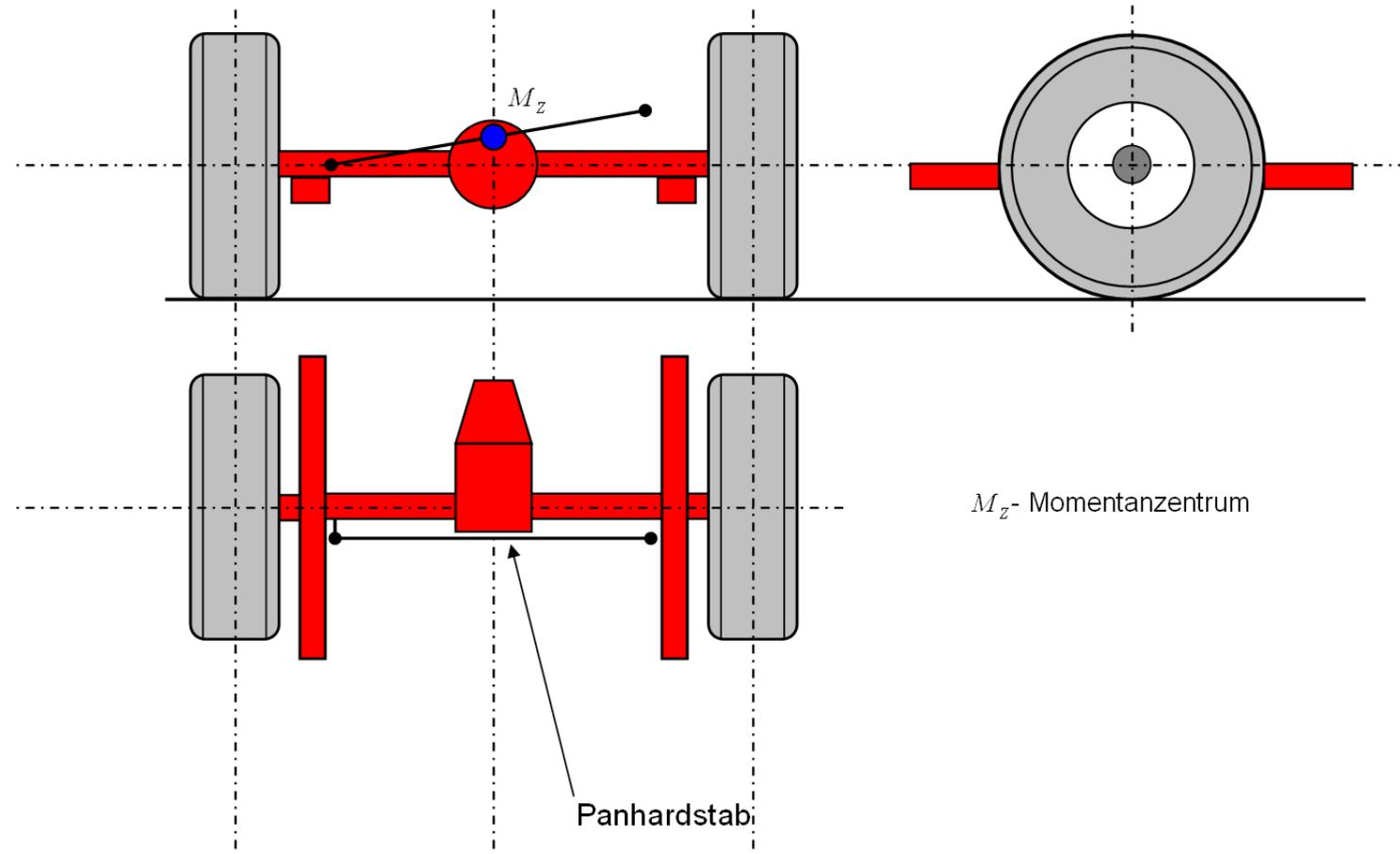
## Notiz - Eigenlenkverhalten Starrachse

Ähnlich wie an der Vorderachse kann auch an der Hinterachse ein sogenanntes Eigenlenkverhalten auftreten. Durch entsprechendes Auslegen der Achsführungen kann dieses Eigenlenken dazu beitragen das Kurvenverhalten eines Fahrzeugs zu beeinflussen. Geht das kurvenäußere, einfedernde Rad einer Einzelradaufhängung in Vorspur und das kurveninnere in Nachspur, um zum Beispiel das Übersteuern durch Antriebskräfte einer "leichten" Antriebsachse bei Standardbauweise abzubauen, so ist der gleiche Effekt dadurch erreicht, wenn sich die Starrachse um den Winkel  $+ \alpha s$  schräg stellt, also in die Kurven herein lenkt. Genau das Gegenteil versucht man bei Frontrieblern zu erreichen, um hier das Untersteuern günstig zu beeinflussen, wäre eine Schrägstellung um den Winkel  $- \alpha s$  anzustreben, also ein Herauslenken der Hinterachse aus der Kurve. Um bei dem Beispiel eines Frontrieblers zu bleiben, sei noch erwähnt, dass bei zunehmender Beladung, wodurch das doch stark lastabhängige Untersteuern durch die höhere Hinterachslast sowieso geringer wird, es günstig wäre, wenn das Eigenlenken der Hinterachse auch abnehmen würde, um nicht bei beladenem Fahrzeug einen ausgeprägten Übersteurer zu haben.

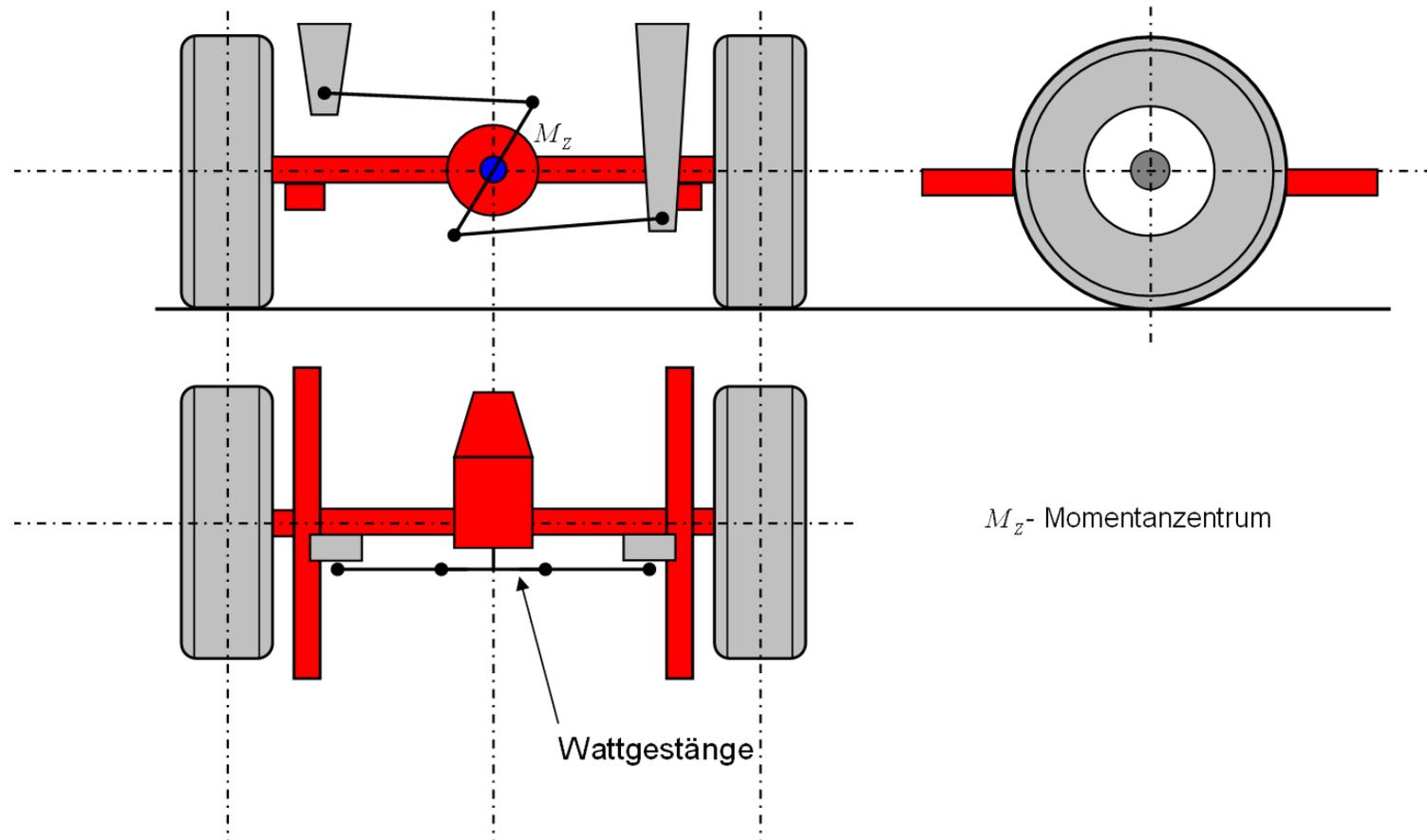
## Starrachse mit Blattfedern



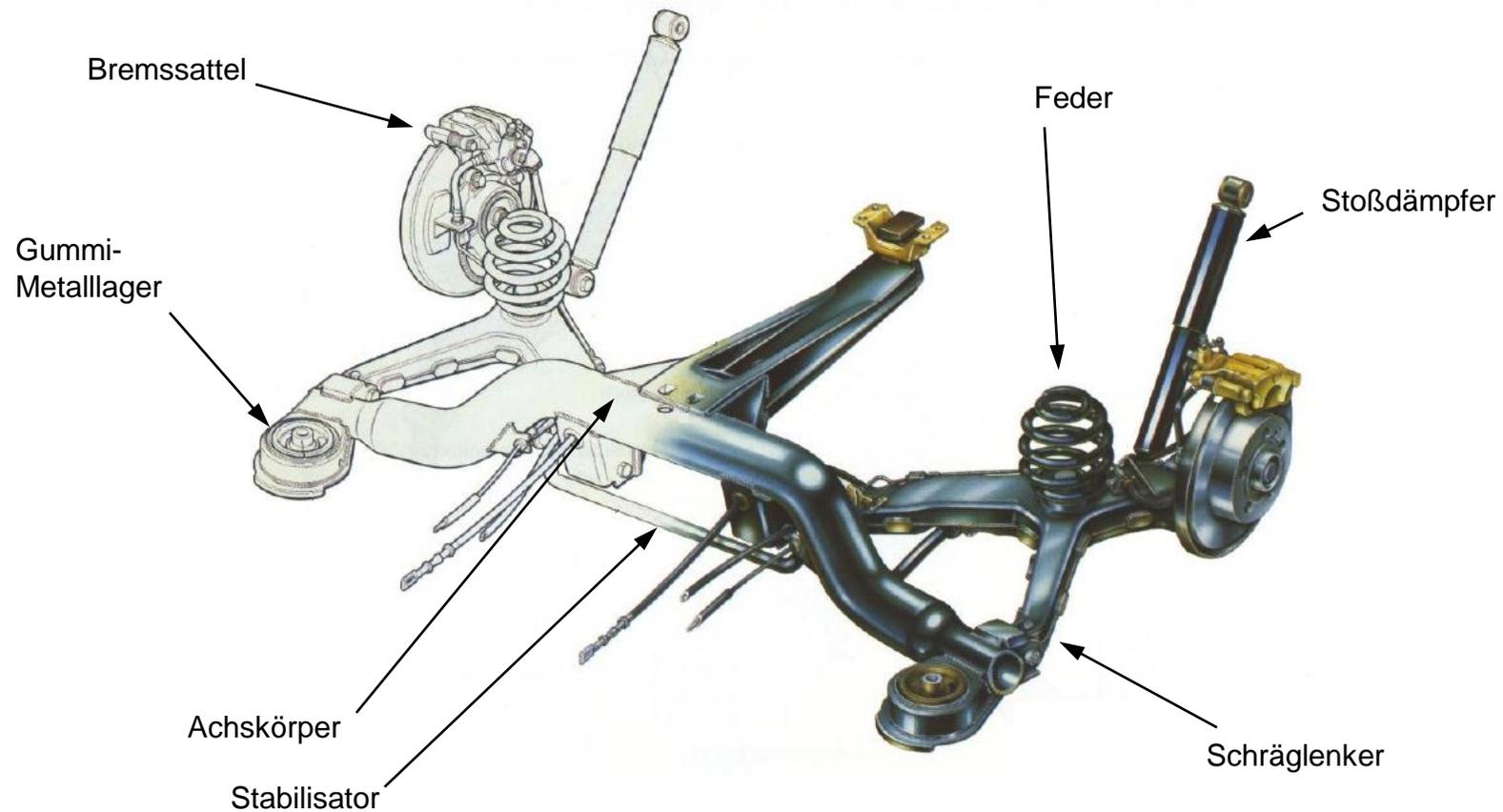
## Starrachse mit Panhardstab



## Starrachse mit Wattgestänge



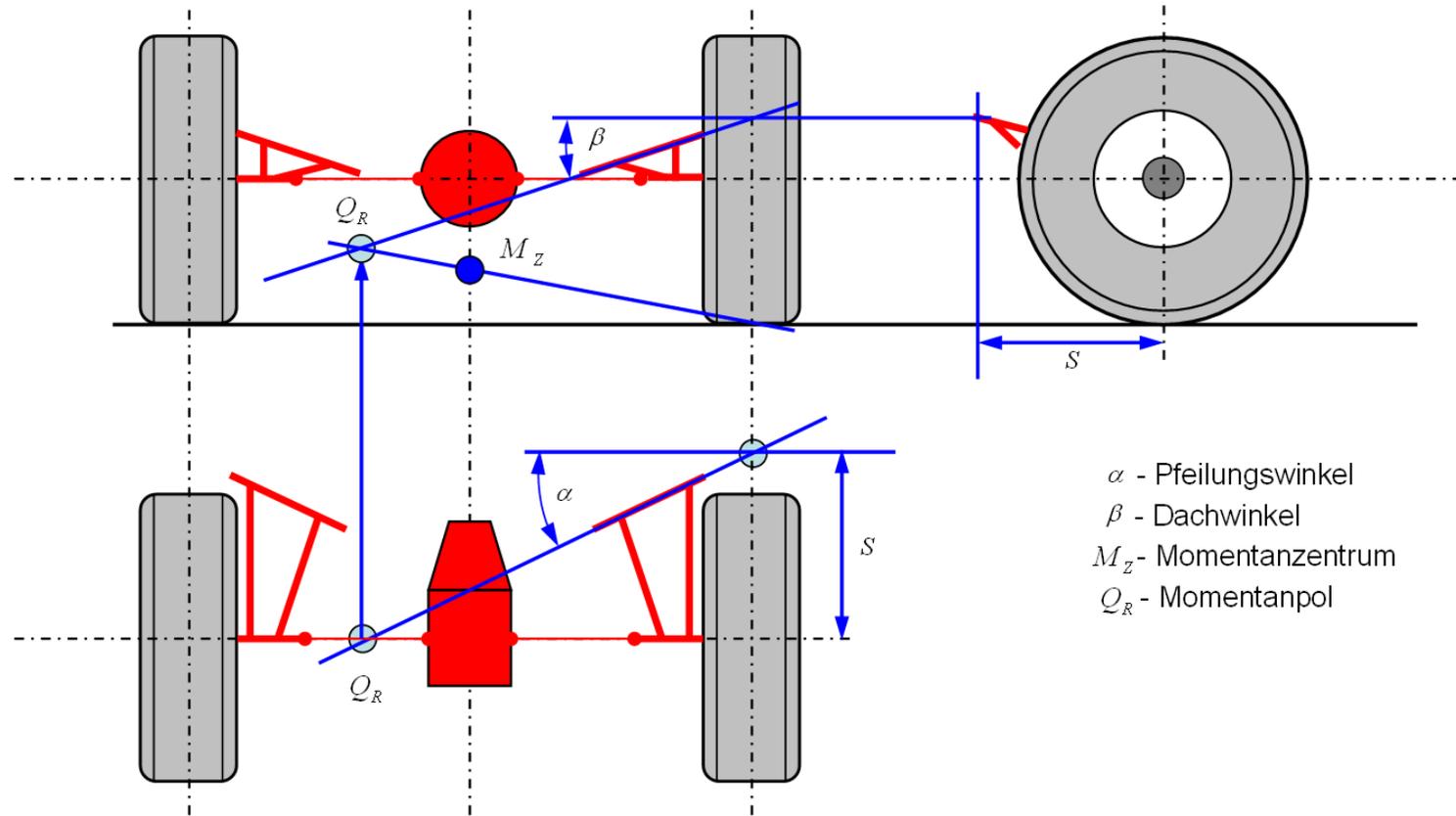
## Schräglenkerachse VW Sharan

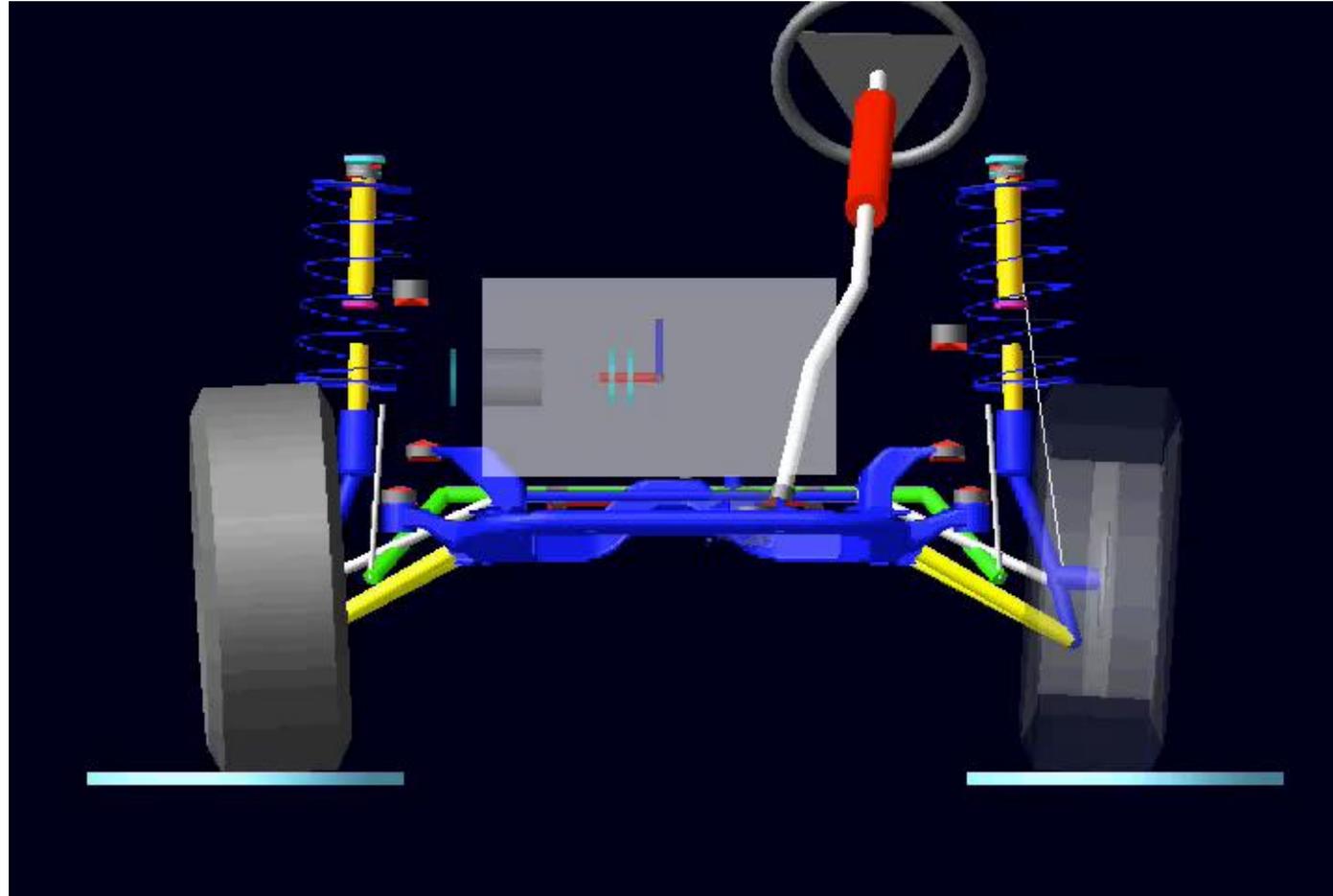


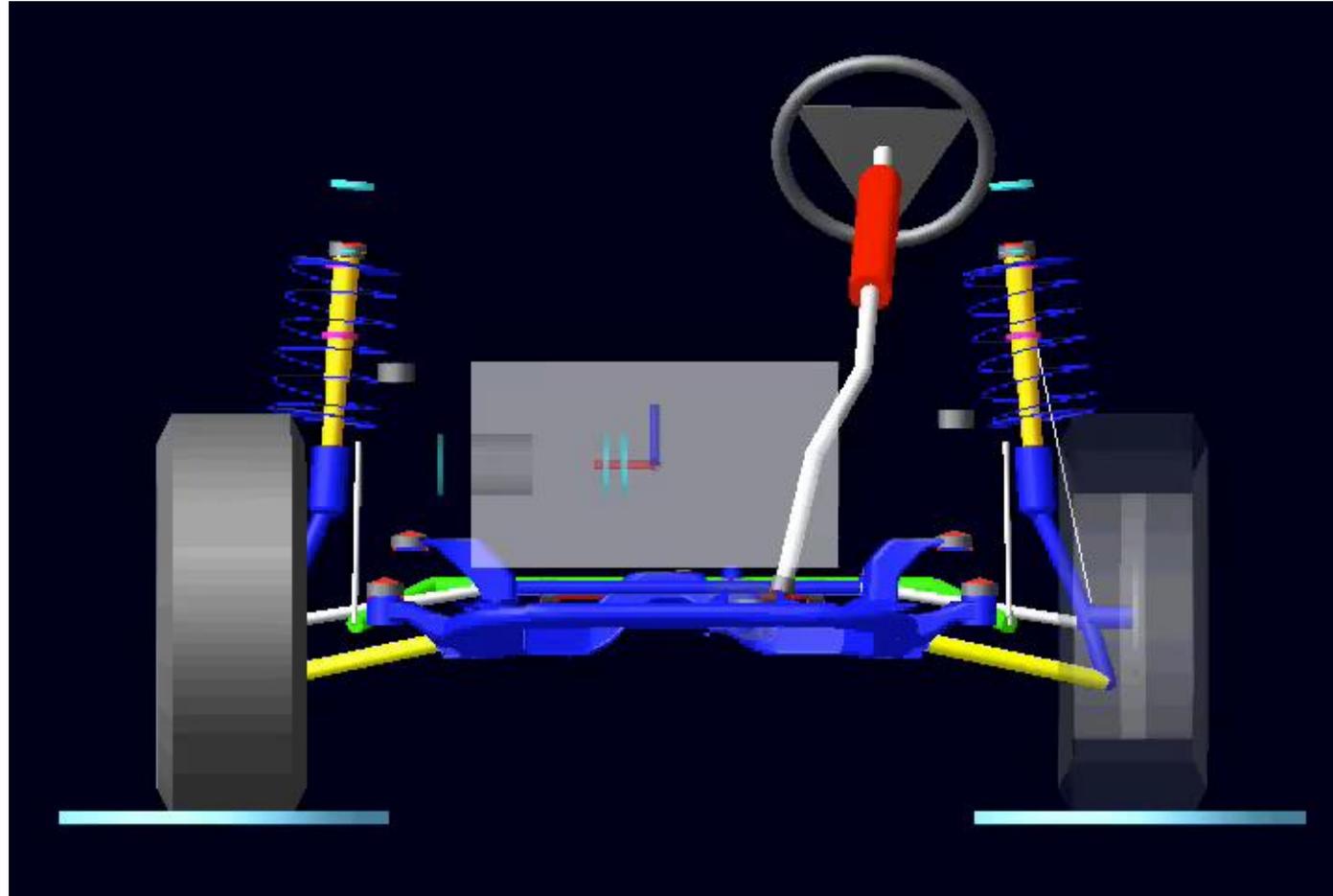
## Notiz – Schräglenkerachse

- Einzerradaufhängung
- Meist als angetriebene Achse
- Sturzkinematik beeinflussbar
- (hauptsächlich durch den Pfeilungswinkel  $10^\circ$  -  $25^\circ$ )
- Höhe des Wankpols beeinflussbar (wie Sturzkinematik)
- Lage des Nickpols (Bremsnicken) auslegbar
- Kleiner Raumbedarf

## Schräglenkerachse

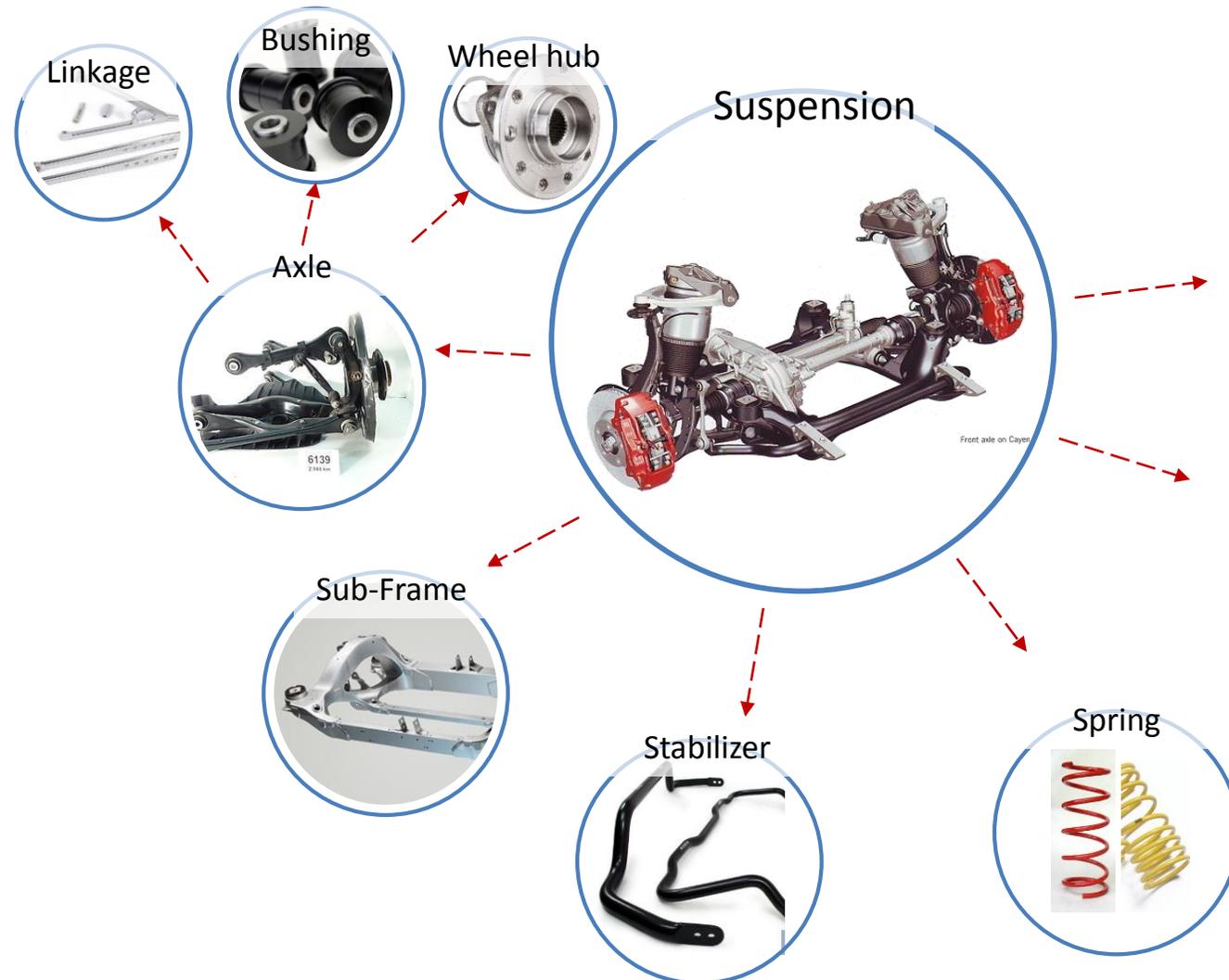






	Starr- achsen	Einzelradaufhängungen			Verbund- achsen
		eben	sphärisch	räumlich	
Kinematisches Auslegungspotenzial	–	0	+	++	0
Längsfederung	–	0	+	++	–
Kosten	+	0	–	--	+
Bauraum	--	0	0	+	–
Gewicht	–	0	+	+	0
Unempfindlichkeit (Achslast, Geländetauglichkeit, Toleranzen, ...)	++	0	–	–	0

# Zusammenfassung: Achskomponenten



Bitte beantworten Sie folgende Fragen und bereiten Sie sich vor die Ergebnisse kurz zu präsentieren:

1. Was hat einen Einfluß auf das Fahrzeugverhalten während eines ISO Spurwechsel ( „Elch Test“ ) ?
2. Welche Vor- und Nachteile hat ein weit oben liegendes Momentan Zentrum.
3. Warum ist ein Reifenschaden an der Hinterachse während der Fahrt gefährlicher als an der Vorderachse?

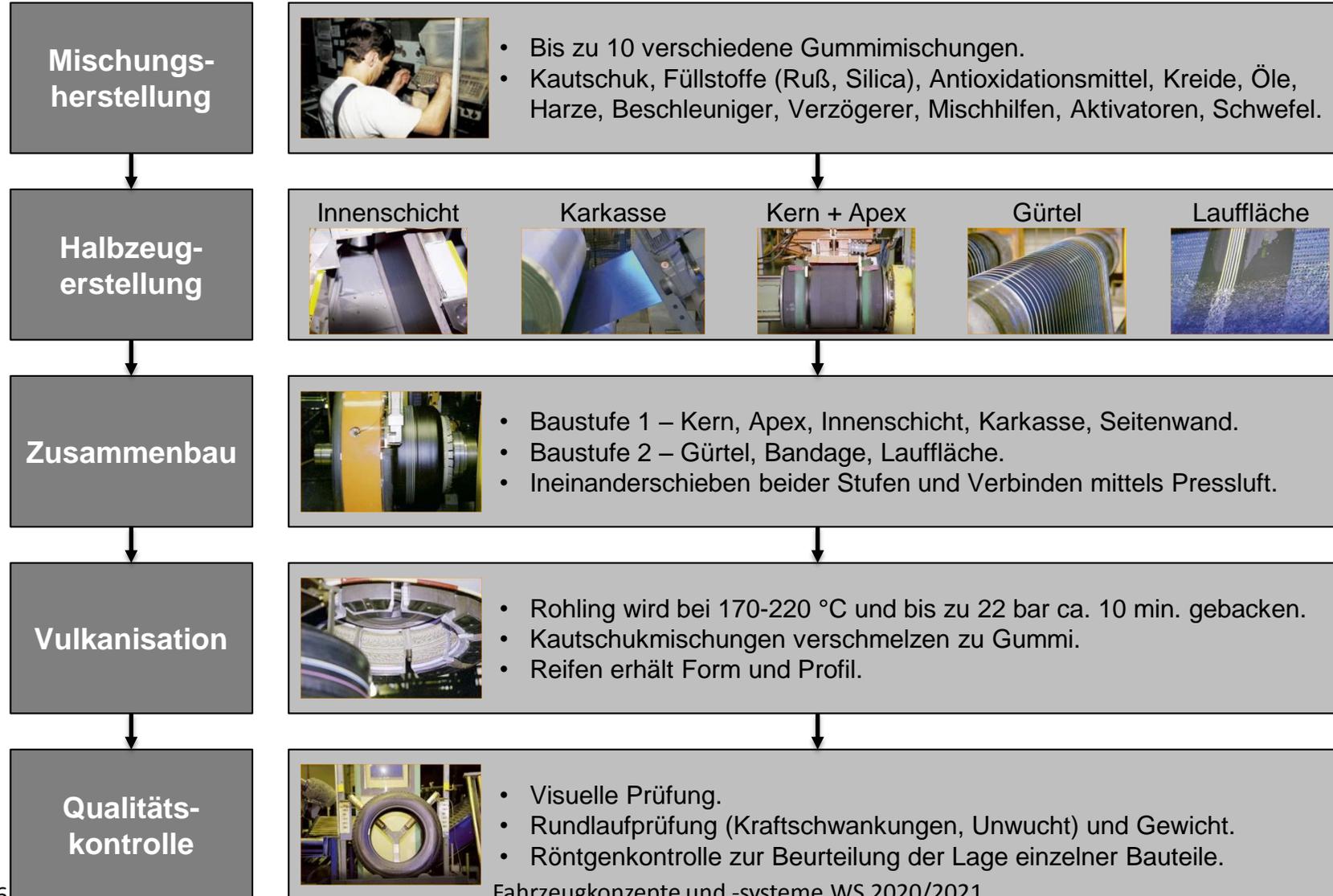
## Agenda

- Fahrwerksgrundlagen
- Reifen / Räder
  - Reifen Geschichte
  - Reifenbauarten
  - Felgenbauarten
  - Reifeneigenschaften
  - Reifenentwicklung
- Lenkung / Querdynamik
- Federung und Dämpfung
- Radaufhängung
- Achskonzepte
- Fahrwerk spüren



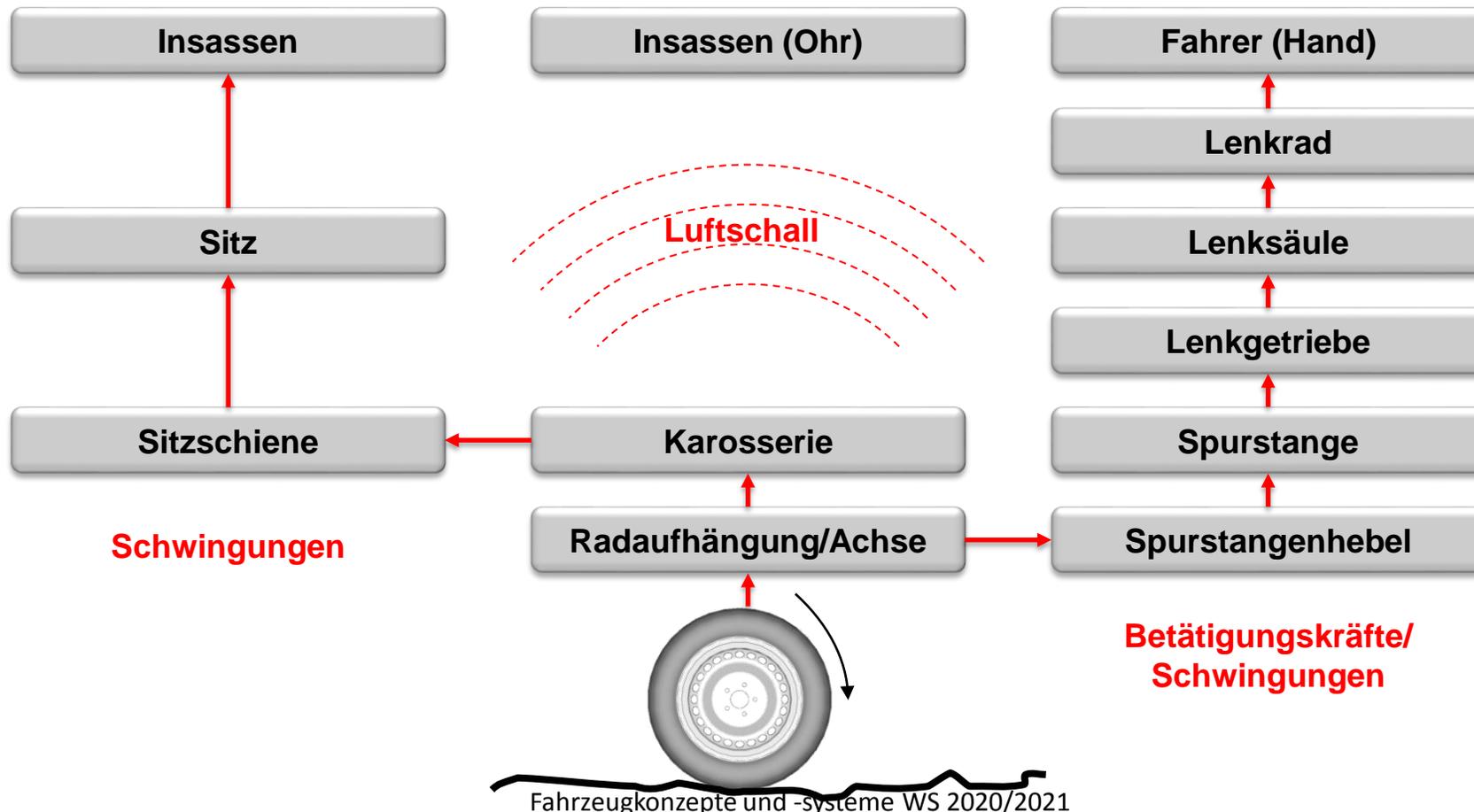


Reifenherstellung



## Reifen als Schnittstelle „Fahrzeug-Umwelt“

- Der Reifen ist **das einzige Bindeglied** zwischen dem Fahrzeug und der Fahrbahn.
- **Alle** Kräfte und Momente zwischen Fahrzeug und Fahrbahn werden vom Reifen übertragen.

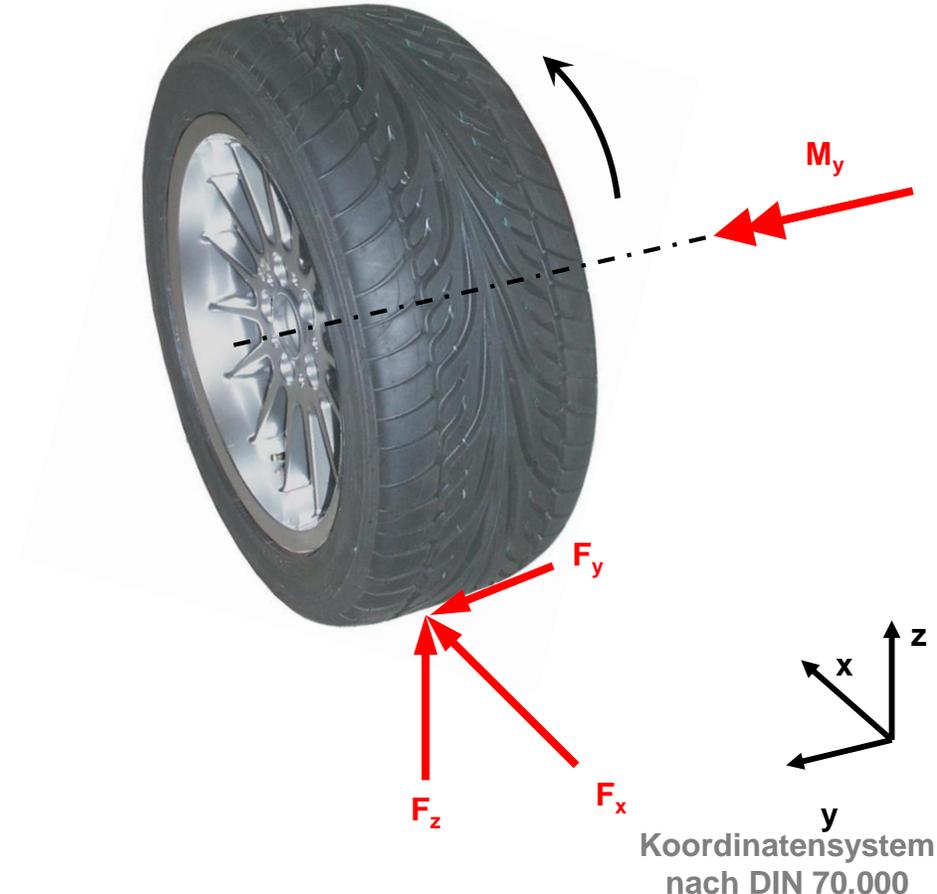


## Der Reifen als Schnittstelle „Fahrzeug- Umwelt“

Das Verhalten des Reifens lässt sich nach den drei Richtungen des Raumes unterteilen:

- Vertikaldynamik:
  - $F_z$  = Radlast
  - $M_z$  = Rückstellmoment
- Längsdynamik:
  - $F_x$  = Längskraft
  - $M_x$  = Sturzmoment
  - Auch als „longitudinal“ bezeichnet.
- Querdynamik:
  - $F_y$  = Seitenkraft
  - $M_y$  = Antriebs-/Bremsmoment
  - Auch als „lateral“ bezeichnet.

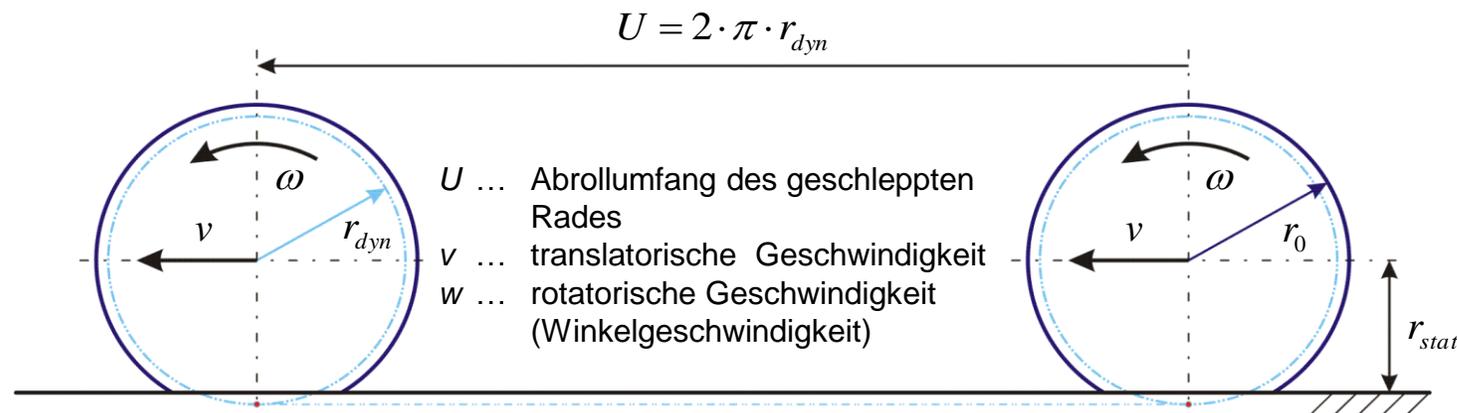
Das Gesamtverhalten wird von der wechselseitigen Abhängigkeit der Teildisziplinen bestimmt.



- Bei der Betrachtung von Kräften, Momenten und Geschwindigkeiten am Rad muss zwischen verschiedenen Radhalbmessern unterschieden werden:

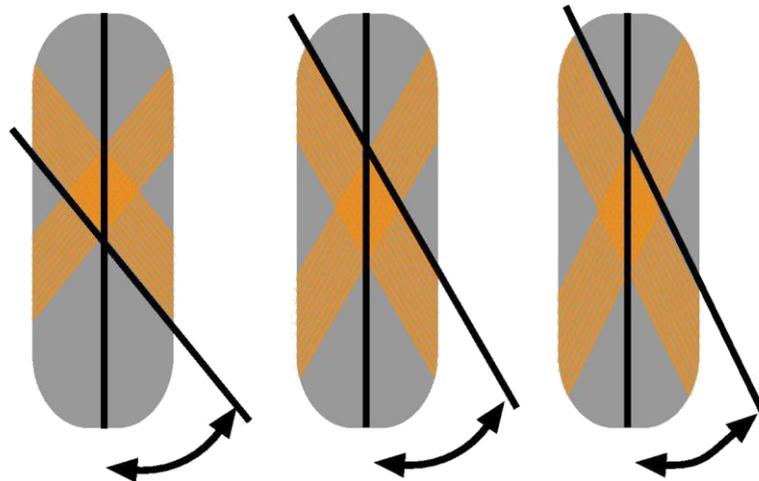
$r_0$	—	Radius des unbelasteten Rades (Fertigungshalbmesser).
$r_{stat}$	—	statischer Radhalbmesser (Wird bei Betrachtungen mit Kräften und Momenten verwendet).
$r_{dyn}$	—	dynamischer Rollradius (Wird bei Betrachtungen mit Umfangsgeschwindigkeiten verwendet).

- Der statische Radhalbmesser wird an einem ruhenden, belasteten Rad ermittelt.
- Der dynamische Rollradius wird nach der DIN 70020 mit einem geschleppten Rad bei einer Geschwindigkeit von 60 km/h, einem vorgegebenem Fülldruck und einer jeweils dem Fülldruck zugeordneten Belastung bestimmt.



## Diagonalreifen

- Cordfäden der einzelnen Karkasslagen werden unter einem spitzen Winkel zueinander verlegt.
- Vorteil – guter Komfort.
- Nachteile – schlechte Fahrstabilität, höherer Rollwiderstand.



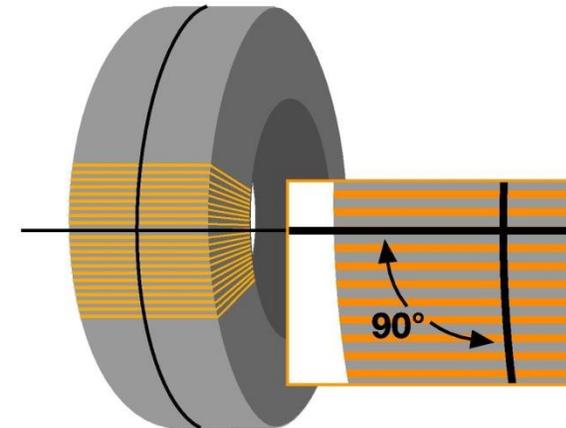
38° - 40°  
Standardreifen

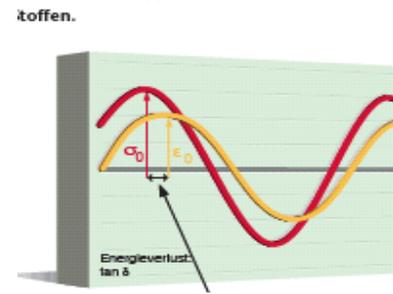
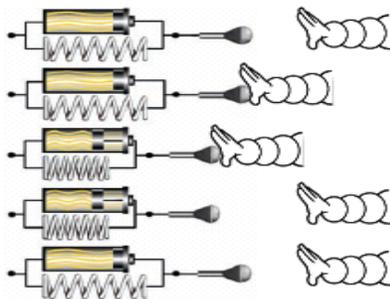
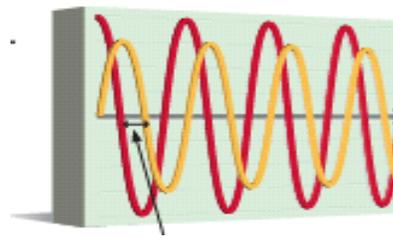
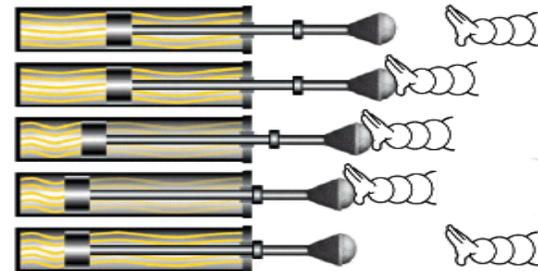
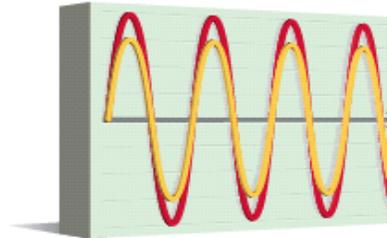
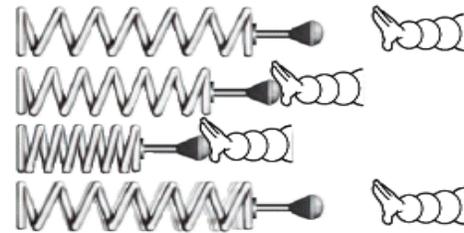
30° - 35°  
Hochgeschwindigkeitsreifen

26°  
Rennreifen

## Radialreifen

- Cordfäden der Karkasse werden unter einem Winkel von 90° zur Laufrichtung verlegt.
- Vorteile – hohe Fahrstabilität, geringer Rollwiderstand.
- Nachteil – schlechterer Komfort.





## Hysterese

Das viskoelastische Material kehrt nach einer Weile von einer Verformung in die Ausgangsposition zurück

## Vertikaldynamik – Radlast und Reifenlatsch

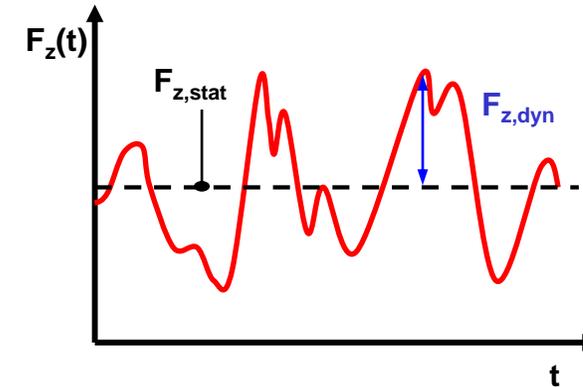
Die auf den Reifen wirkende Vertikalkraft (Radlast) setzt sich zusammen aus:

- **Statische Radlast**  $F_{z,stat}$  = konstant  
(Schwerkraftwirkung der Fahrzeugmasse).
- **Dynamische Radlast**  $F_{z,dyn} = f(t)$   
(Relativbewegung des Aufbaus bzgl. Fahrbahn).

Aufgrund der Elastizitäten des Gummis und der Luft im Reifen, kommt es zur vertikalen **Eindrückung**. Diese führt zur Ausbildung einer **Kontaktfläche A** zwischen Fahrbahn und Lauffläche – dem **Reifenlatsch**. Über diesen müssen sämtliche Umfangskräfte übertragen werden.

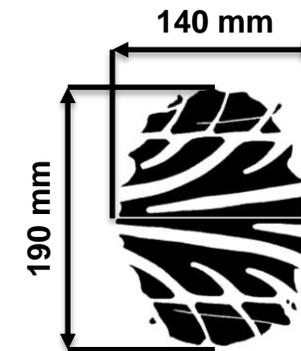
### Einflüsse auf die effektive Latschgröße:

- Radlast.
- Fülldruck.
- Reifenkonstruktion.
- Reifendimension.
- Profil.



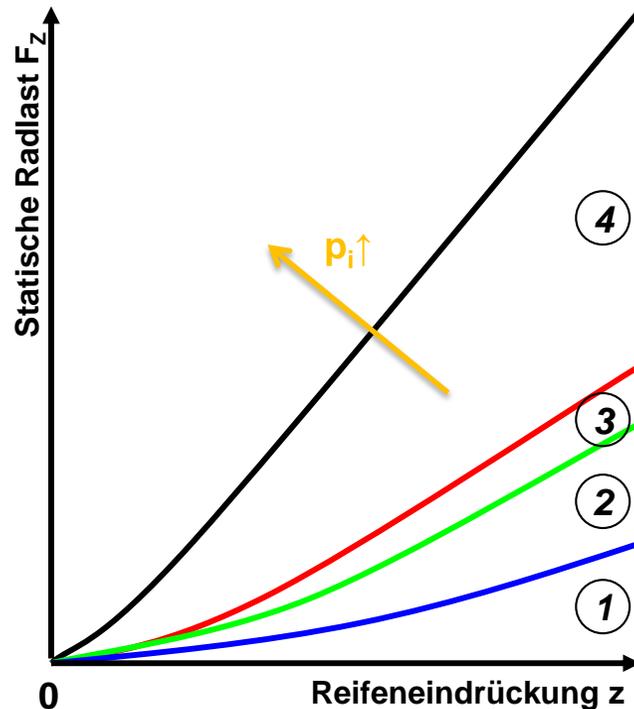
### Beispiel:

245/40 R18, 2,2 bar,  $F_z = 4.700 \text{ N}$



- Bruttolatschfläche  $\approx 230 \text{ cm}^2$
- Nettolatschfläche  $\approx 150 \text{ cm}^2$

## Vertikaldynamik – Vertikalsteifigkeit



Die Reaktionskraft des Reifens auf die Radlast setzen sich aus folgenden Anteilen zusammen:

- 1 - Tragkraft des luftleeren Reifens, entspricht der Tragkraft des Gummi-Gewebe-Körpers infolge seiner elastischen Formänderung.
- 2 - Rundhaltekraft der Pressluft – Versteifung der Reifenwandung infolge des Innendrucks.
- 3 - Kompressionsanteil der Pressluft.
- 4 - Tragkraftanteil der Pressluft.

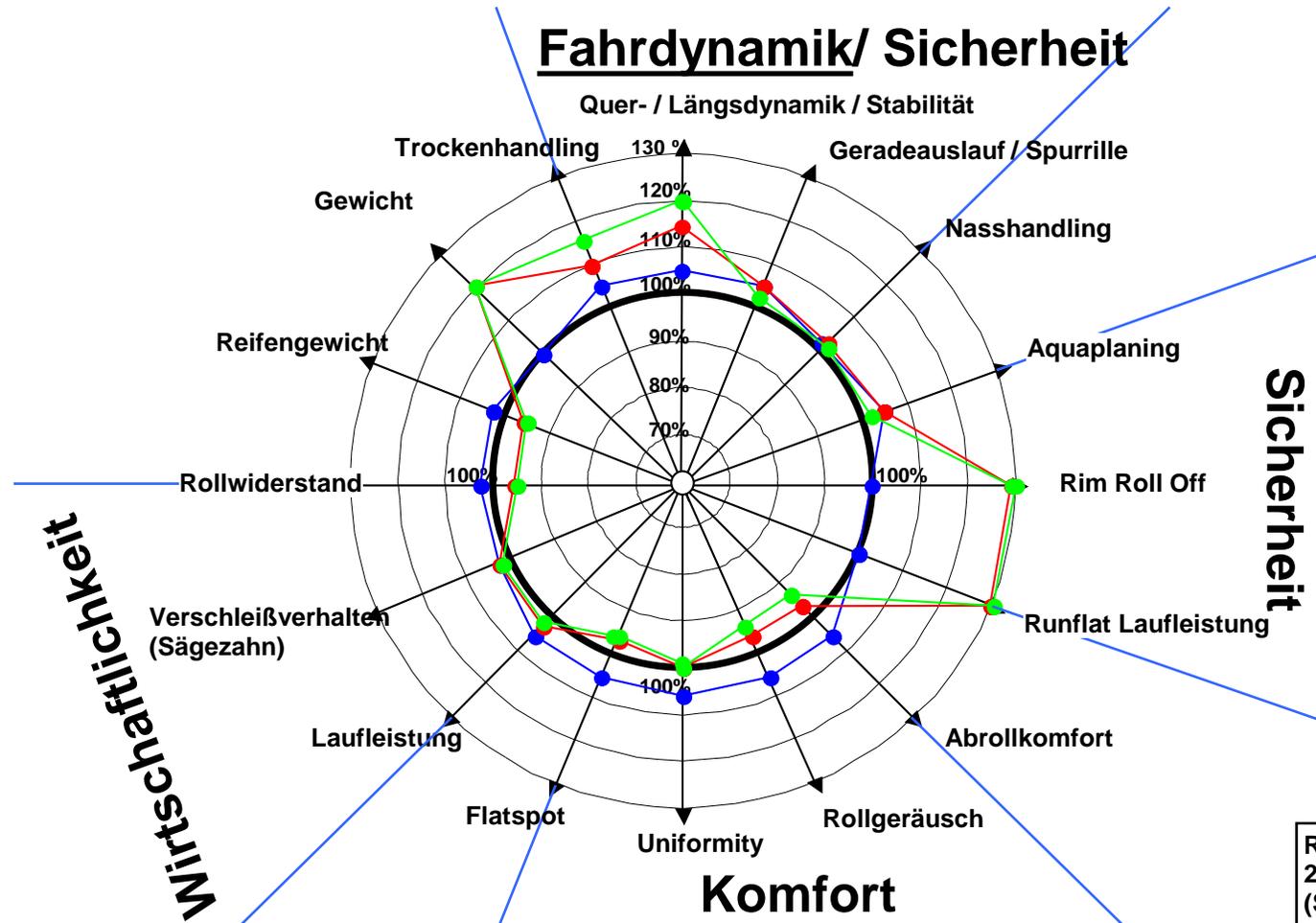
Der Reifen wirkt demnach wie eine Feder mit der Steifigkeit  $c_z$ :

$$\frac{dF_z}{dz} = c_z$$

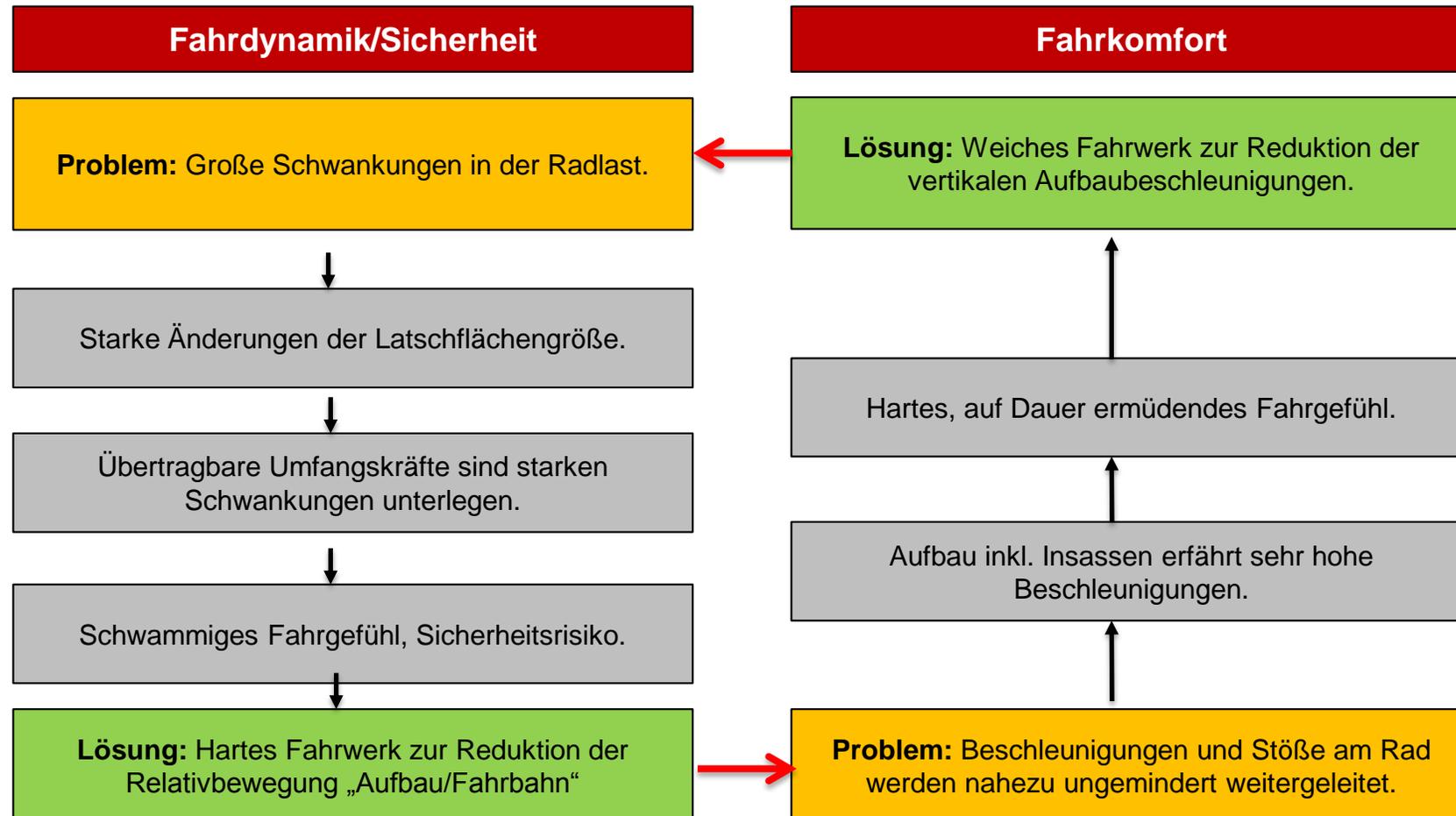
### Einflüsse auf die Vertikalsteifigkeit:

- Reifenbauart.
- Reifenkonstruktion.
- Fülldruck (je höher  $p_i$  desto höher  $c_z$ ).
- Vertikalsteifigkeit des Reifens.
- Näherungsweise linear.
- $c_z \approx 150...320 \text{ N/mm}$  (PKW-Reifen)

# Der Zielkonflikt in der Reifenabstimmung



## Vertikaldynamik – Der Reifen als Schwingungssystem



## Vertikaldynamik – Der Reifen als Schwingungssystem

Die Reifenfedersteifigkeit  $c_z$  bildet mit den **ungefederten Massen  $m_R$**  ein schwingungsfähiges Teilsystem am Fahrzeug. Zu den ungefederten Massen zählen neben der Radmasse alle Komponenten des Fahrwerks und des Antriebsstrangs, welche nicht über die Federn und Dämpfer des Fahrwerks am Rad abgestützt werden.

Eigenfrequenz  
der ungefederten Massen

$$\varpi_{0,R} = \sqrt{\frac{c_z}{m_R}} = f_{e,R} \cdot 2 \cdot \pi$$

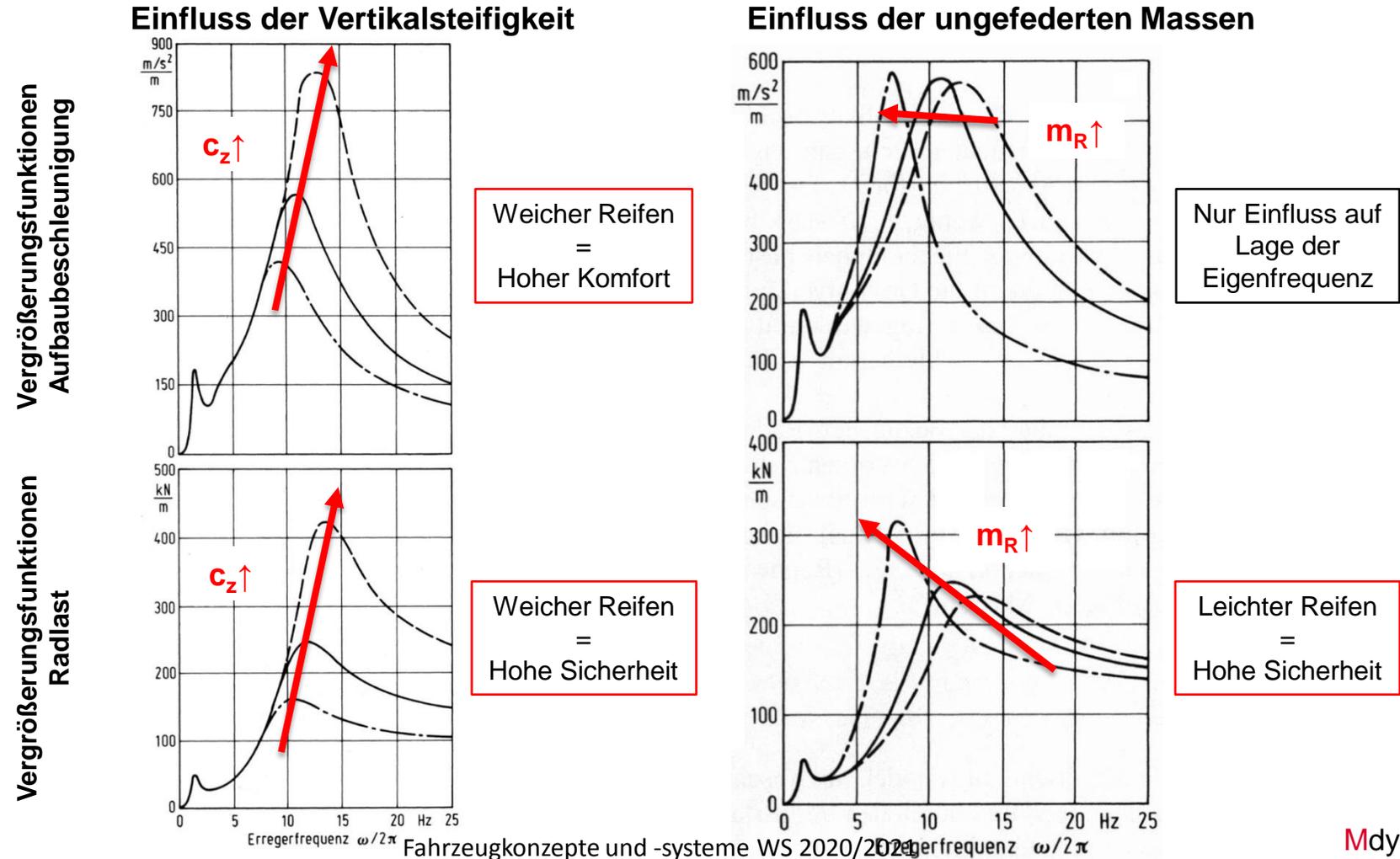
- $f_{e,R} = 8 \dots 15$  Hz.

Dämpfungsmaß  
der ungefederten Massen

$$D_R = \frac{k_R}{2 \cdot m_R \cdot \varpi_{0,R}}$$

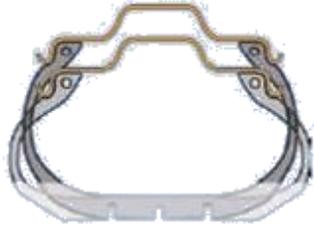
- Reine Werkstoffdämpfung.
- $D_R \approx 0,05$  (wird meist vernachlässigt).
- Dämpfungskonstante  $k_R$  ist abhängig von:
  - Reifenkonstruktion.
  - Rollgeschwindigkeit.
  - Anregungsfrequenz.

## Vertikaldynamik – Der Reifen als Schwingungssystem



## Längsdynamik – Rollwiderstand

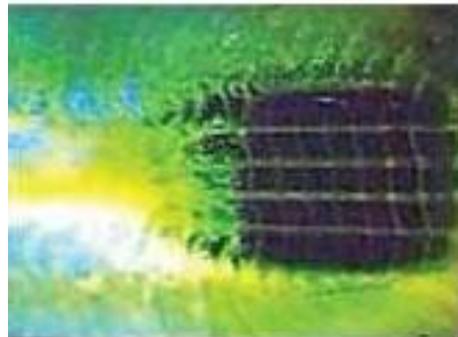
Der Rollwiderstand  $F_{R,roll}$  des Rades ist der Bewegungsrichtung entgegengesetzt und muss von der Antriebskraft  $F_x$  überwunden werden. Er setzt sich aus folgenden Bestandteilen zusammen.

Reifenoberfläche und Umgebungsluft	Lauffläche des Reifens		Seitenwand und Wulstbereich
<p>Luftverwirbelungen</p> 	<p>Schlupf auf Untergrund</p> 	<p>Durch wiederholte Verformung ausgelöster Energieverlust</p> <p>Biegung - Stauchung - Scherung</p> 	<p>Biegung - Scherung</p> 
<p>&lt; 15 %</p>	<p><b>60 bis 70 %</b></p>		<p>20 bis 30 %</p>

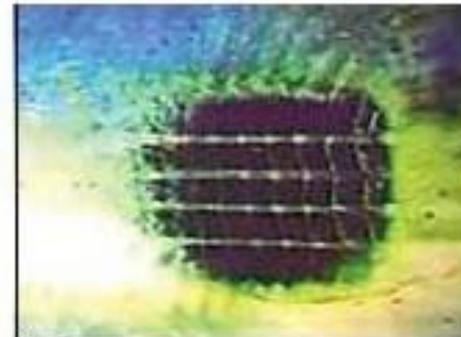
(Anteile am Gesamrollwiderstand)



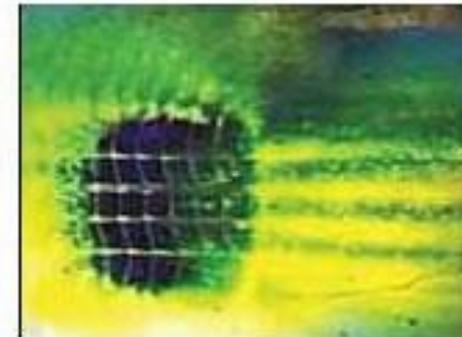
20MPH



40MPH

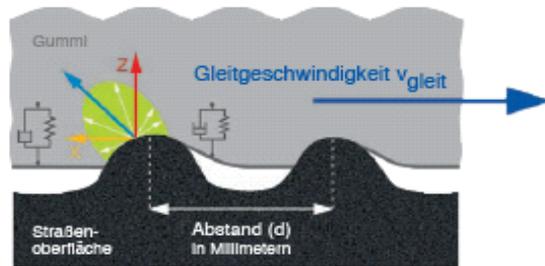


60MPH



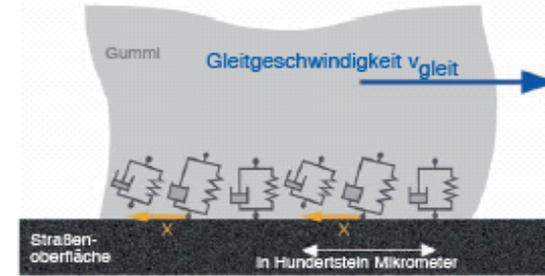
# Zwei Reifen Reibungsmechanismen.

## VERZÄHNUNGSEFFEKT

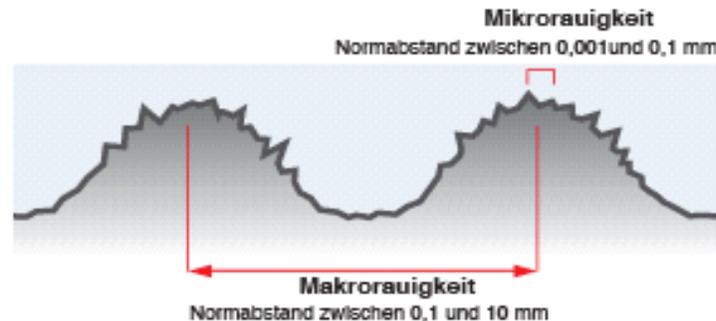


Stößt der Gummiblock gegen eine Erhebung und verformt sich, so kehrt er hysteresebedingt nach der Entlastung nicht sogleich in seine Ausgangslage zurück. Diese asymmetrische Verformung erzeugt ein Kraftfeld, dessen Tangentialkomponente X dem Durchrutschen entgegenwirkt.

## MOLEKULARE HAFTUNG



Die Molekülkette wird gedehnt: Aufgrund ihrer viskosen Eigenschaften, symbolisiert durch den Dämpferkolben, widerstehen die Moleküle zunächst der Verformung und erzeugen eine Reibungskraft X, die dem Durchrutschen entgegenwirkt.

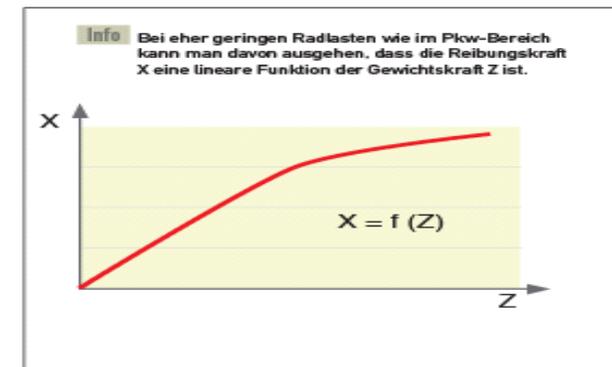
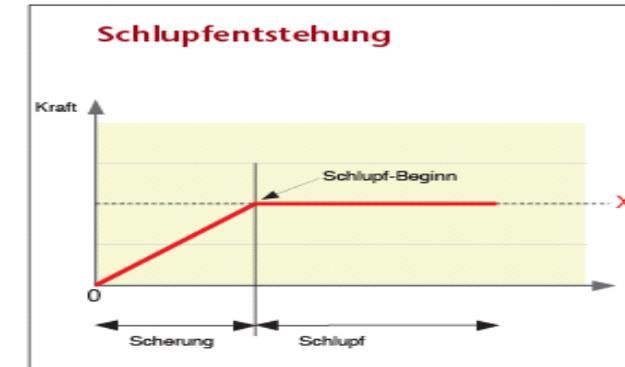
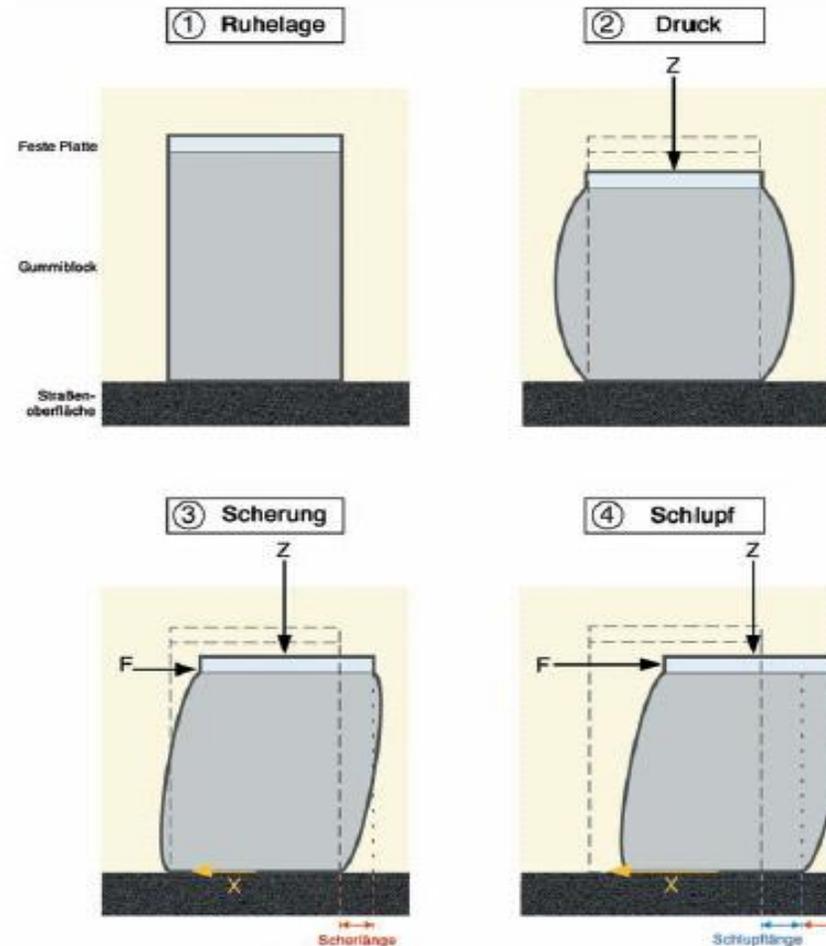


- **Makrorauigkeit.** Dieser Begriff wird gebraucht, wenn der Abstand zwischen zwei "großen" Erhebungen zwischen 100 Mikrometern und 10 Millimetern beträgt. Diese Größe unterstützt den Verzahnungseffekt sowie die Wasserabführung und -einlagerung. Über den Grad der Makrorauigkeit bestimmt das verwendete Asphaltgranulat.

# Reifenkonstruktion und -spezifikation

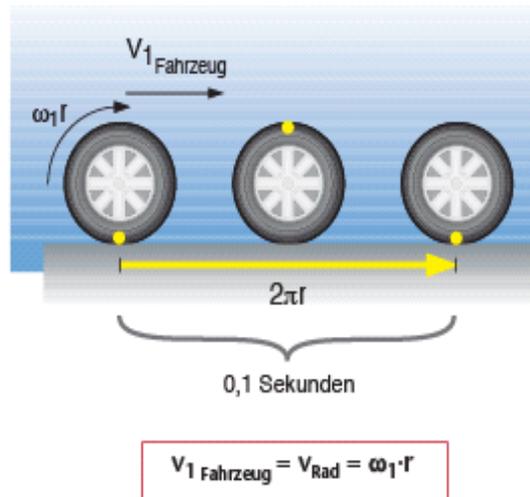


Die weiche Laufflächenmischung von Winterreifen ist auch bei niedrigen Temperaturen noch flexibel, so dass Winterreifen rutschfest bleiben und die Fahrbahn optimal belasten.



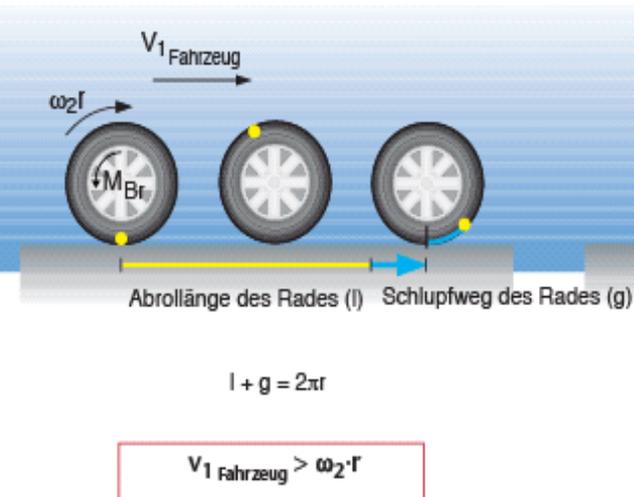
## 1 VOR BREMSBEGINN

Nehmen wir an, ein Rad lege eine Umdrehung ( $360^\circ$ ) innerhalb einer Zeit  $t = 0,1$  s bei einer Fahrgeschwindigkeit  $v = 70$  km/h zurück. Die in dieser Zeit vom rollenden Rad (und gleichzeitig vom Fahrzeug) zurückgelegte Strecke entspricht genau einer abgewickelten Radlänge oder, mathematisch ausgedrückt,  $2 \cdot \pi \cdot r$ .

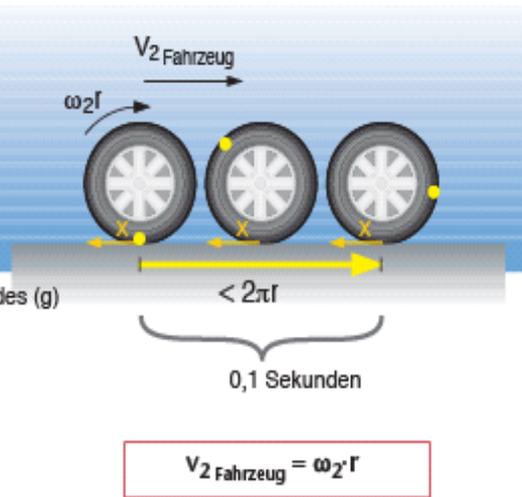


## 2 WÄHREND DES BREMSVORGANGS

Sobald der Fahrer das Bremspedal niedertritt, fällt die Radumfangsgeschwindigkeit ( $\omega \cdot r$ ) unter den Betrag der Fahrgeschwindigkeit. Von diesem Moment an, wenn das Fahrzeug eine Strecke entsprechend  $2 \cdot \pi \cdot r$  zurücklegt, vollführt das Rad keine vollständige Umdrehung mehr. Um der Vorwärtsbewegung des Fahrzeugs folgen zu können,



rollt das Rad unter **Schlupf** ab. Dieser Radschlupf aktiviert die bekannten Haftungsmechanismen wie molekulare Haftung und Verzahnung. Die Reaktionskraft  $X$  wirkt dem Schlupf entgegen und das Fahrzeug verlangsamt sich:  $v_{\text{Fahrzeug}}$  nimmt bis auf  $\omega \cdot r$  ab. In besagten  $0,1$  s legt das Rad nun eine Strecke von weniger als  $2 \cdot \pi \cdot r$  zurück.



### Definitionen:

- $\omega$  = Winkelgeschwindigkeit des Rades, in 1/s
- $r$  = Radradius, in m
- $\omega \cdot r$  = Radumfangsgeschwindigkeit, in m/s
- $M_{Br}$  = Bremsmoment, in Nm

Wenn der Fahrer den Druck auf das Bremspedal beendet, nimmt die Fahrgeschwindigkeit den Wert von  $\omega \cdot r$  an: Der Schlupf nimmt ab.

## Längsdynamik – Schlupf

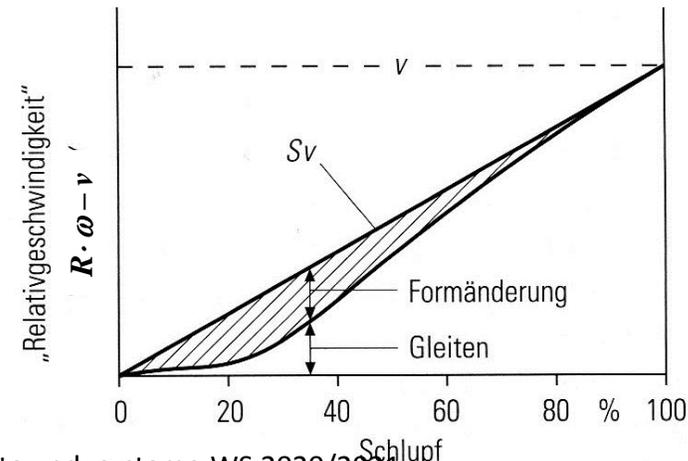
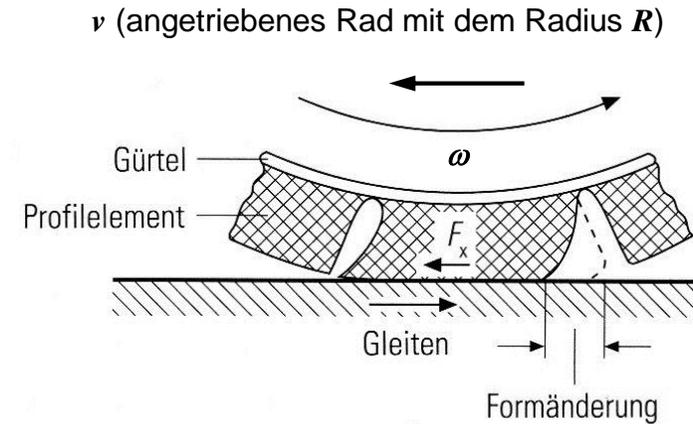
- Die Umfangskraft  $F_x$  bewirkt eine Schubverformung des Reifenprofils.
- Beim Übertragen dieser Umfangskraft zwischen Reifen und Fahrbahn tritt Schlupf ( $S$  oder  $\kappa$ ).
- Der Gesamtschlupf setzt sich aus einem Deformationsanteil (Formänderungsschlupf) und einem Gleitanteil (Gleitschlupf) zusammen.

$$S = \frac{v_u - v}{v_u} \cdot 100\%$$

$S$  ... Schlupf  
 $v_u$  ... Umfangsgeschwindigkeit ( $R \times \omega$ )  
 $v$  ... Fahrgeschwindigkeit

Antriebsschlupf: 
$$S_A = \frac{v_u - v}{v_u} \cdot 100\%$$

Bremsschlupf: 
$$S_B = \frac{v - v_u}{v} \cdot 100\%$$

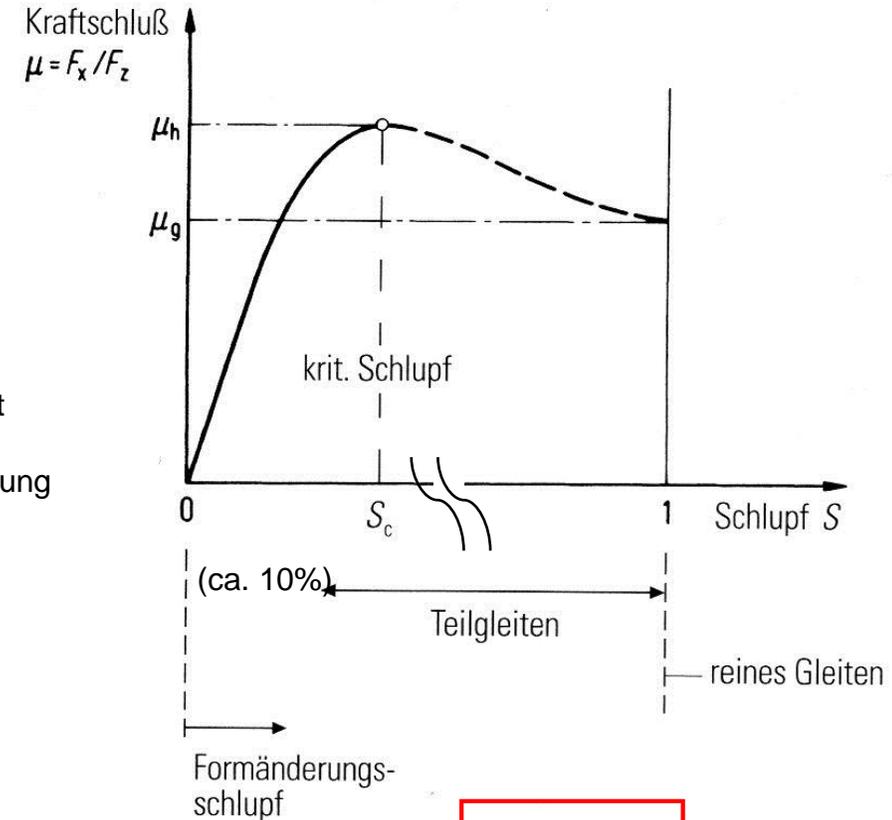


- Die übertragbare Umfangskraft wird durch den Kraftschlussbeiwert  $\mu$  bestimmt.
- Der Kraftschluss  $\mu$  ist bei der Gummireibung eine Funktion des Schlupfes.

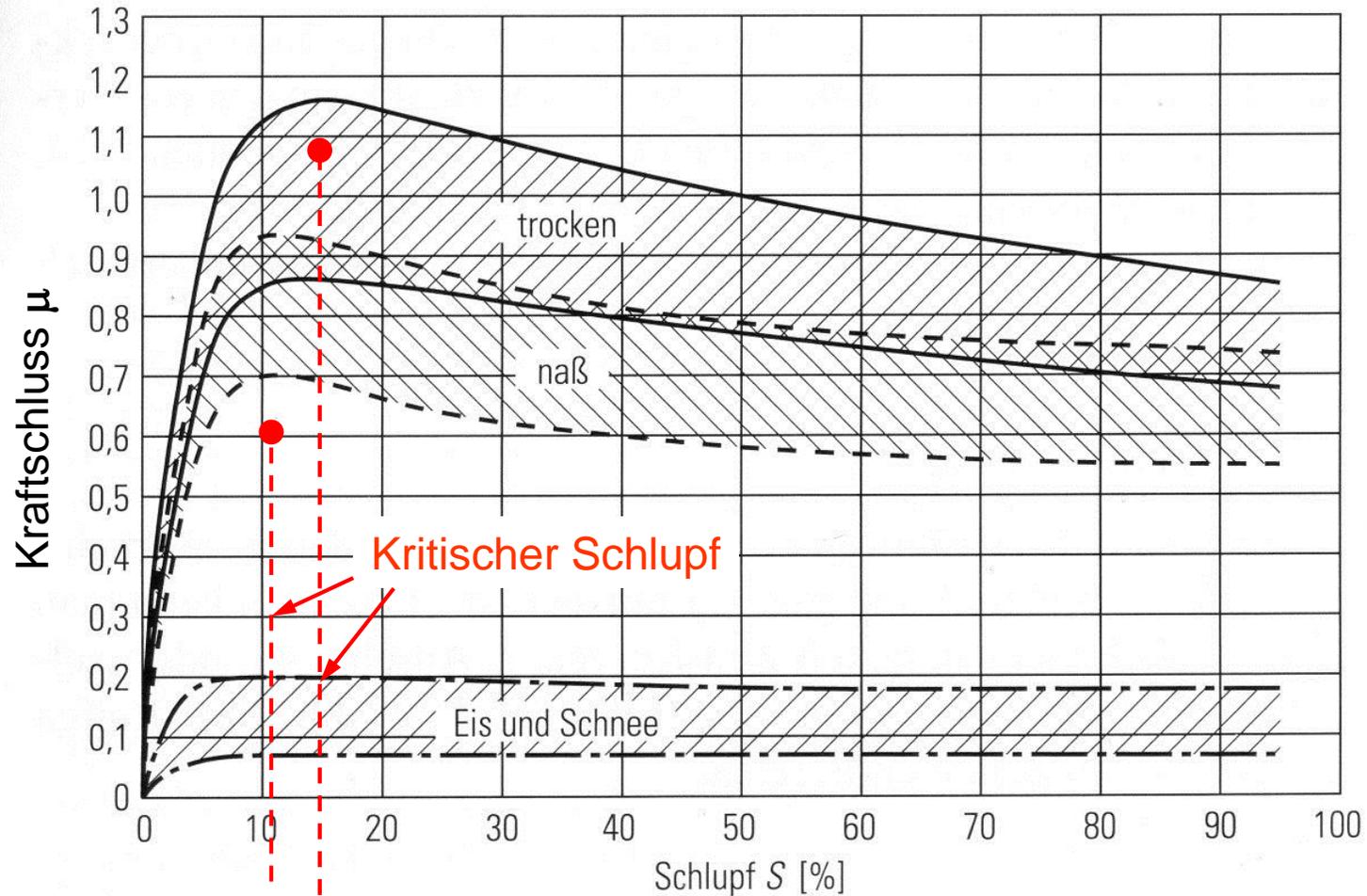
$$\mu = \frac{F_x}{F_z}$$

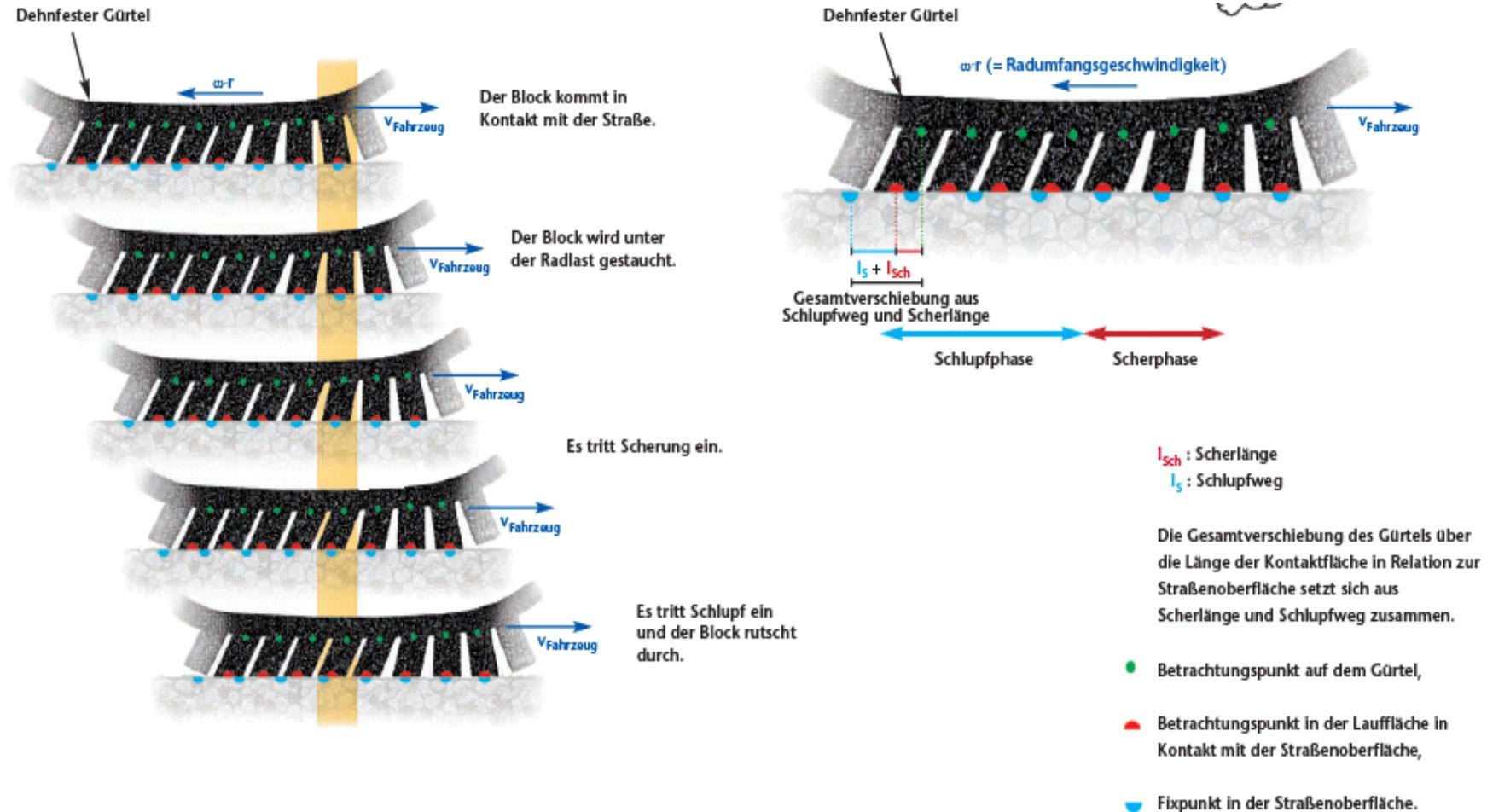
$\mu$  ... Kraftschluss bzw. Kraftschlussbeiwert  
 $F_x$  ... Umfangskraft in Fahrzeuginnenrichtung  
 $F_z$  ... Radaufstandskraft

- $\mu_h$  markiert den höchsten Kraftschluss, der als Haftbeiwert bezeichnet wird.
- Der dazugehörige Schlupf wird „kritischer Schlupf“  $S_c$  genannt und beträgt ca. 10%.
- Bei 100% Schlupf reduziert sich der Kraftschluss auf den Gleitbeiwert  $\mu_g$ .

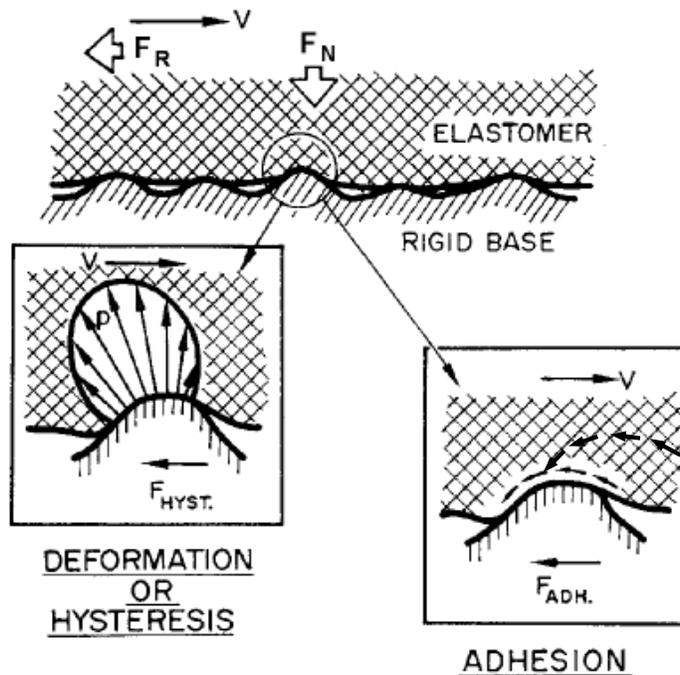


$$\mu_h > \mu_g$$





## Theorie der Gummireibung



- **Hysterese:** Dämpfungsverlust beim Abrollen (unsymmetrische Druckverteilung).
- **Adhäsion:** Schubspannung in der Kontaktfläche (Einflussfaktor: Oberflächenbeschaffenheit)

- Der Reibungsmechanismus beruht auf Effekten im Bereich der Moleküle.
- Parameter: Gummimaterial, Fahrbahn, Temperatur

$$F_R = F_{ADH} + F_{HYST}$$

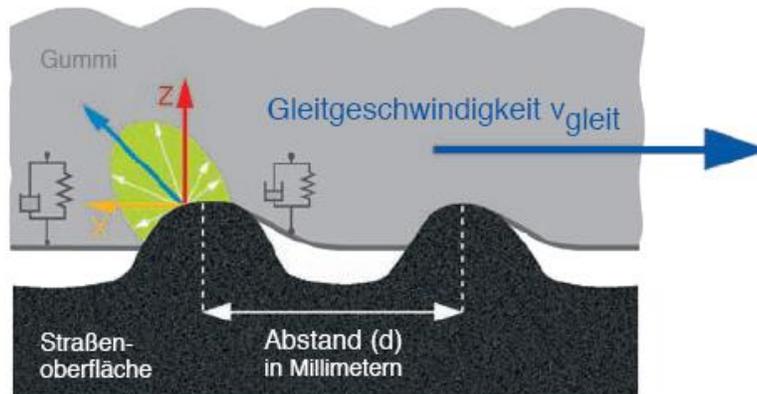
$$F_R = (\mu_{ADH} + \mu_{HYST}) \cdot F_N$$

$$\mu = \frac{F_R}{F_N} \quad 0 \leq \mu \leq \mu_h$$

- $F_N$  ... Normalkraft
- $F_R$  ... Reibkraft
- $F_{ADH}$  ... Adhäsionsreibungskraft
- $F_{HYST}$  ... Hysteresereibkraft bzw. Deformationsreibungskraft
- $\mu$  ... Kraftschlussbeiwert
- $\mu_h$  ... Haftreibungszahl

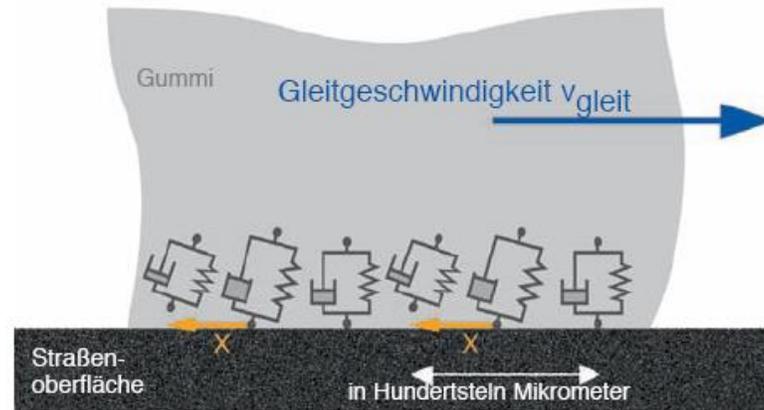
## Theorie der Gummireibung

### VERZÄHNUNGSEFFEKT



Stößt der Gummiblock gegen eine Erhebung und verformt sich, so kehrt er hysteresebedingt nach der Entlastung nicht sogleich in seine Ausgangslage zurück. Diese asymmetrische Verformung erzeugt ein Kraftfeld, dessen Tangentialkomponente  $X$  dem Durchrutschen entgegenwirkt.

### MOLEKULARE HAFTUNG

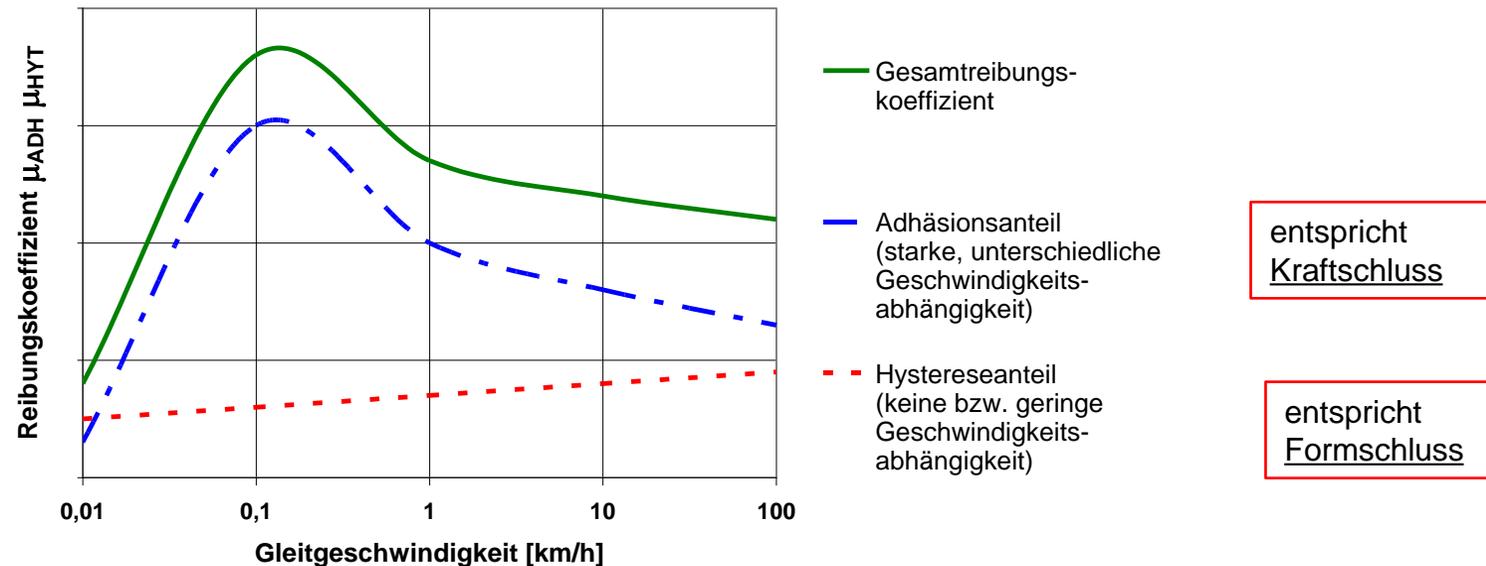


Die Molekülkette wird gedehnt: Aufgrund ihrer viskosen Eigenschaften, symbolisiert durch die Feder-/Dämpferelemente, widerstehen die Moleküle zunächst der Verformung und erzeugen eine Reibungskraft  $X$ , die dem Durchrutschen entgegenwirkt.

## Theorie der Gummireibung

- Die Ursache des Hystereseanteils bildet die Energiedissipation aufgrund der Deformationen des Elastomers (Wirkung analog hydraulischer Dämpferwirkung).
- Der Adhäsionsanteil resultiert aus der Bildung und dem Wiederaufbrechen von adhäsiven Verbindungen zwischen dem Elastomer und dem festen Untergrund.
- Für die Stärke der Adhäsionsreibung ist die Größe der Kontaktfläche von Bedeutung.
- Adhäsion- und Hystereseanteil sind last-, geschwindigkeits- und temperaturabhängig.
- Belastung bestimmt.

### Adhäsions- und Hystereseanteile am Reibungskoeffizienten der Gummireibung



## Längsdynamik – Schlupf

- Die Umfangskraft  $F_x$  bewirkt eine Schubverformung des Reifenprofils.
- Beim Übertragen dieser Umfangskraft zwischen Reifen und Fahrbahn tritt Schlupf auf ( $S$  oder  $\kappa$ ).
- Der Gesamtschlupf setzt sich aus einem Deformationsanteil (Formänderungsschlupf) und einem Gleitanteil (Gleitschlupf) zusammen.

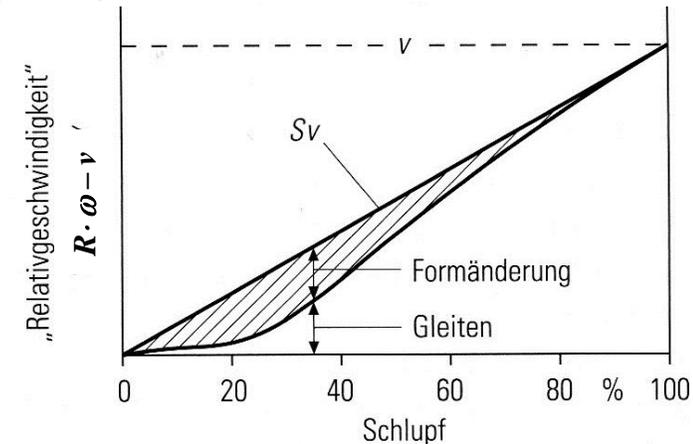
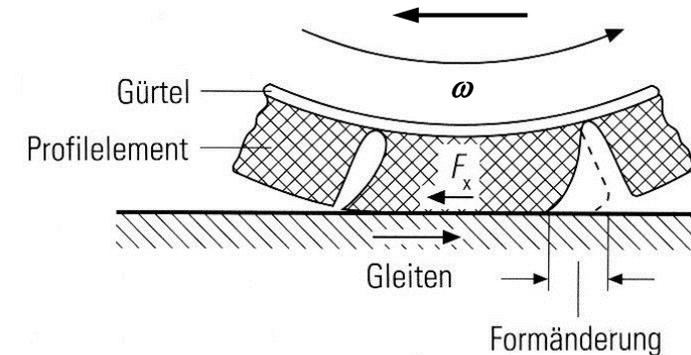
$$S = \frac{v_u - v}{v_u} \cdot 100\%$$

$S$  ... Schlupf  
 $v_u$  ... Umfangsgeschwindigkeit ( $R \times \omega$ )  
 $v$  ... Fahrgeschwindigkeit

Antriebsschlupf: 
$$S_A = \frac{v_u - v}{v_u} \cdot 100\%$$

Bremsschlupf: 
$$S_B = \frac{v - v_u}{v} \cdot 100\%$$

$v$  (angetriebenes Rad mit dem Radius  $R$ )



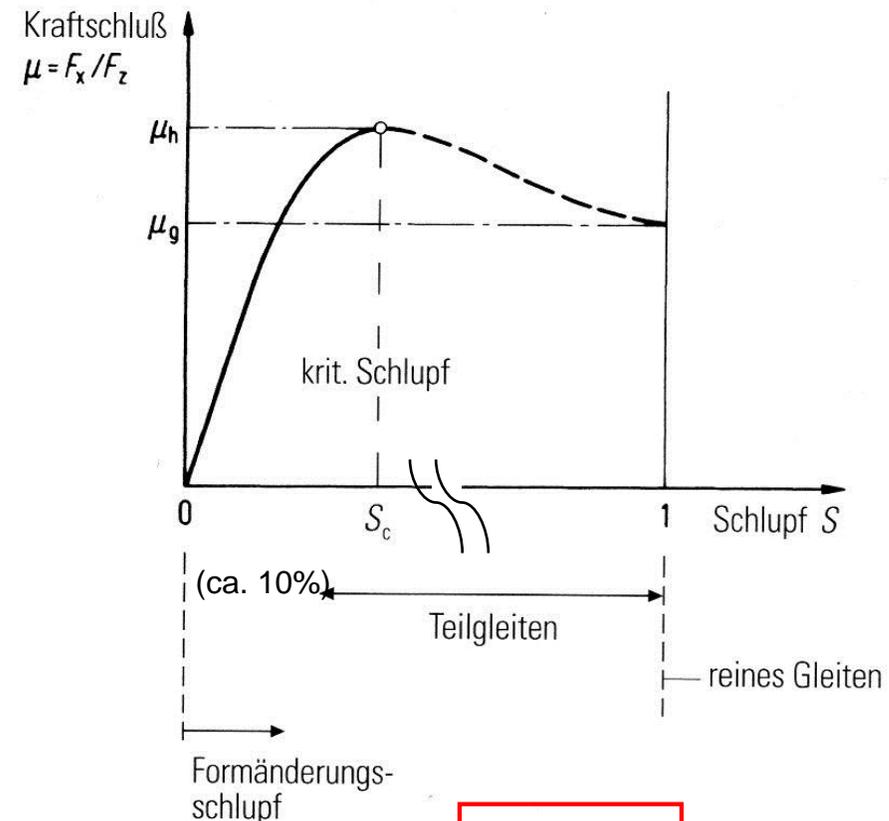
## Längsdynamik – Kraftschluss

- Die übertragbare Umfangskraft wird durch den Kraftschlussbeiwert  $\mu$  bestimmt.
- Der Kraftschluss  $\mu$  ist bei der Gummireibung eine Funktion des Schlupfes.

$$\mu = \frac{F_x}{F_z}$$

$\mu$  ... Kraftschluss bzw. Kraftschlussbeiwert  
 $F_x$  ... Umfangskraft in Fahrzeuginnenrichtung  
 $F_z$  ... Radaufstandskraft

- $\mu_h$  markiert den höchsten Kraftschluss, der als Haftbeiwert bezeichnet wird.
- Der dazugehörige Schlupf wird „kritischer Schlupf“  $S_c$  genannt und beträgt ca. 10%.
- Bei 100% Schlupf reduziert sich der Kraftschluss auf den Gleitbeiwert  $\mu_g$ .

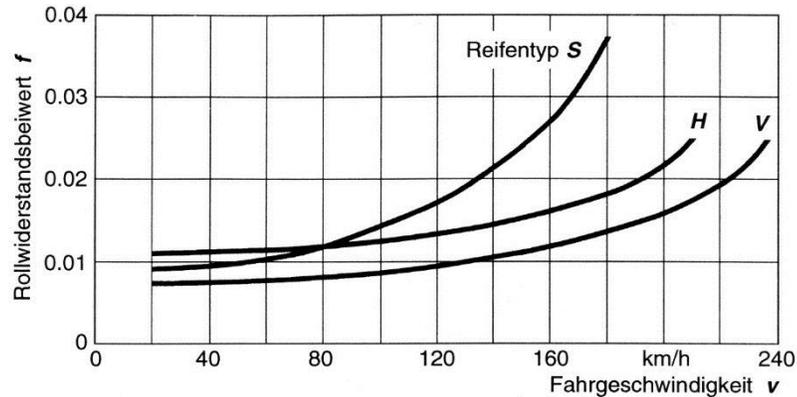


$$\mu_h > \mu_g$$

## Längsdynamik – Rollwiderstand

**Berechnung des Rollwiderstands:**  
(Rollwiderstandsbeiwert  $f_R$ )

$$f_R = f_{R0} + f_{R1} \cdot \left( \frac{v}{100 \text{ km/h}} \right) + f_{R4} \cdot \left( \frac{v}{100 \text{ km/h}} \right)^4$$

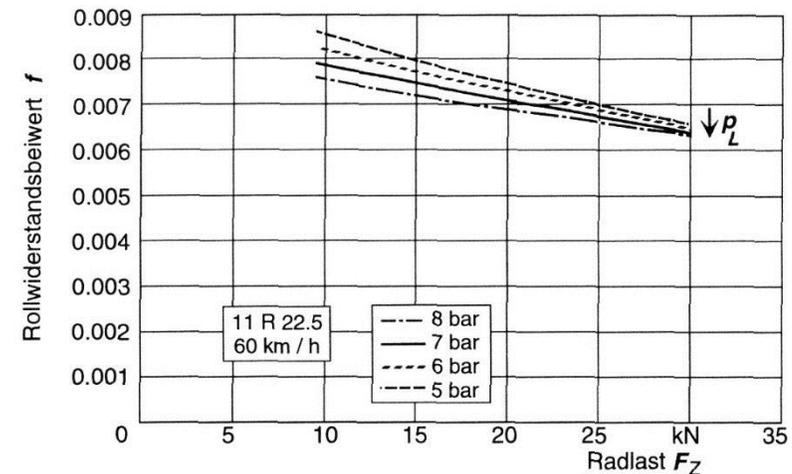


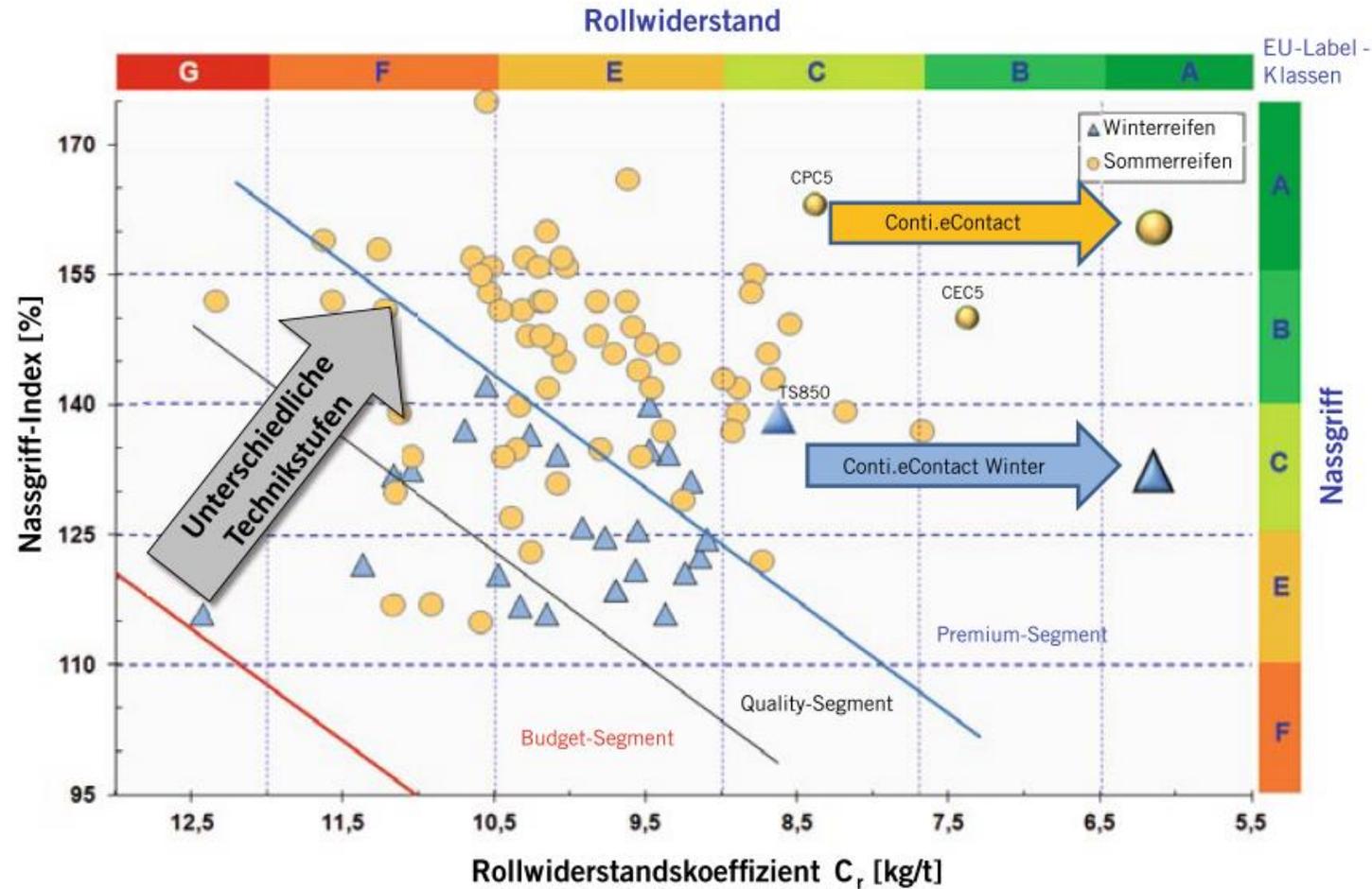
$f_R$  wird oftmals als konstant und mit einem Wert von 0,01 angenommen.

$$F_{R,roll} = f_R \cdot F_z$$

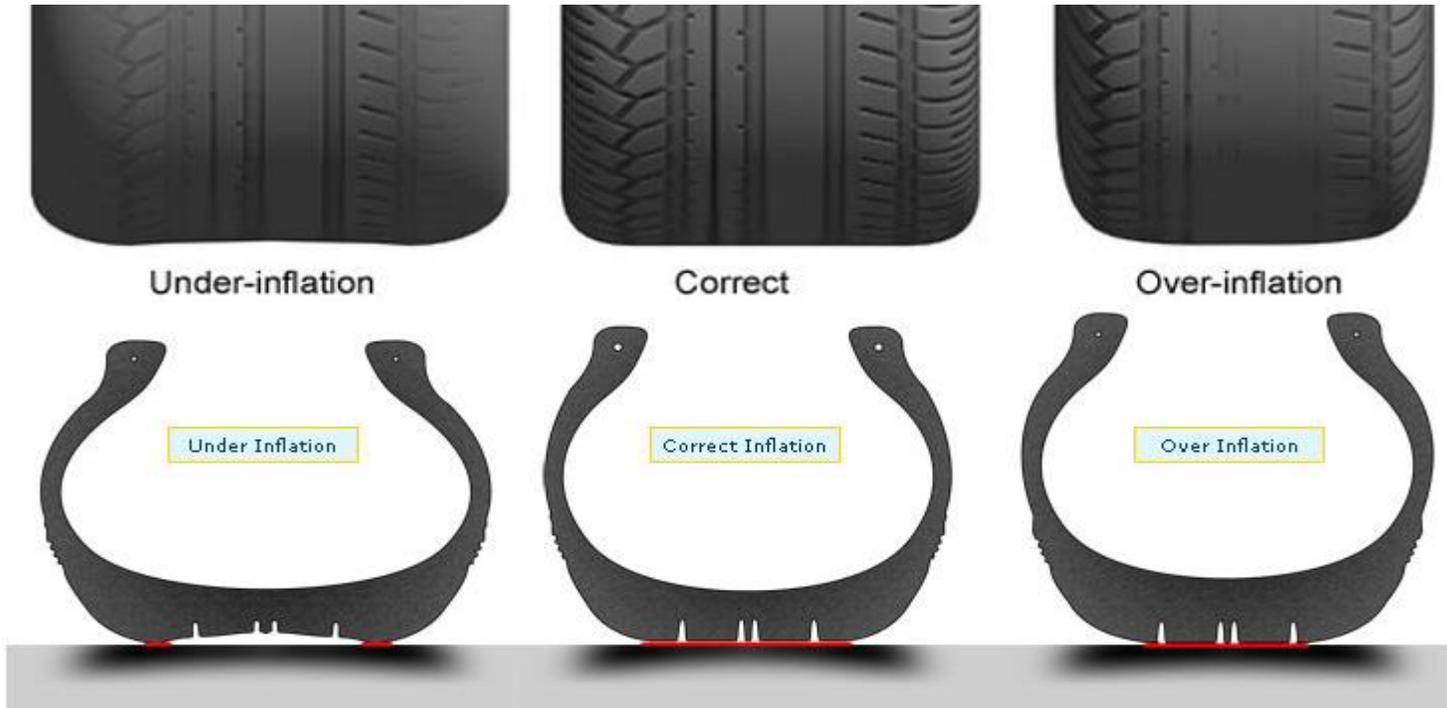
für HR-Reifen gilt:  $f_{R0} \approx 0,009$   
 $f_{R1} \approx 2,0 \cdot 10^{-3}$   
 $f_{R4} \approx 0,25 \cdot 10^{-3}$

Der Rollwiderstandsbeiwert ist desweiteren abhängig von Radlast und Fülldruck:

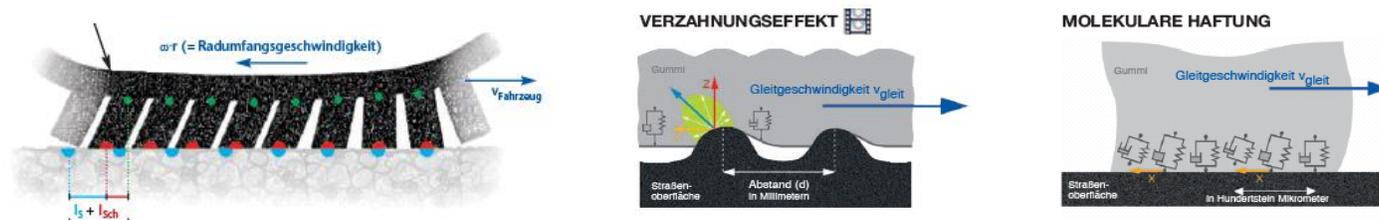




# Korrigieren Sie den Reifendruck für einen guten Reifenabdruck



Influence to the brush, tooth and molecular adhesion effect is obvious.

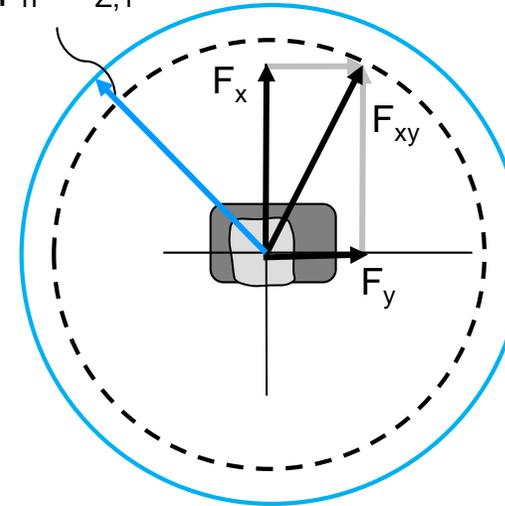




$$F_{xy}^2 = F_x^2 + F_y^2$$

$$F_{xy} \leq F_{max} = \mu_h \cdot F_z$$

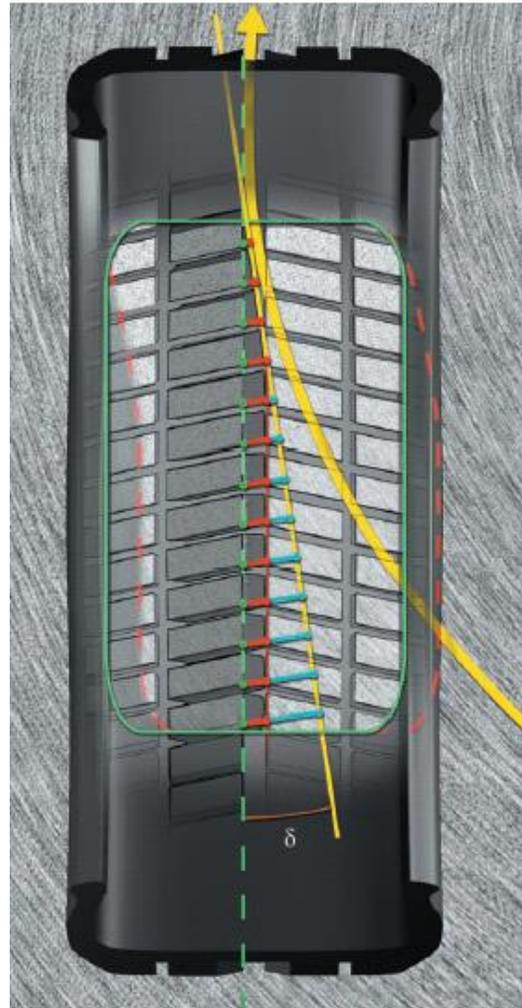
$$F_{max,1} = \mu_h \cdot F_{z,1}$$



Die Summe dieser Kräfte ist höchstens so groß wie die maximal übertragbare Kraft zwischen Reifen und Straße, die sich aus dem Haftungskoeffizienten und der Radlast ergibt.

Damit das Fahrzeug in Längs- und Querrichtung stabil betrieben werden kann, d. H. Das Rad sich ohne starkes Gleiten bewegt, darf die Haftgrenze zwischen Rad und Straße nicht überschritten werden.

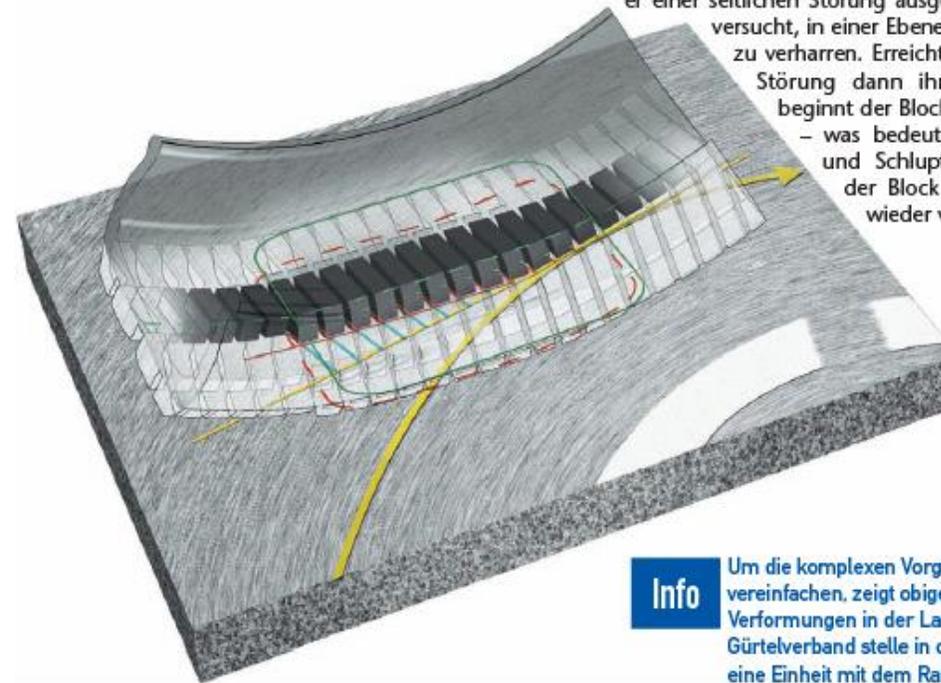
# Reifenseitige Eigenschaften: Seitenschlupfverhalten



- Oberseite der Gummiblöcke
- Profilgrund
- Scherlänge
- Schlupflänge
- Projektion der Blockoberseiten auf die Straßenoberfläche
- Fixpunkt auf der Straßenoberfläche
- Tangente an die Fahrtrichtung

## ENTSTEHUNG VON QUERKRÄFTEN IN DER KONTAKTFLÄCHE

Stellen wir uns also einen Reifen vor, der mit einer definierten Last beaufschlagt ist und mit einem bekannten Schräglaufwinkel abrollt. Im Moment des Einlaufs in die Kontaktfläche steht jeder Gummiblock senkrecht auf der Straßenoberfläche. Nähert sich der Gummiblock nun dem Ende der Kontaktfläche, wird er einer seitlichen Störung ausgesetzt, während er versucht, in einer Ebene mit der des Rades zu verharren. Erreicht die Gummiblock-Störung dann ihren Maximalwert, beginnt der Block seitlich zu gleiten – was bedeutet, dass Scherung und Schlupf auftreten, bevor der Block die Kontaktfläche wieder verlässt.



**Info** Um die komplexen Vorgänge zu vereinfachen, zeigt obiges Schaubild nur die Verformungen in der Lauffläche. Der Gürtelverband stelle in obiger Illustration eine Einheit mit dem Rad dar.

# Reifeneigenschaften

## Querdynamik – Schräglaufwinkel und Seitenkraftübertragung

### Seitenkraft $F_y$ bzw. Seitenführungskraft $F_R$ :

Seitenkraft am rollenden Reifen wird erzeugt durch:

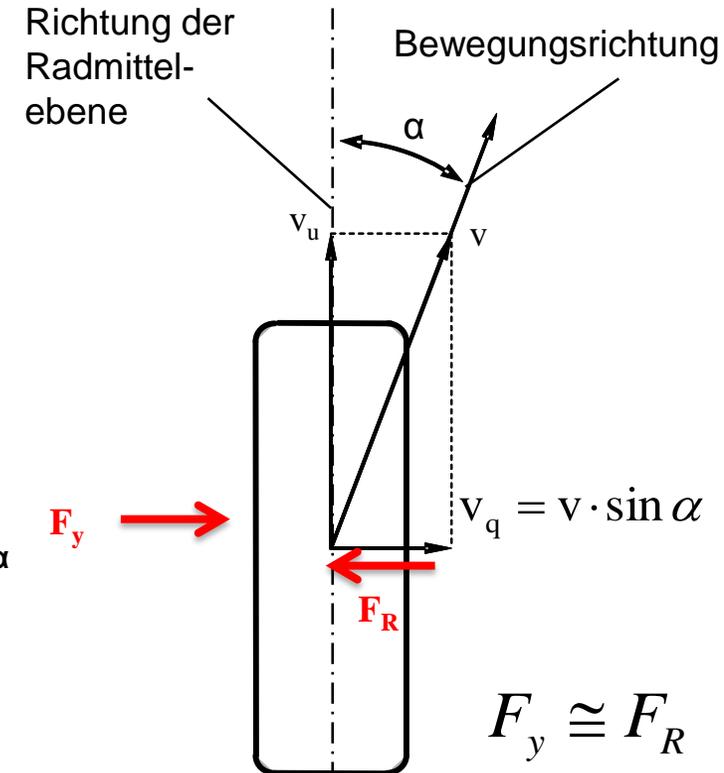
- Abrollen schräg zur Fahrtrichtung (Schräglauf  $\alpha$ ).
- Neigung des Reifens aus seiner senkrechten Lage zur Fahrbahn (Sturz  $\gamma$ ).
- Reifenkonizitäten, Lageeffekte (ply-steer).

### Seitenkraft infolge Schräglauf:

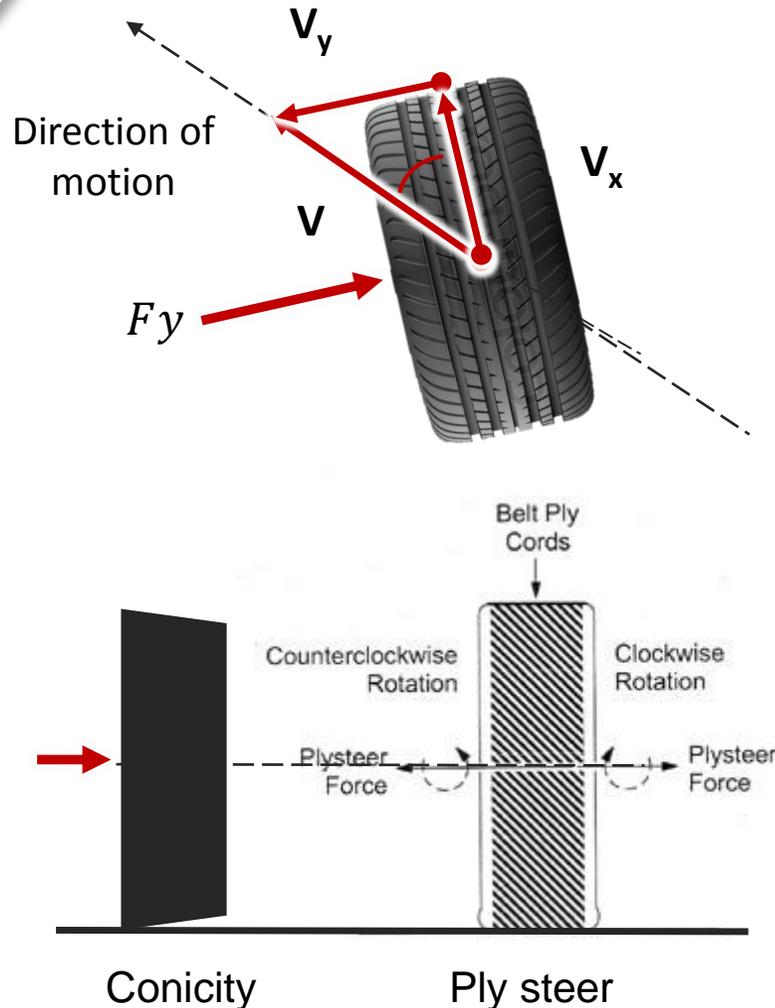
Eine im Fahrzeugschwerpunkt angreifende Störkraft  $F_y$  (z.B. Wind-, Flieh- oder Hangabtriebskraft) erfordert **Radseitenkräfte**  $F_R$  für das Kräftegleichgewicht. Dazu muss das Fahrzeug seine Fahrtrichtung um den **Schräglaufwinkel**  $\alpha$  ändern, der durch einen zusätzlichen **Lenkwinkel**  $\delta$  kompensiert werden muss, um auf Kurs zu bleiben.

### Schräglaufwinkel $\alpha$ :

Der Winkel zwischen der Bewegungsrichtung des Radmittelpunktes (mit der **Geschwindigkeit**  $v$ ) und der Schnittgeraden der Rad- und Fahrbahnebene wird als **Schräglaufwinkel**  $\alpha$  bezeichnet.



- $F_y$  ... Äußere Kraft
- $F_R$  ... Reaktionskraft von Fahrbahn auf Reifen (in der Reifenaufstandsfläche)
- $v_u$  ... Umfangsgeschwindigkeit
- $v_q$  ... Quergeschwindigkeit (aus Querschlupf)



## Schräglaufwinkel $\alpha$ :

Winkel zwischen Bewegungsrichtung und Richtung der Radebene.

$$\alpha = -\arctan \frac{V_y}{V_x}$$

## Reifenseitenführungskraft wird erzeugt:

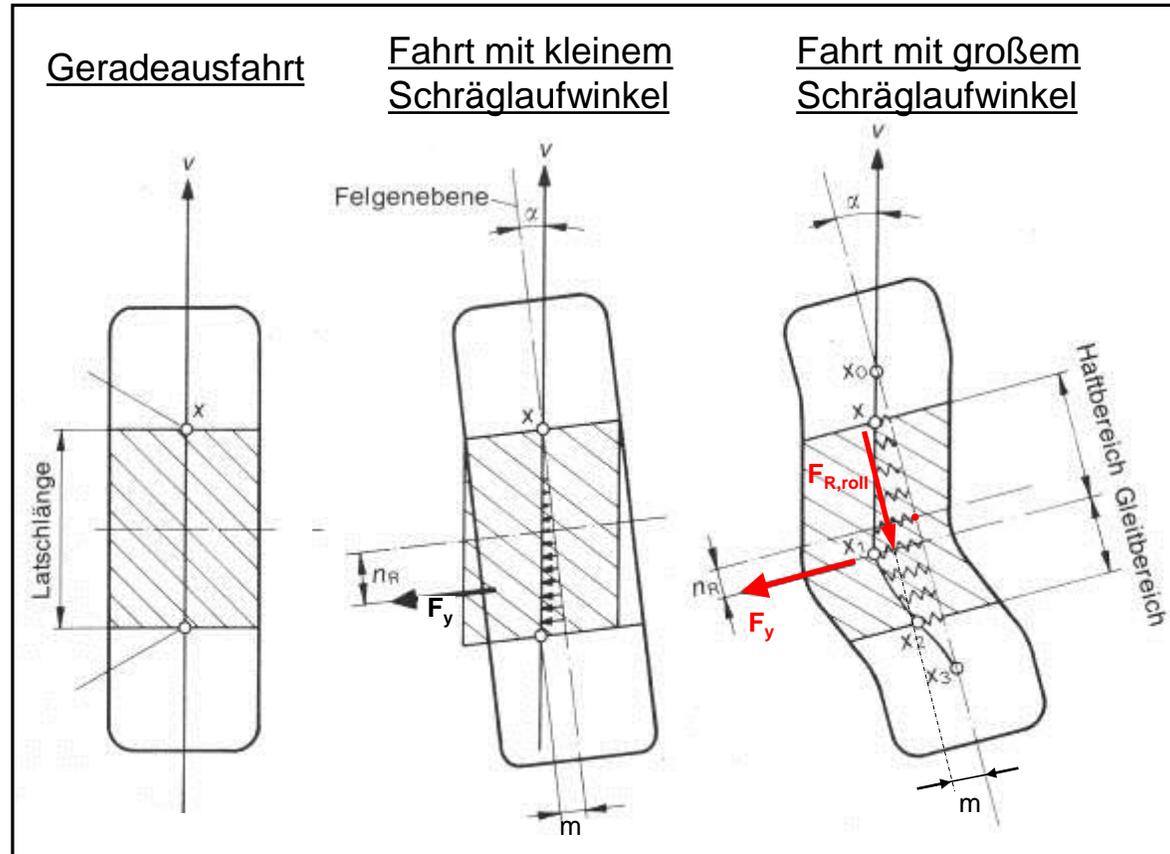
- Diagonal zur Bewegungsrichtung rollen (Seitenschlupfwinkel  $\alpha$ ).
- Neigung des Reifens von seiner vertikalen Position zur Straße (Sturz  $\square$ )
- Reifenkonizität (geometrisch)
- Lagenlenkung (Laufflächen- / Riemenkonstruktion)

## Seitenkraft durch Seitenschlupfwinkel:

- Wind-, Zentrifugal- oder Schwerkraftkräfte erforderten Reifenkräfte.
- Das Fahrzeug muss einen Seitenschlupf aufweisen.

# Reifeneigenschaften

## Querdynamik – Nachlauf und Rückstellmoment



### Reifennachlauf:

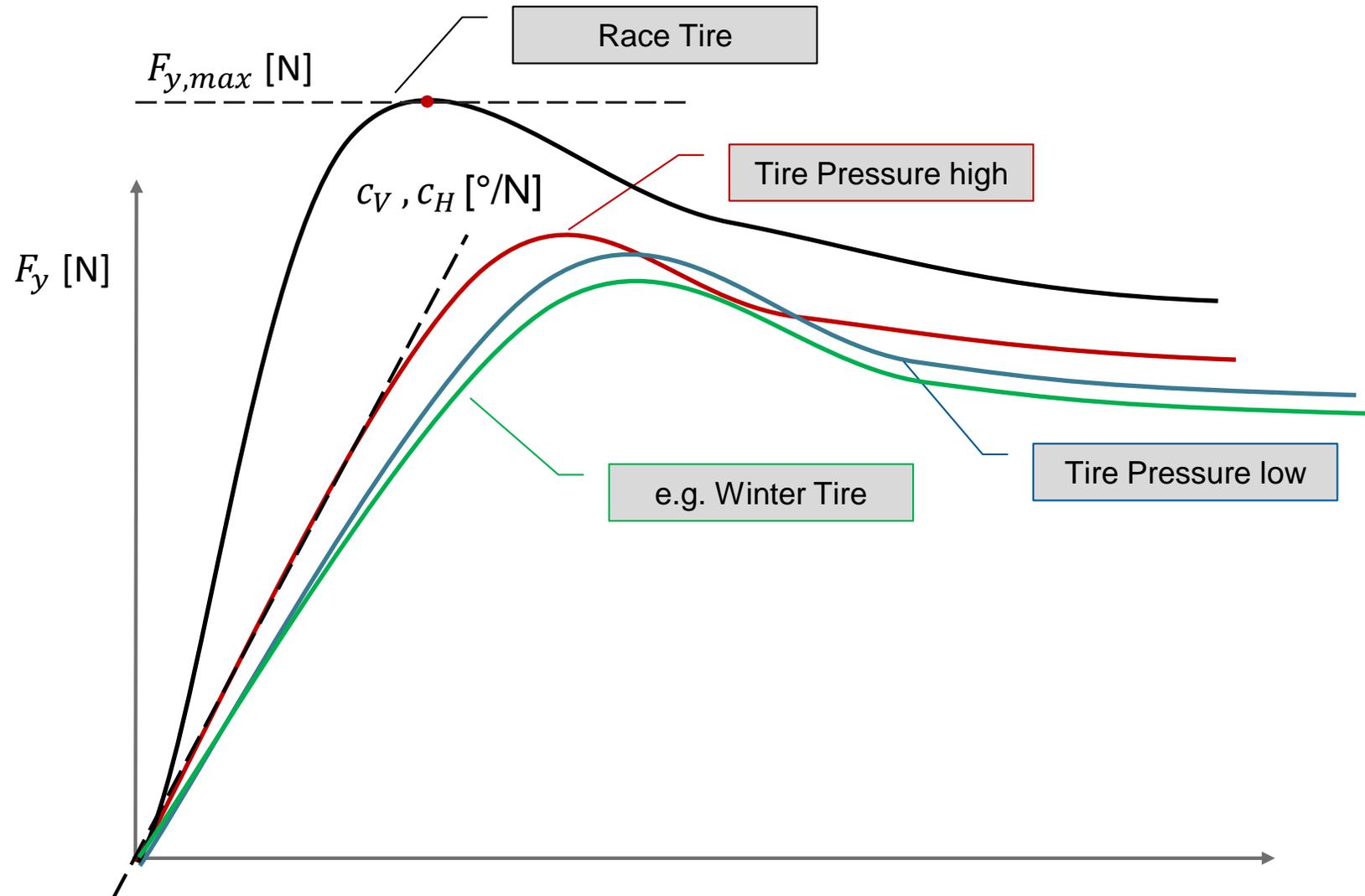
- Die **Seitenkraft  $F_y$**  und der **Rollwiderstand  $F_{R,roll}$**  wirken im Schwerpunkt der Deformationsfläche.
- Der x-Abstand zur Latschmitte wird als konstruktiver **Reifennachlauf  $n_R$**  bezeichnet.
- Der y-Abstand zur Felgenebene wird mit  **$m$**  bezeichnet.

bzw. vereinfacht

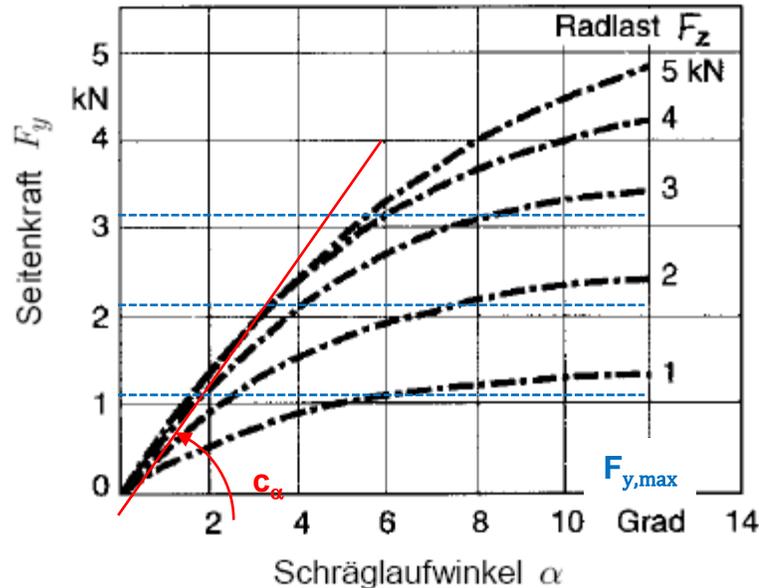
$$M_z = F_y \cdot n_R$$

### Reifenrückstellmoment:

$$M_z = F_y \cdot n_R - F_{R,roll} \cdot m$$



## Querdynamik – Schräglauflinien



- Die maximal übertragbaren Seitenkräfte sind vom maximalen Kraftschlussbeiwert in lateraler Richtung abhängig.

$$F_{y,max} = \mu_{y,max} \cdot F_z$$

Für gewöhnlich läuft die Seitenkraft im Gegensatz zur Längskraft nach Überschreiten von  $\mu_{y,max}$  in eine Sättigung. Ein Abfall des Kraftniveaus ist meist nicht zu beobachten.

- Für Schräglaufwinkel bis ca. 4° existiert ein linearer Zusammenhang zwischen  $\alpha$  und  $F_y$ .

$$F_y = c_\alpha \cdot \alpha$$

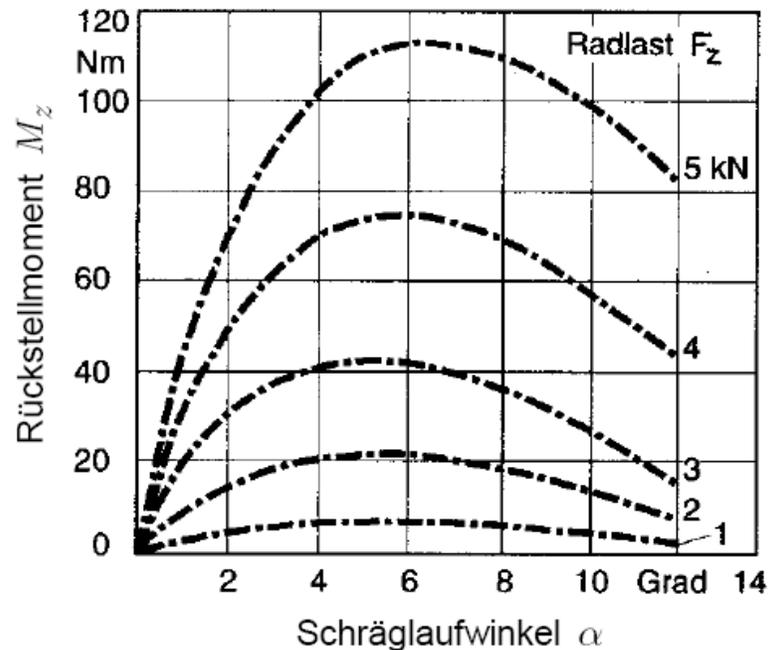
- $c_\alpha$  wird als Schräglaufsteifigkeit bezeichnet.

$$c_\alpha = \frac{dF_y}{d\alpha} = f(F_z)$$

- Einflüsse auf  $c_\alpha$ :
  - Fülldruck.
  - Temperatur.
  - Lokaler Kraftschluss.

# Reifeneigenschaften

## Querdynamik – Rückstellmomentenkennlinie

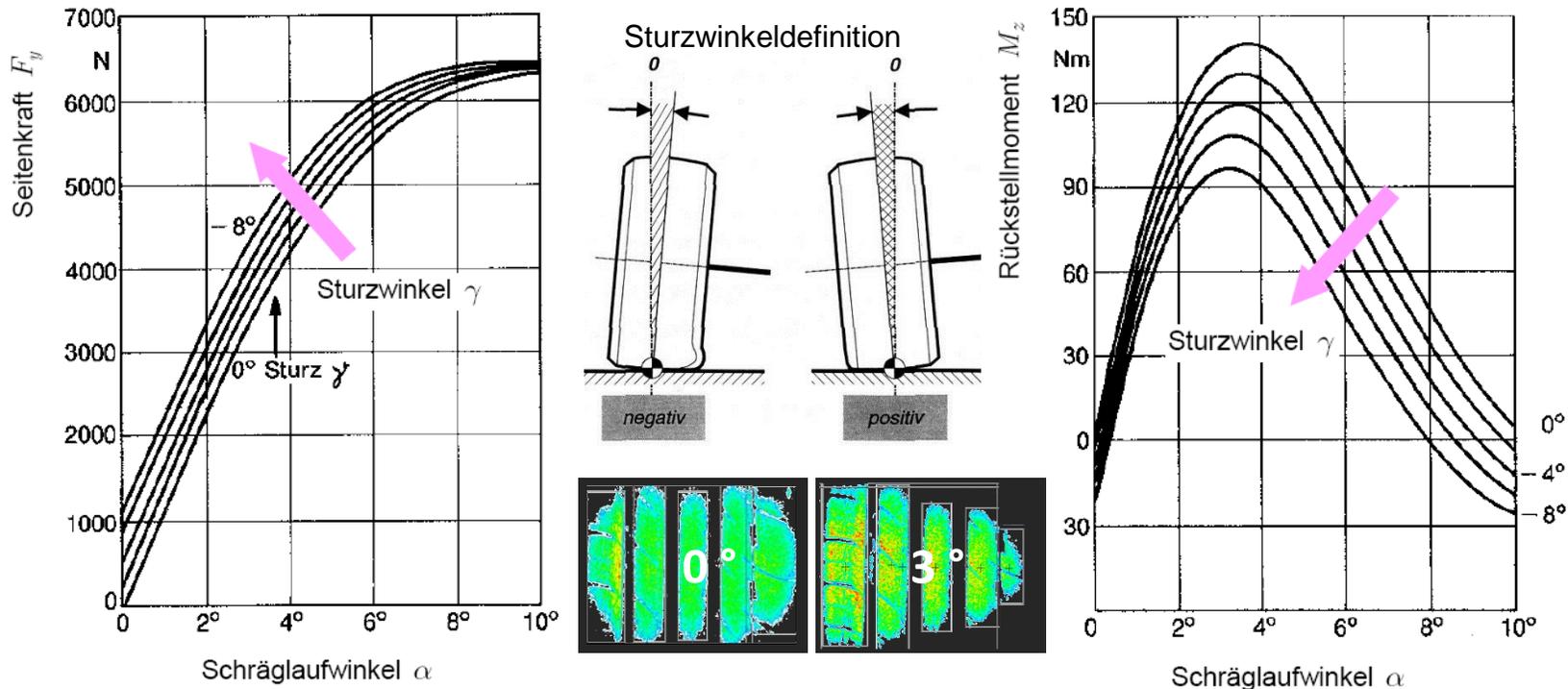


Das Reifenrückstellmoment geht für größere Schräglaufwinkel gegen null.

### Ursache:

- Mit zunehmenden Gleitanteil wandert Schwerpunkt des Spannungsverlaufes Richtung Radmitte (Nachlauf  $\rightarrow$  0).
- Schwerpunkt kann sogar vor den Aufstandspunkt wandern  $\rightarrow$  negativer Nachlauf   
  $\rightarrow$  **negatives Rückstellmoment**

## Querdynamik – Einfluss des Sturzwinkels



Die **Sturzseitenkraft** und das **Sturzmoment** sind deutlich kleiner als die **Seitenkraft** und das **Rückstellmoment**, welche durch den **Schräglauf** verursacht werden.

Näherungsweise erzeugt ein **Sturzwinkel**  $\gamma = 1^\circ$  nur ein **Zwölftel** der Seitenkraft eines **Schräglaufwinkels** von  $\alpha = 1^\circ$ .

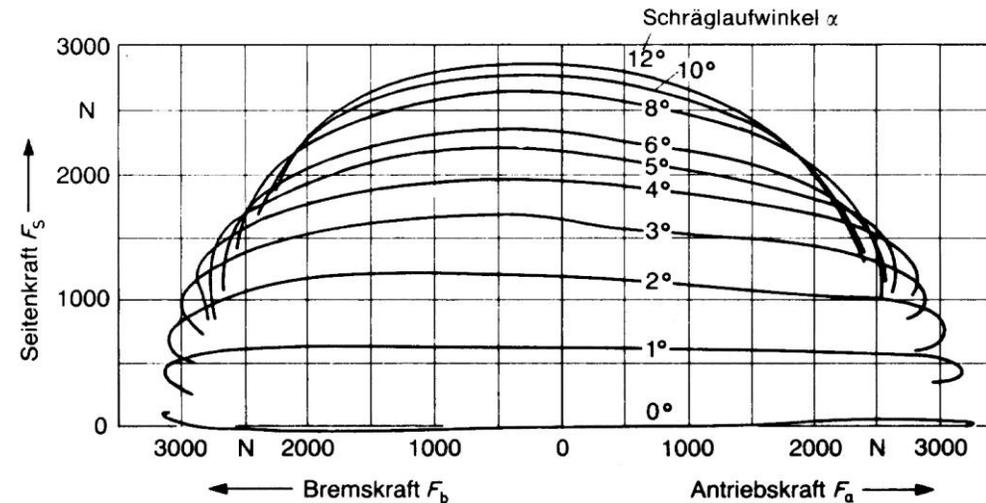
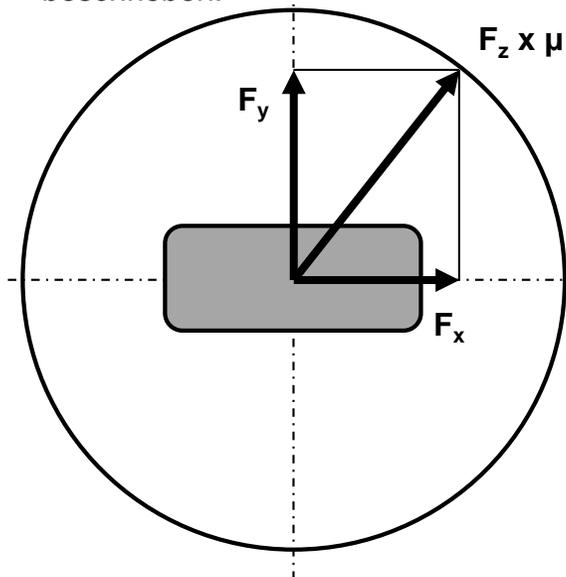
Ein negativer **Sturzwinkel** ermöglicht bei gleichem **Schräglaufwinkel** die Übertragung geringfügig größerer **Seitenkräfte**.

## Reifen unter realer Beanspruchung

Bei gleichzeitigen Auftreten von Längs- und Seitenkräften kann die resultierende Kraft nicht größer als die max. Reibkraft werden, welche sich aus dem Produkt von Radlast und Reibbeiwert ergibt:

$$F_z \cdot \mu \geq \sqrt{F_x^2 + F_y^2}$$

Anschaulich wird dieser Zusammenhang durch den „Kamm’schen Kreis“ beschrieben:

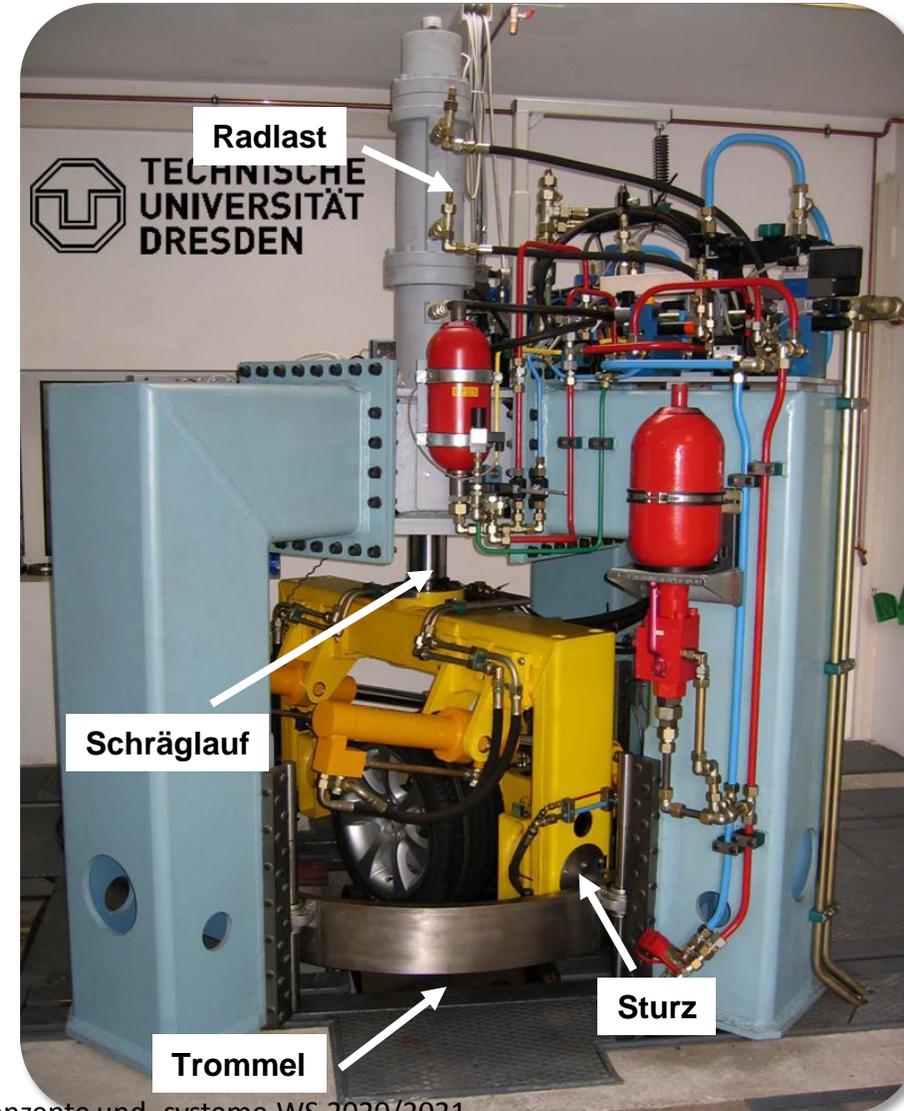


- Gemessene Umfangskraft-Kennfelder weichen von der idealen Kreisform ab.
- Dies ist hauptsächlich durch die unterschiedlichen **Kraftschlussbeiwerte  $\mu$**  in x- und y-Richtung bedingt.
- Die Kurven unterscheiden sich ebenfalls für das Antreiben und Bremsen.

## Messverfahren

### Ermittlung des Reifenverhaltens mittels Außentrommelprüfstand

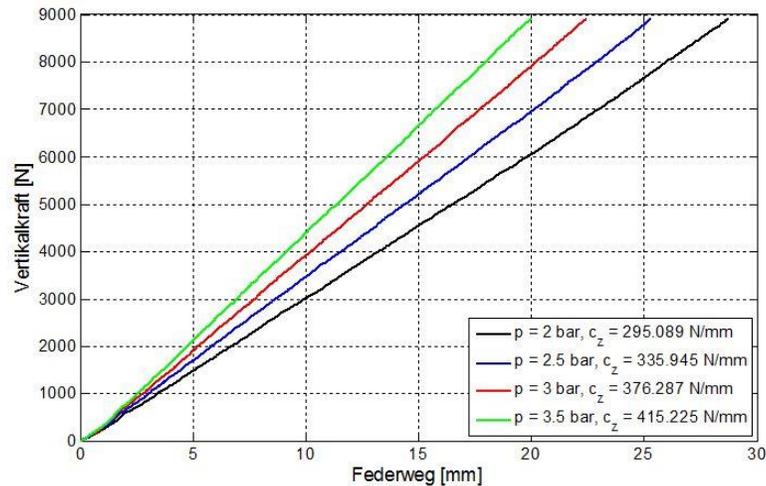
- max. Geschwindigkeit: > 300 km/h
- max. Radlast: 30 kN
- max. Seitenkraft: 20 kN
- max. Schräglaufwinkel: 90°
- max. Sturzwinkel: 45°
- max. Raddurchmesser: 900 mm
- Schräglaufwinkeldynamik: max. 1,5 Hz  
bei  $\pm 3^\circ$
- Trommeldurchmesser: 2000 mm
- Trommelbreite: 500 mm
- Messgrößen:
  - Kräfte und Momente am Rad  
(6-Komponenten-Messnabe).
  - Reifeneindrückung.
  - Oberflächentemperatur.
  - Rad – und Trommeldrehzahl.
  - statischer Radhalbmesser.



## Messverfahren – Vertikaldynamik

### Statisch – Vertikalsteifigkeit

- Stehender Reifen wird rampenförmig mit Radlast beaufschlagt (z.B. 0-15 kN).
- Aufzeichnen der Kraft-Weg-Kennlinie.
- $c_z$  wird aus den Gradienten ermittelt.



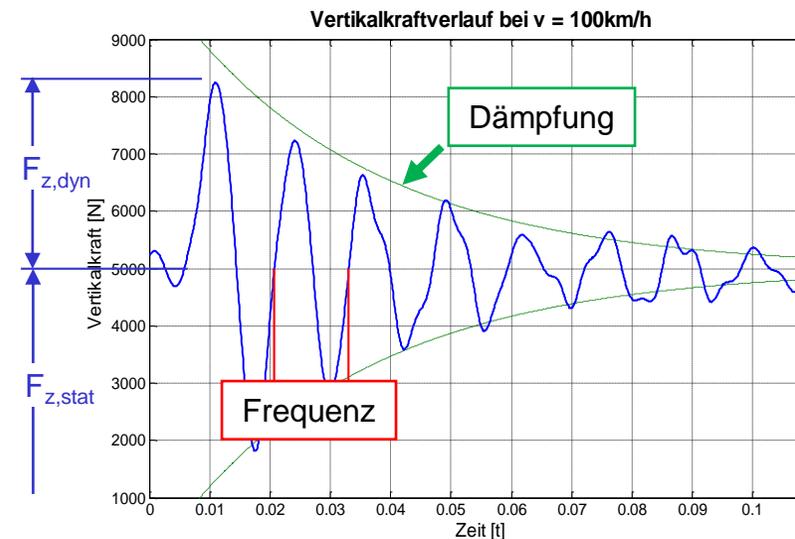
Das Messverfahren lässt sich auch für die Ermittlung der statischen Steifigkeiten in x- und y-Richtung und die Torsionssteifigkeit um die x-Achse anwenden.

### Dynamisch – Schwingverhalten

- Impulsförmige Anregung des Reifens durch Schlagleistenüberfahrt.

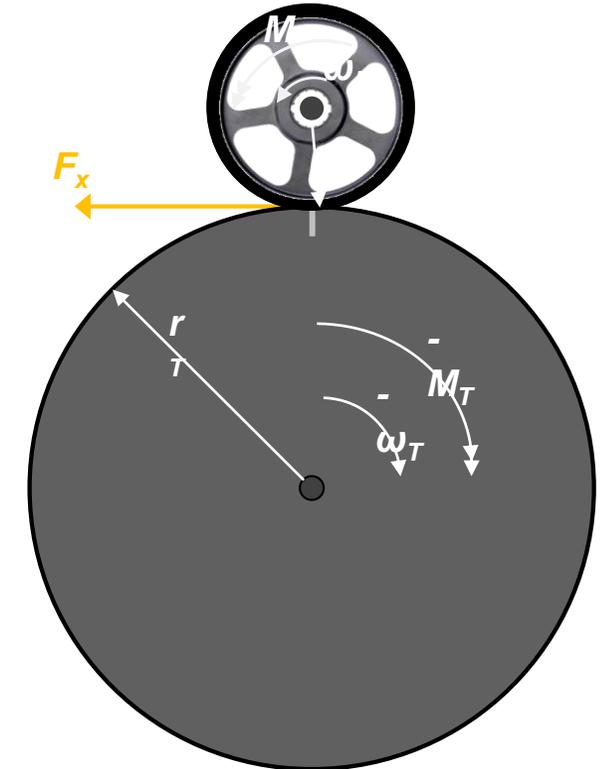
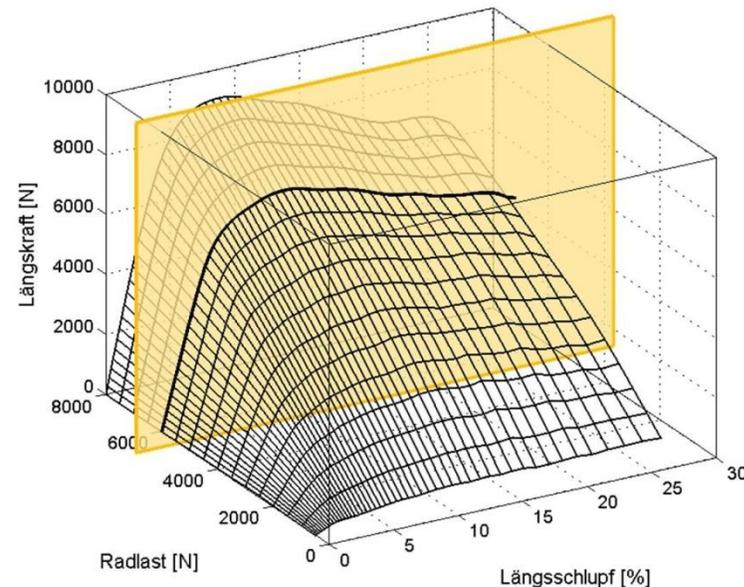


- Ermittlung von Eigenkreisfrequenz und Abklingkonstante aus der Radlastantwort.



## Messverfahren – Längsdynamik

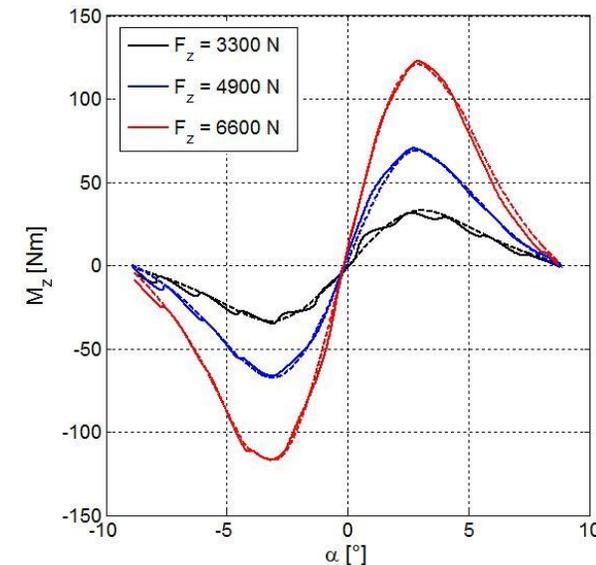
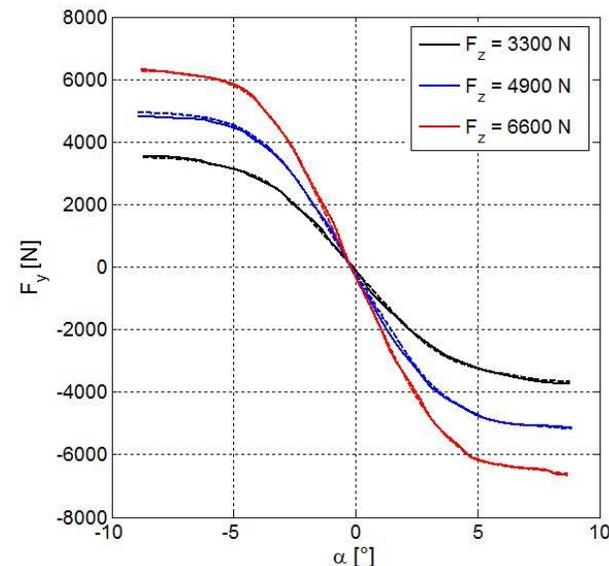
- Der Längsschlupf kann eingestellt werden, indem unter Konstanthaltung der Trommelgeschwindigkeit, ein Antriebs- oder Bremsmoment am Rad aufgebracht wird.
- In der Regel werden Reifenreibeigenschaften in Längsrichtung unter folgende Bedingungen ermittelt:
  - Mehrere konstante Radlasten, ggf. geregelt.
  - Konstanter Sturzwinkel, oftmals  $\gamma = 0^\circ$ .
  - Schräglaufwinkel  $\alpha = 0^\circ$ .
  - Lineare, quasi-stationäre Erhöhung des Längsschlupfes, ausgehend von 0%.



# Reifenentwicklung

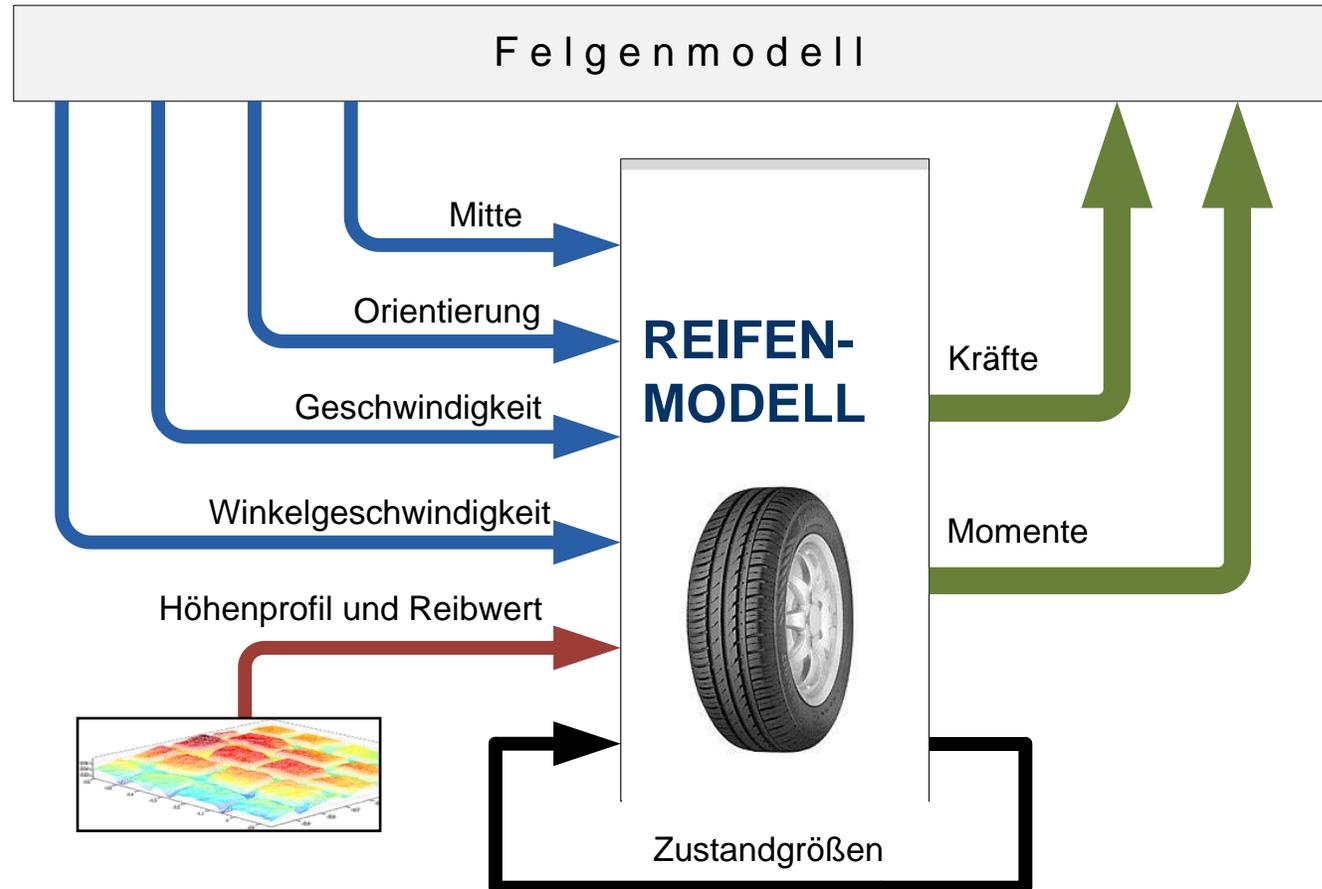
## Messverfahren – Querdynamik

- Versuchstechnische Ermittlung von Seitenkraftkraftkennlinien am IAD:
  - Konditionierung des Reifens (Durchwärmen des Materials, Abbau innerer Spannungen).
  - Aufbringen der Sollradlast (reale Größen zwischen 3.000 und 9.000 N).
  - Rampenförmiges Schwenken des Rades (Amplitude = 12°, Gradient = 5 °/s).
- **$\alpha$  übersteigt im allgemeinen 10° bis 15° nicht, da das Fahrzeug sonst nicht mehr beherrscht werden kann (übliche Größenordnung im Straßenverkehr < 5°).**
- $c_{\alpha}$  wird im Bereich von -2° bis +2° ausgewertet.
- Durch Ungleichförmigkeiten in der Gummimischung und im Reifenaufbau können auch bei Geradeauslauf kleine Nullseitenkräfte auftreten (Winkel- und Konuseffekt) → Offset-Korrektur.



## Reifenmodelle – prinzipielle Funktion

Das Standard Tire Interface - STI



## Reifenmodelle – Anwendungsbereiche

	Fahrdynamik	Komfort
Frequenzbereich	bis 20 Hz (relevant: 4-5 Hz)	bis 80 Hz (und mehr)
Ansätze	<b>Empirisch</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Approximation gemessener Kennfelder mit Hilfe mathematischer Funktionen.</li> <li>• Punktkontakt, Kopplung Felge-Straße starr.</li> </ul>	<b>Physikalisch</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Abbildung des Reifens als Mehrkörpersystem.</li> <li>• Masse-, Feder-, Dämpferelemente.</li> <li>• Rad-Straße-Kontakt durch Reibelemente in der Latschfläche.</li> </ul>
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Einfacher parametrierbar.</li> <li>• Geringe Rechenzeiten.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hohe Abbildungsgüte.</li> <li>• Abbildung vieler Effekte möglich.</li> </ul>
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Eingeschränkte Abbildungsgüte.</li> <li>• Abbildung reiner Fahrdynamik.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Schwierig parametrierbar.</li> <li>• Erhöhter Rechenaufwand.</li> </ul>

## Anforderung an das Fahrverhalten von Kraftfahrzeugen

### Magic Formula Tire (MFT – H. Pacejka)

- Abbildung aller Reifenkennlinien (Längskraft, Seitenkraft, Rückstellmoment, ...) über trigonometrische Funktionen.
- Grundform der „Magic Formula“:

$$y(x) = D * \sin\{C * \tan^{-1}[B * x - E * (B * x - \tan^{-1}(B * x))]\}$$

$$Y(X) = y(x) + S_v \quad \text{und} \quad x = X + S_h$$

- Bestimmung der Parameter B,C, D und der Offsets Sv und Sh aus Prüfstandsmessungen mit Hilfe von Fitting-Software (z.B. unter MATLAB).
- Parameter sind dabei Funktionen der Radlast und des Sturzes.

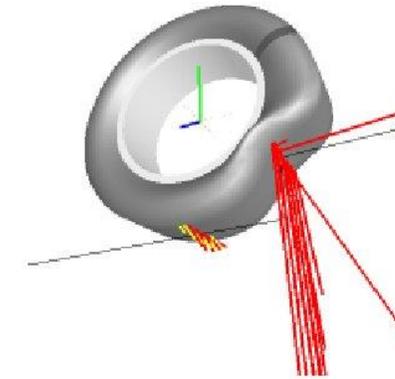
Kennlinie	Eingangsgröße x	Ausgangsgröße y
Längskraftkennlinie	$\kappa$	$F_x$
Schräglaufkennlinie	$\alpha$	$F_y$
...	...	...

## Reifenmodelle – Komfortmodell (Beispiel)

### Flexible Ring Tire Model (FTire – M. Gipser)

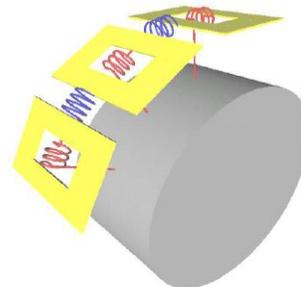
#### Grundmodell:

- Reifengürtel als dehnbarer und flexibler Ring aus 50 bis 150 Punktmassen.
- Untereinander durch sehr steife Feder-Dämpferelemente, sowie durch Biegesteifigkeiten in der Gürtel Ebene gekoppelt.
- Die Anbindung an die Felge erfolgt ebenfalls durch Feder-Dämpfer-Kombinationen in radialer, axialer und tangentialer Richtung.
- Kontakt zur Straße durch 5 bis 40 masselose Kontaktelemente pro Gürtелеlement.

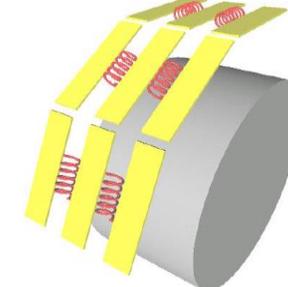


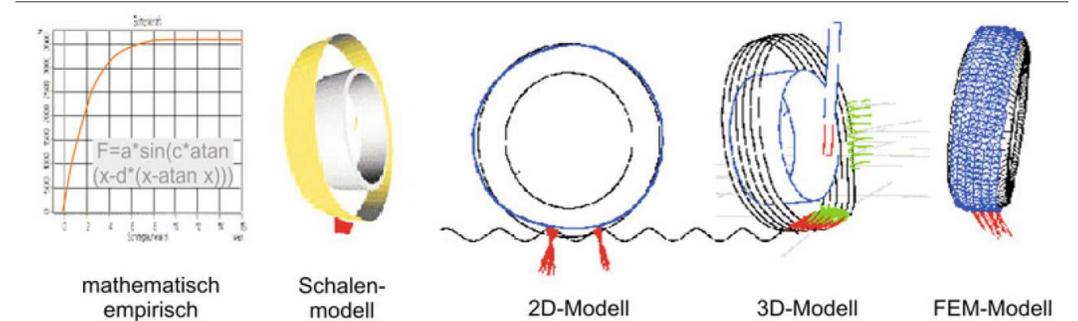
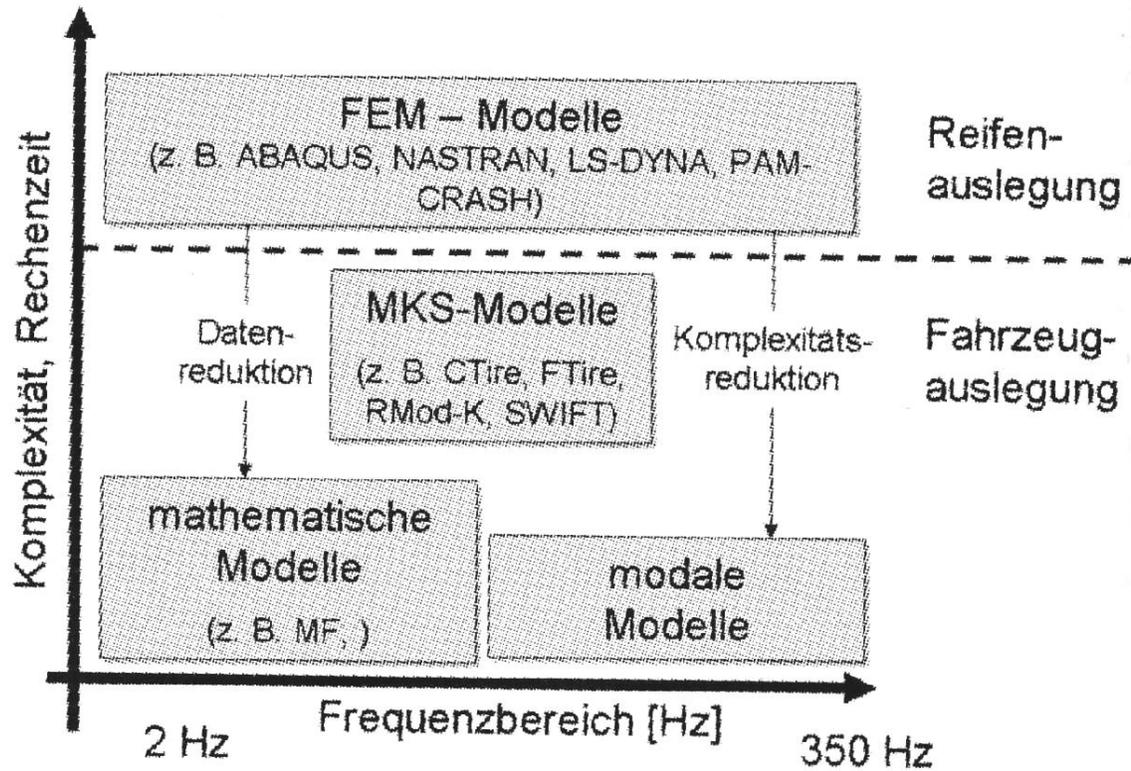
#### Erweiterungen:

Rotatorischer Freiheitsgrad  
um die Gürtellängsachse



Laterale Biegesteifigkeiten  
des Reifengürtels





Bitte beantworten Sie folgende Fragen und bereiten Sie sich vor die Ergebnisse kurz zu präsentieren:

1. Beschreiben Sie die Definition „Kammscher Kreis“
2. Warum geht das Reifenrückstellmoment bei größeren Schräglaufwinkel gegen „null“ ?
3. Was bezeichne ich als „kritischen Schlupf“ ?

- Fahrwerksgrundlagen
- Reifen / Räder
- **Lenkung / Querdynamik**
  - Anforderungen an die Lenkung
  - Lenkungsauslegung
  - „Servolenkung“
  - Lenkungskinematik
  - Kriterien zu Lenkungsauslegung
- Federung und Dämpfung
- Radaufhängung
- Achskonzepte
- Fahrwerk spüren



## Fahrzeuglenkung:

- 1818 Patent von Lankensperger und Ackermann zu Achsschenkelenkung ersten Automobile
- Daimler Motorkutsche mit Drehschemellenkung
  - Benz Motorwagen mit Gabellenkung
- 1889 Daimler Stahlradwagen mit Gabellenkung
- 1893 Benz Viktoria mit Achsschenkelenkung
- 1987 mechanische 4-Rad-Lenkung im Honda Prelude



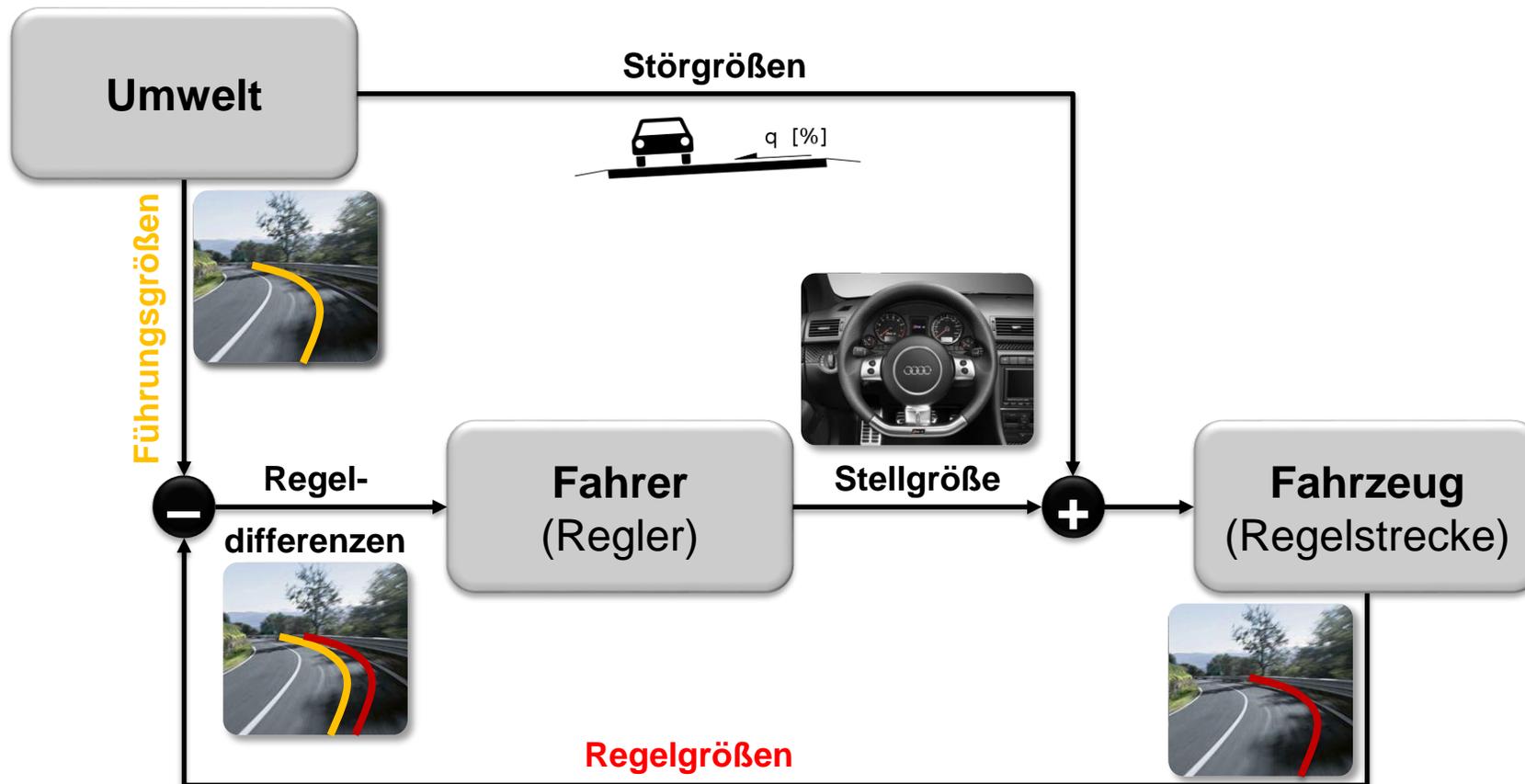
## Lenksysteme:

- 1927 Patent von F.W. Davis zu Hydraulic Steering Mechanism
- 1951 hydraulische Servolenkung in PKW  
- Power Steering Gemmer Hydraguide -  
im Chrysler New Yorker und Imperial
- 1970 geschwindigkeitsabhängige Closed-Center-Lenkung DIRAVI im Citroën SM
- 1978 elektromechanische Servolenkung im Kleinwagen Suzuki Cervo
- 1998 elektrohydraulische Servolenkung im Opel Astra/Zafira
- 2002 Überlagerungslenkung im 5er BMW



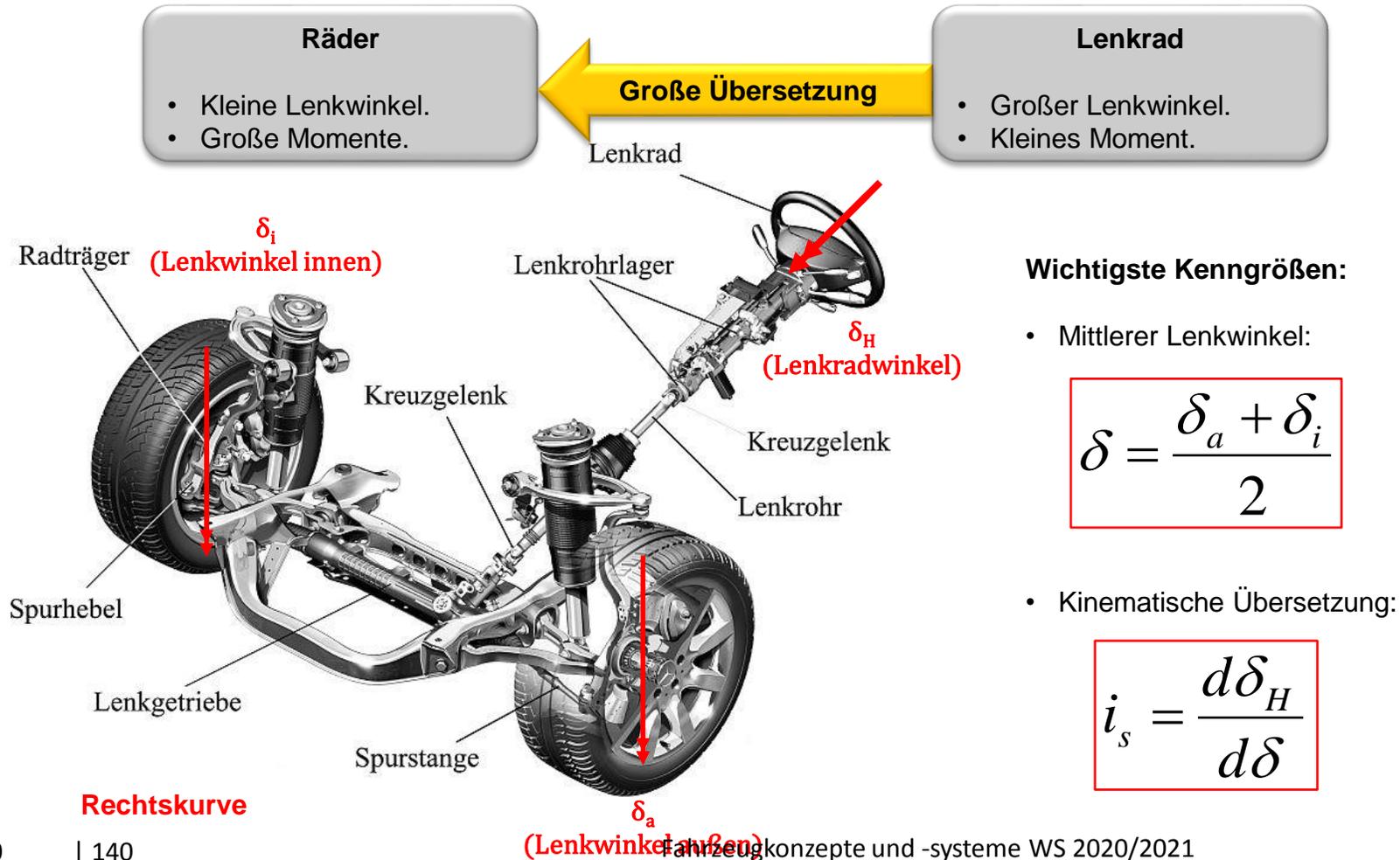
Evolution von Lenksystemen  
Prof. Dr.-Ing. Hartmut Ulrich, FH Köln

## Bedeutung für das System „Fahrer-Fahrzeug-Umwelt“



- Die Lenkung ist die am häufigsten betätigte Stellgröße im Regelkreis und dient der Spurführung.
- Sie liefert haptische Rückmeldungen über die Zustandsgrößen der Vorderräder (z.B. Gefühl für die Reibverhältnisse durch das Rückstellmoment).
- Lenkungsbauteile sind Sicherheitsbauteile (Deformation vor Bruch).

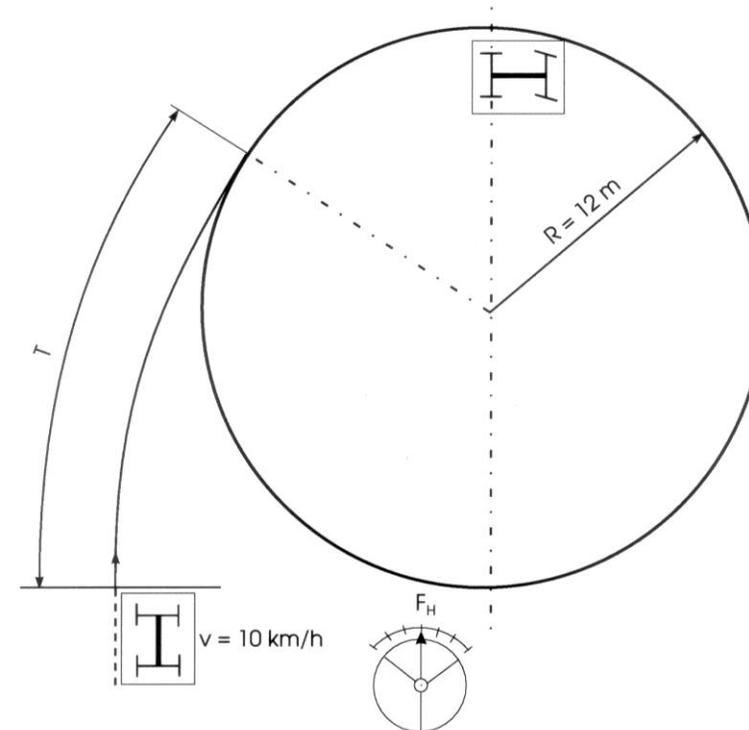
## Prinzipieller Aufbau und Kenngrößen



## Statische Lenkungsauslegung

- **EG-Richtlinie 70/311/EWG, ECE Richtlinie 79:**
  - Betätigungskräfte.
  - Betätigungszeiten.
- **ECE Richtlinie 12:**
  - Eindringen der Lenksäule in den Innenraum (max. 127 mm bei Frontalaufprall mit 48,3 km/h).
  - Energieaufnahmefähigkeit des Lenkrades (max. Aufprallkraft 11,11 kN bei  $\Delta v = 24,1$  km/h).
  - Kopfaufprall (max. Beschleunigung: 80 g).
- **Straßenverkehrs-Zulassungsverordnung (StVZO) §38(2):**
  - Leichtes, sicheres Lenken.
  - Verweis auf 70/311/EWG und 75/321/EWG.

	Zulässige Betätigungskraft $F_H$ am Lenkrad [N]		Zulässige Betätigungszeit T [s]	
	Klasse M1 (Pkw)	Klasse N3 (Nfz > 12t)	Klasse M1 (Pkw)	Klasse N3 (Nfz > 12t)
Normale Fahrt	150	200	4	4
Ausfall Lenkhilfe	300	450	4	6

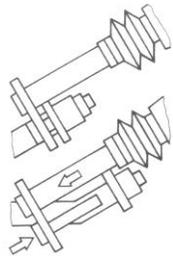


### Prüfvorschrift:

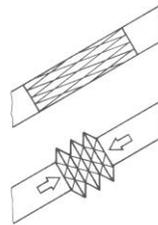
Das Fahrzeug ist aus der Geradeausfahrt in eine Spirale zu fahren. Die Lenkkraft  $F_H$  und die Lenkzeit T werden gemessen, bis das Fahrzeug einen Wendekreisradius 12 m beschreibt.

## Fahrzeugbezogene Anforderungen

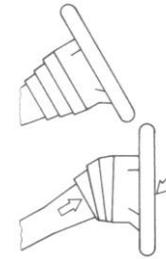
- **Betriebssicherheit und passive Sicherheit:**
  - Lenkung muss auch nach einem Missbrauch betriebssicher bleiben.
  - Kraftübertragende Elemente müssen sich spürbar deformieren, dürfen aber nicht brechen.
  - Bruch nur im Zuge der passiven Sicherheit zulässig (Sicherheitslenksäulen):



**Auslenk-  
kupplung**



**Maschen-  
gitterrohr**



**Pralltopf**

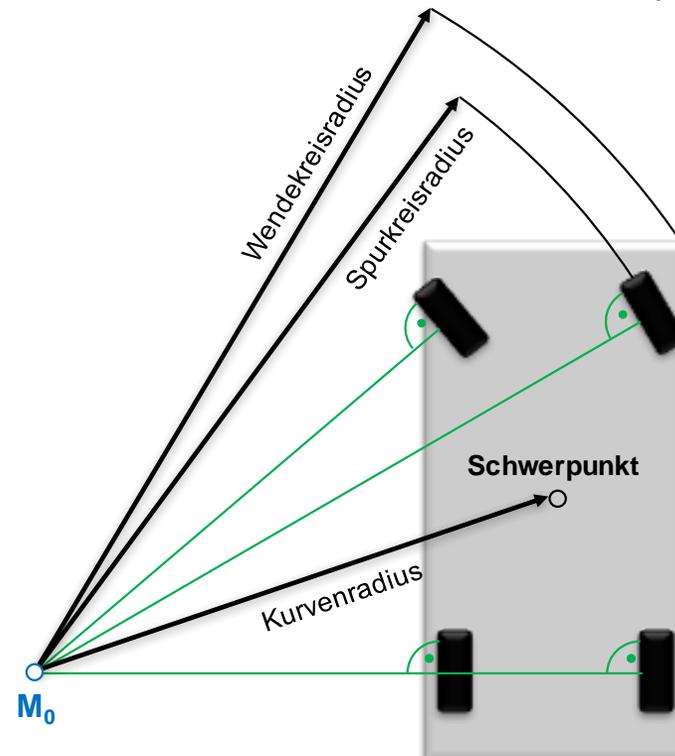
- **Mechanische Verbindung zwischen Lenkrad und Radträgern:**
  - Gesetzlich vorgeschrieben für Pkw und Nfz, die über 50 km/h fahren.
  - „mechanische Rückfallebene“ bei Ausfall der Lenkunterstützung.

## Fahrzeugbezogene Anforderungen

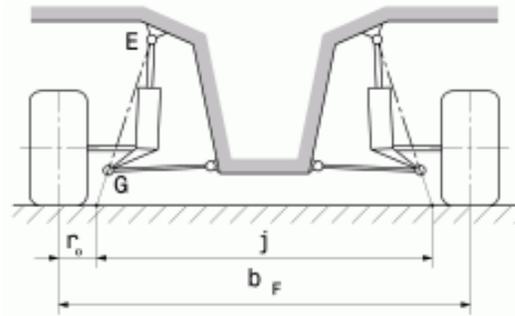
- **Wahl der Lenkübersetzung:**
  - Parkieren = Große Lenkwinkel → kleine Lenkübersetzung.
  - Normale Fahrt = kleine Lenkwinkel + geringe Lenkkräfte → große Lenkübersetzung.
  - Lenkübersetzung heutiger Lenkgetriebe ist variabel und vom Lenkeinschlag abhängig.
- **Lenkungsrückstellung nach Kurvenfahrt:**
  - Durch Radkräfte in Überlagerung mit Radstellungsgrößen.
  - Setzt sehr reibungsarme Lenkung voraus.
- **Lenkungsdämpfung:**
  - Zur Stabilisierung der Lenkreaktion (z.B. sprunghafte Freigabe des Lenkrads während einer Kurvenfahrt).
  - Meist durch Eigenreibung in der Lenkanlage erreichbar.
  - Muss jedoch auch kleine Radkräfte am Lenkrad spürbar belassen.

## Definition des Momentanpols

- Der **Momentanpol** beschreibt das Drehzentrum der vom Fahrzeug beschriebenen Kreisbahn.
- Er ergibt sich idealisiert aus dem Schnittpunkt  $M_0$  der **Normalen auf den Radmittelebenen** (*Ackermannbedingung, vgl. 4.2.3*).
- Alle Punkte des Fahrzeugs bewegen sich auf konzentrischen Bahnen um  $M_0$ .

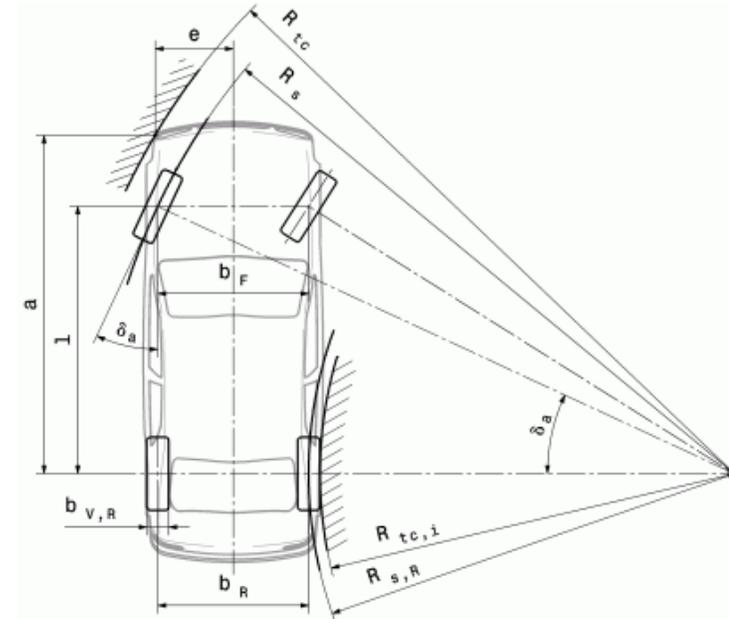


## Statische Lenkungsauslegung



**Bild D-2**  
Streckenbezeichnungen zu **Bild D-1**

- EG Spreizungsachse (Lenkachse) *kingpin axis*
- j Spreizungsachsenabstand auf der Fahrbahn *distance of steering axes on road*
- $b_F$  Spurweite vorne *front track*
- $r_o$  Lenkrollradius (in der Darstellung positiv) *scrub radius*



Die Bahnradien ergeben sich aus den Abmessungen wie folgt: <sup>s</sup>

$$\delta_o = \arcsin \frac{l}{R_S}$$

$R_S$  Spurbreisradius, mm

$R_{S,R}$  Spurbreisradius hinten, mm

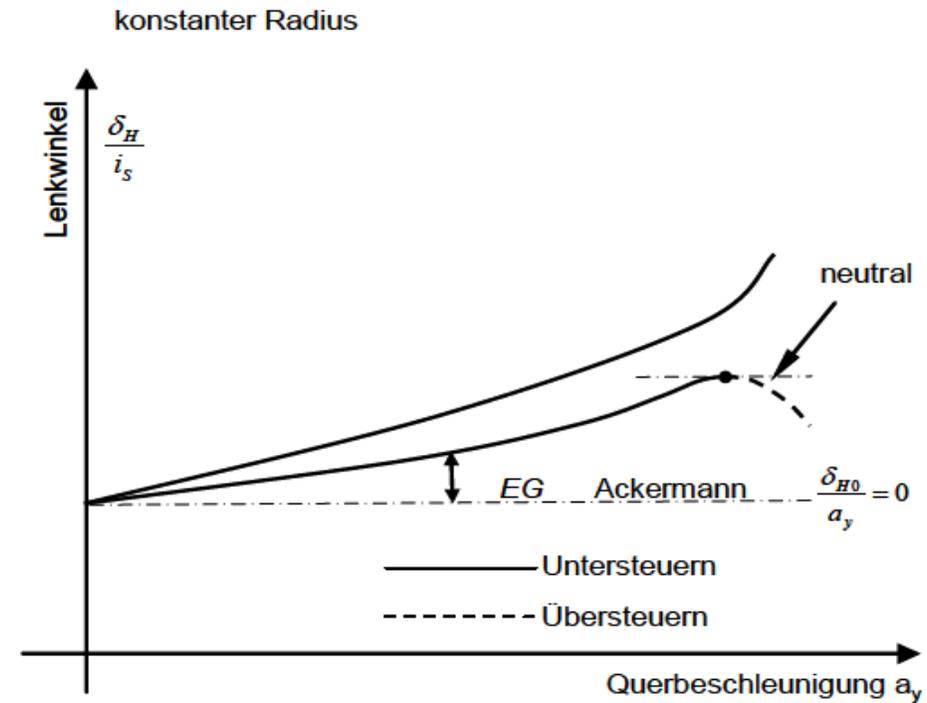
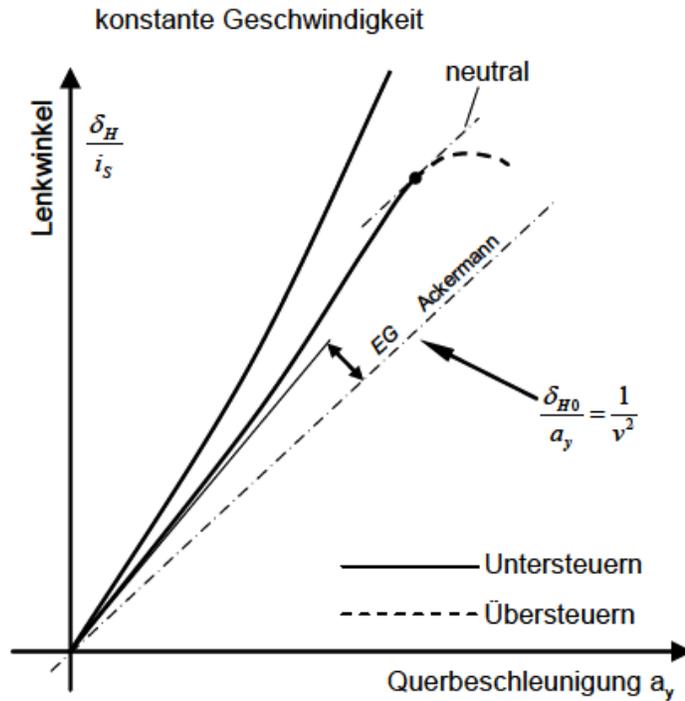
$\delta_o$  Lenkwinkel des kurvenäußeren Rads, °

$$R_{tc,i} = \sqrt{R_S^2 - l^2} - 0,5(b_F + b_R + b_{V,R})$$

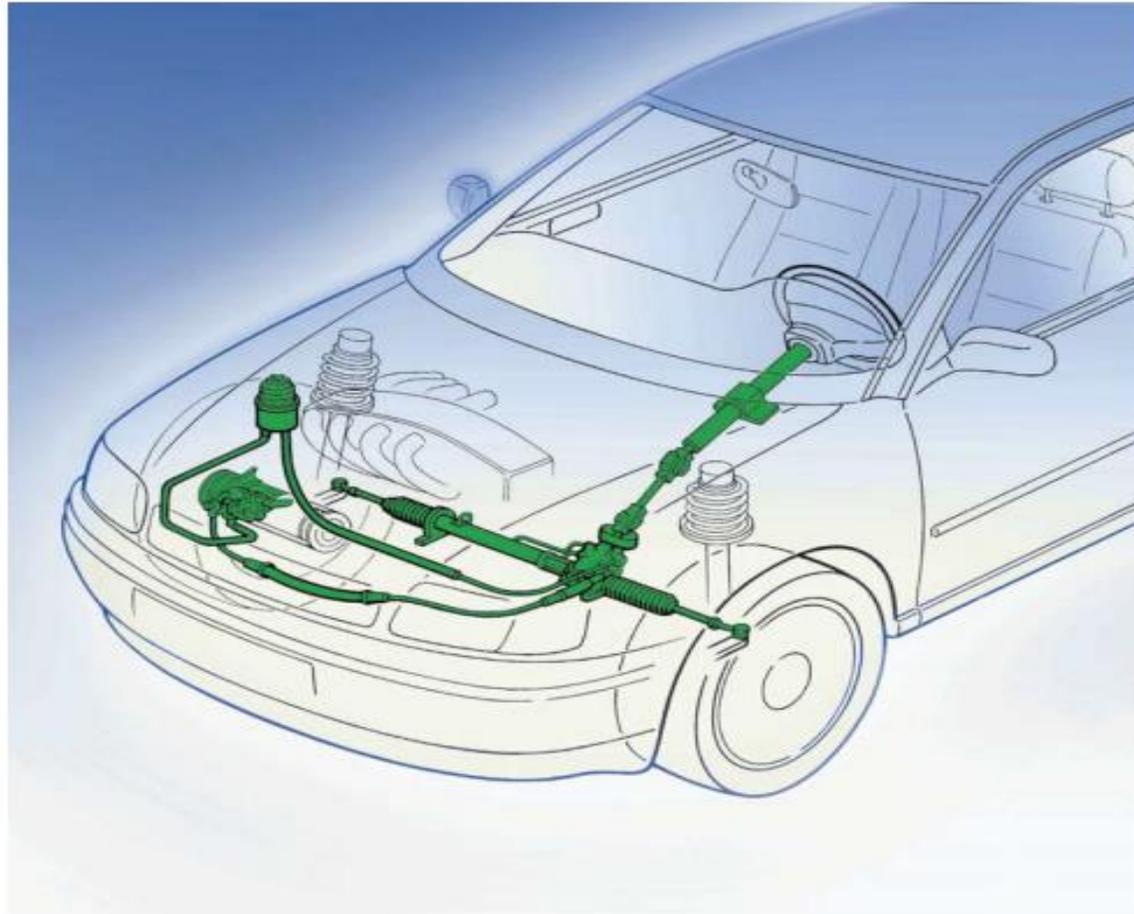
$R_{tc,i}$  Bordsteinradius des Hinterrads, mm

$b_{V,R}$  Reifenbreite hinten, mm

## Stationäre Kreisfahrt – Unter- und Übersteuern



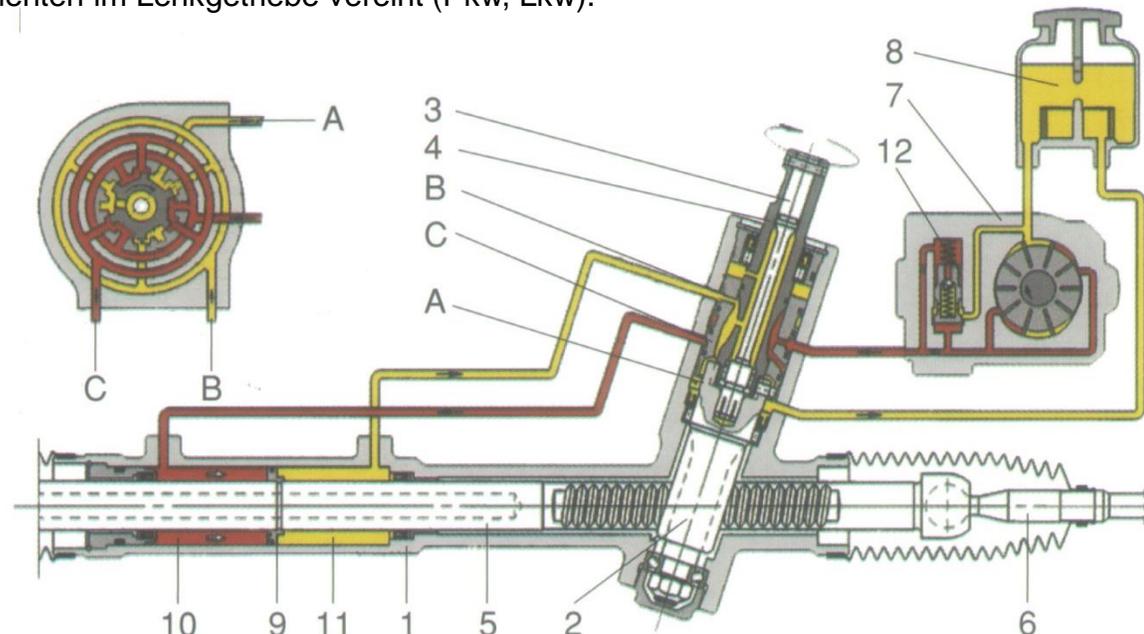
## Hydraulische Lenkanlage



## Hilfskraftlenkung – Hydromechanische Lenkung

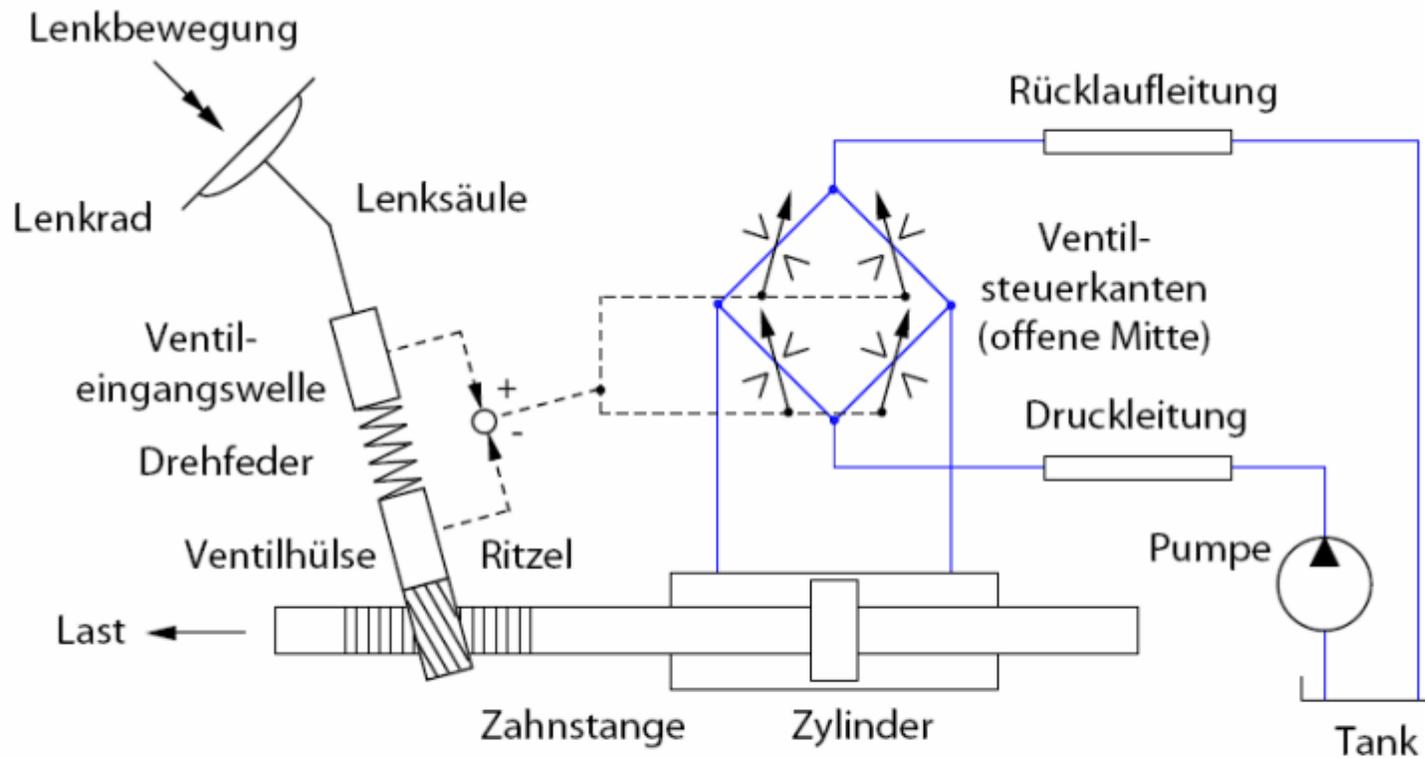
- Hydraulische Unterstützung der vom Fahrer aufzubringenden Lenkkräfte (Anteil 70...90%).
- Rückmeldung über Radkräfte darf nicht verloren gehen.
- Last- und geschwindigkeitsabhängige Regelung der Unterstützungskraft.
- Betrieb der Pumpe ist jedoch permanent notwendig, da Druckaufbau sonst zu träge.
- Bauweisen:
  - Halbblockbauweise – nur Regelventil im Lenkgetriebe, Arbeitszylinder an den Rädern (für schwere Nfz).
  - Vollblockbauweise – alle Komponenten im Lenkgetriebe vereint (Pkw, Lkw).

- |    |                        |
|----|------------------------|
| 1  | Gehäuse                |
| 2  | Antriebsritzeln        |
| 3  | Drehstab               |
| 4  | Drehschieber           |
| 5  | Zahnstange             |
| 6  | Spurstange             |
| 7  | Lenkungspumpe          |
| 8  | Ölbehälter             |
| 9  | Kolben                 |
| 10 | Arbeitszylinder 1      |
| 11 | Arbeitszylinder 2      |
| 12 | Druckbegrenzungsventil |



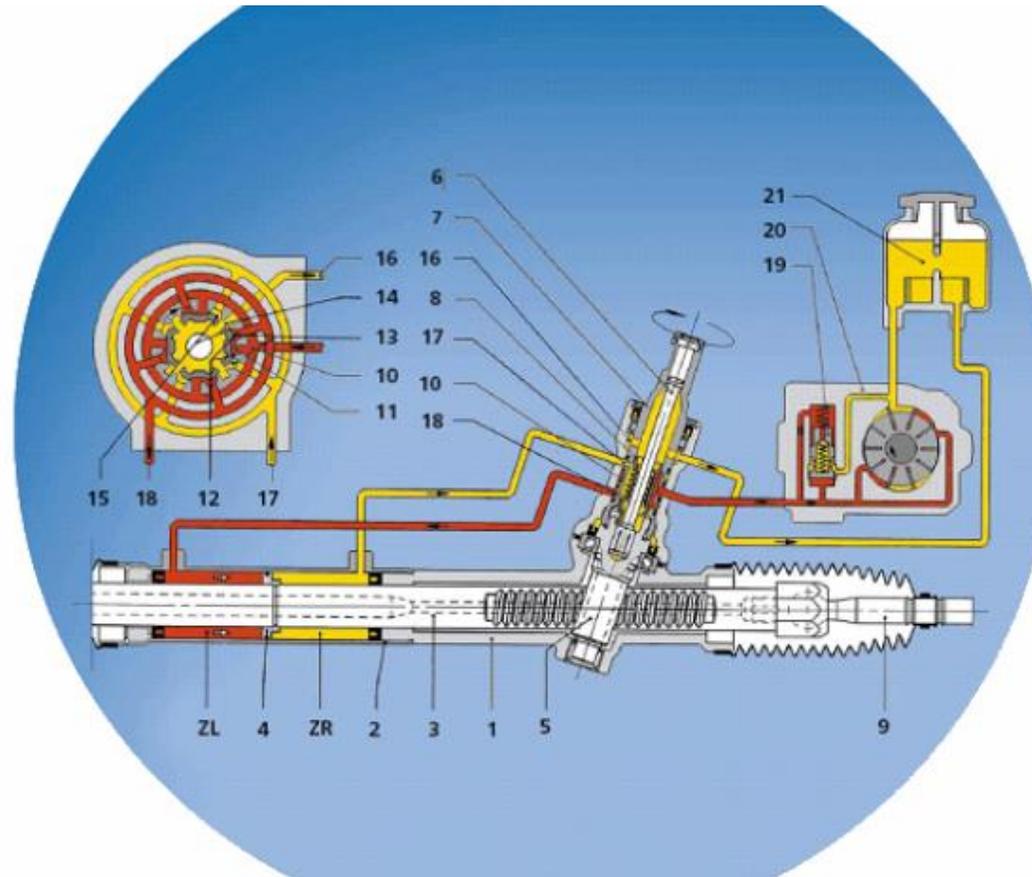
Fahrzeugkonzepte und -systeme WS 2020/2021

## Hydraulische Lenkanlage



## Zahnstangen Hydrolenkung

- 1 Gehäuse
  - 2 Zylinderrohr
  - 3 Zahnstange
  - 4 Kolben
  - 5 Antriebsritzel
  - 6 Drehstab
  - 7 Ventilkörper
  - 8 Regelbuchse
  - 9 Spurstange
  - 10 Zulauf-Radialnut
  - 11 Zulauf-Steuernut
  - 12 Zulauf-Steuerkante
  - 13 Axialnut
  - 14 Rücklauf-Steuernut
  - 15 Rücklauf-Steuerkante
  - 16 Rücklaufraum
  - 17 Radialnut
  - 18 Radialnut
  - 19 Druck- und Strombegrenzungsventil
  - 20 Lenkungspumpe
  - 21 Ölbehälter
- ZL Arbeitszylinder, links  
ZR Arbeitszylinder, rechts



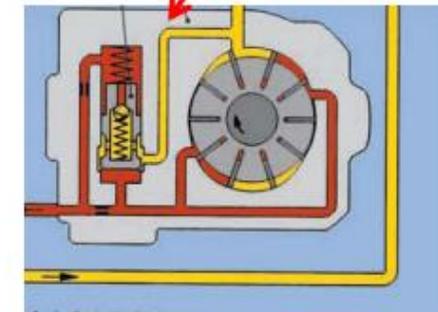
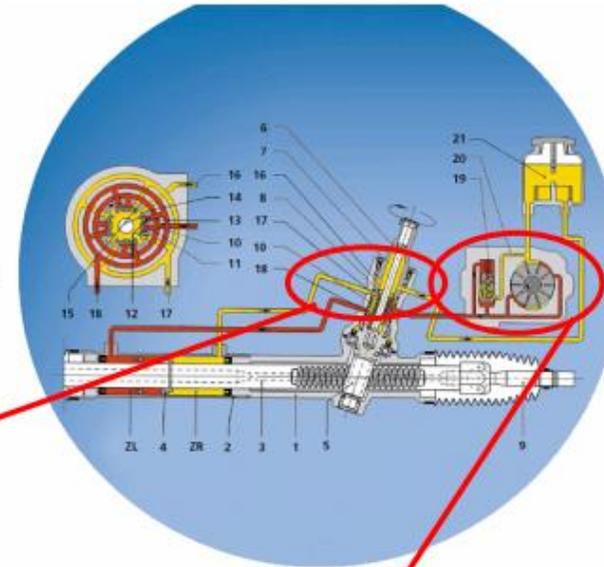
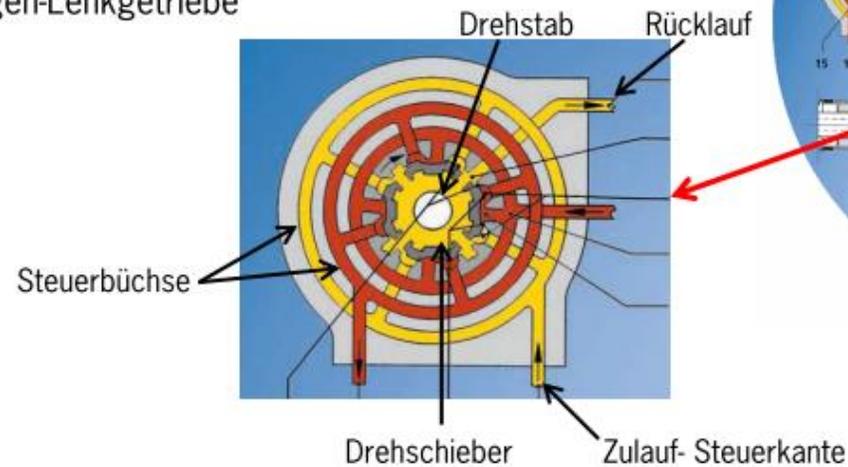
## Zahnstangen Hydrolenkung

Aufbau:

Steuerventil und Flügelzellenpumpe

hydraulischer Arbeitszylinder

mechanisches Zahnstangen-Lenkgetriebe



Drehschieber + Steuerbüchse → Drehschieberventil

Drucköl fließt über Zulauf in den entsprechenden Arbeitsraum

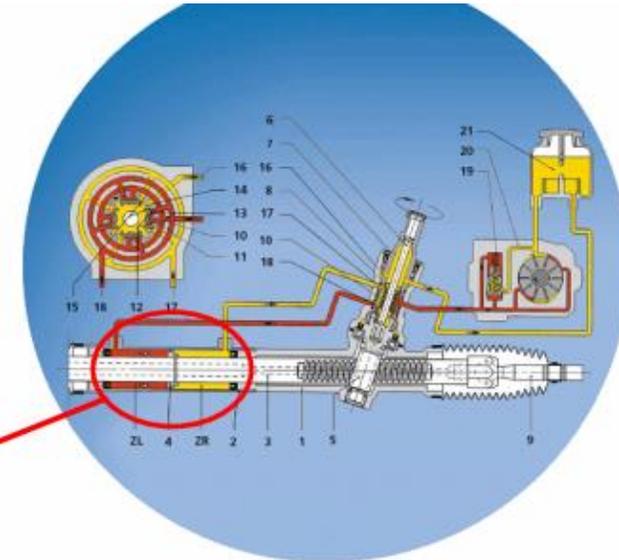
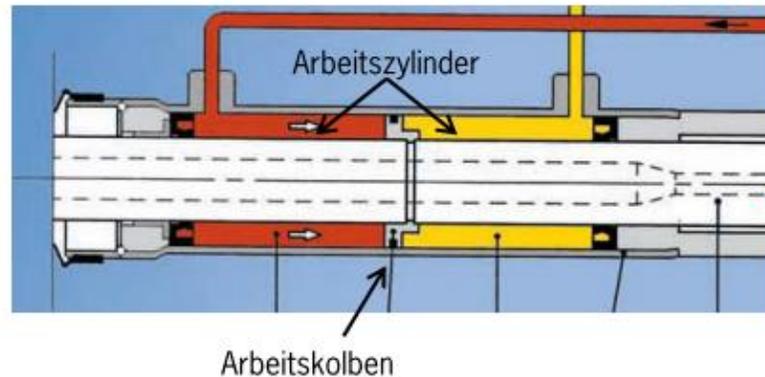
## Zahnstangen Hydrolenkung

Aufbau:

hydraulischer Arbeitszylinder

Steuerventil und Flügelzellenpumpe

mechanisches Zahnstangen-Lenkgetriebe



- Flüssigkeitsdruck wirkt entweder auf die rechte oder linke Seite des Arbeitskolbens und erzeugt dort die hydraulische Unterstützungskraft
- Wird das Lenkrad nicht weiter verdreht, so gehen Drehstab und Drehschieberventil in die Neutralstellung zurück und das Öl fließt über den Rücklauf in den Ölbehälter zurück.

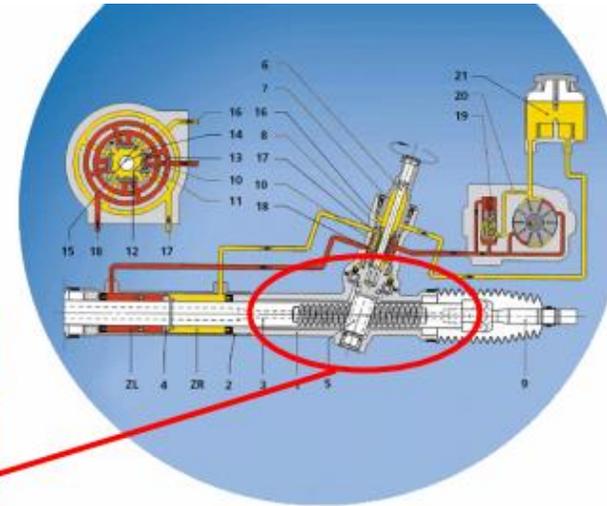
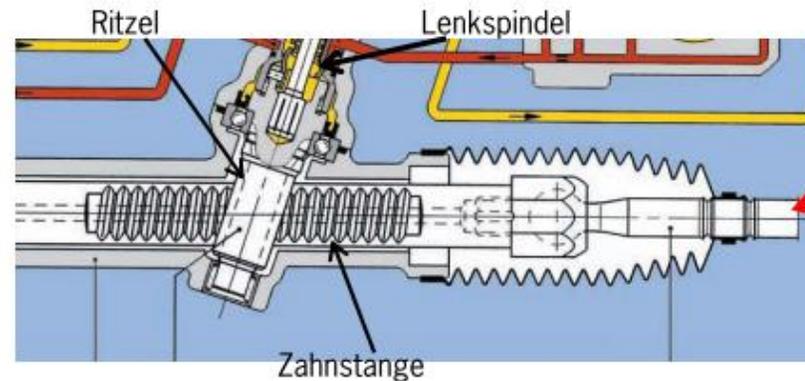
## Zahnstangen Hydrolenkung

Aufbau:

mechanisches Zahnstangen-Lenkgetriebe

hydraulischer Arbeitszylinder

Steuerventil und Flügelzellenpumpe



- Das im Lenkgehäuse gelagerte Ritzel greift in Verzahnung der Zahnstange
- Drehung am Lenkrad bewirkt Axialverschiebung der Zahnstange durch Drehbewegung des Ritzels
- Bewegung der Zahnstange

⇒ translatorische Bewegung der Spurstange

⇒ führt über die Lenkinematik über zu einer rotatorischen Bewegung von Schwenklager + Rad

## Zahnstangen Hydrolenkung

### Steuerventil

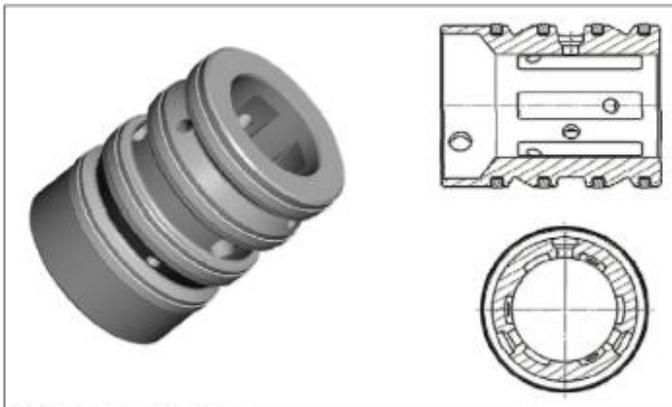
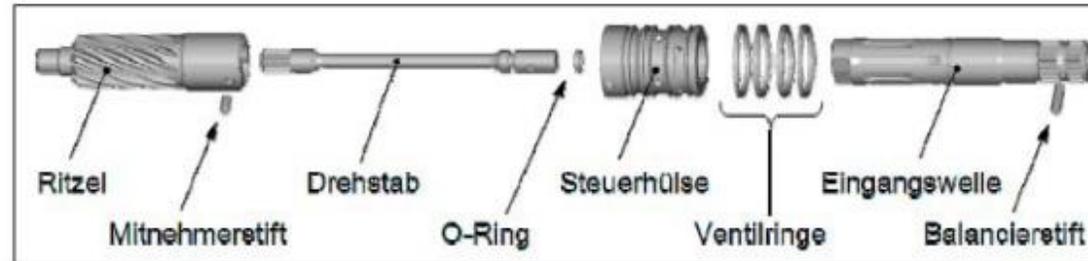
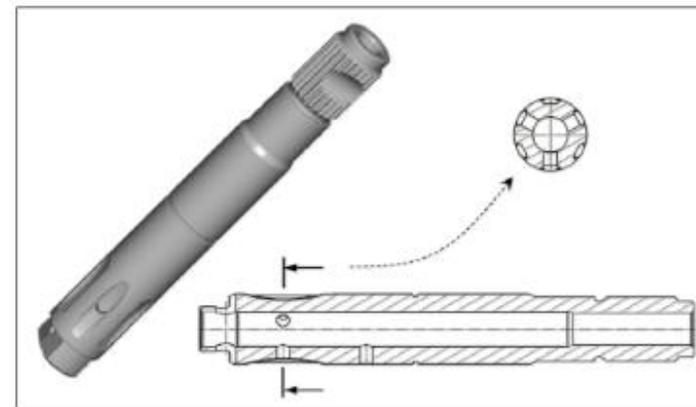
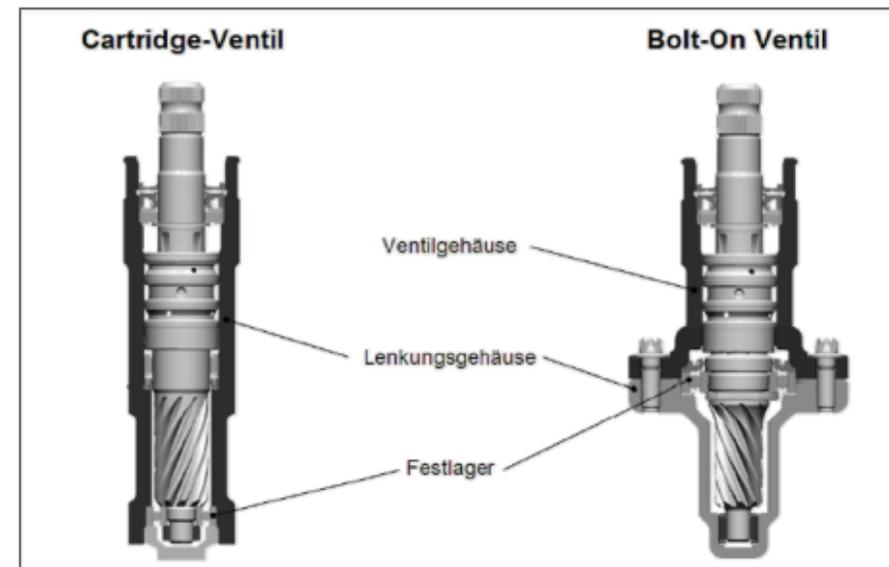
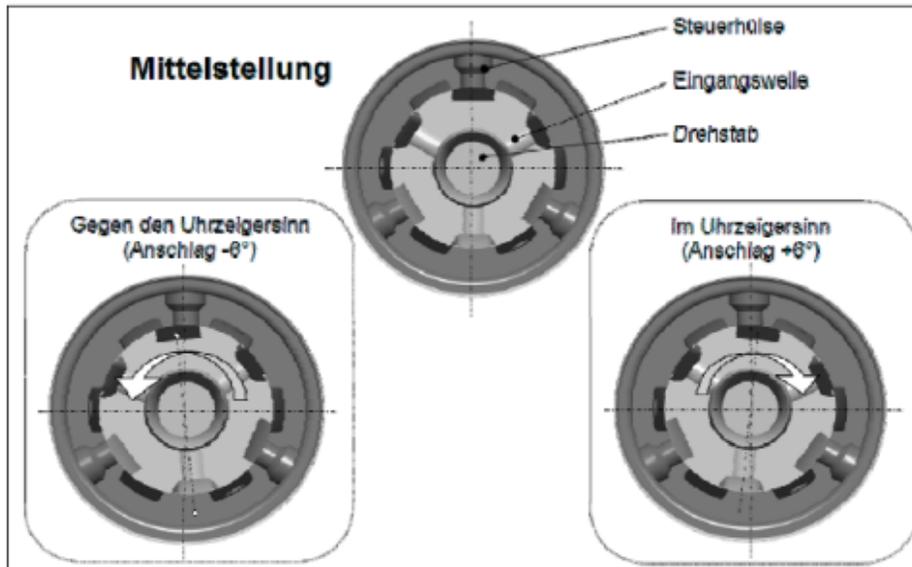


Bild 2.15: Steuerhülse mit Ventilringen



## Zahnstangen Hydrolenkung

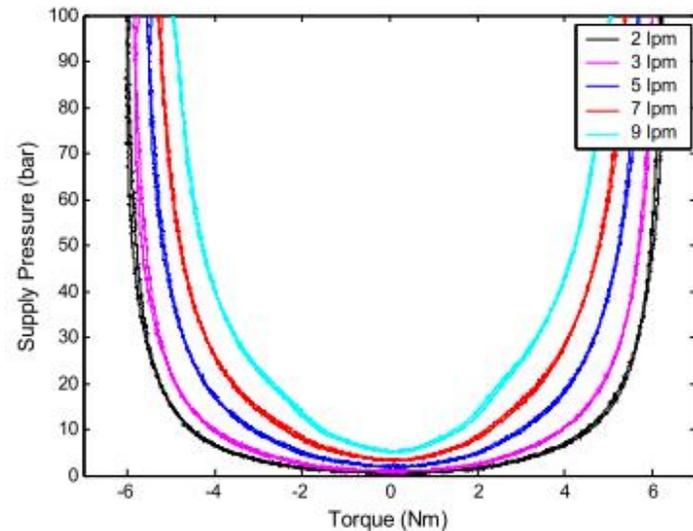
### Steuerventil



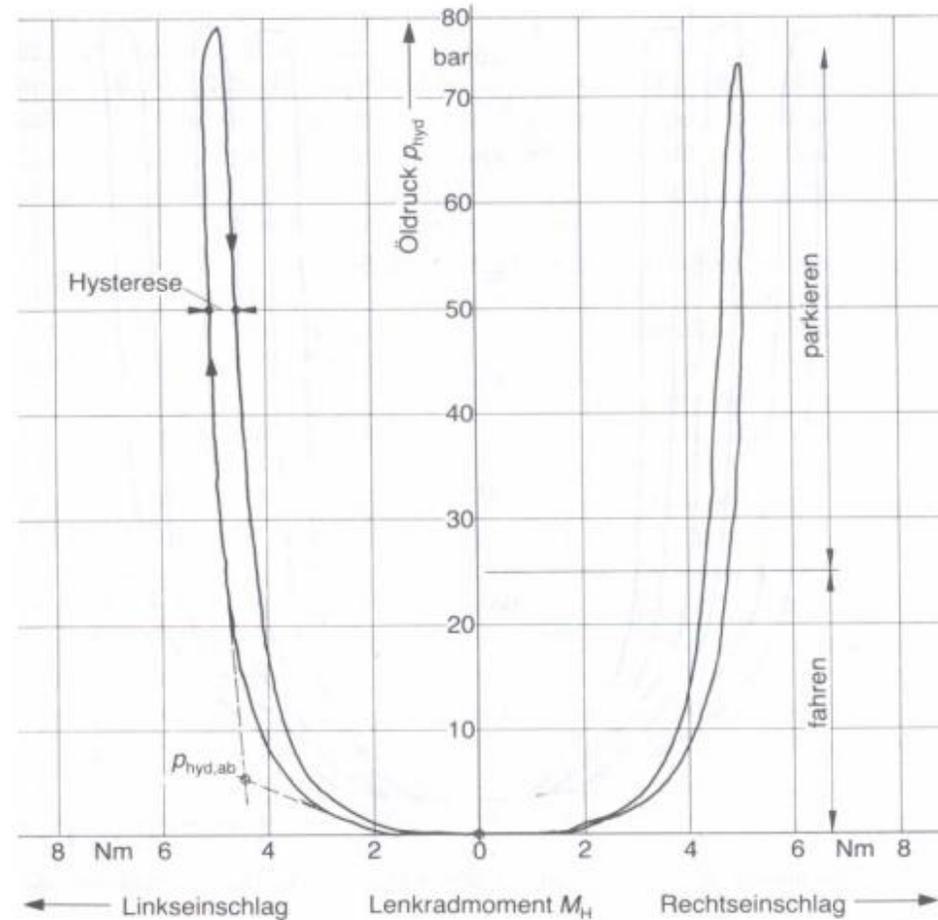
## Zahnstangen Hydrolenkung

Charakteristische Ventilkennlinie:

Als Ventilkennlinie bezeichnet man die Abhängigkeit zwischen Öldruck im Arbeitszylinder und dem am Lenkrad aufgetragenen Lenkmoment.



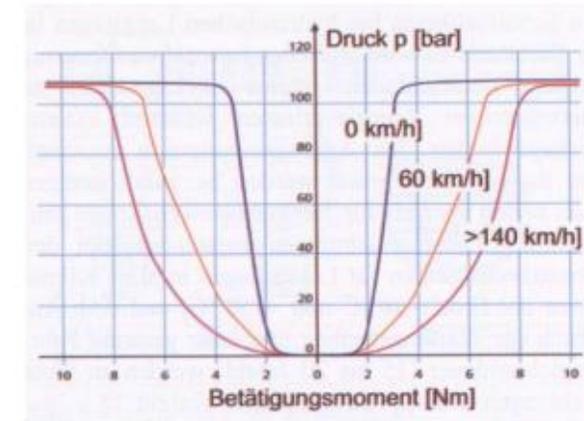
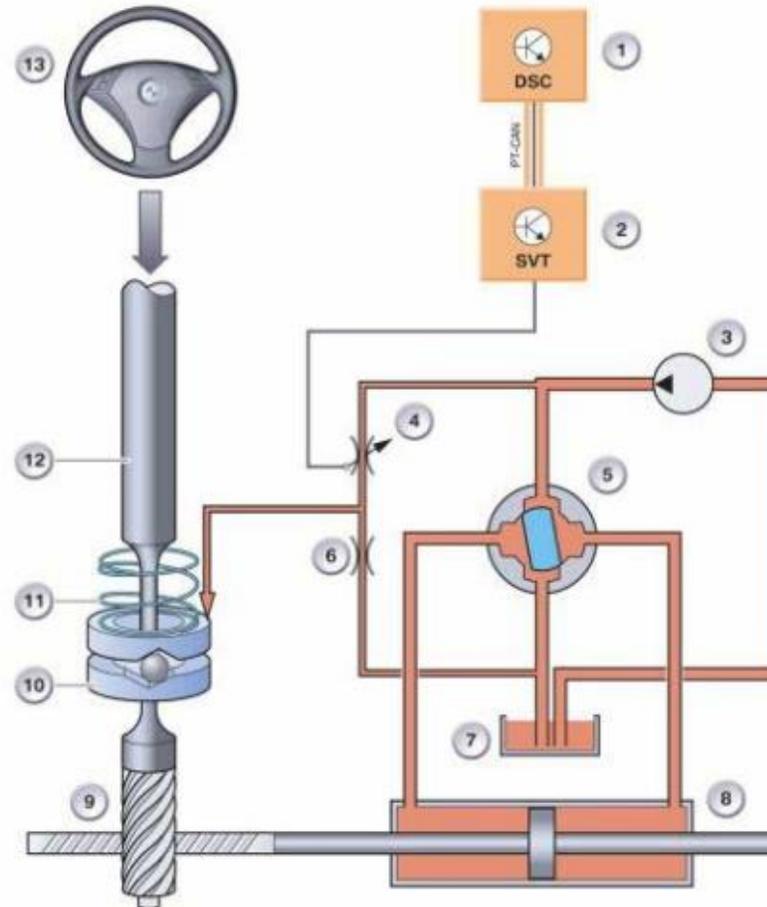
Abhängigkeit der Ventilkennlinie vom Volumenstrom



Grafik: li. Prof. Pfeffer; re. Vogel Fachbuch „Fahrwerktechnik“

## Servotronik

- 1 DSC Steuergerät
- 2 Servotronic- Steuergerät
- 3 Lenkhilfpumpe
- 4 Servotronic Ventil
- 5 Drehschieber im Lenkgetriebe
- 6 Drossel
- 7 Ausgleichsbehälter
- 8 Kolben auf der Zahnstange
- 9 Lenkgetriebe
- 10 Zentriereinheit
- 11 Feder für die Zentriereinheit
- 12 Torsionsstab
- 13 Lenkrad



Servotronic- Ventilkennlinie

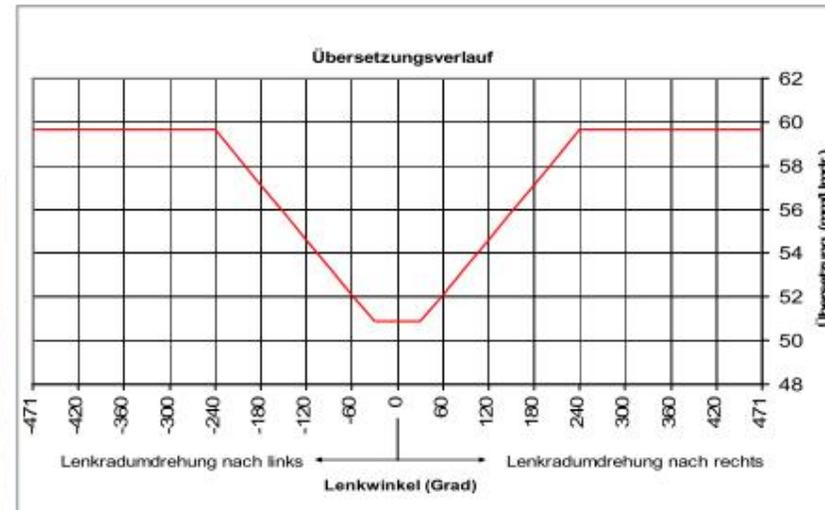
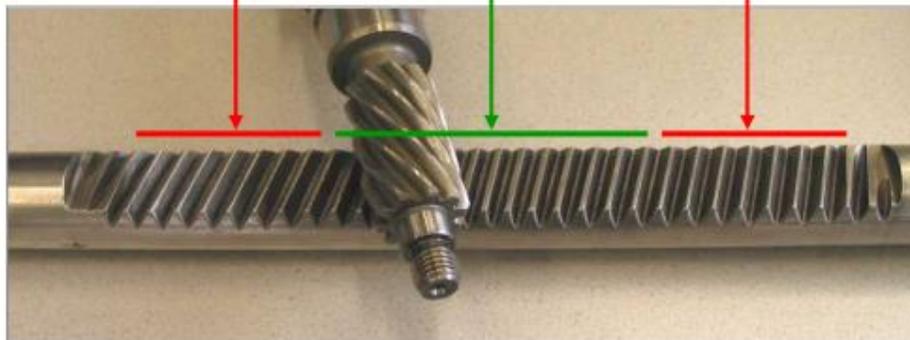
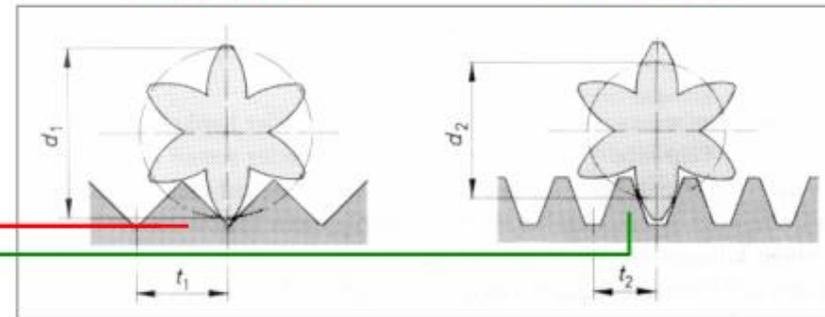
## Zahnstangenlenkung mit variabler Übersetzung

Schematischer Übersetzungsverlauf bei Zahnstange mit variabler Übersetzung und normal verzahntem Ritzel.

Durch unterschiedlichen Modul ändert sich die Teilung „t“ und der Wälzkreisdurchmesser „d“.

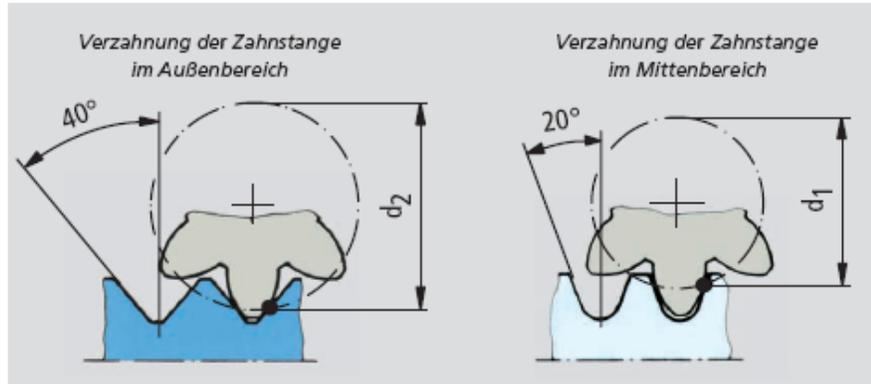
Verzahnung der Zahnstange im Außenbereich

Verzahnung der Zahnstange im Mittenbereich



## Übersetzung

- Zahnstangenlenkung kann konstant oder variabel ausgeführt werden



Außenbereich

- Übersetzung wird größer

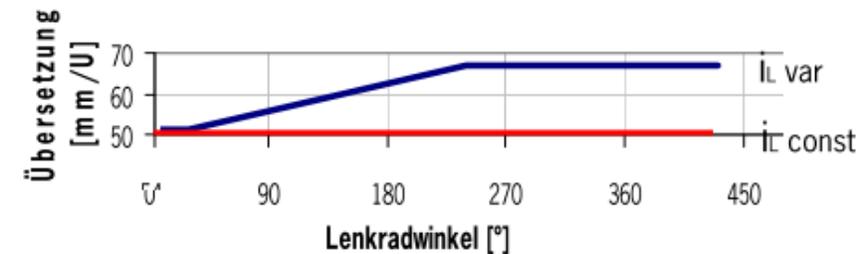
Lenkung wird direkter

Mittenbereich (Geradeausfahrt)

- gewohntes Reagieren der Lenkung

Vorteile:

- Lenkung ermöglicht präzise, schnelle Lenkreaktion bei höheren Geschwindigkeiten
- gutes Handling beim Parkieren und Wenden auf engem Raum



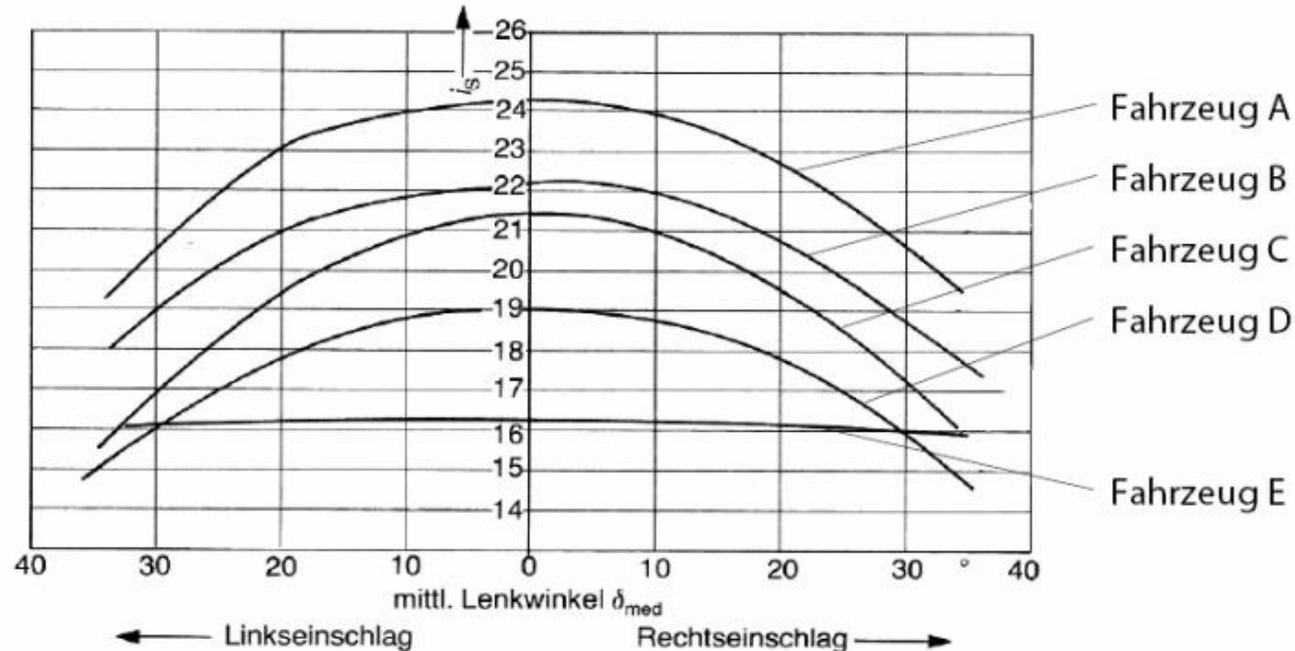
## Kinematische Lenkübersetzung

Fahrzeug  $i_s = \frac{\delta_L}{\delta_{med}}$

für Zahnstangenlenkung  $i_s = \frac{1}{i_L \cdot i_T}$

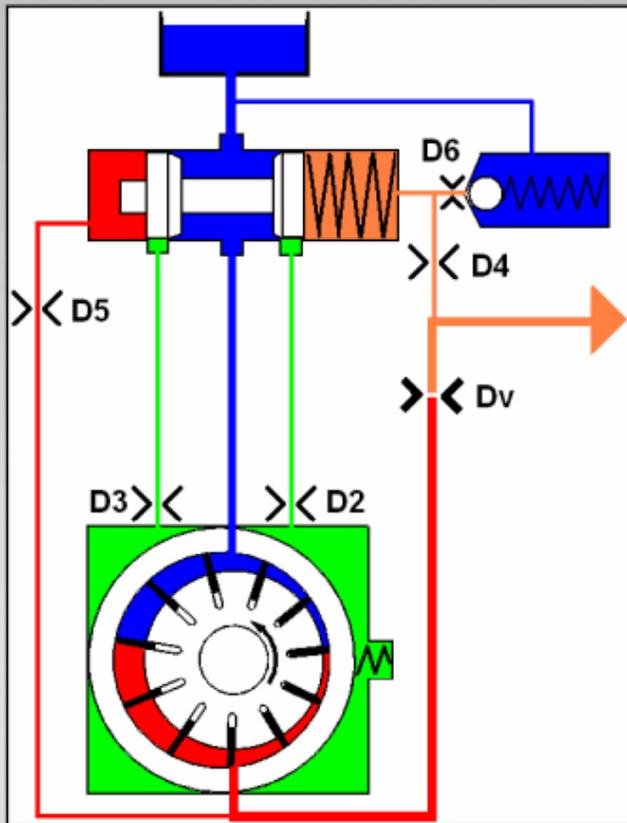
$i_s$  Gesamtübersetzung (Lenkwinkel/Radwinkel)  
 $\delta_L$  Lenkradwinkel  
 $\delta_{med}$  mittlerer Radlenkwinkel

$i_L$  Lenkgetriebeübersetzung (Weg/Lenkwinkel)  
 $i_T$  Lenkgestängeübersetzung (Radwinkel/Weg)



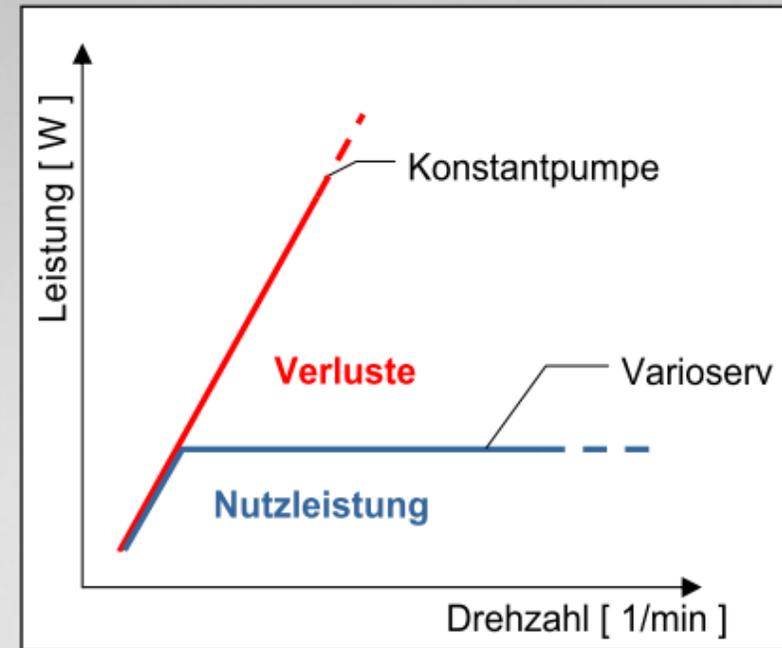
Grafik: Vogel Fachbuch „Fahrwerktechnik“

## Reduktion des Energieverbrauchs durch Varioserv



Verstellbare Flügelzellenpumpe.  
Das geometrische Fördervolumen kann abhängig vom Systemdruck verändert werden:

- Reduzierter Kraftstoffverbrauch
- Geringerer CO<sub>2</sub>-Ausstoß



Quelle: Steering Tec  
Dr. Runge

## Elektrohydraulische Lenkanlagen

Ölpumpe wird nicht mehr vom Fahrzeugmotor, sondern von einem eigenständigen Elektromotor angetrieben.

Zielvorgaben:

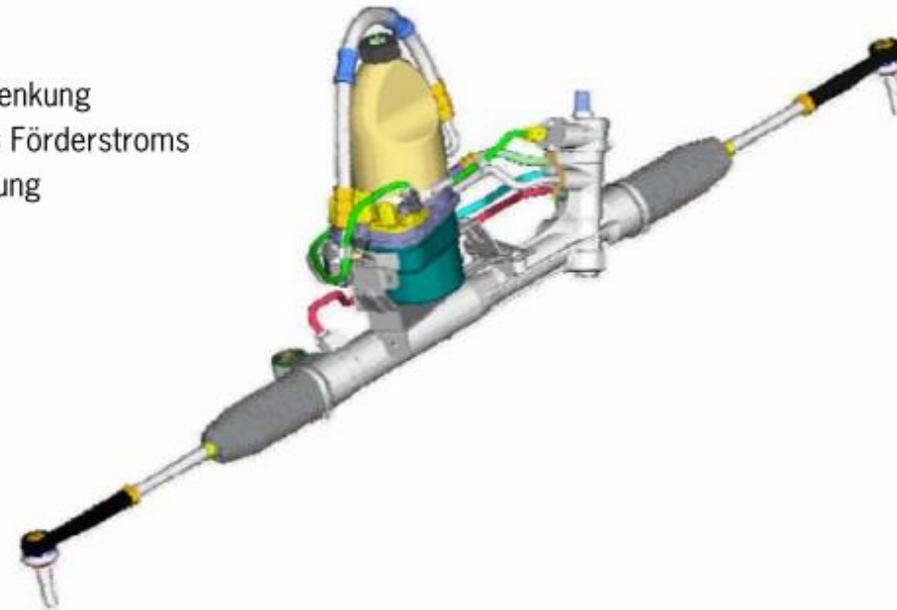
- vollwertige Lenkunterstützung beim Parkieren
- Lenkungscharakteristik wie bei konventioneller hydraulischer Lenkung
- Möglichkeit des Geschwindigkeitsabhängigen Regelbarkeit des Förderstroms
- Regelung der Pumpendrehzahl auf die gewünschte Förderleistung
- möglichst geringer Verbrauch

Vorteile:

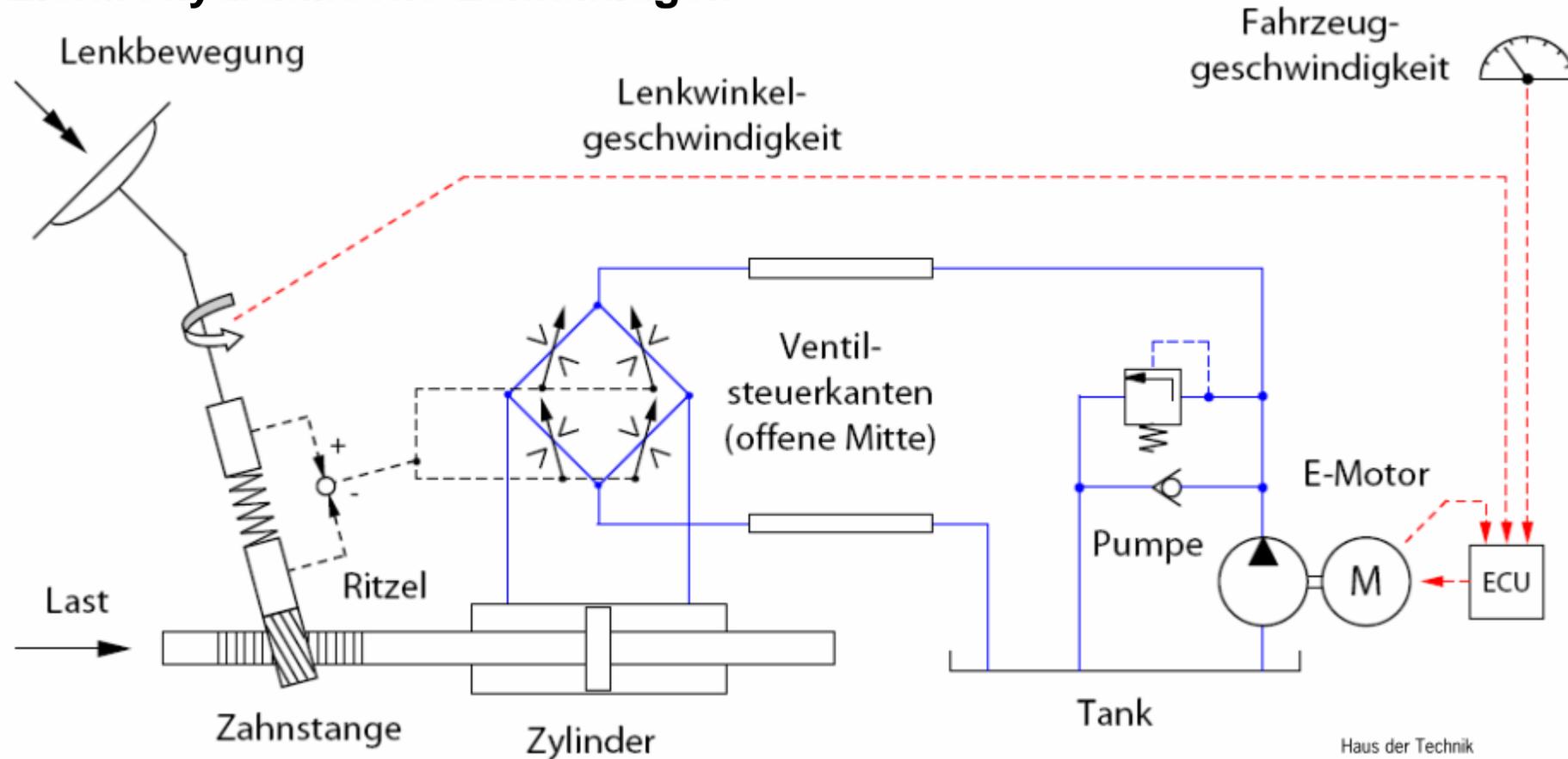
- Einbau in temperaturgünstiger Umgebung
- direkte Nähe zum Lenkgetriebe
  - ⇒ Kostenvorteil von kurzen Leitungen
- einfache Regelung des Förderstroms

Nachteile:

- kurze Leitungen können Lenkungsgeräusche verursachen
- hohe Anforderungen an das Lenkungsöl bei tiefen Temperaturen



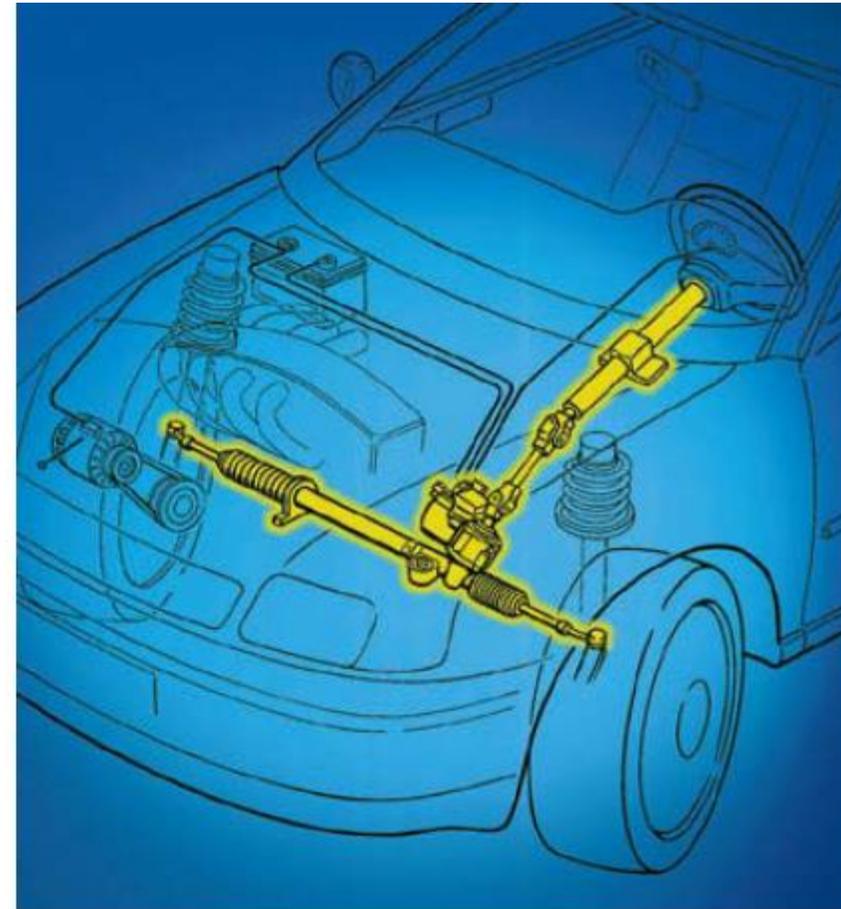
## Elektrohydraulische Lenkanlagen



Haus der Technik  
 Lenksysteme in Kraftfahrzeugen  
 Prof. Dr.-Ing. Hartmut Ulrich, FH Köln

## Elektromechanische Lenkung

Die für die Servowirkung benötigte Unterstützungskraft wird von einem Elektromotor erzeugt, der von der Starterbatterie bei Bedarf mit elektrischer Energie versorgt wird.



## System EPS



Elektronisches Steuergerät



Drehmomentsensor



Motordrehzahl



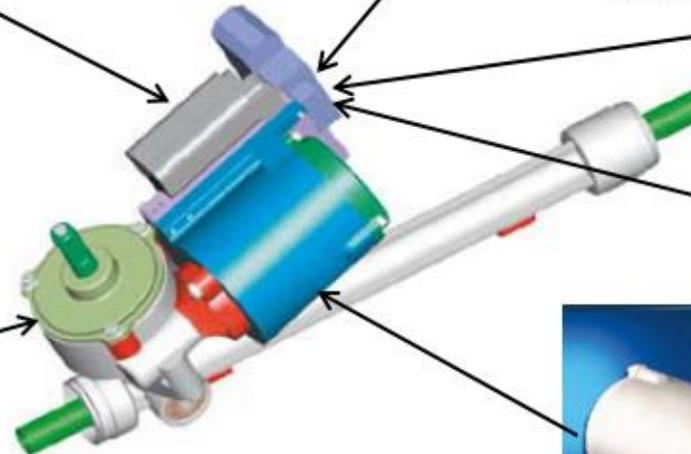
Fahrzeuggeschwindigkeit



Stromversorgung



Elektromotor



## EPS



Fahrer führt Lenkbewegung aus und bringt somit ein Lenkdrehmoment auf einen Torsionsstab (Drehmomentsensor) auf



Sensor registriert das entsprechende Lenkmoment und die Lenkgeschwindigkeit

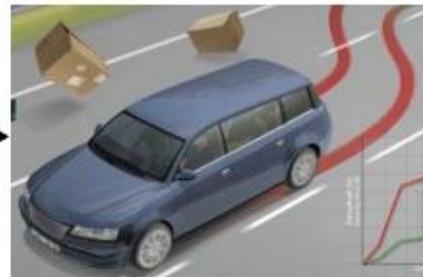


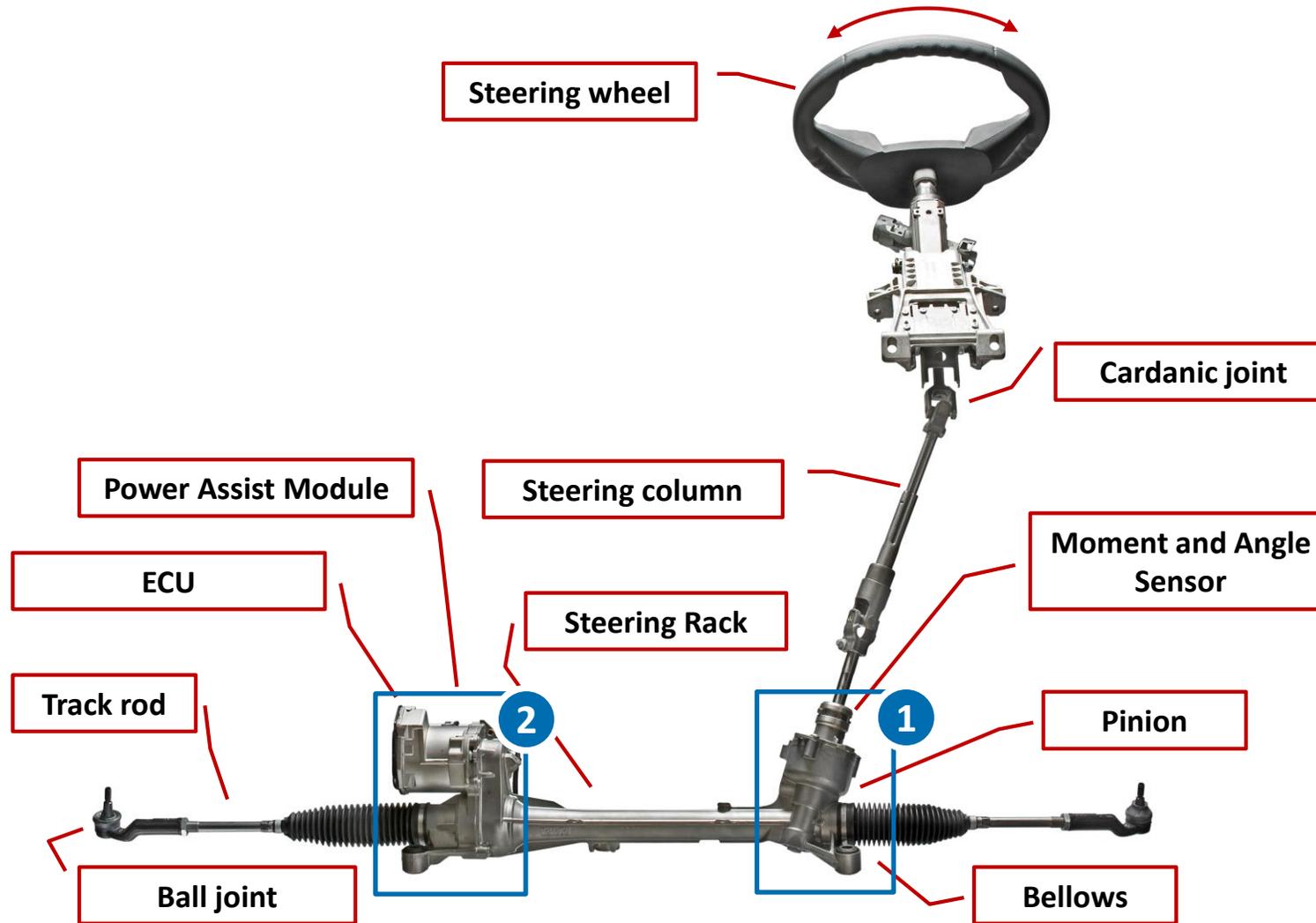
Eingangsdaten werden an das Steuergerät weitergeleitet



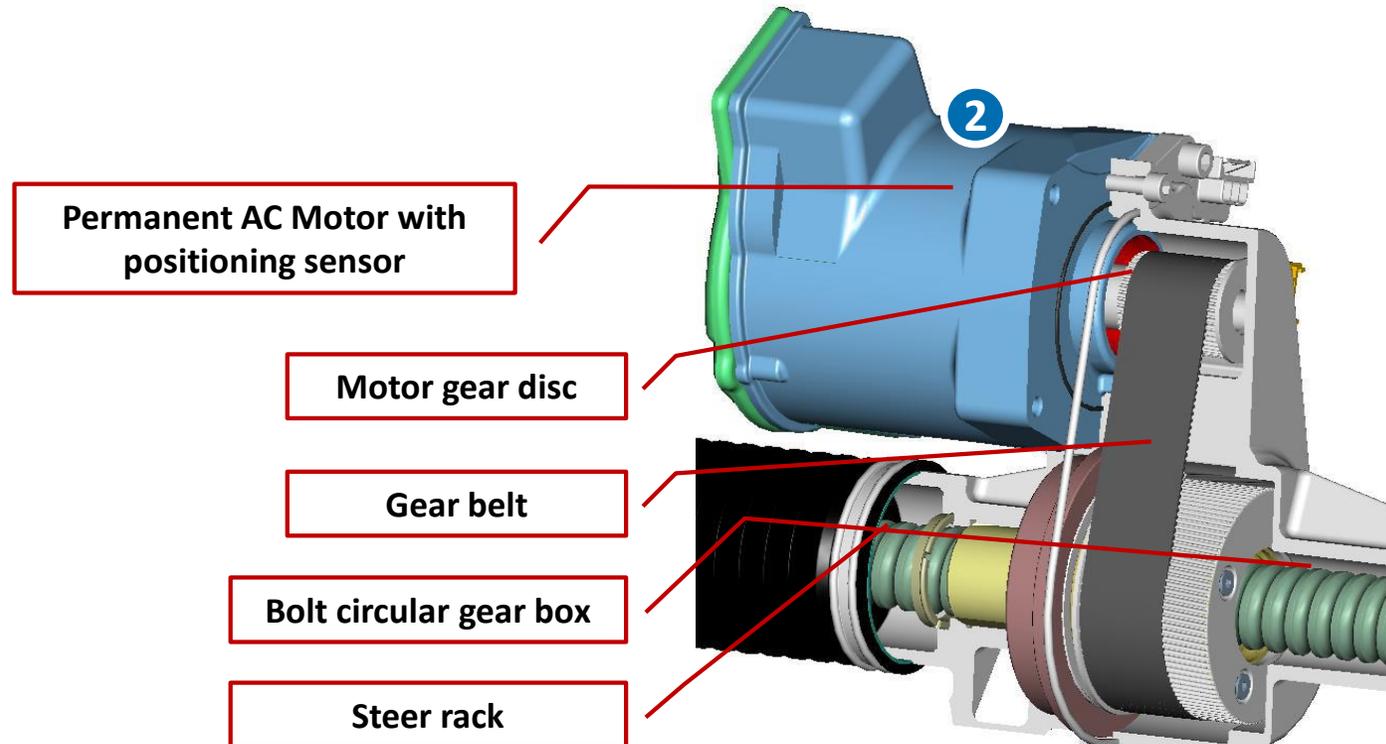
Steuergerät berechnet die erforderliche Lenkunterstützung und sendet Daten an den Servomotor

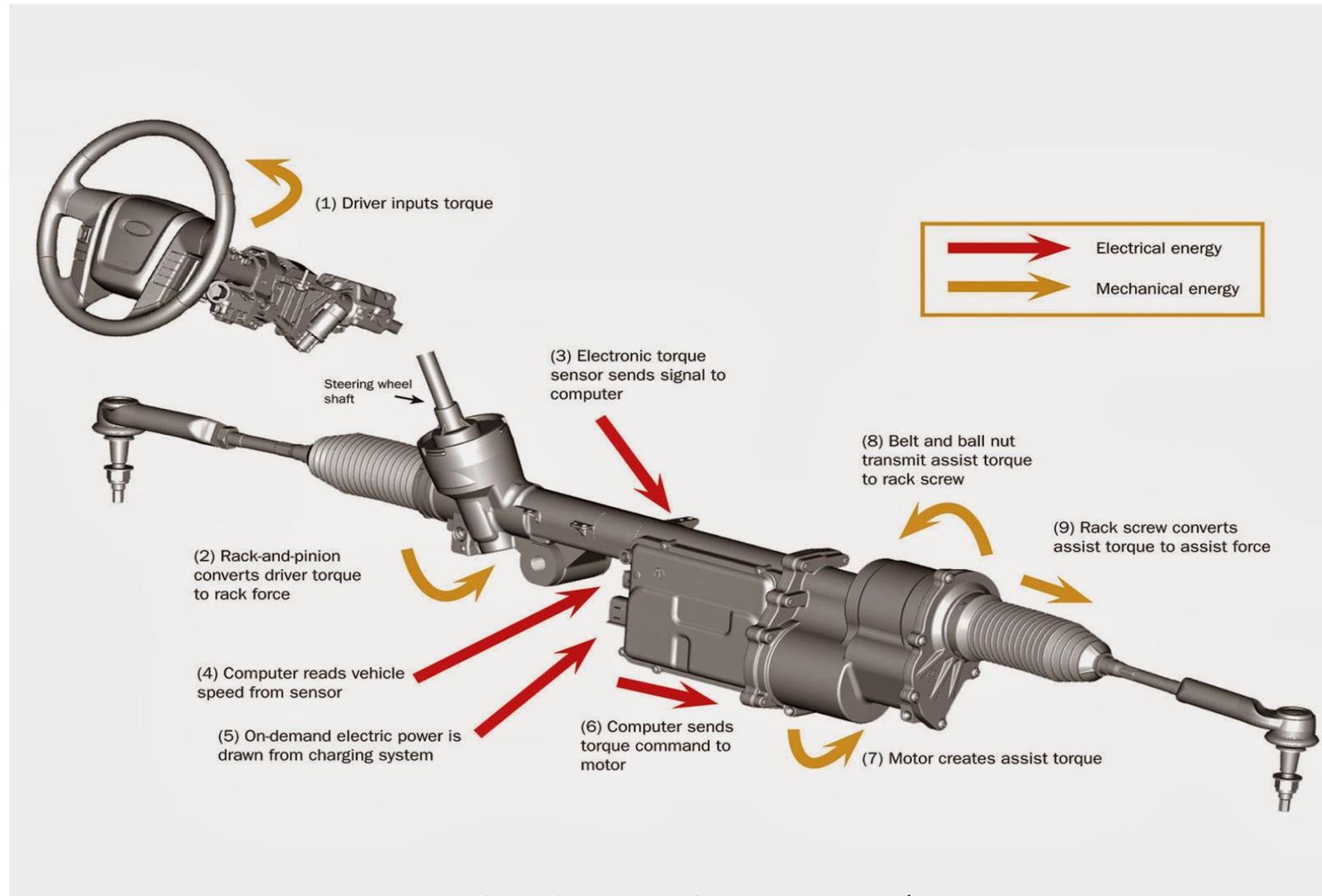
Motor überträgt das Servomoment an ein Schnecken- oder Kugelumlaufgetriebe auf Lenksäule, Ritzel, Doppelritzeln oder Zahnstange der mechanischen Zahnstangenlenkung.

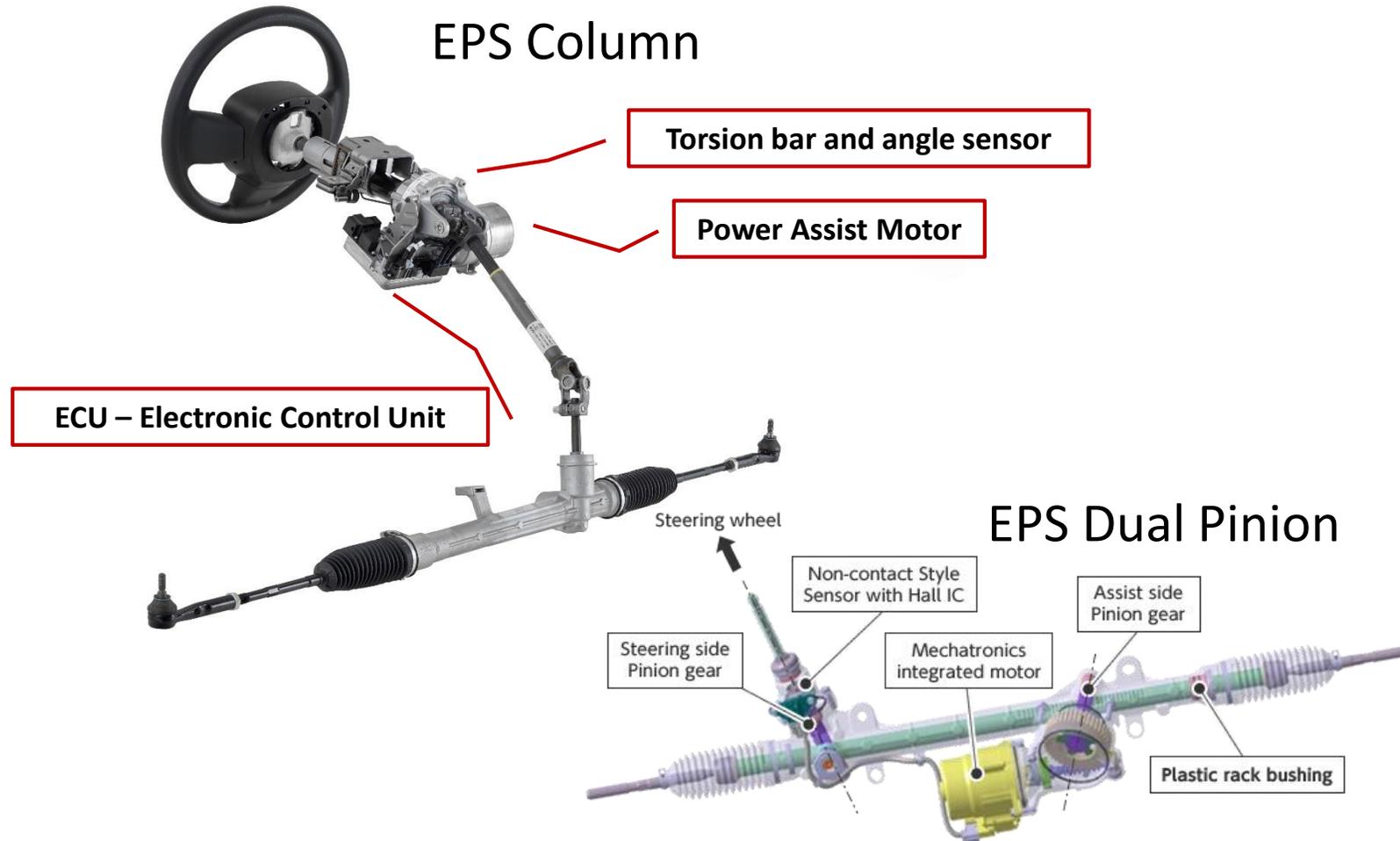




# APA – Achsparalleler Antrieb

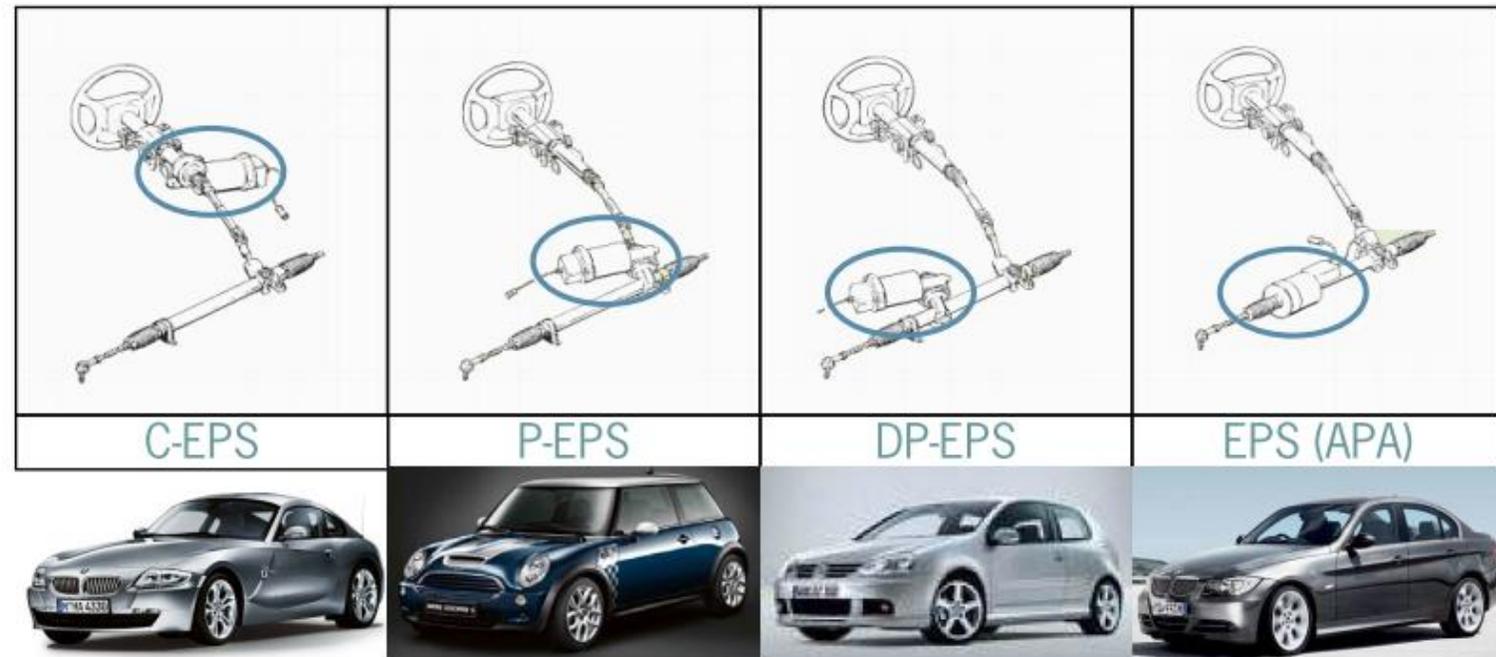




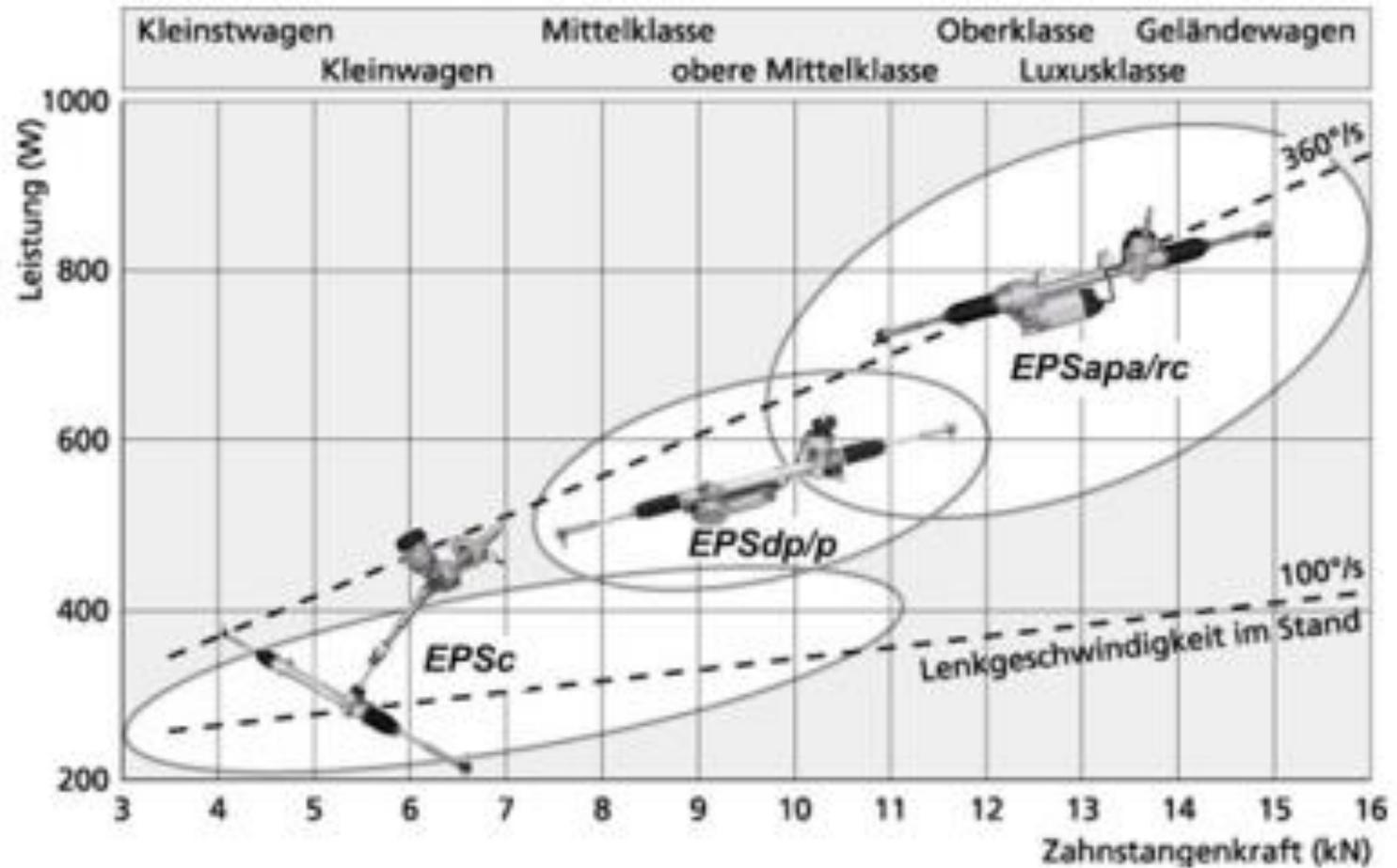


## Grundtypen

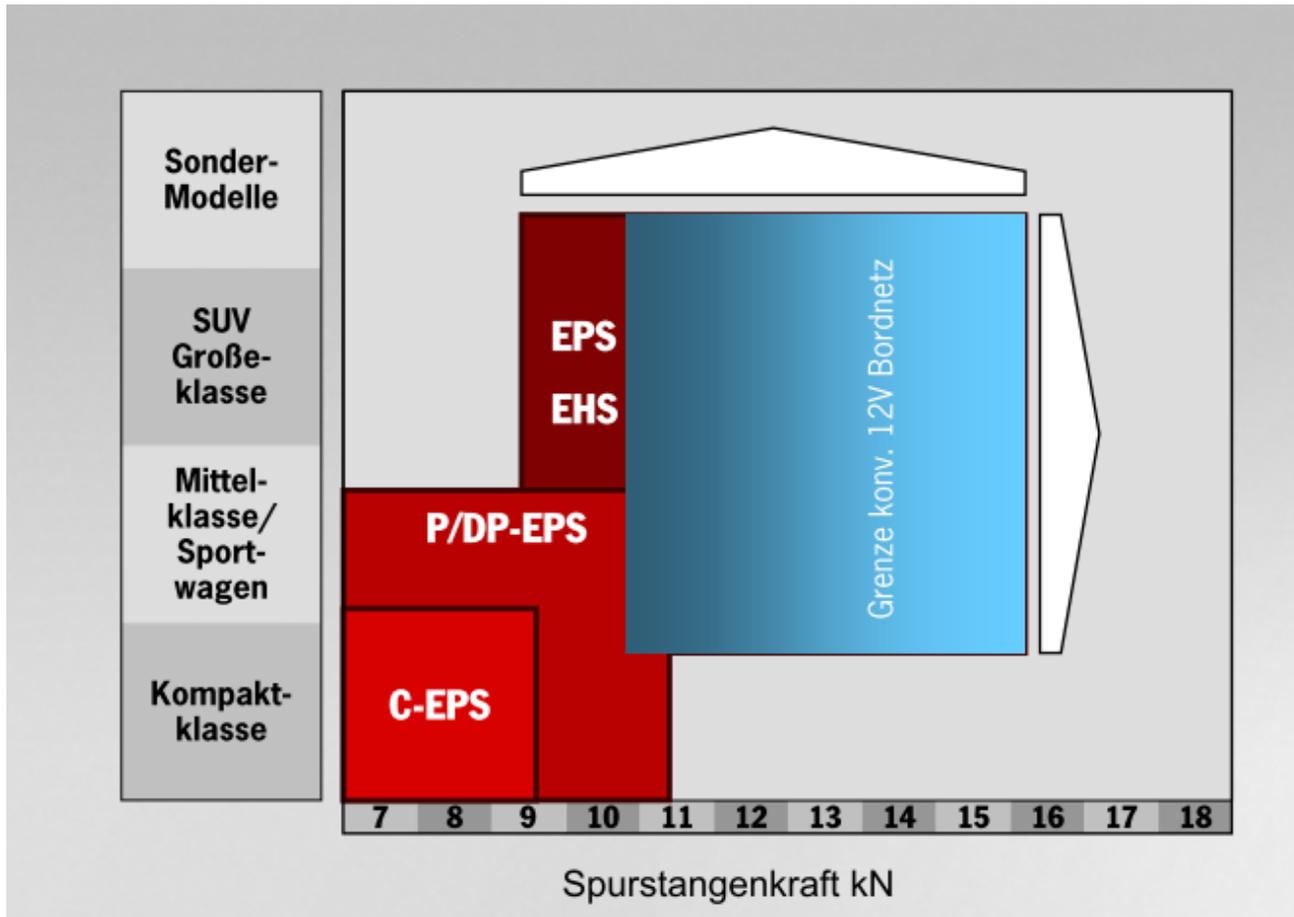
Je nach Einbauraum, Leistung des Bordnetzes und benötigter Zahnstangenkraft wird die Servoeinheit an der Lenksäule, am Ritzel, am Doppelritzeln oder parallel zur Zahnstange angebaut.



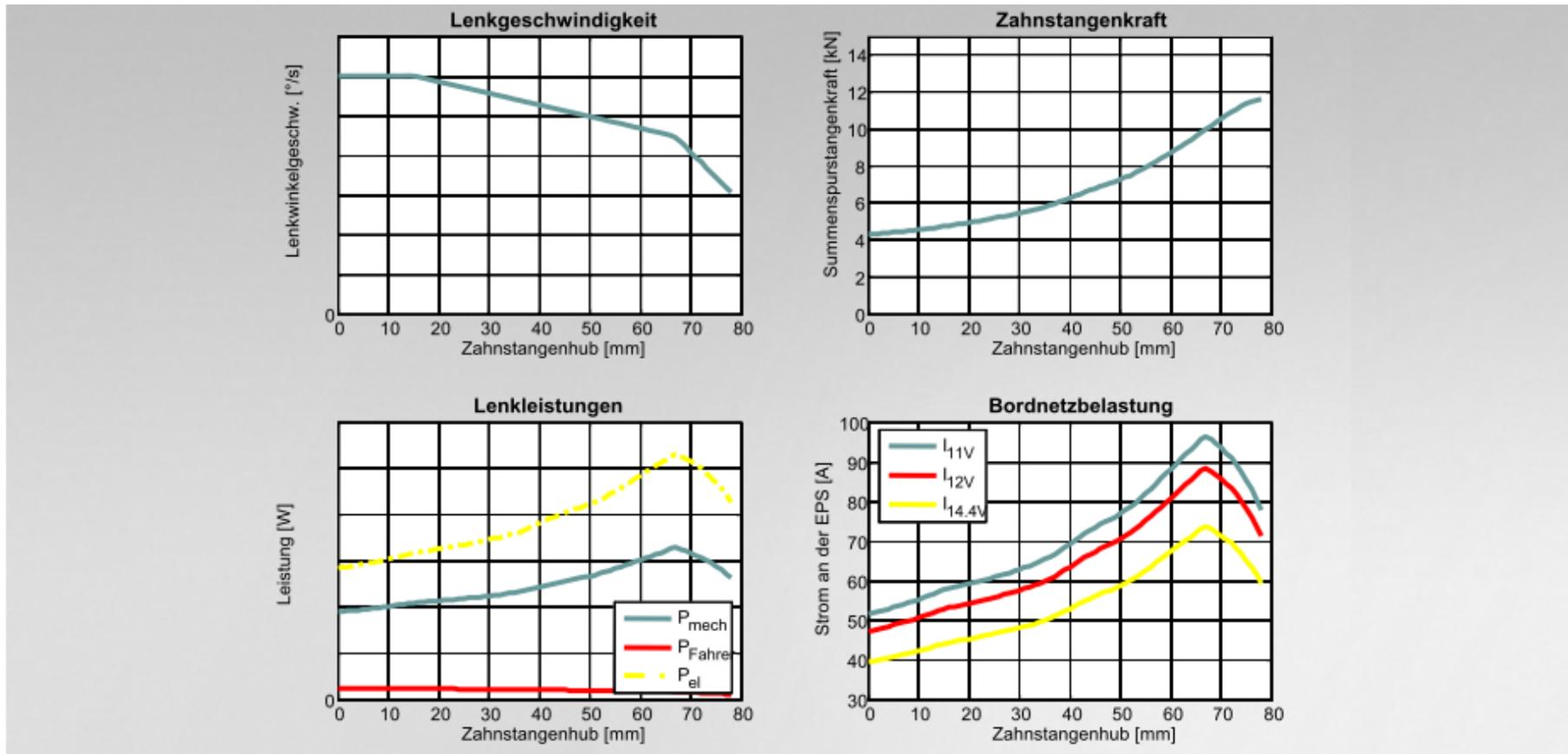
## Entwicklungstrend



## Anwendungsbereiche EPS Varianten



## Bordnetzbelastung



## EPS Vorteile

### Vorteile für den Kunden

- Erhöhte Funktionsvielfalt
  - geschwindigkeitsabhängiges Lenkradmoment
  - aktive Lenkradrückstellung
  - Lenkraddämpfungsfunktion
- Geringerer Kraftstoffverbrauch
- Steigerung der Produktqualität
- Umfangreiches Diagnosesystem für verbesserten Kundendienst

### Vorteile für den Fahrzeughersteller

- Differenzierungsmerkmal (gesteigerte Funktionalität)
- Beitrag zur Reduzierung der CO<sub>2</sub> Emissionen (ACEA)
- Akteur für Fahrerassistenzfunktionen
- Beitrag zur Reduzierung der Systemkomplexität
  - Entfall hydraulischer Komponenten
  - Gleiches Lenksystem in verschiedenen Fahrzeugtypen
  - Vereinfachte Logistik- und Montageprozesse

## Funktionsvielfalt

### Variable Lenkungsdämpfung

- In Abhängigkeit von Lenkmoment, Fahr- und Lenkwinkel-geschwindigkeit bewirkt diese Funktion eine aktive Bedämpfung freier Lenkradschwingungen um die Lenkungsmittellage



- Aktive Sicherheit wird durch implementierte „Dämpfungsfunktion“ gesteigert
- Die Schlingerneigung wird durch diese Funktion reduziert

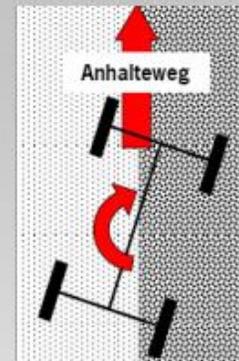
## Stabilisierungsfunktion

Vernetzung des elektronischen Stabilitätsprogramms mit dem Lenksystem

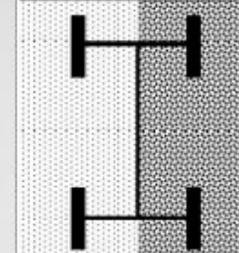
EPS

Stabilisierung mittels Lenkmomenteingriff unterstützt den Fahrer in kritischen Situationen bestmöglich zu lenken. Hinweise erfolgen mittels Änderung der Lenkradmoments

Fahrzeug ohne Lenkmoment - empfehlung

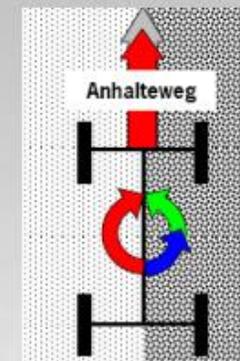


Vollbremsung

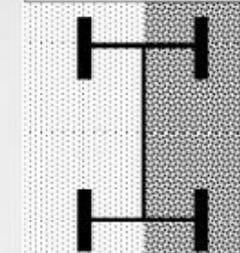


Eis Asphalt

Fahrzeug mit Lenkmoment - empfehlung



Vollbremsung



Eis Asphalt

Quelle: Aachen 2006

## Lenkmomentenregelung

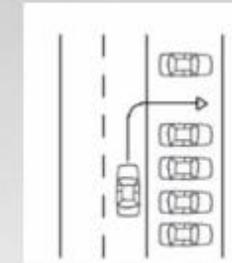
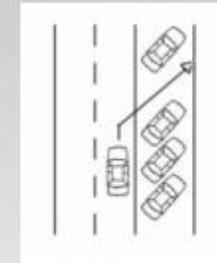
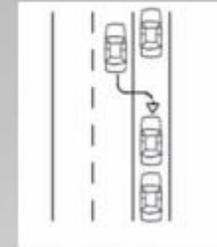
Ziel ist eine Auflösung des Bezuges von Lenkradmoment und Servounterstützung

- Nutzung von fahrdynamischen Größen (z.B. Gierrate, Querb beschleunigung) zur Berechnung der Reifenseitenkräfte
- Fahrspaß und Verbesserung des Lenkgefühls durch Querb beschleunigungsrückmeldung über Lenkmoment
- Rückmeldung von Reibwertänderungen bei Kurvenfahrt
- Stabilisierendes Lenkmoment beim Übersteuern

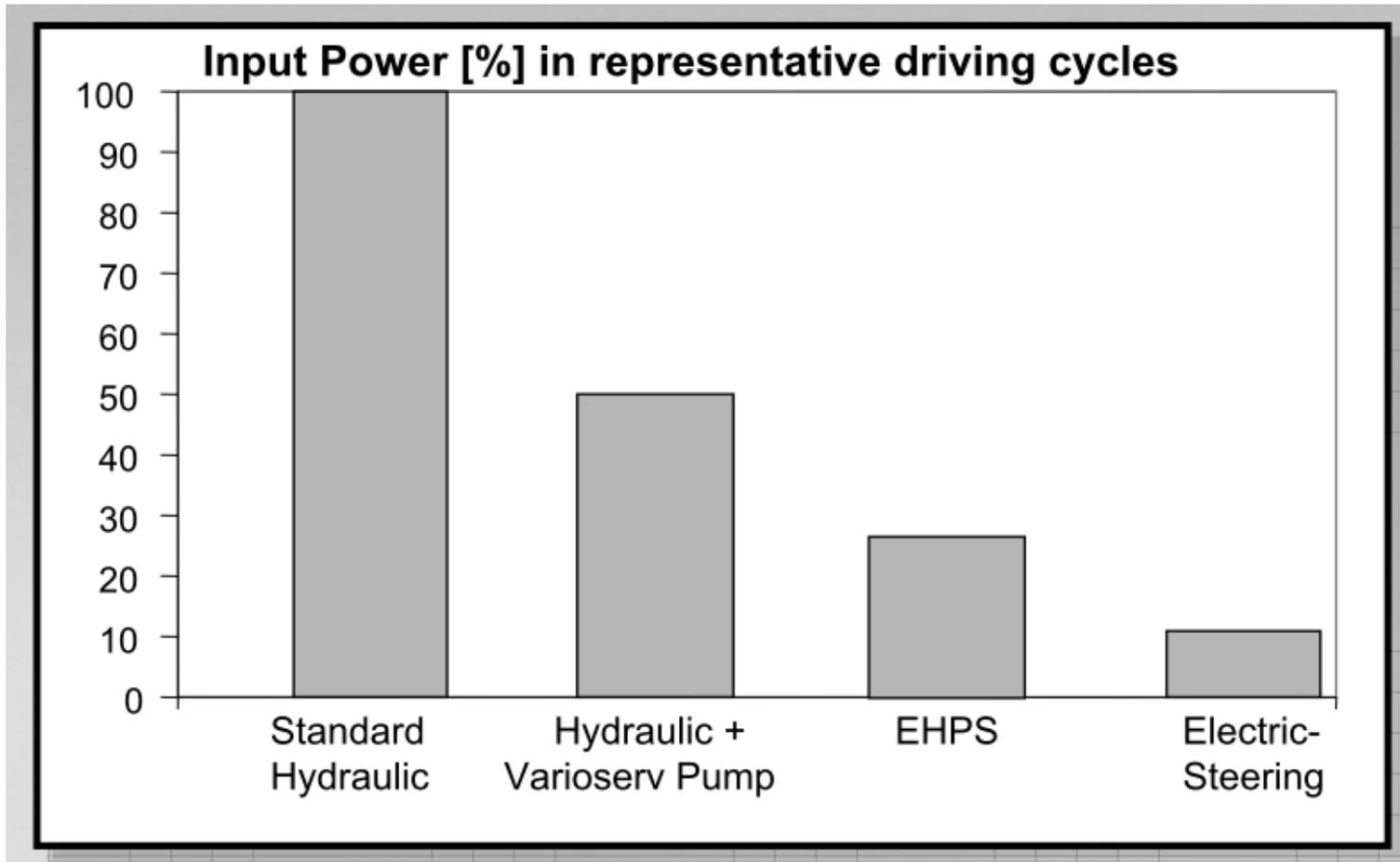
## Assistenzfunktionen

### Unterstützung bei der Kurshaltung

- Parkmanöverassistentz
- Spurhalteassistentz
- Kompensationsfunktionen
- Automatische Fahrzeugquerführung (Zukunft)

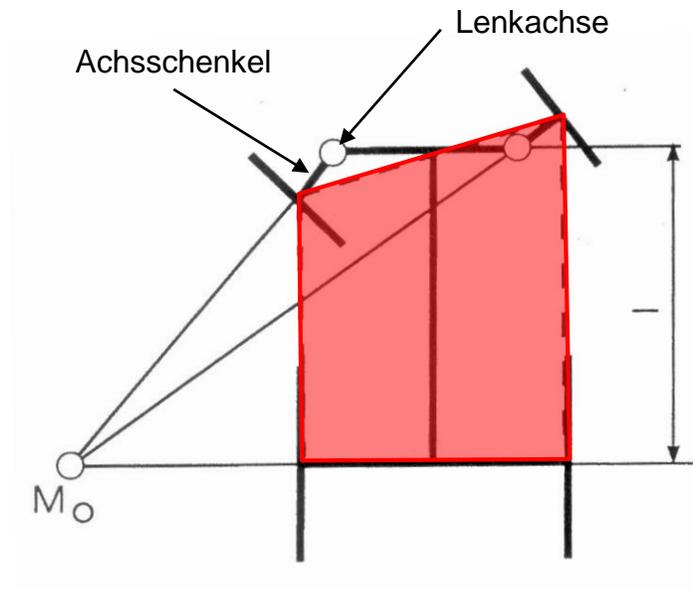


## Energieverbrauch



## Lenkprinzip – Achsschenkellenkung

Schwenken der Räder um jeweils eine Lenkachse

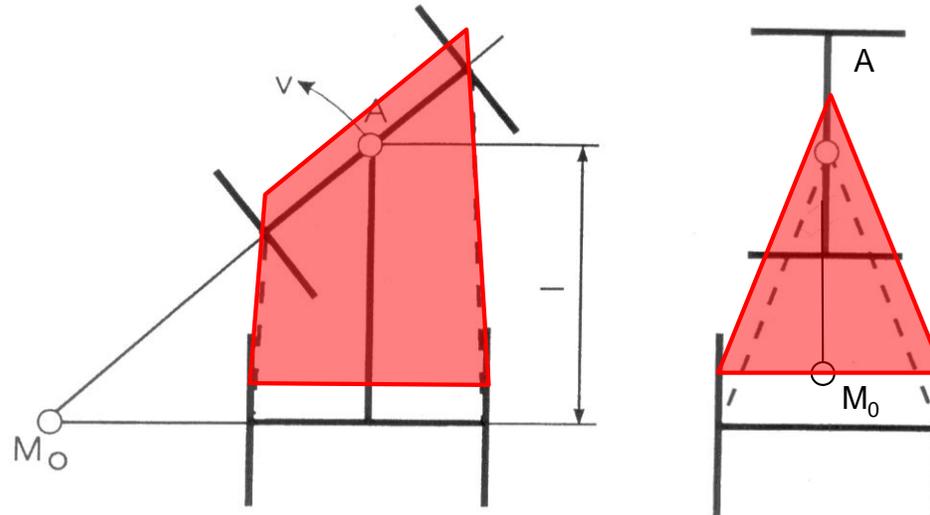


**Stützfläche:**  
Auswirkung auf statische und dynamische Kippsicherheit.

- **Vorteile:**
  - Ausreichend große Stützfläche auch bei sehr großem Lenkeinschlag.
  - Geringer Bauraumbedarf.
- **Nachteil:** Ackermannbedingung kann aufgrund der Lenkgestängeanordnung nur hinreichend genau erfüllt werden.
- **Einsatzgebiet:** nahezu alle Pkw, Lkw und Busse.

## Lenkprinzip – Drehschemellenkung

Schwenken beider Räder um gemeinsame Lenkachse (A)



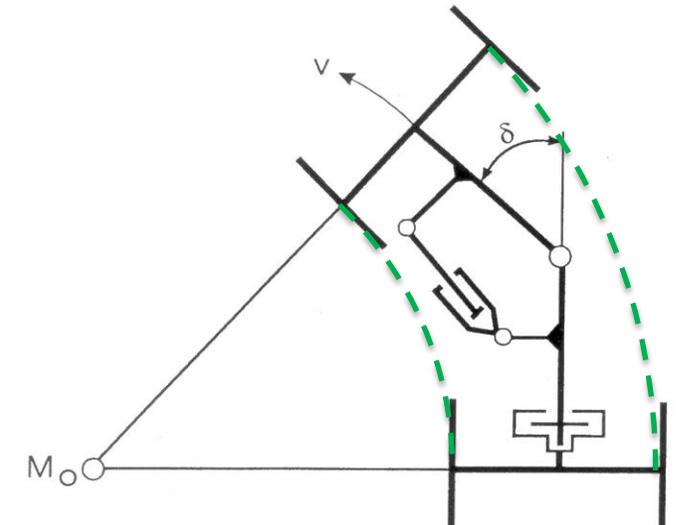
**Stützfläche** ist abhängig vom Lenkwinkel.

- **Vorteile:**
  - Optimale Erfüllung der Ackermannbedingung.
  - Große Lenkwinkel und somit kleine Wendekreisradien möglich ( $\delta = 90^\circ \rightarrow$  Drehung um die Hinterachse, siehe mittleres Bild).
- **Nachteile:**
  - Erhöhte Kippgefahr bei großen Lenkwinkeln.
  - Großer Bauraumbedarf im Vorderwagen.
- **Einsatzgebiet:** Anhänger, Arbeitsmaschinen.

## Lenkprinzip – Knicklenkung

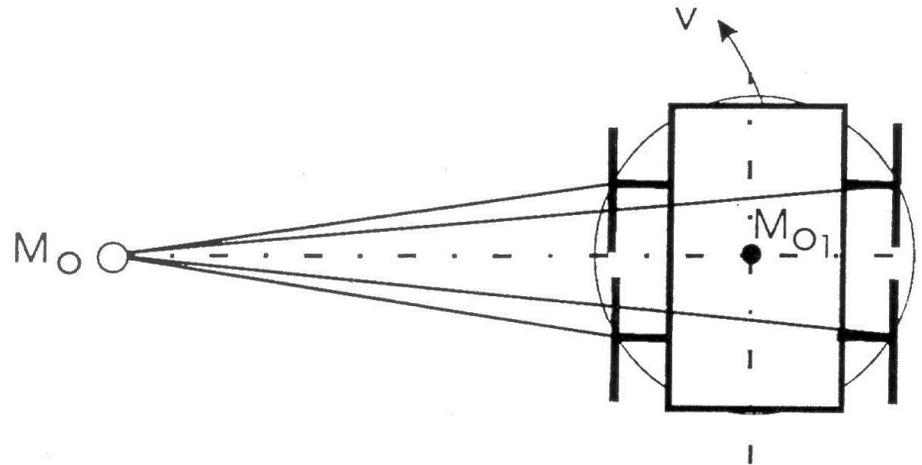
Einknicken von Vorder- und Hinterwagen

- **Vorteile:**
  - Richtungsänderung von Vorder- und Hinterwagen im Stand möglich (z.B. bei Be- und Entladung).
  - Kleine Wendekreisradien.
  - Kein Lenkfehler (geringer Reifenverschleiß).
  - Einfache Achskinematiken verwendbar.
  - Vorder- und Hinterräder in gleicher Spur.
- **Nachteile:**
  - Geringe Querstandssicherheit bei großen Lenkwinkeln (Lage des Schwerpunktes ändert sich).
  - Ungewollte Bewegung von angebauten Arbeitsmaschinen bei Lenkbewegung.
  - Schlechte Fahrstabilität.
  - Aufwändig und teuer (Knick-Drehgelenk).
- **Einsatzgebiet:** Forstfahrzeuge, Baumaschinen.



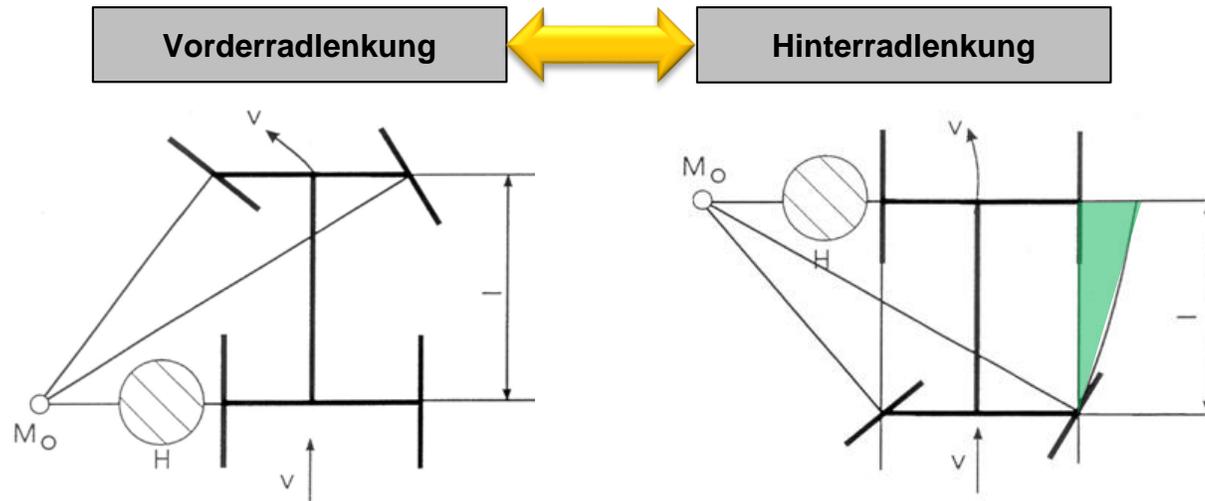
## Lenkprinzip – Radseitenlenkung

Drehung des Fahrzeuges durch unterschiedliche Umfangsgeschwindigkeiten der linken und rechten Triebräder



- **Vorteil:** hohe Wendigkeit (bei gegensinniger Drehrichtung ist Drehen auf der Stelle möglich).
- **Nachteil:** starker Verschleiß an den Reifen (bei nicht-nachgiebiger Fahrbahn).
- **Einsatzgebiet:** kleine Radlader.

## Hinterradlenkung



- **Vorteile:**
  - Exaktes Vorbeifahren an Hindernissen (H).
  - Exaktes Positionieren des Fahrzeuges ohne größere Fahrwege.
- **Nachteile:**
  - Ausschwenken des Fahrzeuges.
  - Schlechte Wahrnehmung von Lenkinformationen durch den Fahrer.
  - Ungenügende Lenkstabilität (Rückstellmoment wirkt einschlagvergrößernd).
- **Einsatzgebiet:** langsamfahrende Flurförderfahrzeuge (z.B. Gabelstapler).

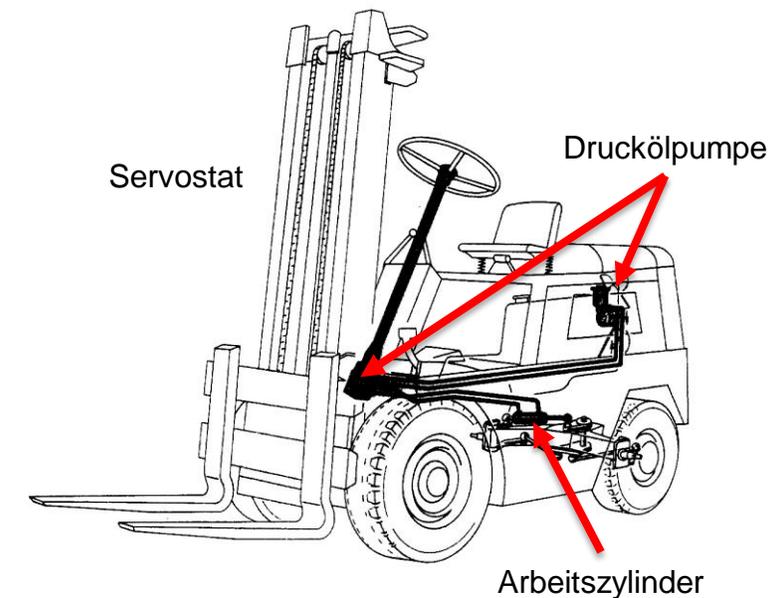
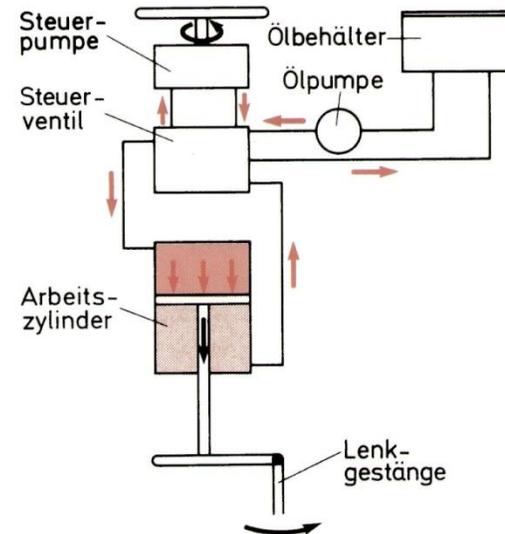
## Kraftaufbringung und Übertragungseinrichtung

Kraftauf- bringung	Definition	Mögl. Übertragungs- einrichtungen	Beispiel
Muskelkraft	Lenkkräfte nur aus Muskelkraft des Fahrers.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mechanisch (Verstärkung nur aus der Lenkübersetzung).</li> </ul>	
Hilfskraft	Lenkkräfte aus Überlagerung von Muskelkraft des Fahrers und zusätzlich unterstützender Hilfskraft.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hydraulisch.</li> <li>• Elektrisch.</li> <li>• Pneumatisch.</li> </ul>	
Fremdkraft	Lenkkräfte ausschließlich aus Fremdenergie.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hydraulisch.</li> <li>• Elektrisch.</li> </ul>	
Reibung	Lenkkräfte durch Kräfte/Momente auf den Reifenlatsch oder selbstspurende Räder.	Durch Kombination von: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mechanisch.</li> <li>• Hydraulisch.</li> <li>• Elektrisch.</li> </ul>	

## Fremdkraftlenkung – Hydraulische Lenkung

maximal zulässige Geschwindigkeit für  
Fremdkraftlenkungen: 50 km/h

- Keine mechanische Kopplung zwischen Lenkrad und Rädern.
- Konstruktive Freiheit bei der Anordnung der Bauteile.
- Funktionsweise:
  - Durch Lenkradbewegung wird mittels Steuerpumpe der Kolben des Steuerventils verschoben.
  - Druck-Öl strömt zum Arbeitszylinder, Rücklauf-Öl in den Vorratsbehälter.
  - Bewegung des Lenkgestänges.
- Bei Ausfall der Ölpumpe kann noch mit der Steuerpumpe gelenkt werden (Notlenkung).
- Anschluss an die Zentralhydraulik der Arbeitsmaschine (Arbeitsdruck: 200 bar).
- Einsatzgebiet – Land- und Baumaschinen.

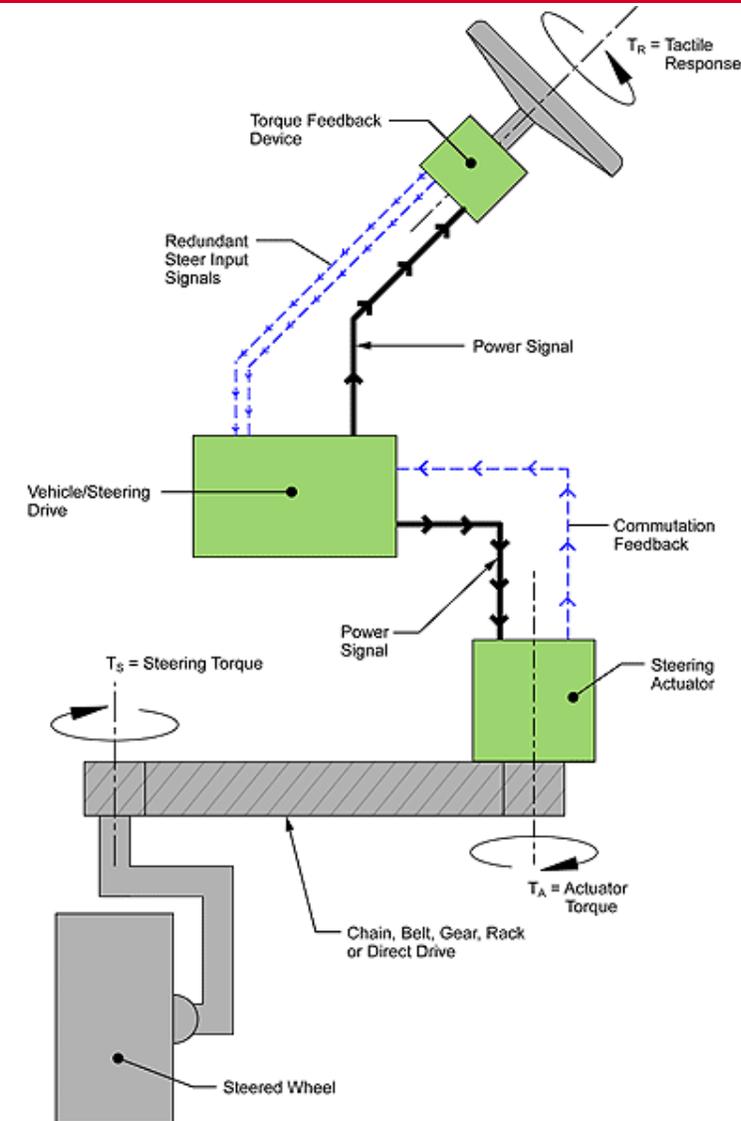


## Fremdkraftlenkung – Elektrische Lenkung

### Steer-by-wire

- Packagevorteile durch Entfall mechanischer Komponenten.
- Modulare Entwicklung und Applikation des Lenksystems.
- Vollkommen freie Gestaltung der Lenkcharakteristik möglich.
- Erhöhung der passiven Sicherheit durch Entfall der Lenksäule.
- Gewichtsreduktion.

Die Anwendung ist derzeit aus gesetzlichen Gründen in PKWs nicht möglich (nur bis 50 km/h), auch wenn die technische Umsetzbarkeit bereits in einigen Konzept-Fahrzeuge nachgewiesen wurde.



## Lenkgetriebekinematik – rotatorisch → translatorisch

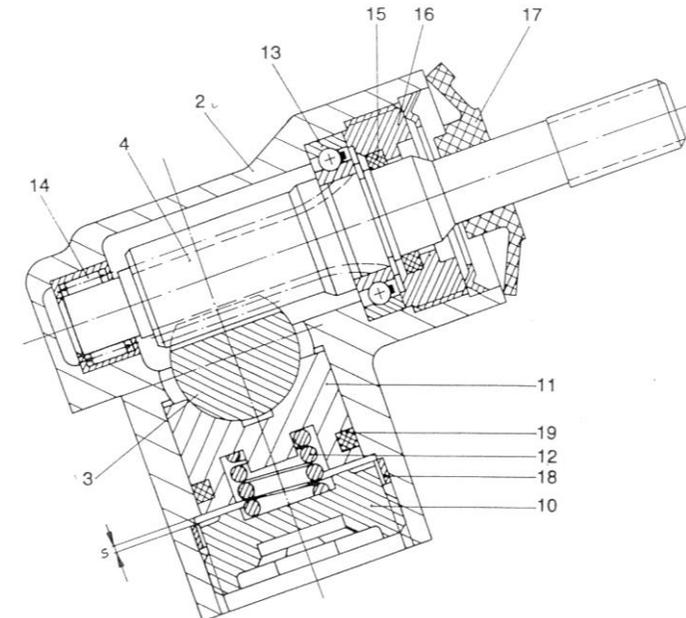
### Zahnstangenlenkung

#### Vorteile:

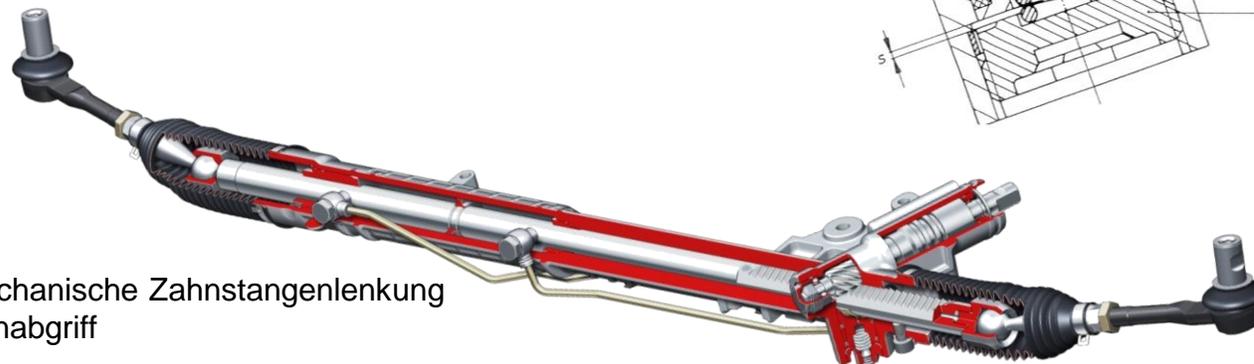
- Einfacher Aufbau.
- Geringer Bauraumbedarf.
- Hohe Lenksteifigkeit.

**Nachteile:** störepfindlicher als Drehhebellenkung.

**Einsatz:** Pkw, leichtere Nfz.



- |    |                           |
|----|---------------------------|
| 2  | Gehäuse                   |
| 3  | Zahnstange                |
| 4  | Ritzel                    |
| 10 | Verschraubung             |
| 11 | Druckstück, federbelastet |
| 12 | Feder                     |
| 13 | Kugellager                |
| 14 | Nadellager                |
| 15 | Dichtung                  |
| 16 | Verschraubung             |
| 17 | Gummikappe                |
| 18 | Distanzring               |
| 19 | O-Ring                    |



Hydromechanische Zahnstangenlenkung  
mit Seitenabgriff

## Lenkgetriebekinematik – rotatorisch → rotatorisch

### Drehhebellenkung (Kugelumlauf-Lenkgetriebe)

#### Vorteile:

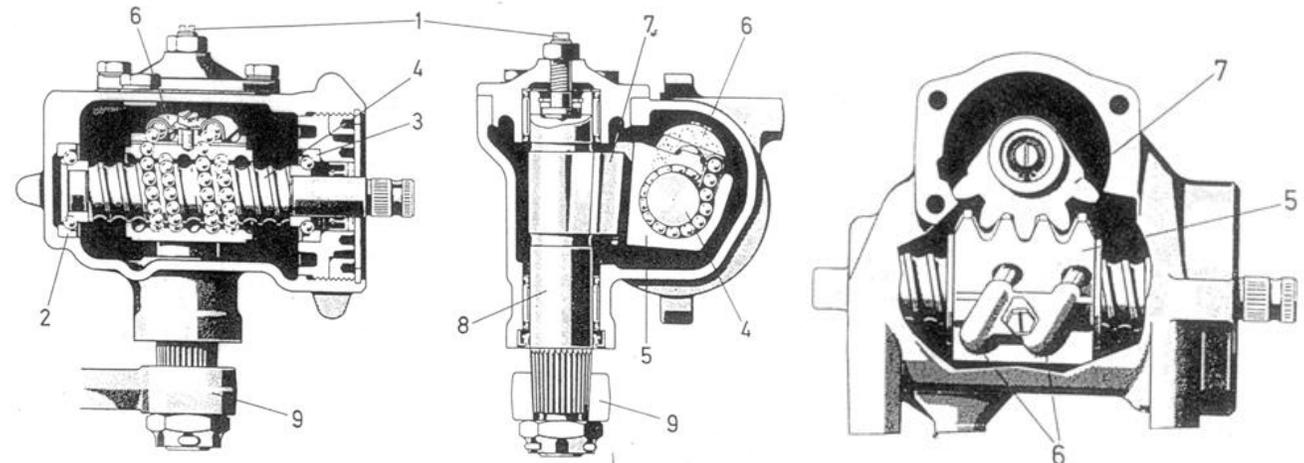
- Geringe Stoßempfindlichkeit.
- Hoher Komfort.
- Geringe Reibung.
- Hohe Übersetzungsvariabilität.

**Nachteil:** sehr aufwändig und teuer.

**Einsatz:** Oberklasse-Pkw, Lkw.



- |   |                                    |
|---|------------------------------------|
| 1 | Schraube<br>(Lenkspieleinstellung) |
| 2 | Kugellager                         |
| 3 | Kugellager                         |
| 4 | Lenkschraube                       |
| 5 | Lenkmutter                         |
| 6 | Rohr zur Kugelführung              |
| 7 | Zahnsegment                        |
| 8 | Lenkwelle                          |
| 9 | Lenkstockhebel                     |



## Lenkungsregelung – Geschwindigkeitsabhängige Hilfskraftlenkung

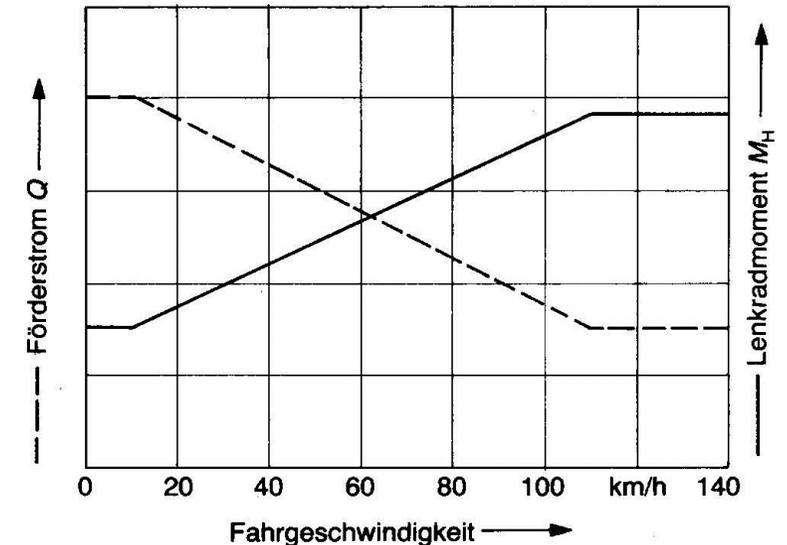
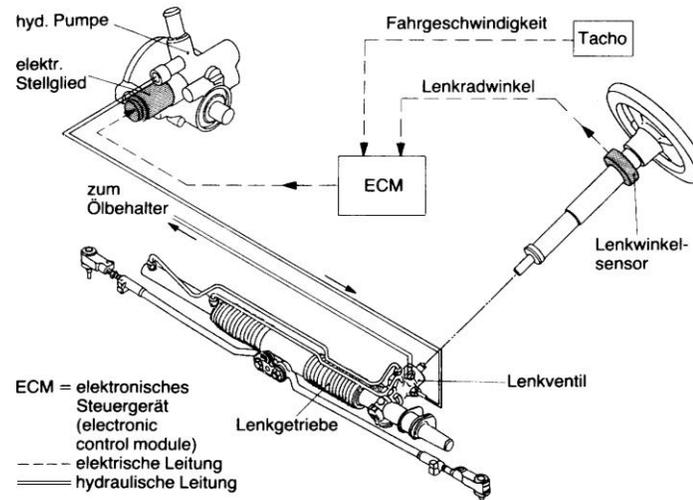
Geschwindigkeitsabhängige Gestaltung des Lenkradmoments durch Variation des Förderstromes bei hydromechanischen Lenkungen

### Erhöhung des Komforts durch:

- Geringere Lenkkräfte beim Parkieren.

### Erhöhung der aktiven Fahrsicherheit durch:

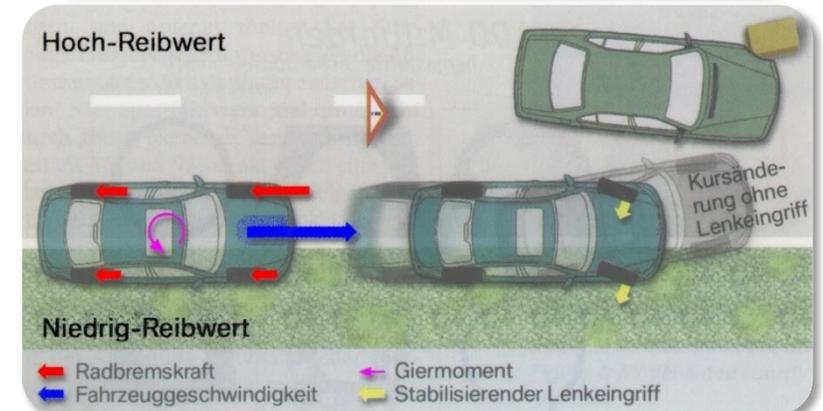
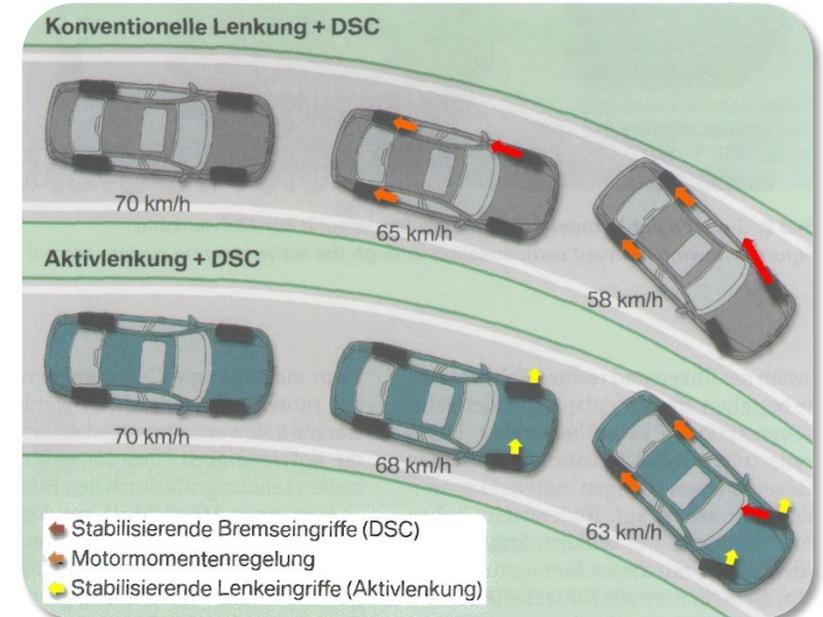
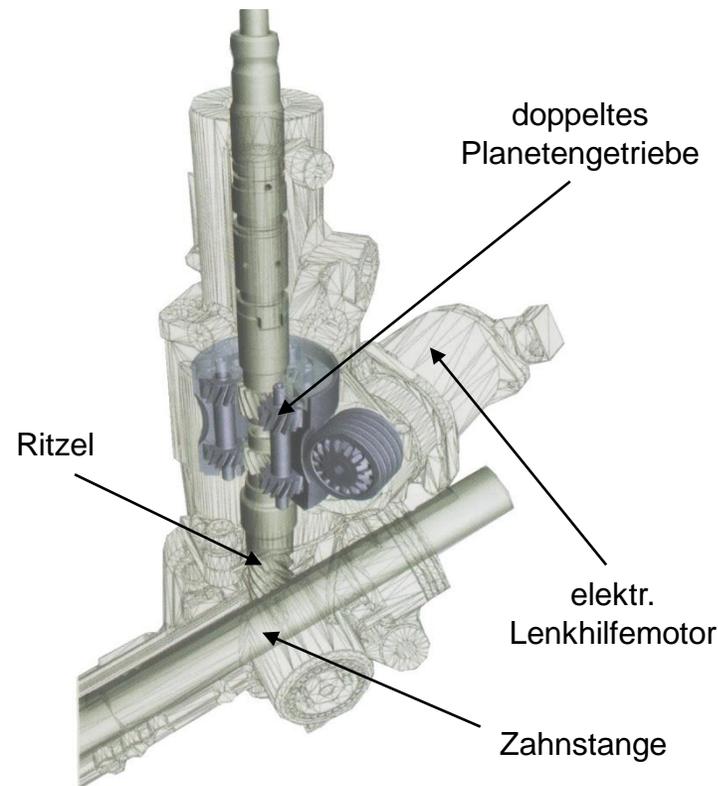
- Angemessene, höhere Lenkkräfte bei hohen Geschwindigkeiten.
- Geringe „Nervosität“ der Lenkung.
- Gute Rückmeldung über den Fahrbahnkontakt.



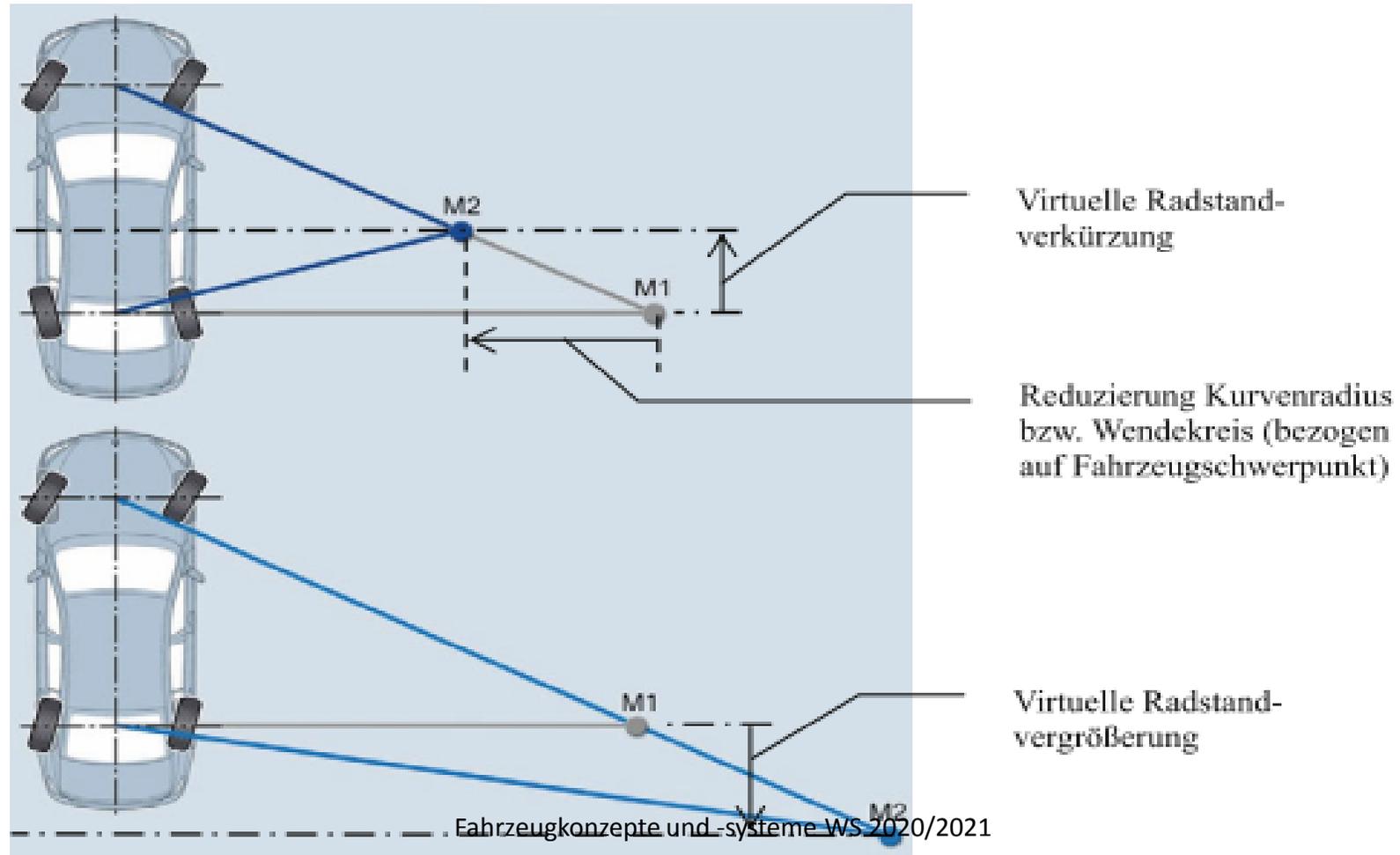
## Lenkungsregelung – Aktivlenkung

### Spezielle Form der elektromechanischen Lenkung

- Unterstützung bei Kurvenfahrt und Spurwechsel.
- Kompensation von Fahrbahnquerneigung und Seitenwind.
- Integration in Aufgaben des ESPs.



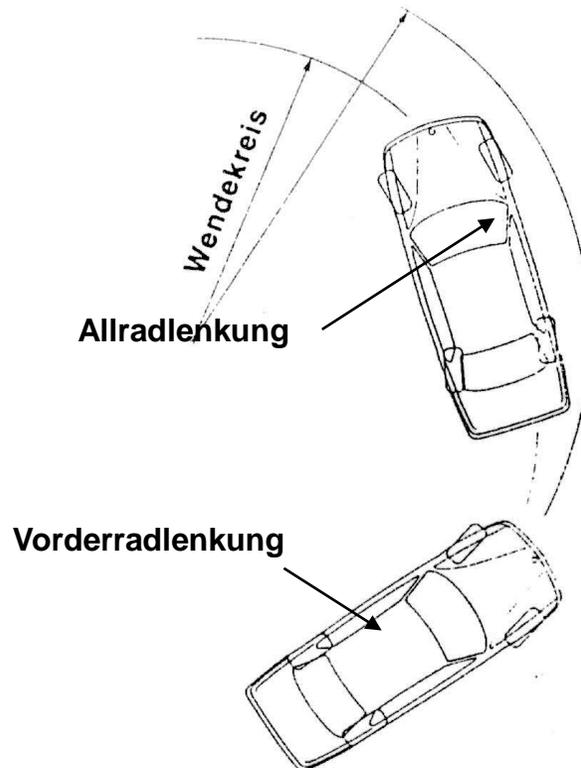
## Hinterradlenkung



## Statische Lenkungsauslegung

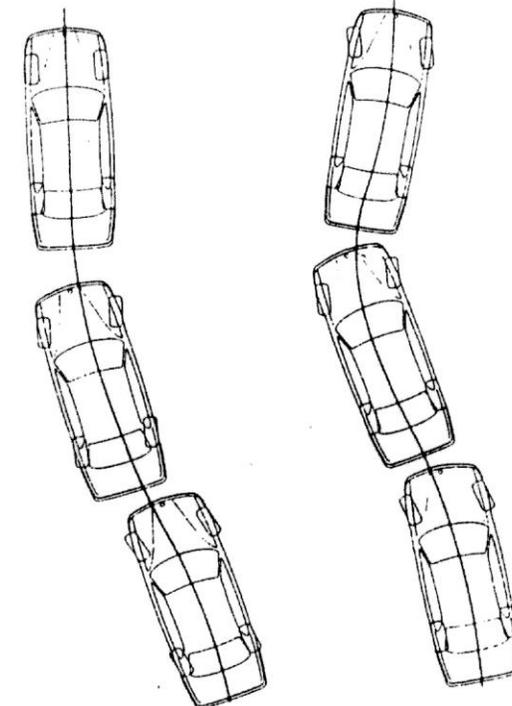
Gegensinniger Lenkeinschlag der Hinterräder zur Erreichung kleinerer Wendekreisradien.

Gleichsinniger Lenkeinschlag der Hinterräder zur Richtungsstabilisierung.



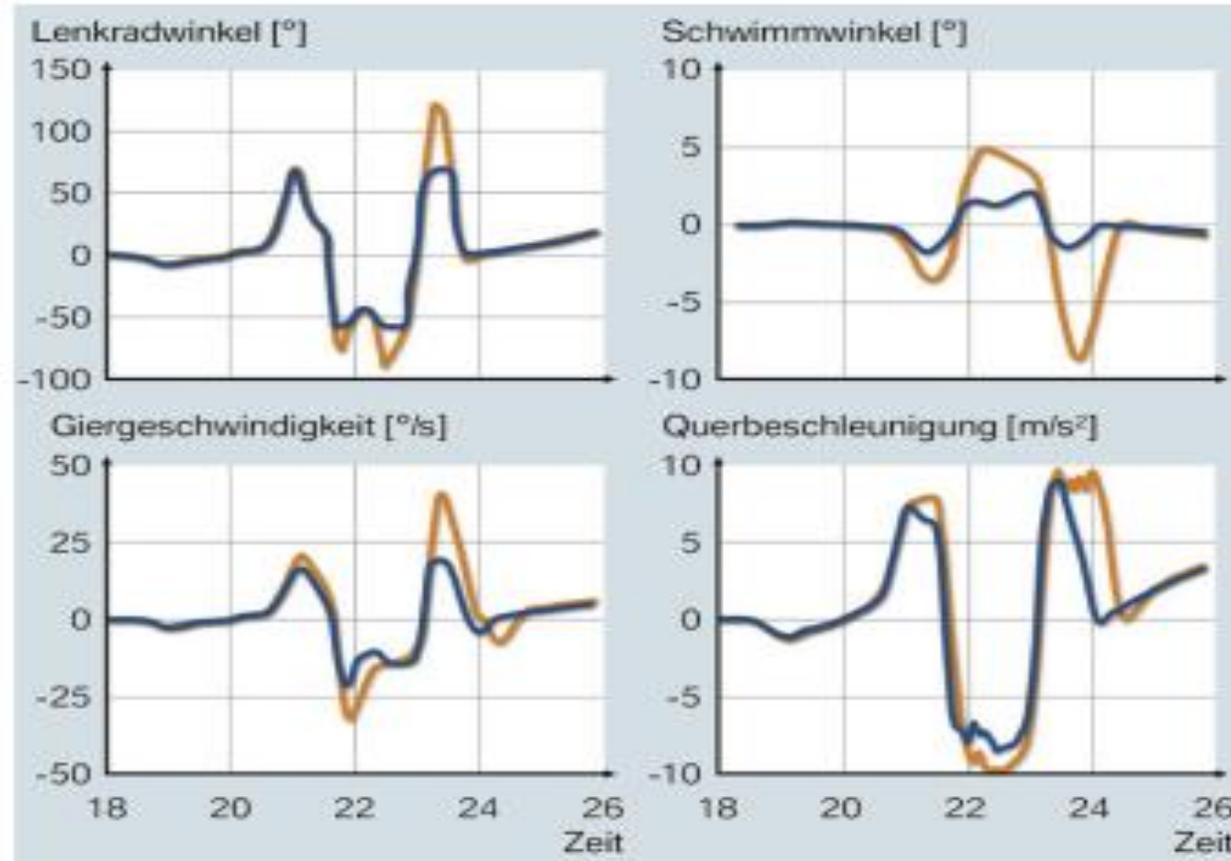
Allradlenkung

Vorderradlenkung



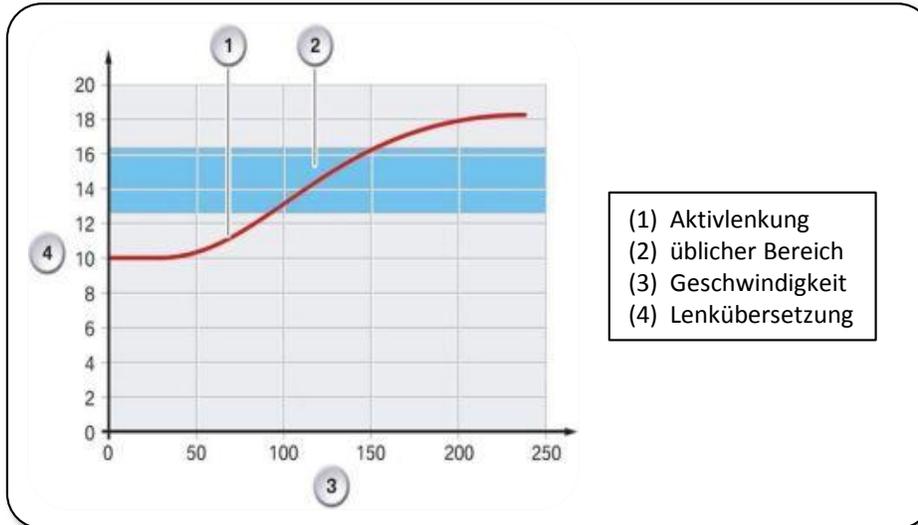
# Lenkungssysteme

## Hinterradlenkung

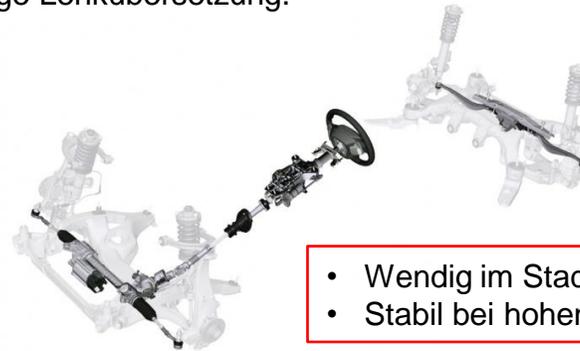


**Bild Q-15** Simulation ISO-Fahrspurwechsel ( $k_p > 0$ ),  
blau: Allradlenkung, gelb: konventionelle Lenkung [10]

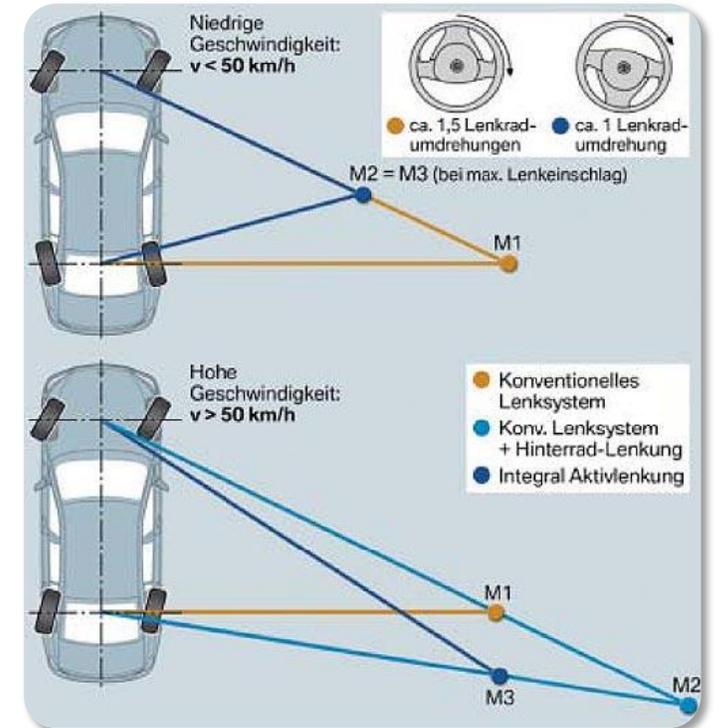
## Lenkungsregelung – Integral-Aktivlenkung



Geschwindigkeitsabhängige Lenkübersetzung.



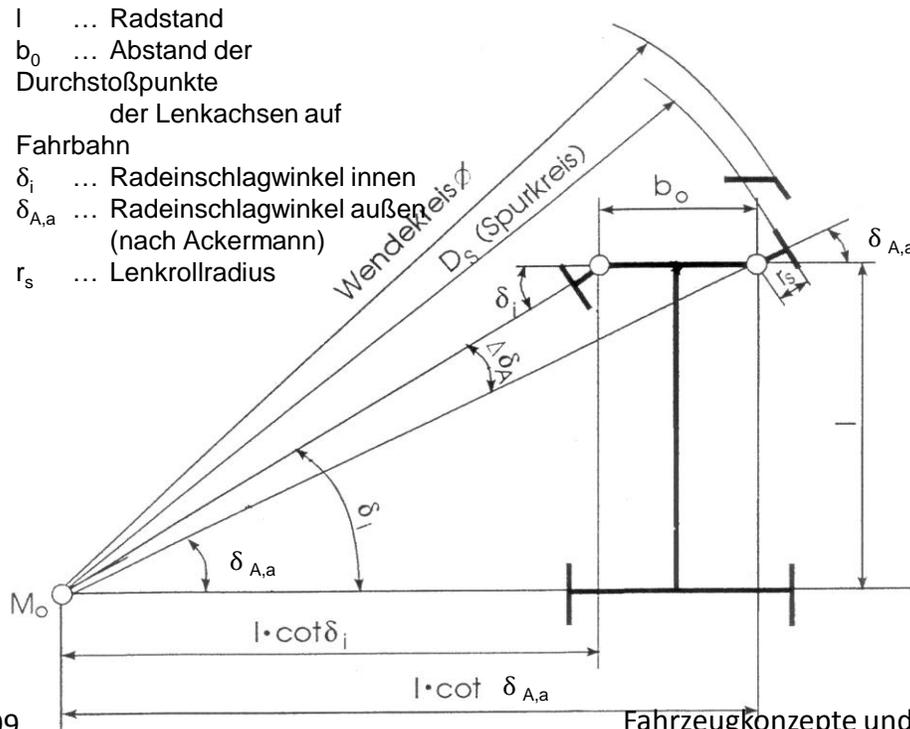
- Wendig im Stadtverkehr.
- Stabil bei hohen Geschwindigkeiten.



Geschwindigkeitsabhängige Umschaltung zwischen gegensinnigem und gleichsinnigem Lenkeinschlag (Allradlenkung).

## Statische Auslegung nach Ackermann

- Zur Gewährleistung eines idealen Abrollvorganges müssen sich die Normalen der Radmittelebenen der gelenkten Räder in einem Punkt auf der verlängerten, nicht gelenkten Achse schneiden (Momentanpol  $M_0$ ).
- Nur gültig für niedrige Geschwindigkeiten und/oder große Kurvenradien  
→ vernachlässigbare Querbeschleunigung (vgl. *Dynamische Auslegung*).



Einschlagwinkel von Innen- und Außenrad:

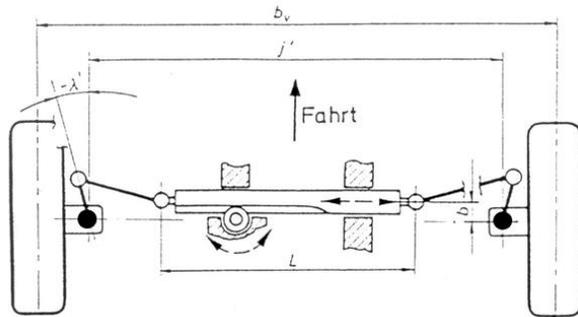
$$\delta_{A,a} = \operatorname{arccot} \left( \frac{b_0}{l} + \cot \delta_i \right)$$

Spurkreisdurchmesser (als mögliche Zielgröße):

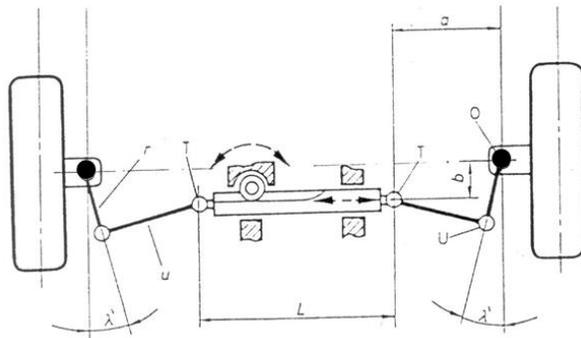
$$D_s = 2 \cdot \left( \frac{l}{\sin \delta_{A,a}} + r_s \right)$$

## Ausgeführte Lenkkinematik

### Zahnstangenlenkung

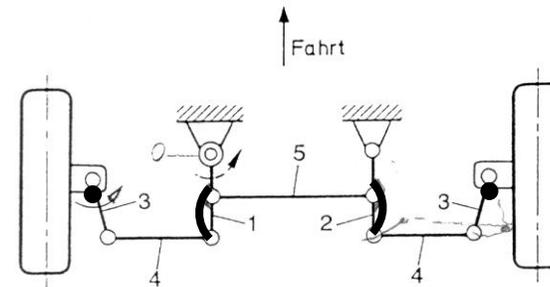


Lenkdreieck mit Lenkgetriebe vor der Achse

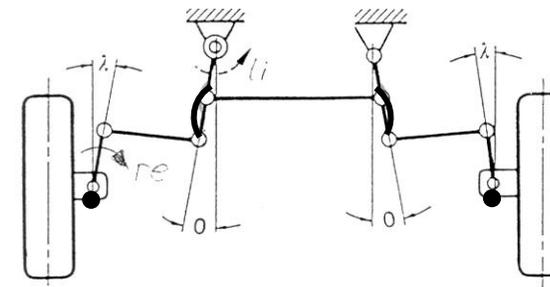


Lenkdreieck mit Lenkgetriebe hinter der Achse

### Drehhebellenkung



Gleichläufiges Lenkviereck

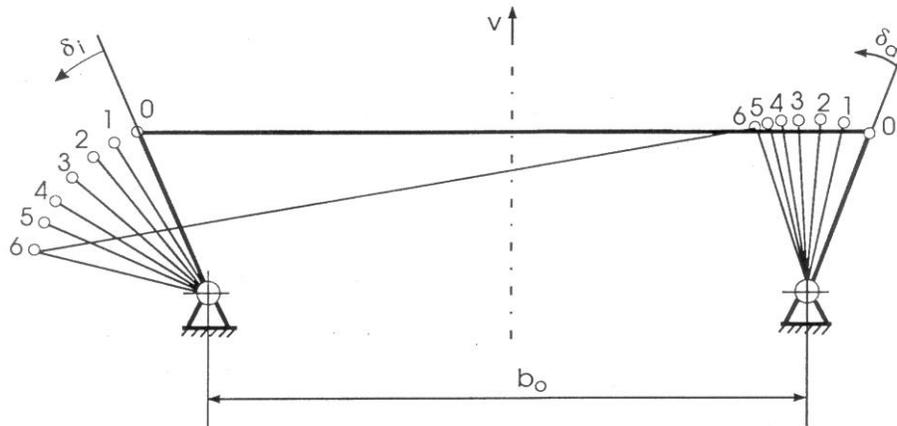


Gegenläufiges Lenkviereck

- Feste Verbindung
- Gelenk

## Kinematische Zwangsbedingungen

Vereinfachte Betrachtung am Lenktrapez:



$$\frac{d\delta_{A,a}}{d\delta_i} \neq \frac{d\delta_a}{d\delta_i}$$

- Nicht-linearer Zusammenhang zwischen innerem und äußerem Lenkwinkel (Ackermannbedingung ist auch eine nicht-lineare Gleichung).
- Ackermannbedingung lässt sich jedoch mit Lenkgestängen kinematisch nicht exakt nachbilden.

## Statische Lenkungs auslegung / Lenkfehler

Der Lenkfehler  $\delta_F$  beschreibt die Abweichung des tatsächlichen Lenkwinkels  $\delta_a$  am äußeren Rad vom Lenkwinkel  $\delta_{A,a}$  nach Ackermann:

$$\Delta\delta_F = \delta_a - \delta_{A,a}$$

Pkw werden i.A. mit positivem Lenkfehler ausgelegt ( $\delta_a > \delta_{A,a}$ ).

### Grund für positive Auslegung:

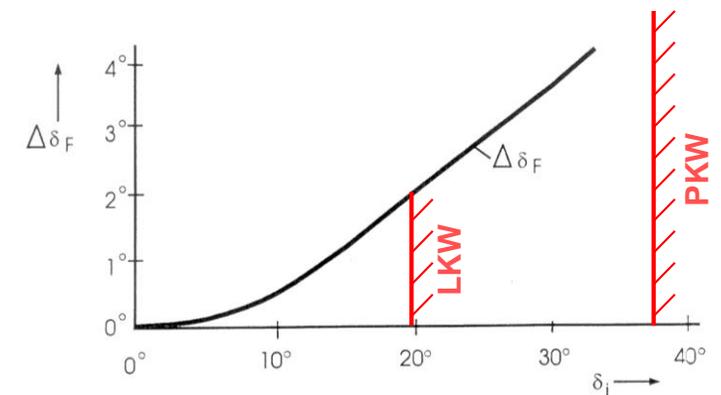
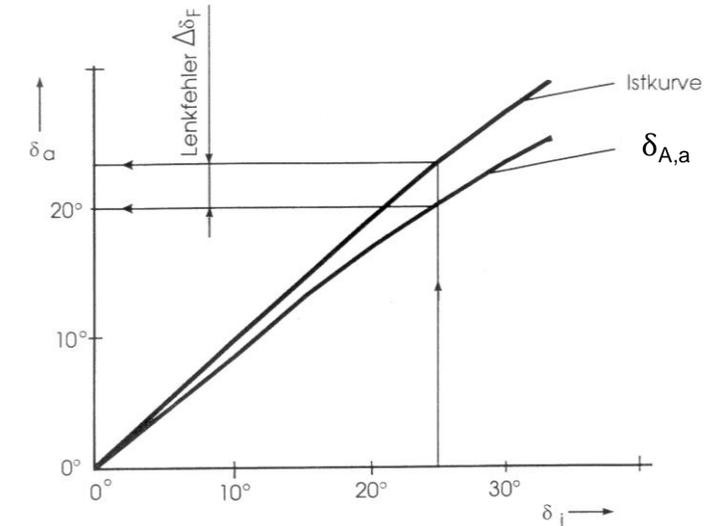
- Verkleinerung des Wendekreises.
- $\delta_i$  kann nicht beliebig groß gewählt werden (Radfreigang, Beugungswinkel der Antriebswellen).

### Ermittlung der Soll-Kurve:

- Rechnerisch nach Ackermann.

### Ermittlung der Ist-Kurve:

- Grafisch.
- Versuch.



**Pkw:**  $\delta_F = 1-5^\circ$  (Bauraumgrenzen)

**Lkw:**  $\delta_F = 1-2^\circ$  (Reifenverschleiß)

## Dynamische Auslegung

Fahrzeug bei schnellerer Kurvenfahrt erfährt Querbeschleunigung.

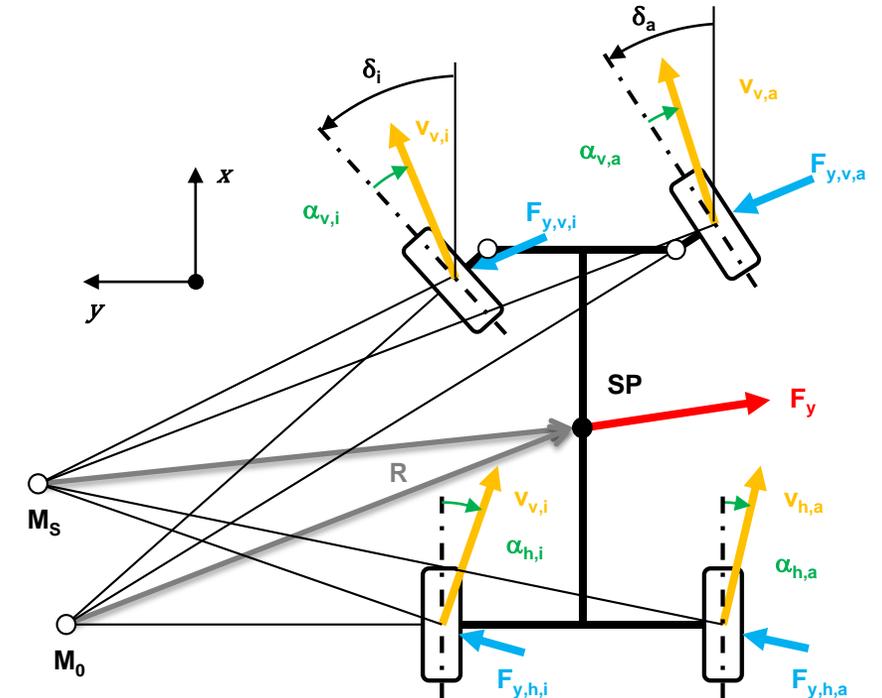
$$\ddot{y} = \frac{\dot{x}^2}{R} \quad F_y = m_{veh} \cdot \ddot{y}$$

- Querkraft im Schwerpunkt  $F_y$  erzeugt Reaktionskräfte  $F_{y,i}$  an den Reifen.

$$\alpha_i = \frac{F_{y,i}}{C_{\alpha,i}}$$

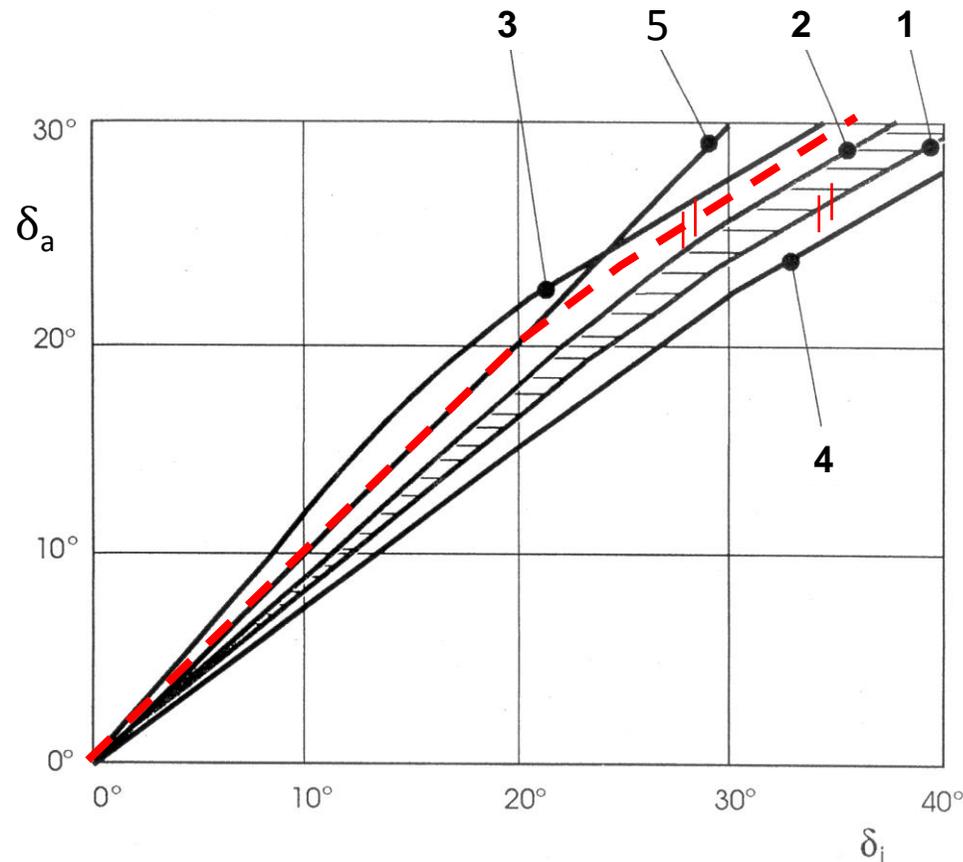
$i$  = Laufvariable für Anzahl der Räder

- Schräglaufwinkel  $\alpha_i$  verdrehen die Geschwindigkeitsvektoren  $v_i$  der Räder.
- Schnittpunkt der Normalen auf  $v_i$  ist  $M_s$ .
- Fahrzeug dreht sich um  $M_s$  als neuen Momentanpol.
- Geometrisch bedingt sind  $\alpha_{v/h,a}$  kleiner als  $\alpha_{v/h,i}$ .



Die äußeren Räder können aufgrund höherer dynamischer Radlasten mehr Seitenkraft übertragen. Daher ist eine dynamische Vergrößerung von  $\delta_a$  sinnvoll.

## Auslegungsprinzipien



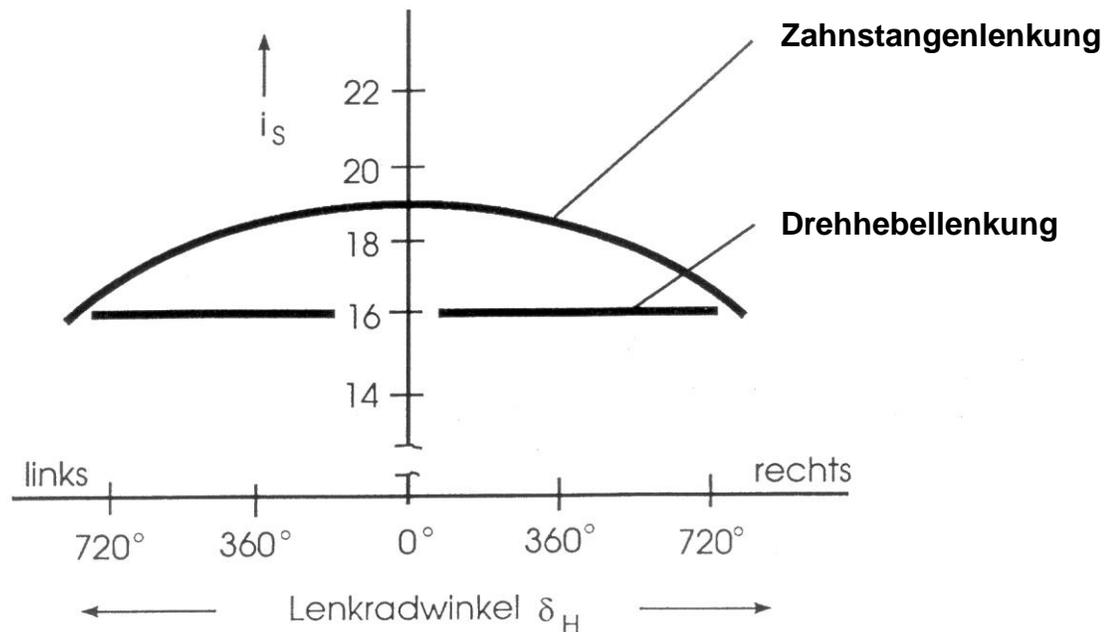
- 1 Nach Ackermann
- 2 Gleiche Schräglaufwinkel  $\alpha_{v,i}$  und  $\alpha_{v,a}$
- 3 Gleiche Reibwerte  $\mu_{v,i}$  und  $\mu_{v,a}$
- 4 Gleiche Seitenreibleistung
- 5 Gleiche Lenkwinkel (Lenkparallelogramm)

Praxis:

- $0 \leq \delta_i \leq 20^\circ$ :  
Lenkparallelogramm (höheres  $\delta_a$ )
- $\delta_i > 20^\circ$ :  
Parallele zu Ackermann (Verschleißreduktion)

## Auslegungsprinzipien

Die kinematische Übersetzung vom Lenkrad zum Radeinschlag ergibt sich aus den Übersetzungen von Lenkgetriebe und Lenkgestänge.

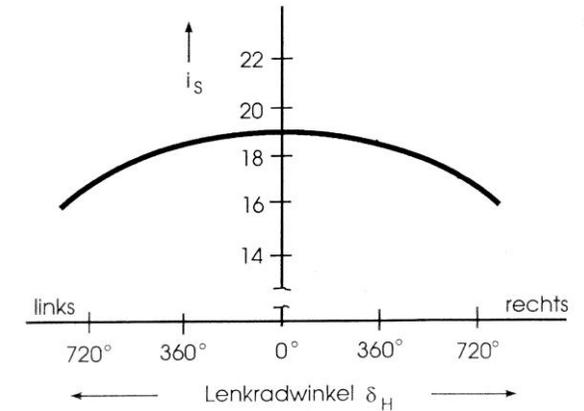
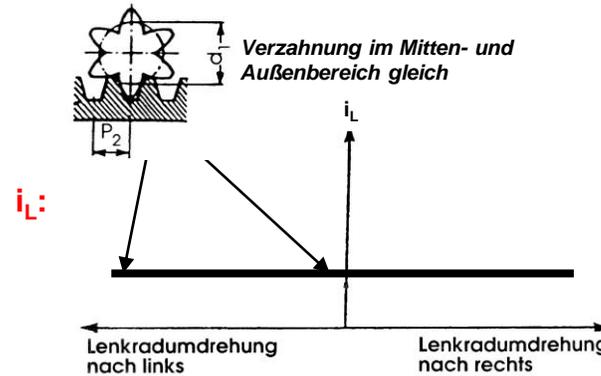


$$i_s = i_L \cdot i_T = \frac{d\delta_H}{d\delta}$$

- $d\delta_H$  ... Lenkradwinkeländerung
- $d\delta$  ... Änderung des mittleren Lenkwinkels
- $i_s$  ... Kinematische Gesamtübersetzung
- $i_L$  ... Lenkgetriebeübersetzung
- $i_T$  ... Lenkgestängeübersetzung

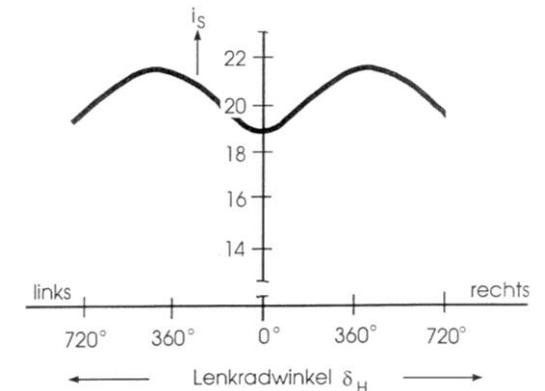
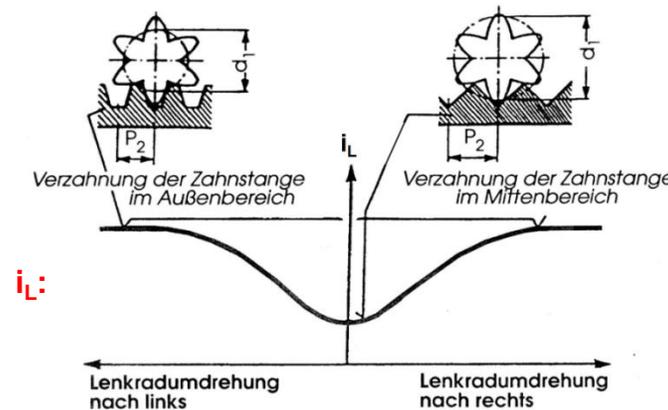
## Lenkübersetzung

Zahnstangenlenkgetriebe mit konstanter Übersetzung:

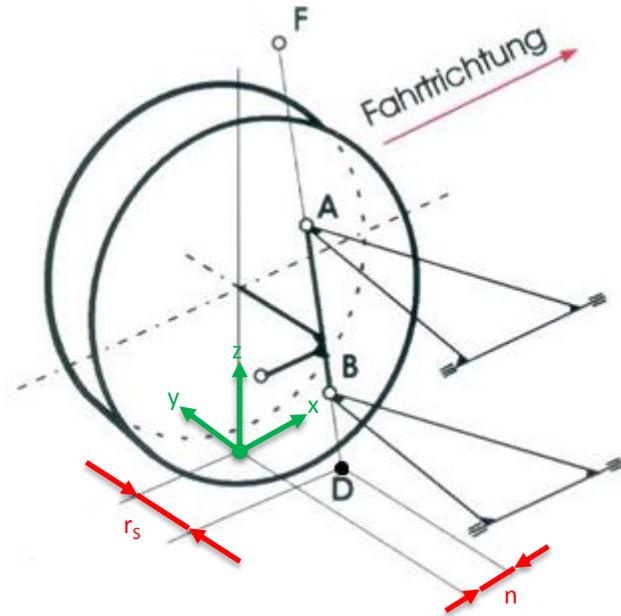


Zahnstangenlenkgetriebe mit variabler Übersetzung:

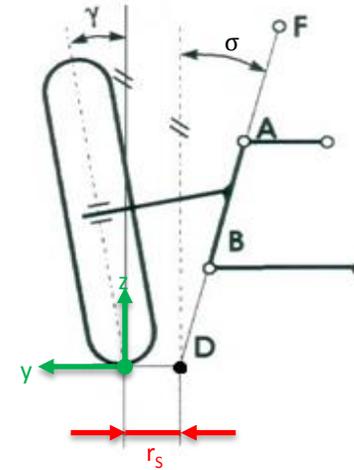
- Modul und Eingriffswinkel der Zahnstange veränderlich.
- Ritzel der Lenksäule normalverzahnt.



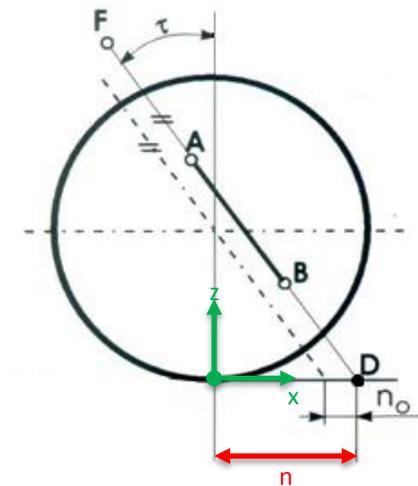
## Auslegungsprinzipien



- A,B ... Anlenkpunkte der Querlenker am Radträger  
(Achse durch A und B ist die Lenkachse)
- D ... Durchstoßpunkt der Lenkachse auf der Fahrbahn
- $r_s$  ... Lenkrollradius (laterale Exzentrizität)
- $n$  ... Achsnachlauf (longitudinale Exzentrizität)

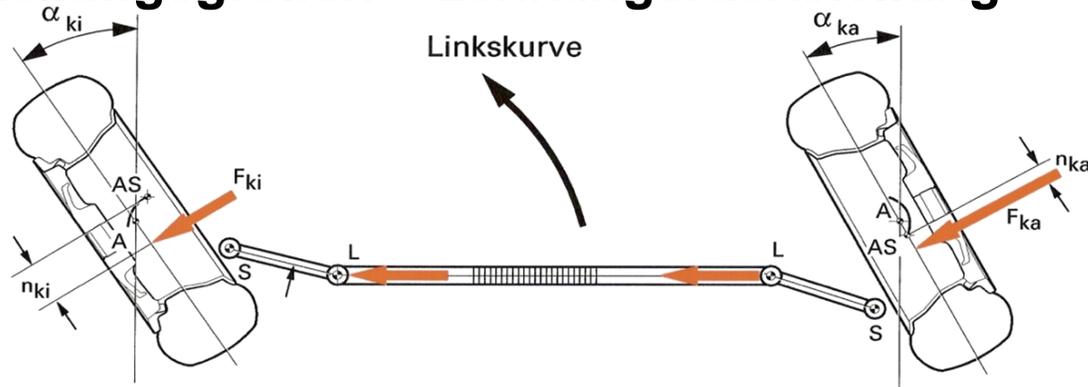


- $\gamma$  ... Radsturz
- $\sigma$  ... Achsspreizungswinkel



- $\tau$  ... Nachlaufwinkel
- $n_0$  ... Nachlaufversatz

## Radstellungsgrößen – Lenkungsrückstellung



Zum Rückstellmoment um die Lenkachse tragen alle Kräfte im Reifenlatsch mit den entsprechenden Hebelarmen bei:

$$M_{Ges} = M_1 + M_2 + M_3$$

- **Moment aus Längskraft**  $F_x$  und Lenkrollradius  $r_s$ :

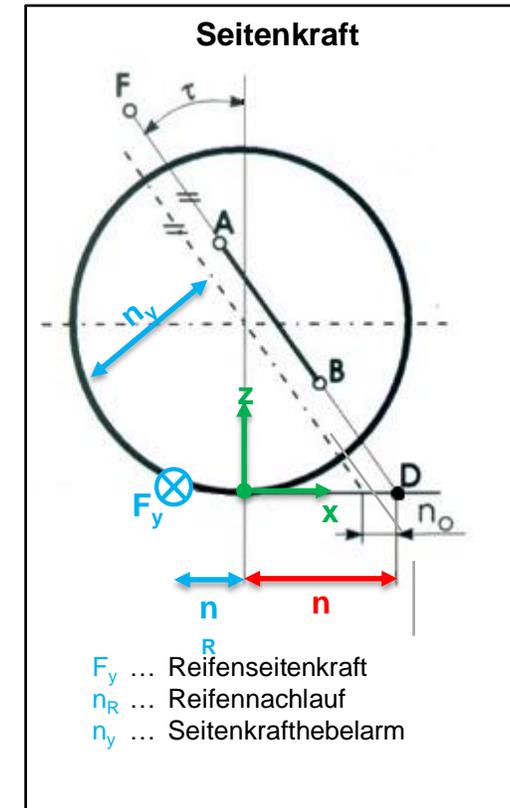
$$M_1 = F_x \cdot r_s \cdot \cos \sigma$$

- **Moment aus Seitenkraft**  $F_y$  und Seitenkrafthebelarm  $n_y$ :

$$M_2 = F_y \cdot n_y \quad n_y = (n_R + n - n_0) \cdot \cos \tau$$

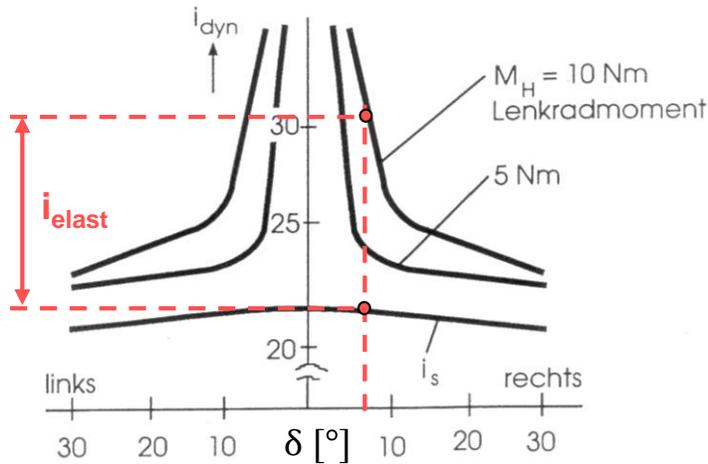
- **Moment aus Radlast**  $F_z$ , Lenkrollradius  $r_s$  und Spreizung  $\sigma$  (auch im Stand vorhanden):

$$M_3 \approx F_z \cdot \sin \sigma \cdot r_s$$



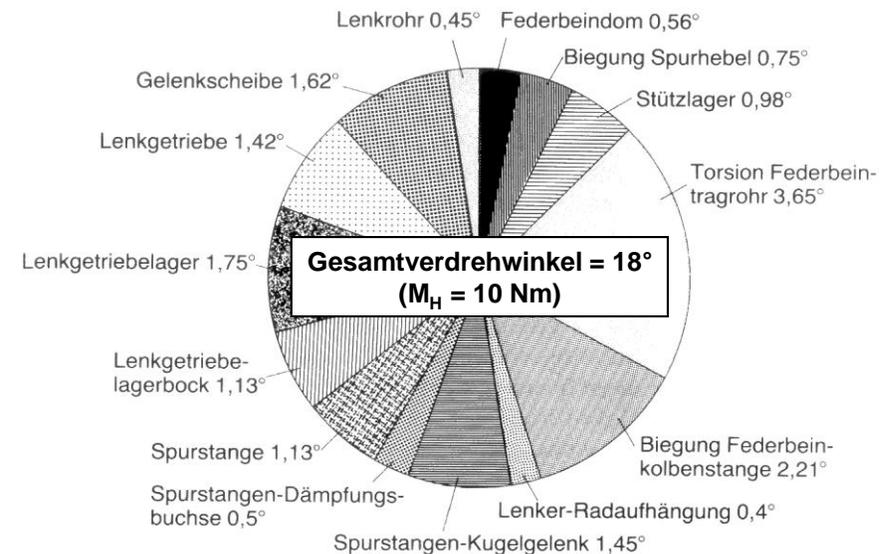
## Elastizitäten – Dynamische Lenkübersetzung

Aufgrund von Elastizitäten in der Lenkung ist besonders bei geringen Winkeländerungen am Lenkrad die Übersetzung sehr groß. Das führt zu sehr kleinen Winkeländerungen am Rad.



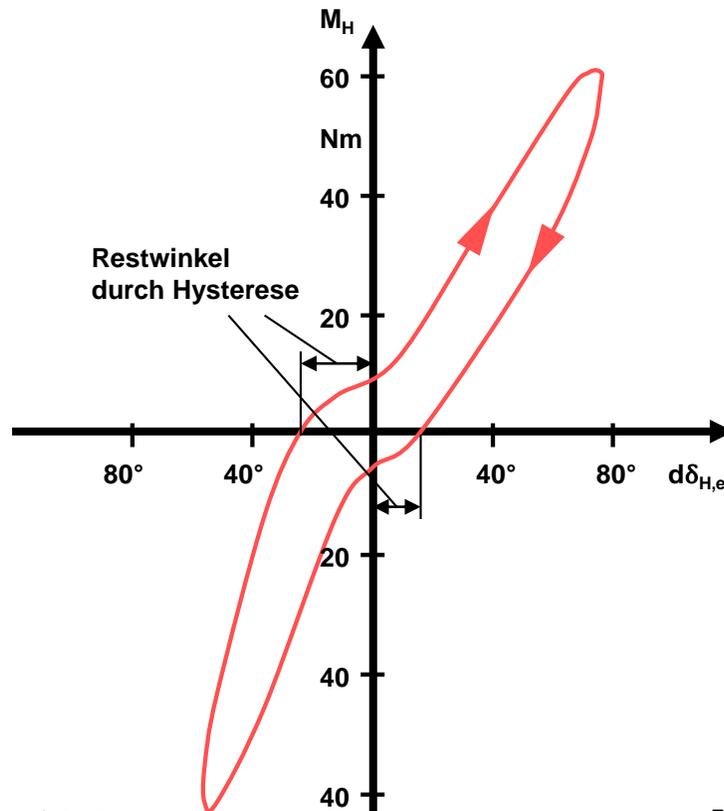
$$i_{s,dyn} = i_s + i_{elast} = \frac{d\delta_H + d\delta_{H,e}}{d\delta}$$

**Elastizitäten in der Lenkung**  
(Verdrehwinkelanteil am Lenkrad bei gefesselten Rädern)



## Elastizitäten – Lenksteifigkeit

Die resultierende Drehfedersteifigkeit aller beim Schwenken der Räder beanspruchten Bauteile, reduziert auf die Lenkachse ( $c_L$ ) bzw. das Lenkrad ( $c_H$ ), wird als Lenksteifigkeit bezeichnet.



- Auf das Lenkrad reduzierte Lenksteifigkeit  $c_H$  (bei gefesselten Rädern):

$$c_H = \frac{M_H}{d\delta_{H,e}}$$

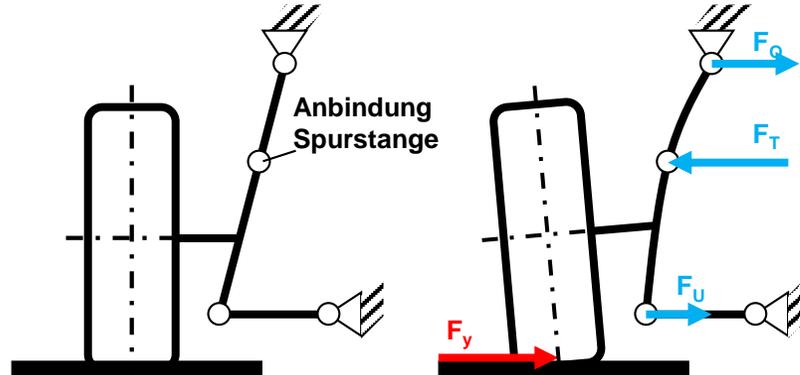
$M_H$  ... Lenkradmoment  
 $d\delta_{H,e}$  ... Elastische Lenkradwinkeländerung

- **Zu große Lenksteifigkeit bewirkt schlechtes Komfortverhalten durch Weiterleitung von Fahrbahnstößen.**
- **Zu geringe Lenksteifigkeit bewirkt schlechtes (schwammiges) Lenkgefühl.**

## Elastizitäten – Einfluss der Spurstangenanbindung

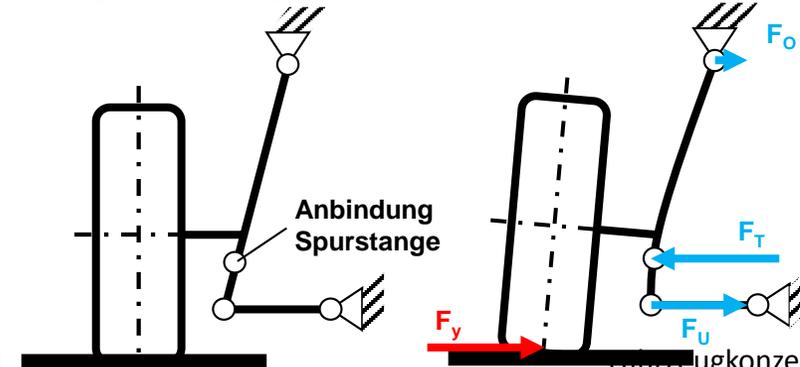
### Betrachtung am kurvenäußeren Rad

- Spurstange obenliegend, hinter der Vorderachse:



- Hohe Durchbiegung → hohe Elastizität.
- Hohe Querkräfte am oberen Lager.
- Hohes Biegemoment auf Schwingungsdämpfer bei MacPherson-Achsen.
- Positive Sturzverstellung (Seitenkraftreduktion).

- Spurstange untenliegend, hinter der Vorderachse:



- Geringere Durchbiegung.
- Kleine Querkräfte am oberen Lager.
- Große Kräfte an unterem Querlenker.
- Negativer Sturzverstellung (Seitenkraftverstärkung).

Bitte beantworten Sie folgende Fragen und bereiten Sie sich vor die Ergebnisse kurz zu präsentieren:

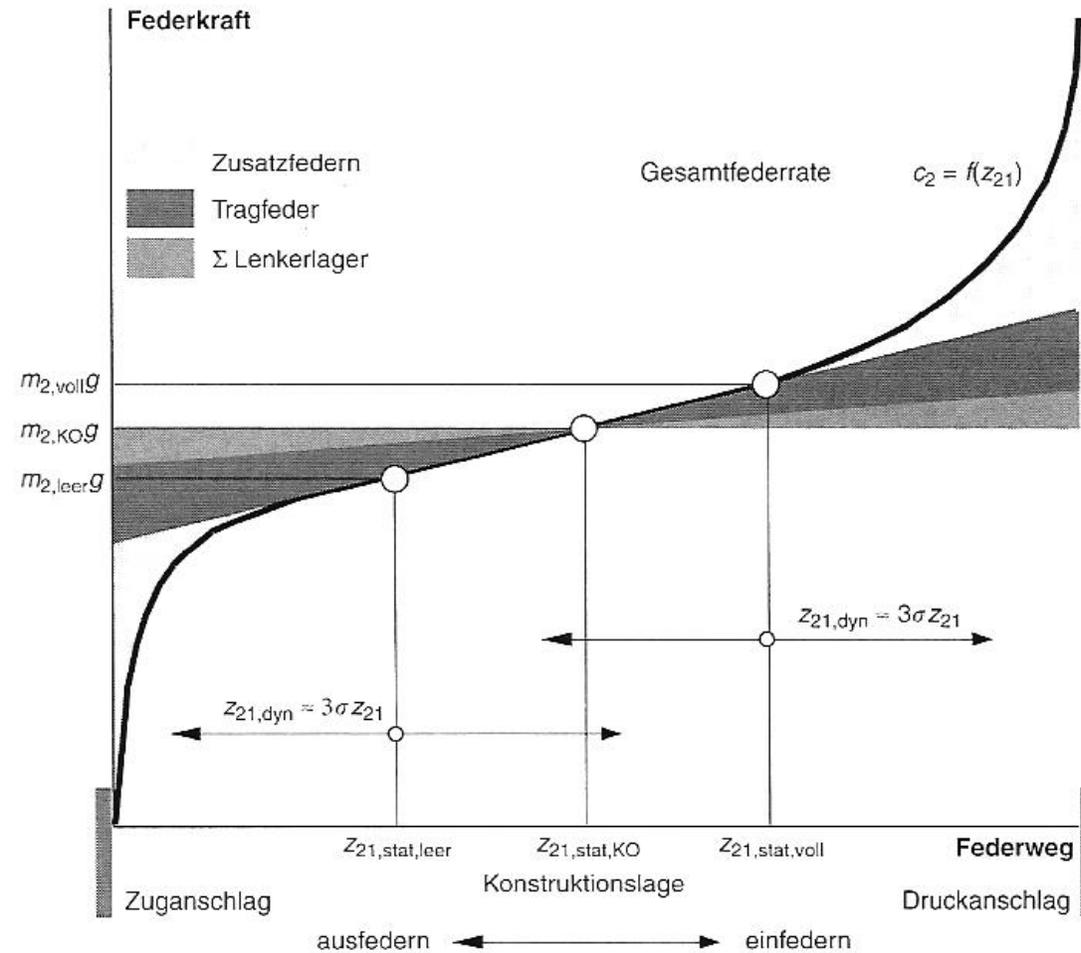
1. Geben Sie die Vorteile einer Elektromechanischen Lenkung im Vergleich zur Hydraulischen Lenkung an, nennen Sie drei wesentliche Vorteile
2. Warum haben Fahrzeuge bei der Lenkungsauslegung einen „Lenkfehler“ ( Abweichung von der „Ackermann Definition“ )
3. Durch welche Maßnahmen kann ich eine „schwergängige Lenkung“ verbessern; nenne vier Maßnahmen und begründe sie.

## Agenda

- Fahrwerksgrundlagen
- Reifen / Räder
- Lenkung / Querdynamik
- **Federung und Dämpfung**
  - Aufgaben von Federung und Dämpfung
  - Federungssysteme
  - Aufgaben von Dämpfung
  - Dämpfungssysteme
- Radaufhängung
- Achskonzepte
- Fahrwerk spüren

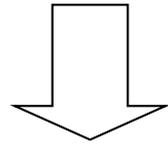


## Federkennlinie



## Aufgaben des Feder- Dämpfer-Systems

- möglichst **reibungsfreie** Federung (Ansprechverhalten, Komfort)
- **zusätzliche Dämpfung** notwendig (Radlastschwankungen minimieren)



- In Kraftfahrzeugen ist deshalb immer eine Kombination aus federnden und dämpfenden Funktionselementen vorhanden

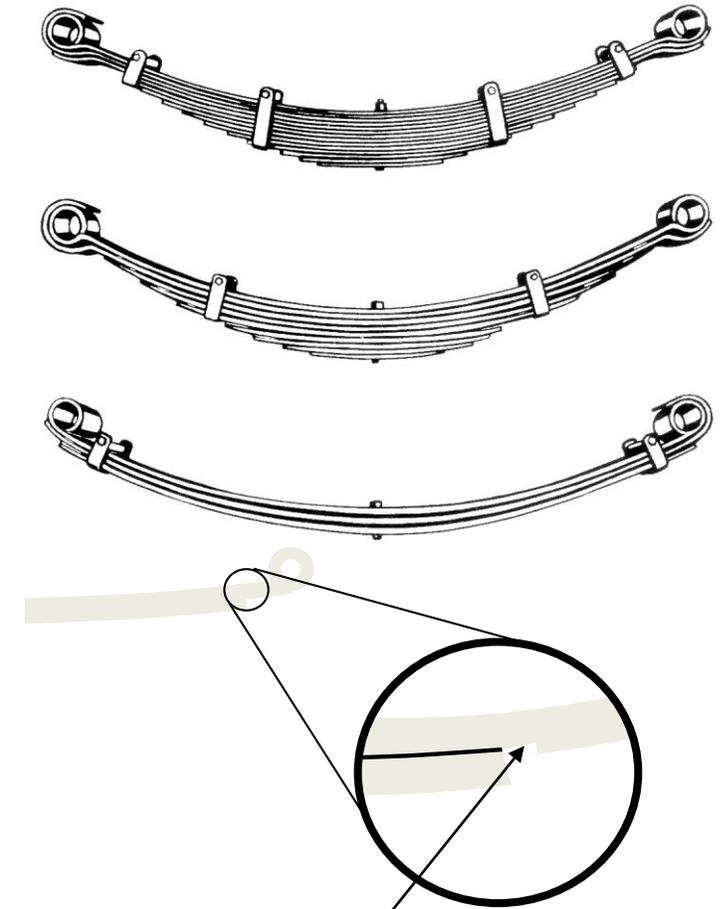
## Ausführungen von Federn:

- Metallfedern
- Kunststofffedern (GFK, Elastomere)
- Luftfedern
- Hydropneumatische Federung

## Varianten der Federung

### Ausführungen geschichteter Blattfedern

- Blattfedern eignen sich als Radführungselement zum Verbinden von Aufbau und Fahrwerk
- geschichtete (mehrlagige) Blattfedern besitzen eine Eigendämpfung aufgrund der Reibung zwischen den einzelnen Federlagen
- Blattfedern werden im Pkw-Bereich als Sonderlösung eingesetzt (Transporter, Geländewagen)
- Im Nfz-Bereich sind Blattfedern weit verbreitet



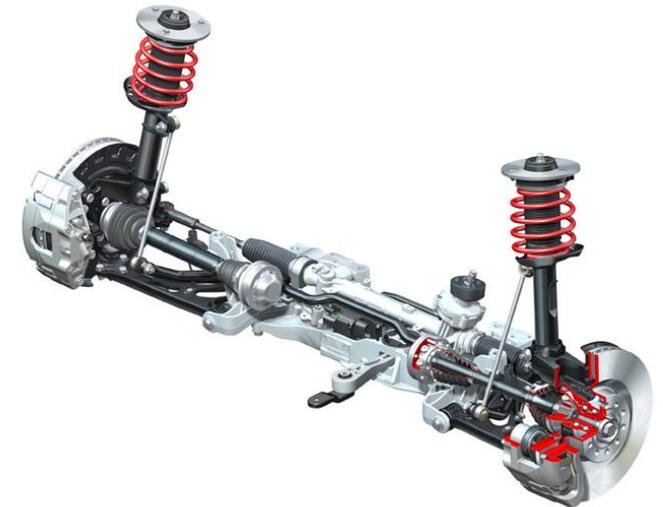
## Varianten der Federung

### Grundsätzliches:

- Eine Schraubenfeder entspricht im wesentlichen einer auf Torsion beanspruchten Drehstabfeder (in gewickelter Form). Die Beanspruchung auf Biegung ist vernachlässigbar gering. Demzufolge ist das Arbeitsaufnahmevermögen sehr günstig (Leichtbau).

### weitere Merkmale:

- keine Rad- und Achsführungseigenschaften
- bei **Druckbeanspruchung** sind Schraubenfedern grundsätzlich gegen **Ausknicken** auszulegen bzw. zu führen



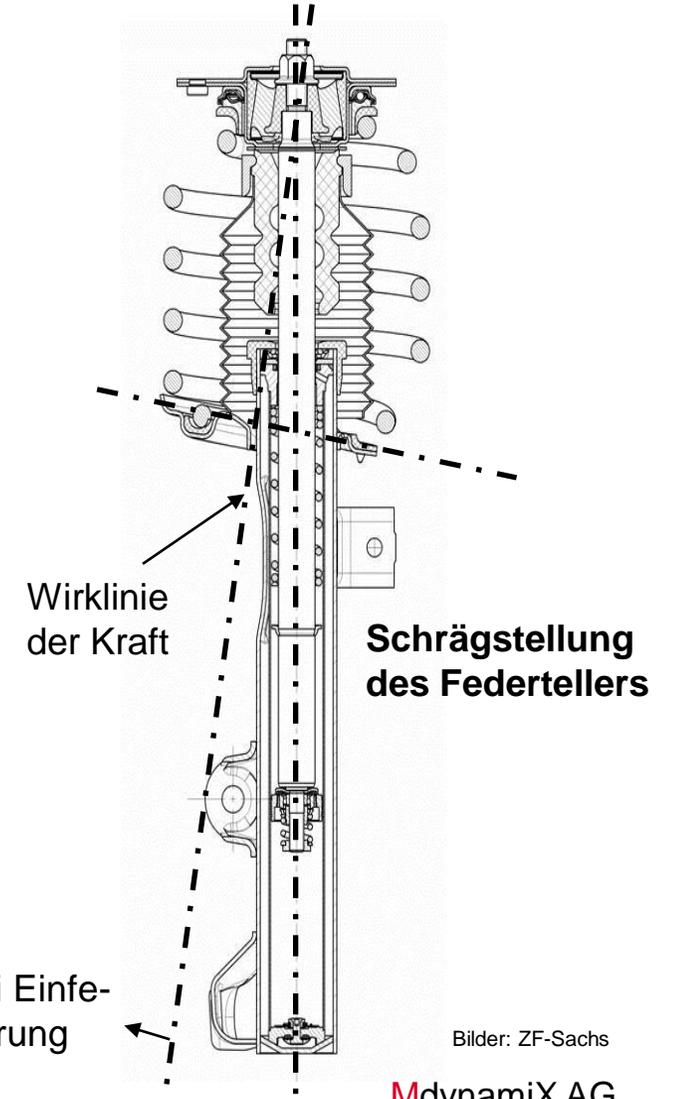
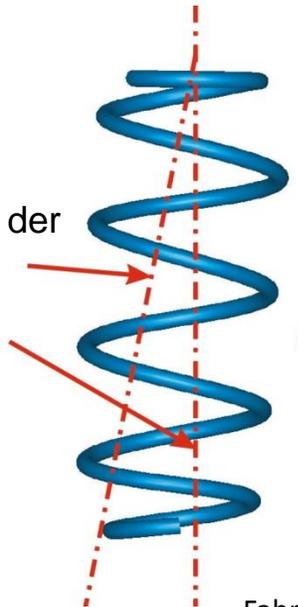
## Varianten der Federung

**Beeinflussung der Wirklinien von Schraubenfedern** durch Schrägstellung/Versatz der Federteller oder Deaxierung der Feder

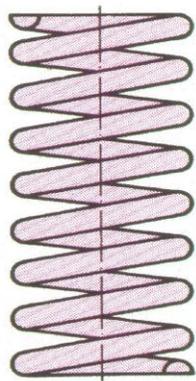
- veränderliche Wirkungslinie beim Ein-/Ausfedern
- positive Beeinflussung der Querkraft am Stoßdämpfer
- Änderung der wirksamen Übersetzung (Hebelverhältnisse)
- evtl. gezielte Veränderung der Radstellungsgrößen (Elastokinematik)

### Deaxierte Feder

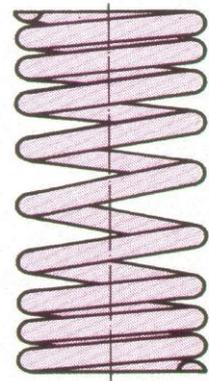
Wirklinie der Kraft  
Dämpferachse



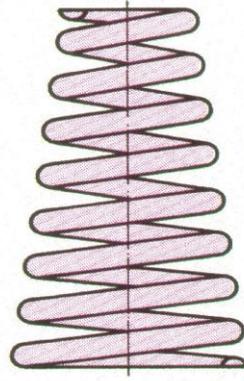
## Varianten der Federung – Progression bei Schraubenfedern



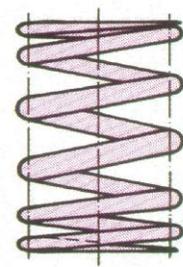
a) konstante Steigung



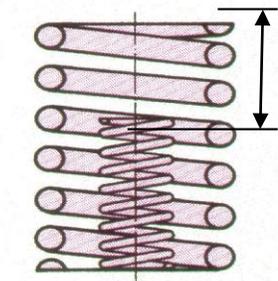
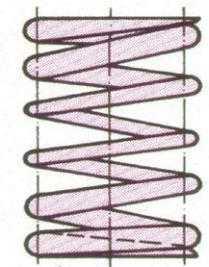
b) veränderliche Steigung



c) konische Wicklungsform



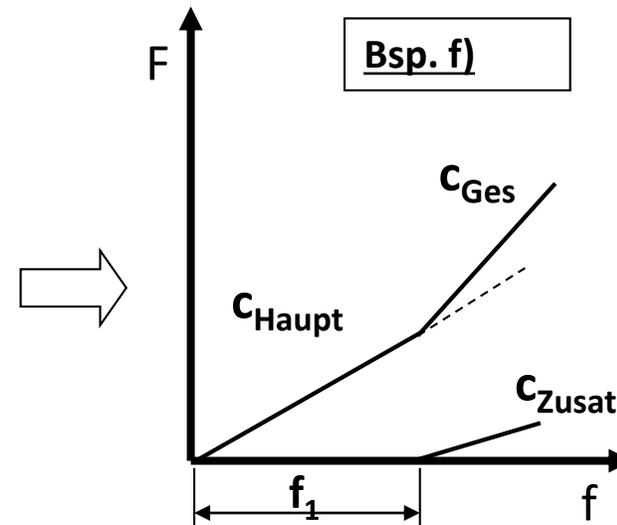
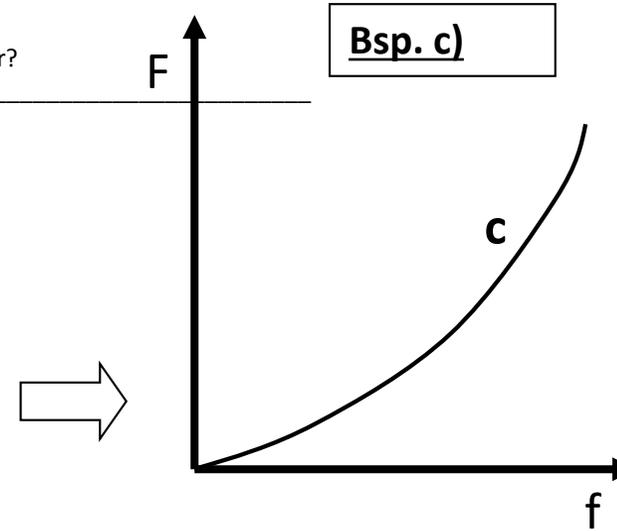
d + e) Federn aus konischem Draht



f) ineinander-gestellte Federn

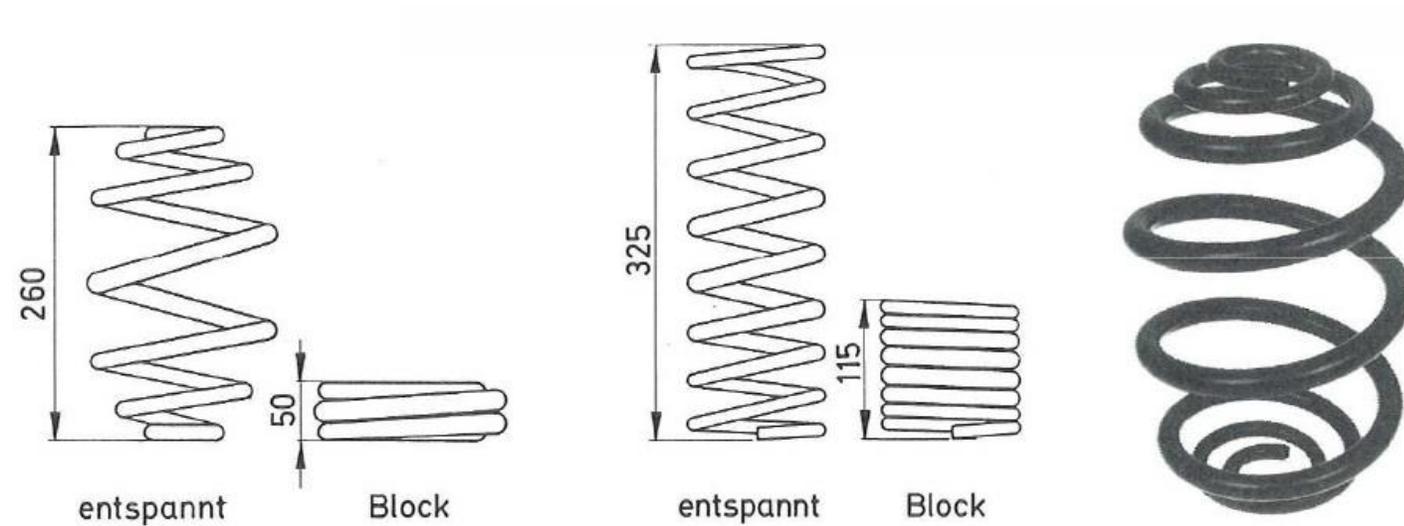
$f_1$

Was sieht man hier?  
Überschrift: \_\_\_\_\_



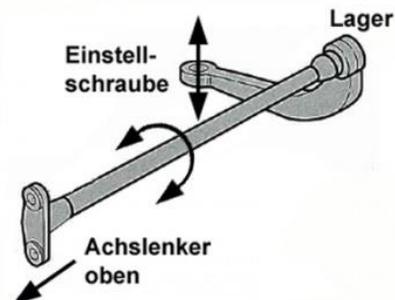
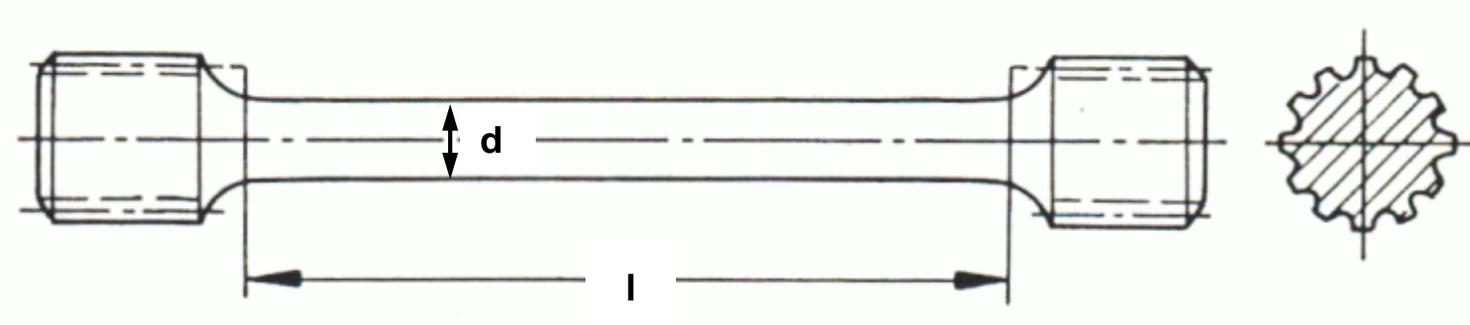
# Aufgaben von Federung und Dämpfung

## Schraubenfedern - Blockmaß

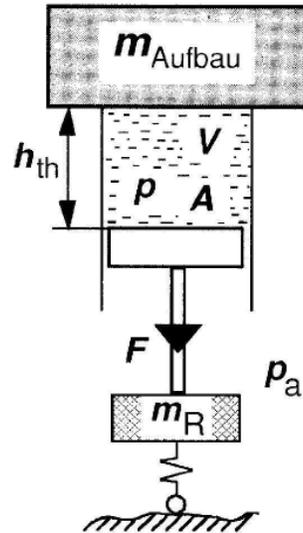


## Varianten der Federung

- Einsatz in Pkw und Leicht-Lkw (geringer Bauraum)
- einseitige Einspannung karosserieseitig
- Erzeugung des Verdrehmomentes durch einen Fahrwerkslenker als Verdrehhebel (Kurbel) mit resultierender Hubbewegung



## Gasfeder



theoretische Federlänge  $h_{th} = \frac{V}{A}$

Federsteifigkeit

$$c(f) = A \cdot n \cdot p(f) \cdot \frac{1}{h_{th}}; h_{th} = \frac{V(f)}{A}$$

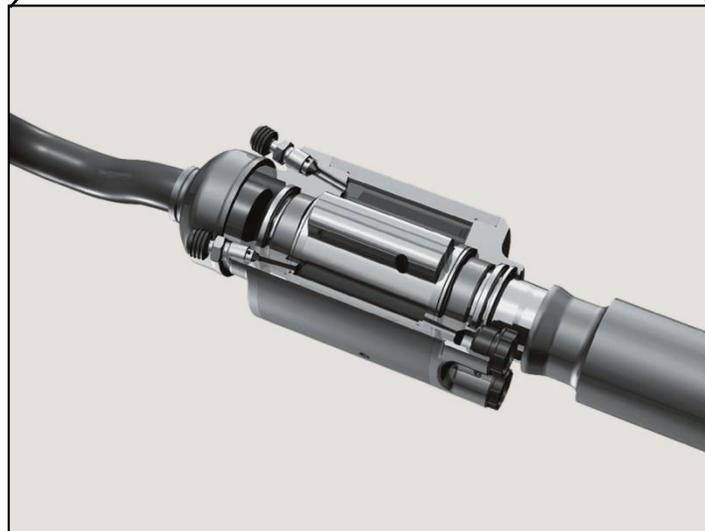
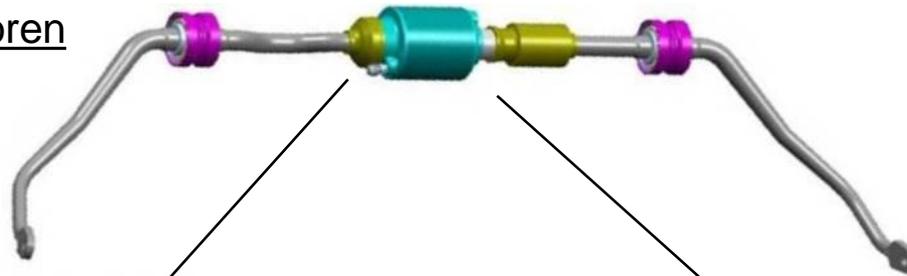
mit

f = Federweg

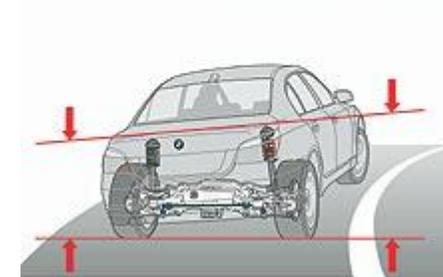
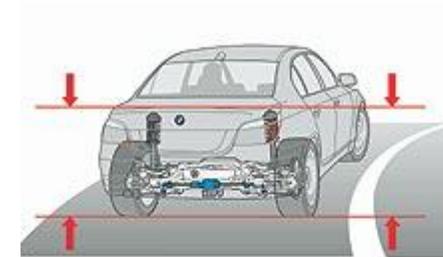
n = Polytropenexponent

## Varianten der Federung

Aktive Stabilisatoren



BMW ARS-System



## Varianten der Federung

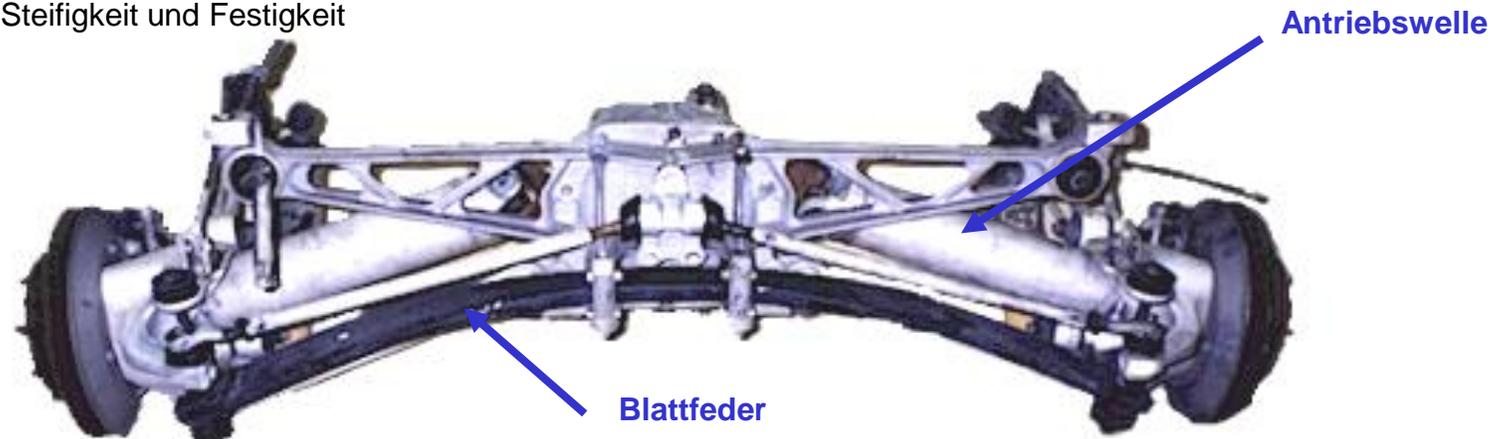
- Glaserfaserverstärkter Kunststoff (GFK)
- Carbonfaserverstärkter Kunststoff (CFK)
- Aramidfaserverstärkter Kunststoff (Kevlar)

Vorteile:

- Beanspruchungsgerechte Gestaltung (Geometrie) ist z.T. einfacher möglich als bei metallischen Werkstoffen (z.B. Parabelfeder)
- geringe Masse
- gute Steifigkeit und Festigkeit



Quelle: ZF



Hinterachse Corvette mit einlagiger Blattfeder aus Faserverbundwerkstoff

## Varianten der Federung

**Prinzipien:** Metall- u. Elastomerfedern → Formänderungsenergie

Luftfedern

→ Kompression/Volumenänderungsenergie  
des gasförmigen Mediums

### Historie:

- erste Patente 1847 (USA), 1900 (D)
- Serieneinführung: 1953 (USA), 1957 (D),  
1960 (Borgward), 1964 (MB W100)

### Vorteile:

- niedrige, fast konstante Eigenfrequenz
- gute Annäherung an ideale Federkennlinie
- schnelles Ansprechen durch geringe Eigenreibung
- Niveauregulierung möglich
- hohe Lebensdauer

### Nachteile:

- keine Rad- u. Achsführungseigenschaften
- aufwändige Konstruktion

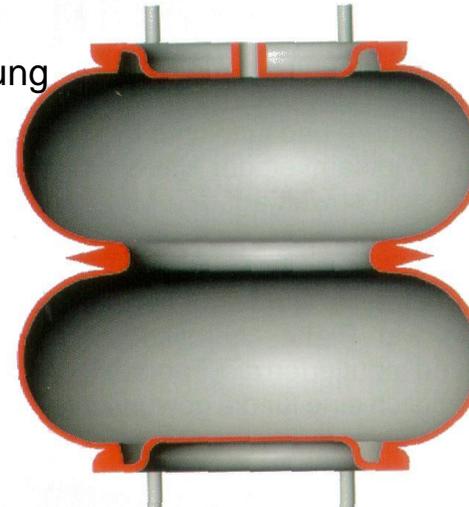
### Haupteinsatzgebiete:

- Lkw, Bus
- schwere Pkw

Rollbalg-  
Luftfeder



Bilder: Continental

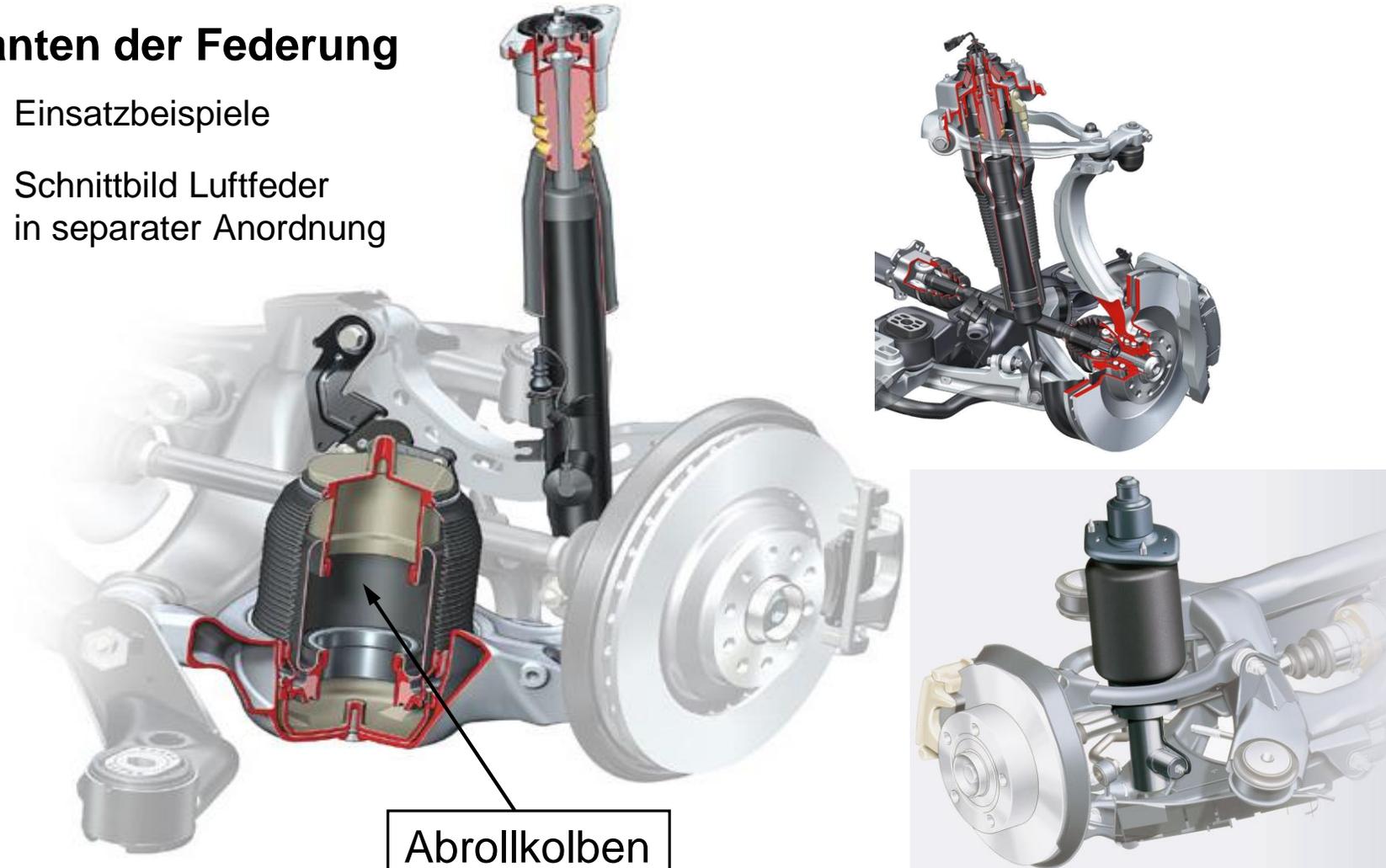


Faltenbalg-  
Luftfeder

## Varianten der Federung

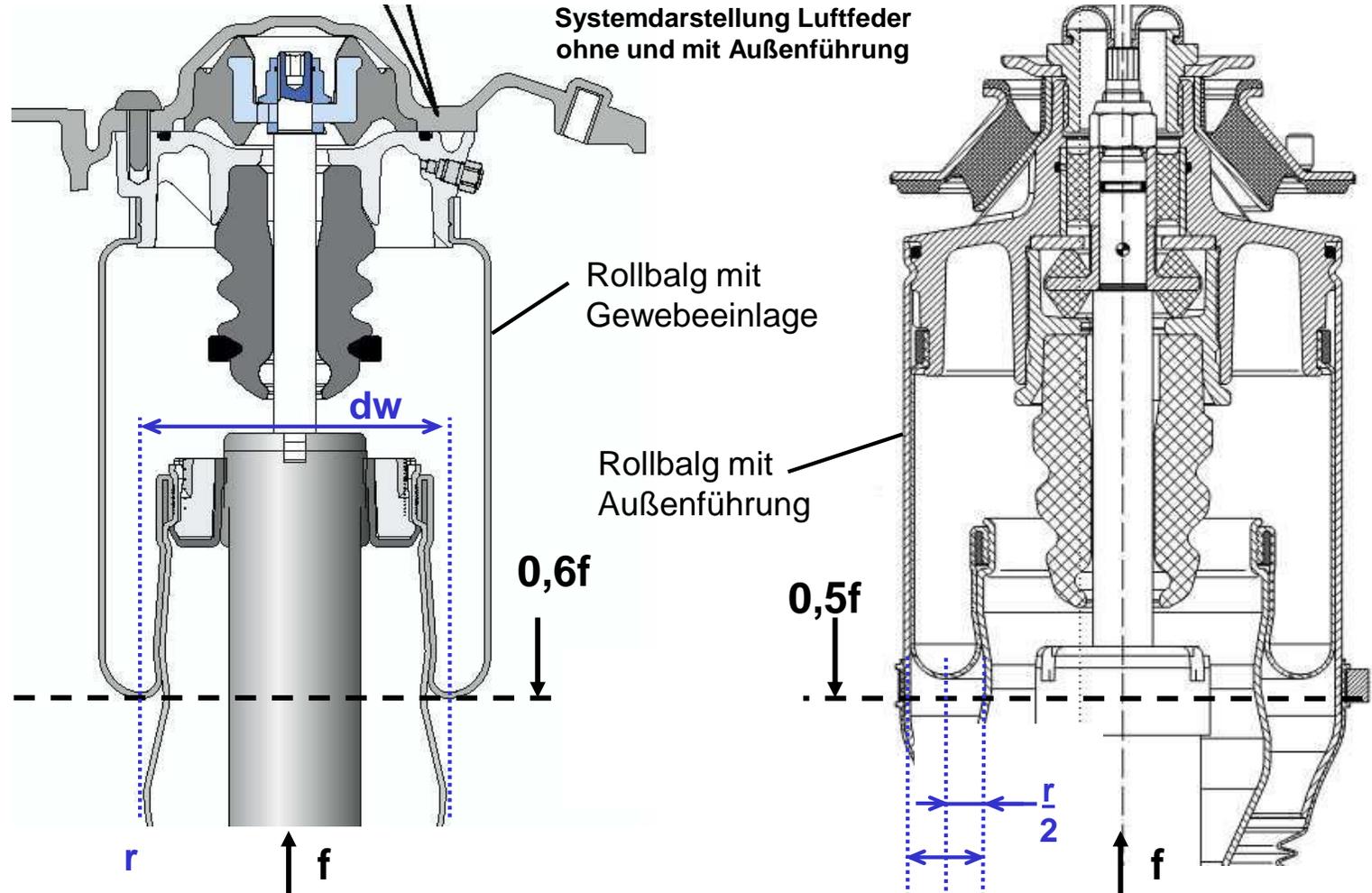
Einsatzbeispiele

Schnittbild Luftfeder  
in separater Anordnung



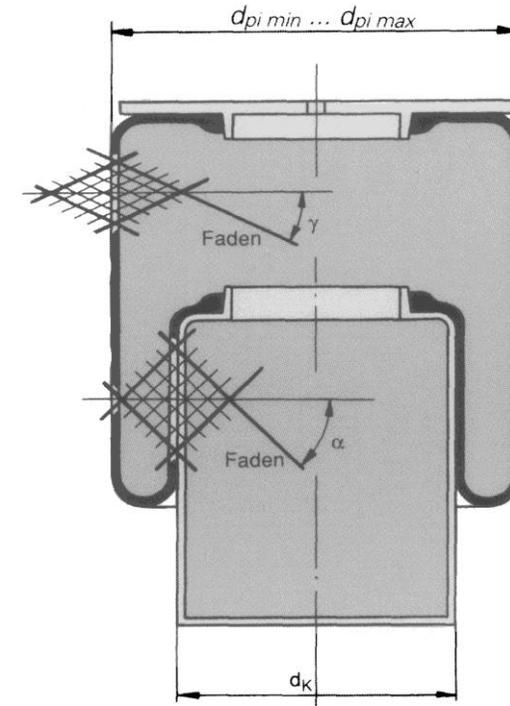
# Federungssysteme

## Varianten der Federung



## Varianten der Federung

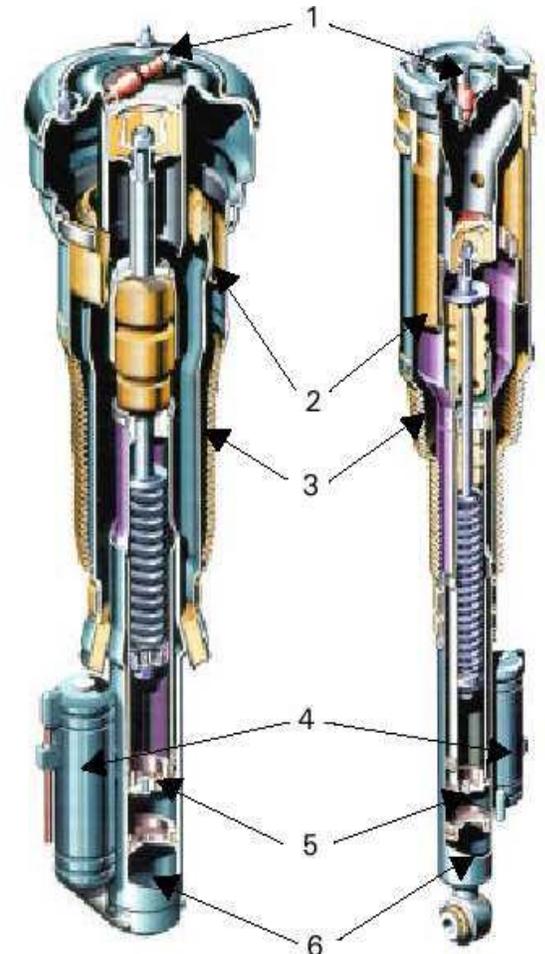
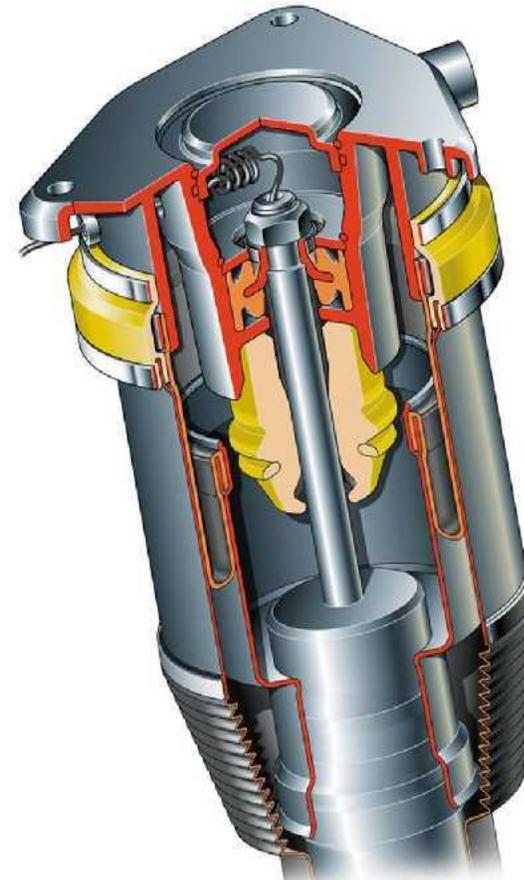
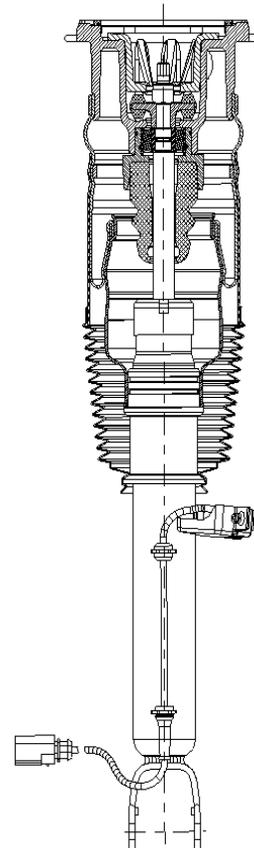
Luftfeder-  
Dämpfereinheit



Das Ansprechverhalten der Rollbalg-Luftfeder wird wesentlich durch die Orientierung des Rollbalg-Fadenwinkels bestimmt.

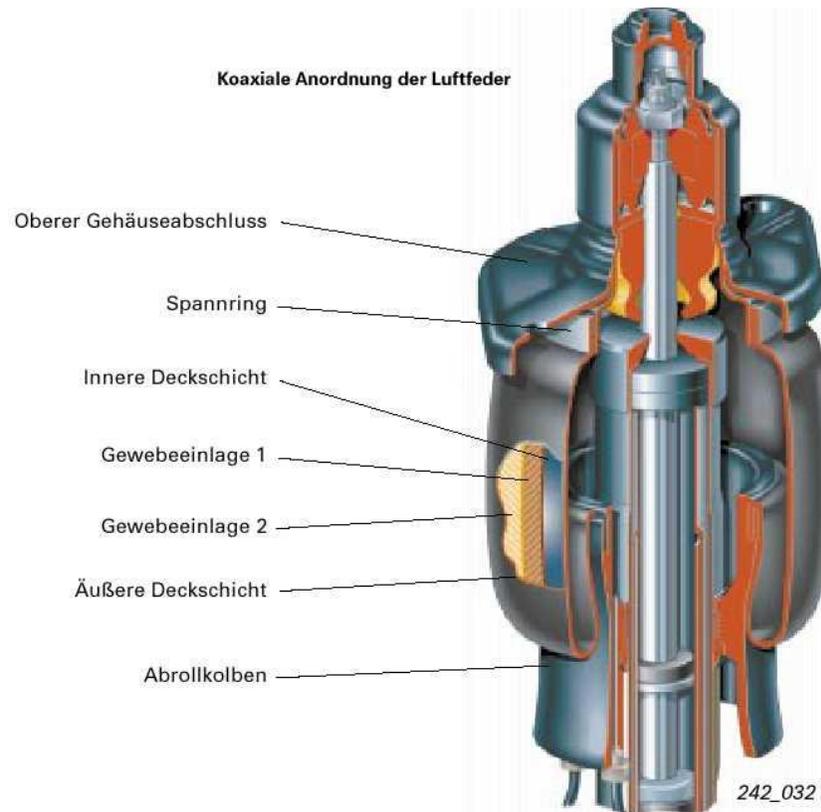
## Varianten der Federung

Ausführungen von  
Luftfedersystemen  
Hinterachsluftfedern

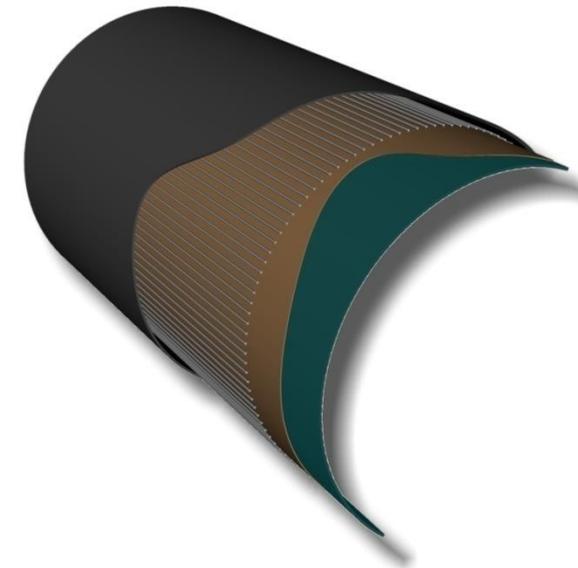


## Varianten der Federung

### Schnittbild Luftfederbein ohne Außenführung



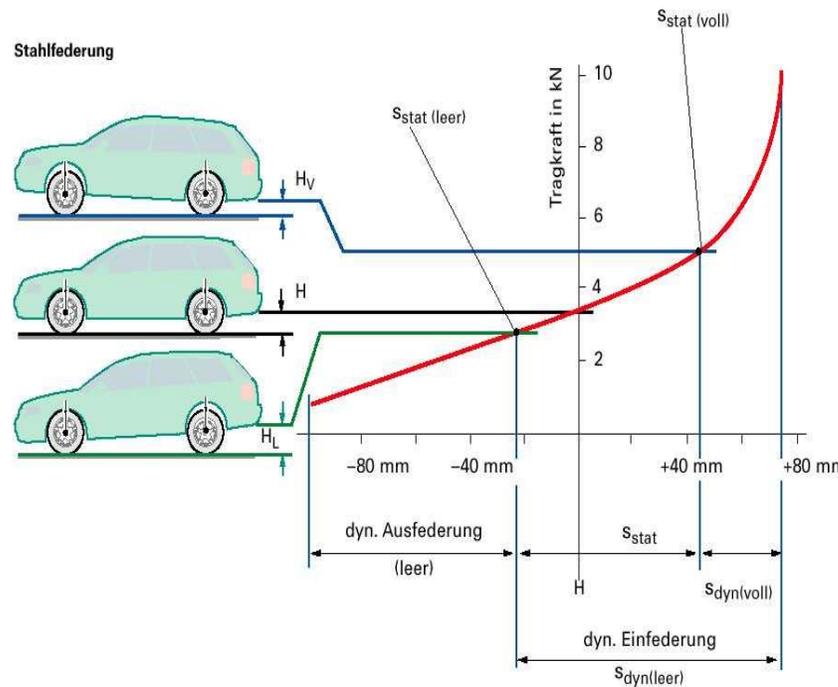
### Luftschlauch mit Längsgewebe für System mit Außenführung



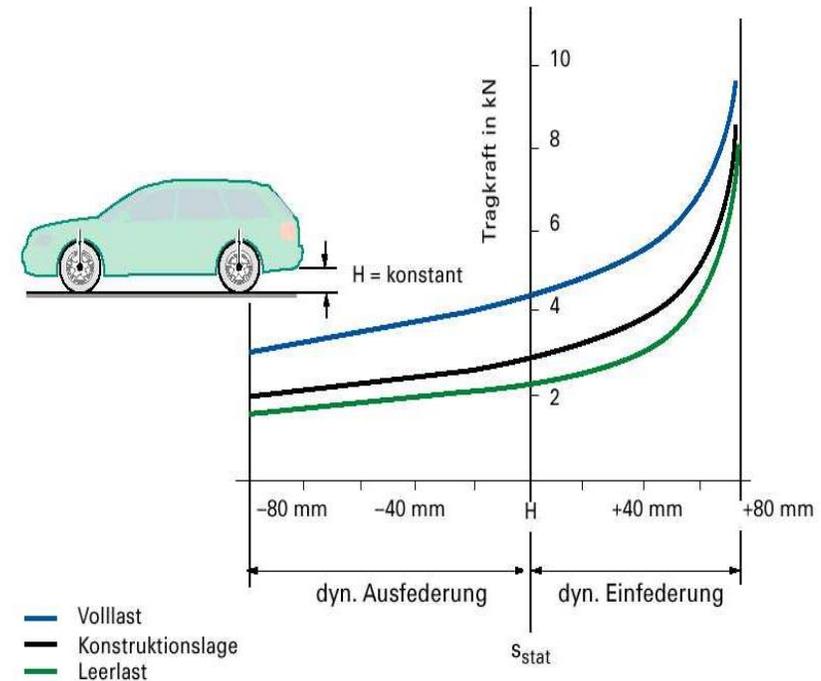
## Varianten der Federung

Federwege u. Höhenstand ohne und mit Niveauregulierung

### Stahlfeder (progressiv)



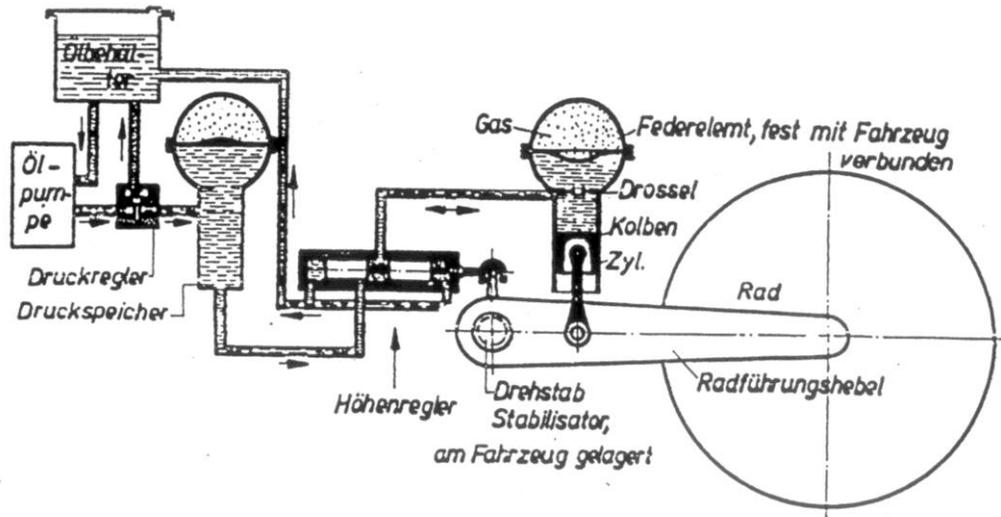
### Luftfeder



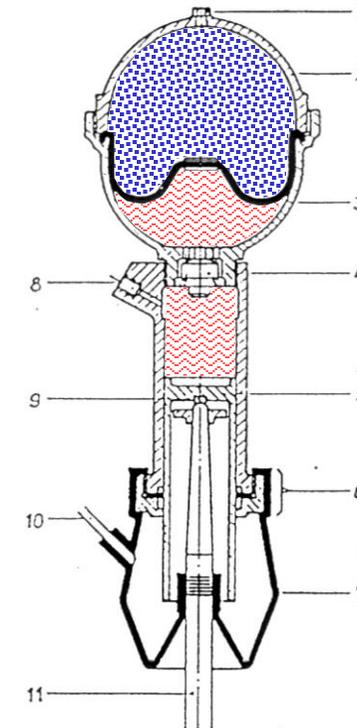
## Varianten der Federung

	Stahlfeder	Luftfeder mit Niveauregulierung
Fahrkomfort	veränderlich $\omega \sim \frac{c}{F}$	Nahezu konstant $\omega \sim \frac{p}{p_{\ddot{u}}}$
Gesamtfederweg	$f_{ges} = f_{stat} + f_{dyn}$	Luftfeder kann weicher ausgelegt werden $f_{ges} = f_{dyn}$
Niveaulage	Abhängig vom Beladungszustand	Konst.
Raumbedarf	Bei modernen Schraubenfedern sehr gering (Miniblockfeder)	i.A. deutlich größer (Summe aller Bauelemente)

## Varianten der Federung



- Bekannte Anwendung bei Citroen
- Zusammenwirken einer Gasfeder ( $N_2$ ) und einer Hydraulikeinheit
- Durch Anpassung des hydr. Volumens erfolgt eine Niveauregulierung ( $m_{\text{Gas}} = \text{konst.}$ )
- Dämpfung erfolgt in einem Ventil zwischen Kugelvolumen und Hydraulikzylinder



 Gas

 Öl

- 1 Gas-Einfüllöffnung
- 2 Stickstofffüllung
- 3 Membrane
- 4 Stoßdämpfer
- 5 Kolben
- 6 Dichtsystem

- 7 Dichtmanschette
- 8 Zuleitung für Drucköl
- 9 Druckstück für Stoßelabstützung
- 10 Rücklauf
- 11 Stößel

## Varianten der Federung



Bild: ZF-Sachs

### Allgemein

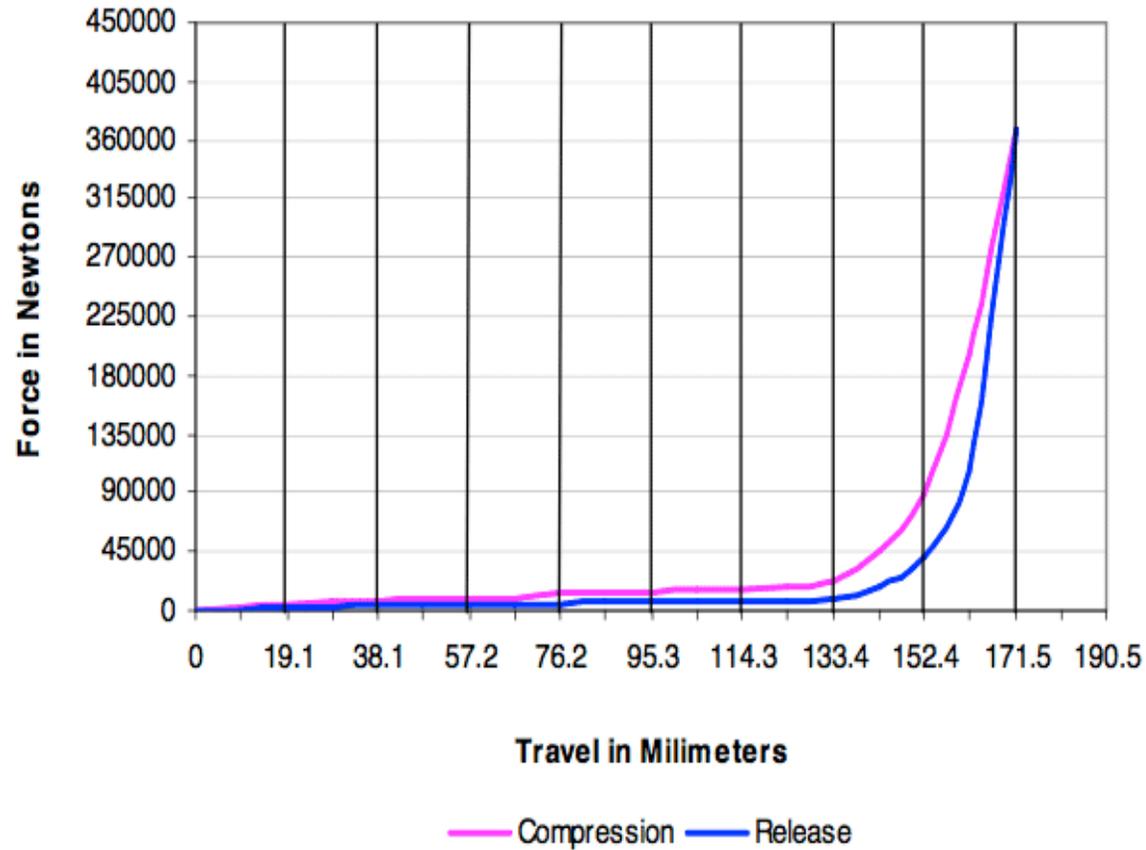
Einsatz von Elastomerfedern nur in untergeordneten Fällen als lasttragende Elemente (meist als Zusatzfedern)

Gründe:

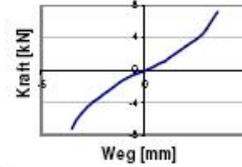
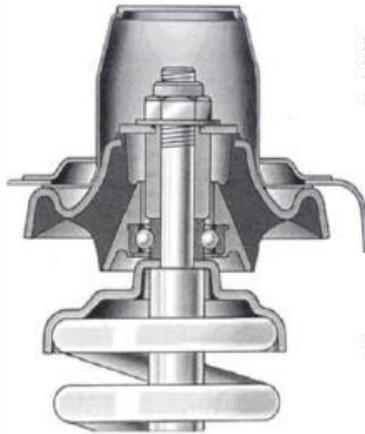
- Gummi kriecht (Setzverhalten bei langer Vorlast)
- Hysterese frequenzabhängig (hohe Frequenz = hohe unerwünschte Dämpfung)
- Eigenschaften stark temperaturabhängig

### Materialien

- Gummi (Naturkautschuk)
  - EPDM (-50...120°C)
  - NR (-60...80°C)
  - SBR (-50...100°C)
  - Thermoplastische Polyurethane - TPU
  - Thermoplastische Polyester - TPE
  - Thermoplastische Olefine - TPO
  - Polyurethanelastomere - PUR (-25...80°C)
- } 60...120°C)

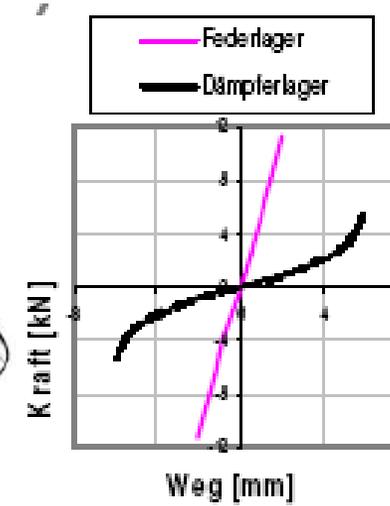
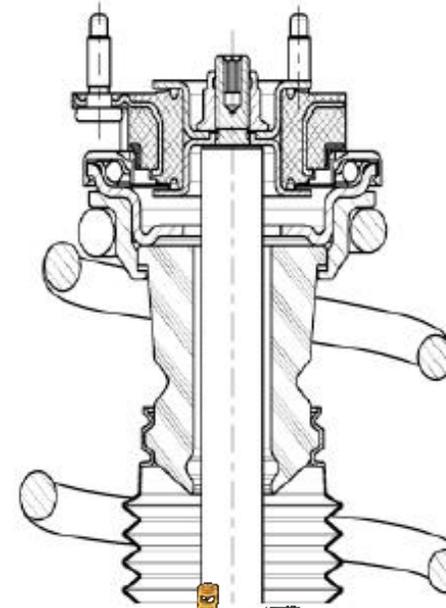


## Varianten der Federung

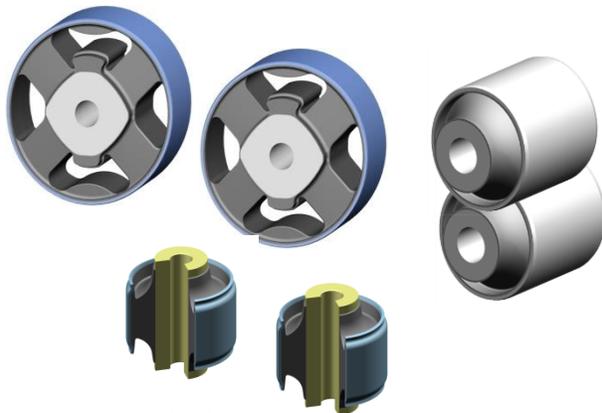


Feder-, Dämpfer- und Pufferkräfte werden durch ein einteiliges Gummielement abgestützt.

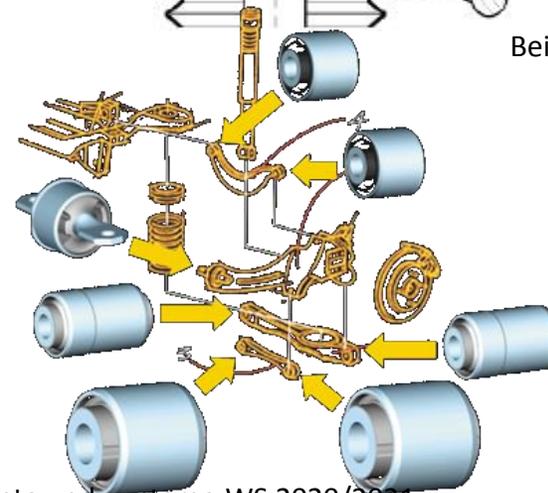
Beispiel: Fiat Punto /Bravo / Brava Y10



Beispiel: Ford Mondeo CD 132



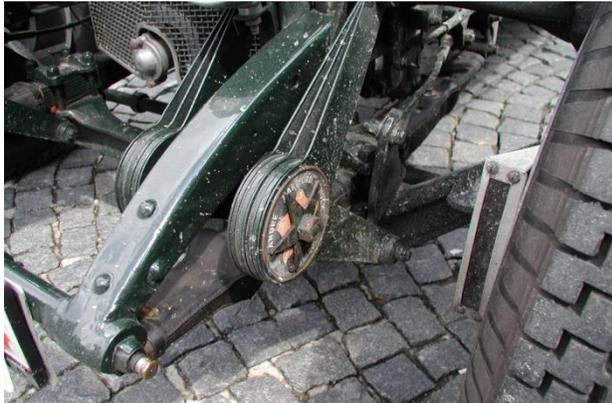
Beispiel: Audi R8



Beispiel: Ford Focus

# Die Aufgaben des Stoßdämpfers

## Historischer Rückblick – Dämpferbauarten



Mechanischer  
Reibungsdämpfer



Mechanischer Band-Stoßdämpfer (1926)



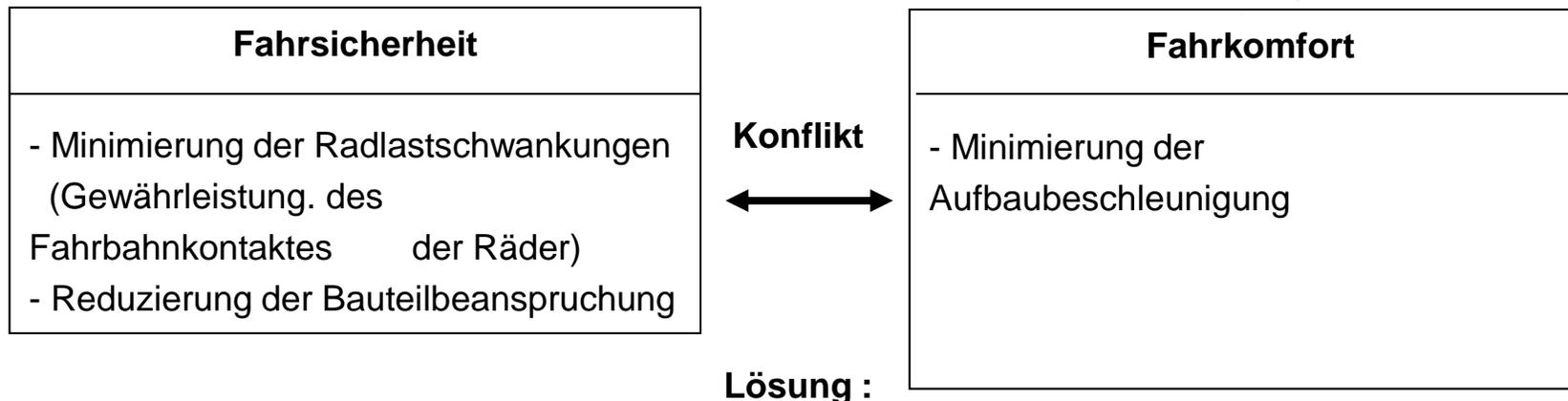
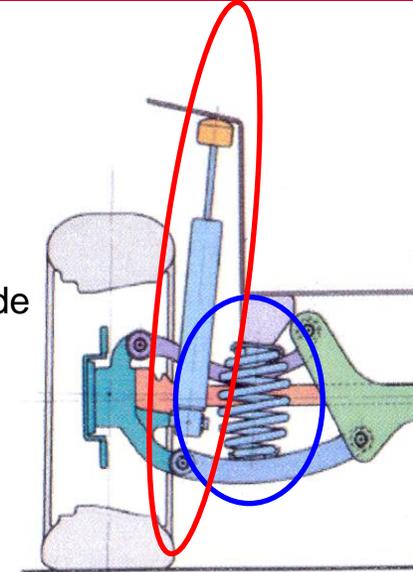
Hydraulischer Hebel-  
Stoßdämpfer (1930)

## Stoßdämpfer (shock absorber) = Schwingungsdämpfer

- Federung:
- nimmt kinetische Energie auf und gibt diese wieder ab
  - ergibt Radlastschwankungen mit gleichbleibender Amplitude
  - Beeinträchtigung der Fahrsicherheit!

## Dämpfung:

Bedämpfung der auftretenden Schwingungsamplituden führt zum schnellen Abklingen der Vertikalbewegung



Kompromiss bei der Dämpfungsauslegung im Hinblick auf den Einsatzzweck des Fahrzeuges (komfortorientierte Limousine – sportlich orientiertes Fahrzeug – Rennfahrzeug)

## Varianten der Dämpfung

### Mechanisch

- basierend auf Coulomb'scher Reibung
- ausgeführt als reibungsbehaftete Parabelfedern bzw. Hebel- oder Mehrscheibendämpfer
- schwierige Abstimmung auf komplexe Anforderungen
- bis in die 30er Jahre Standard, heute kaum noch genutzt als Fahrzeugdämpfung

### Pneumatisch

- basierend auf Strömungswiderstand eines gasförmigen Mediums
- geringes Dämpfungsvermögen bei kleinen Amplituden
- selten genutzt als Fahrzeugdämpfung

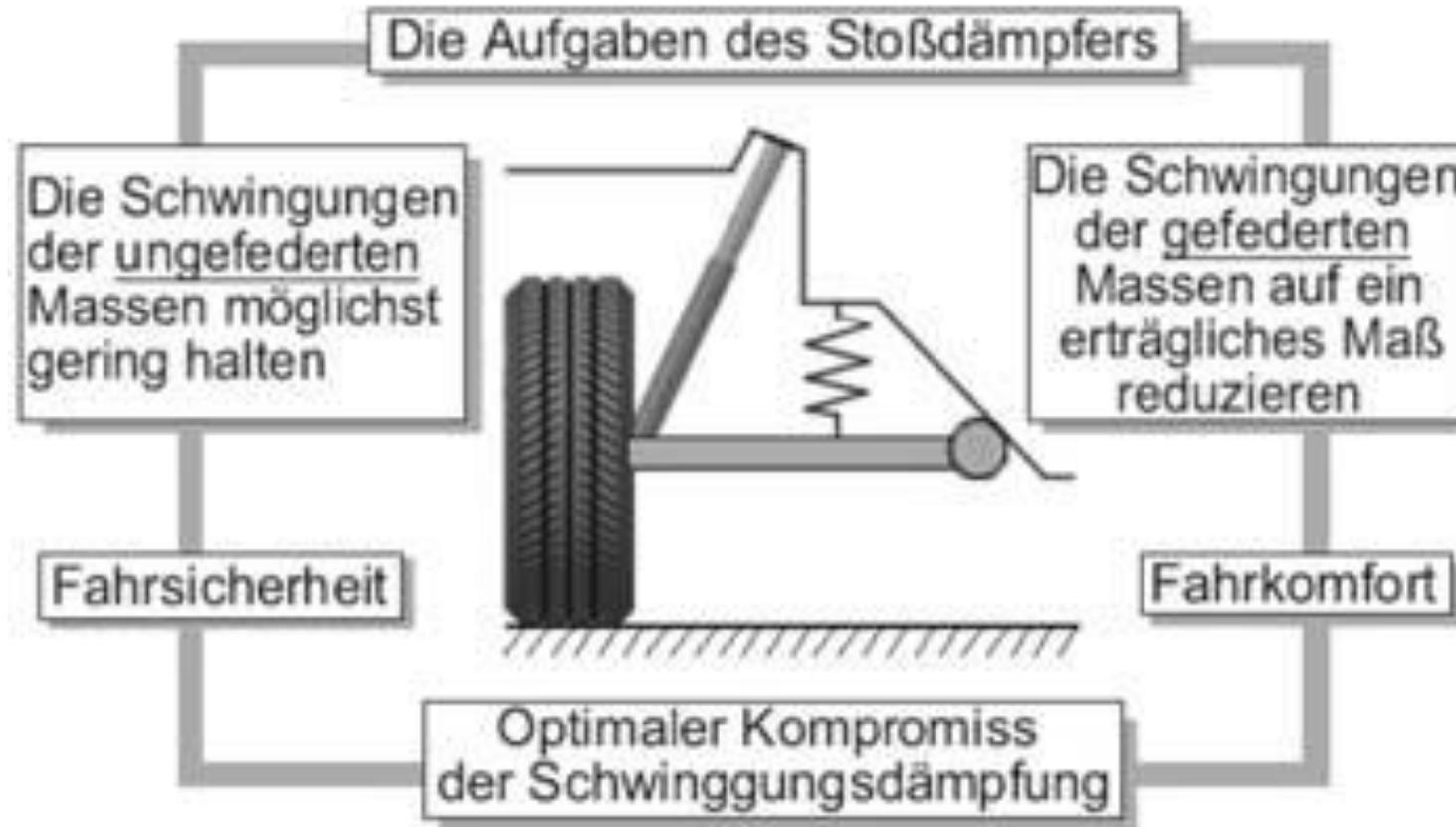
### Hydraulisch

- basierend auf Strömungswiderstand eines flüssigen Mediums
- gut abstimmbare auf komplexe Anforderungen
- Einrohr- und Zweirohrstoßdämpfer (und Mischbauformen)
- Hauptbauform als Kraftfahrzeugdämpfer

### Neue Technologien

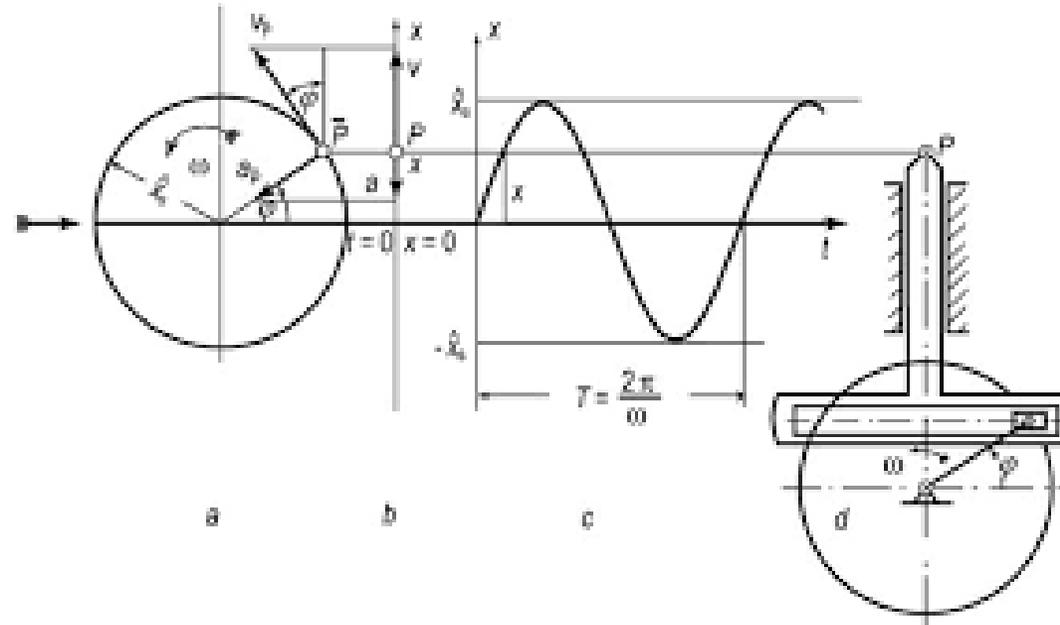
- auf Basis elektro- und magnetorheologischer Flüssigkeiten (ERF+MRF) oder
- elektromagnetische Dämpfung
- Entwicklungsziele: höhere Variabilität d. Dämpfungswirkung bei vertretbarem Konstruktions- und Kostenaufwand (!)

# Die Aufgaben des Stoßdämpfers



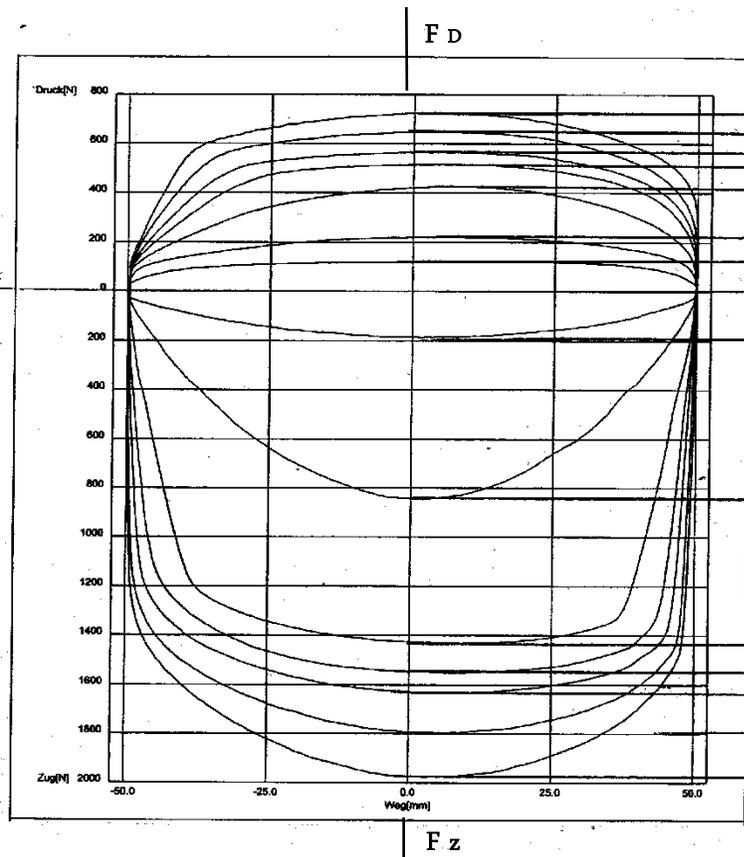
# Dämpferprüfung

## Sinus Anregung durch Exzenter

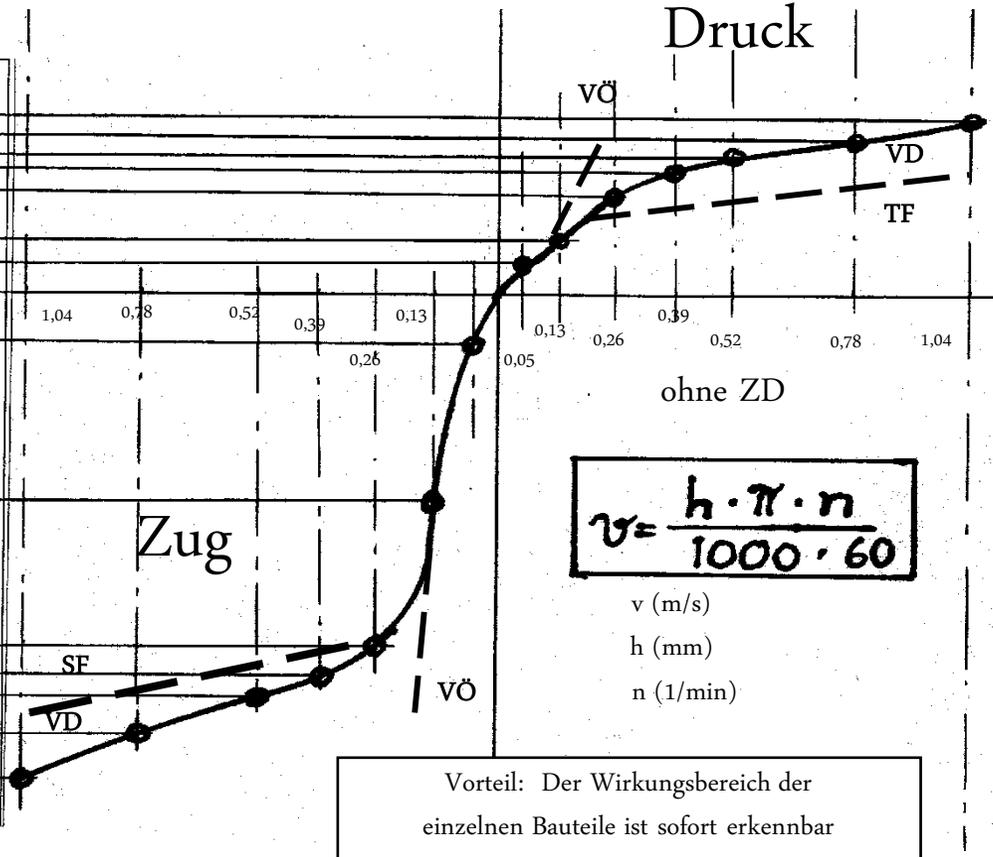


## Kraft – Weg – Diagramm

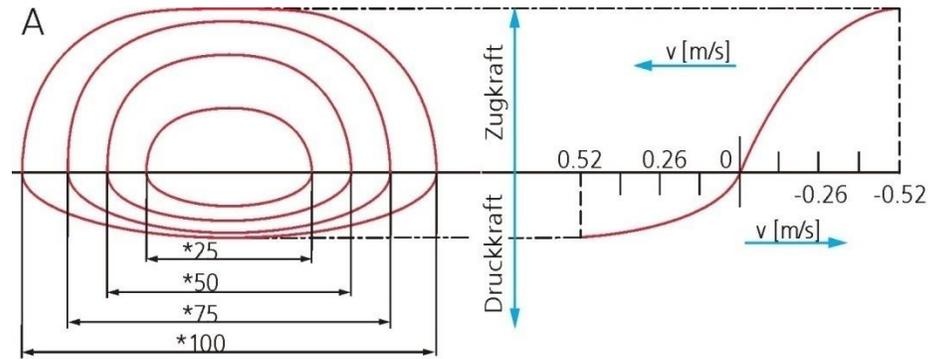
$n = 10 \text{ min}^{-1}$  bis  $200 \text{ min}^{-1}$



## Kraft- Geschwindigkeits- Diagramm

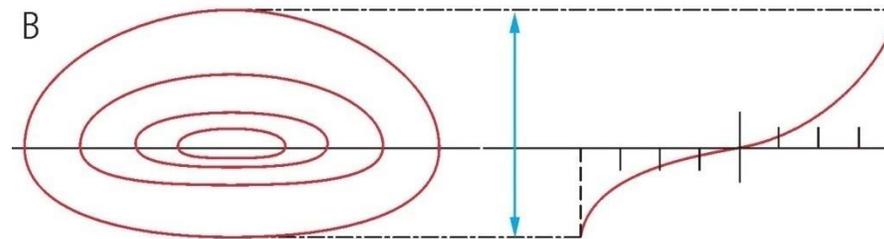


$F_{\text{max}}$  in Hubmitte

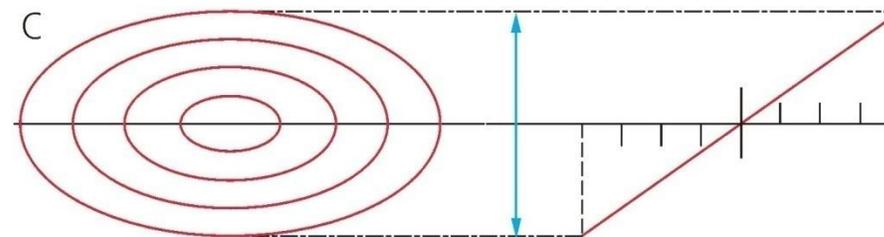


A degressiv

Drehzahl konstant für alle Hübe:  $100 \text{ min}^{-1}$  (\*=Hub[mm])

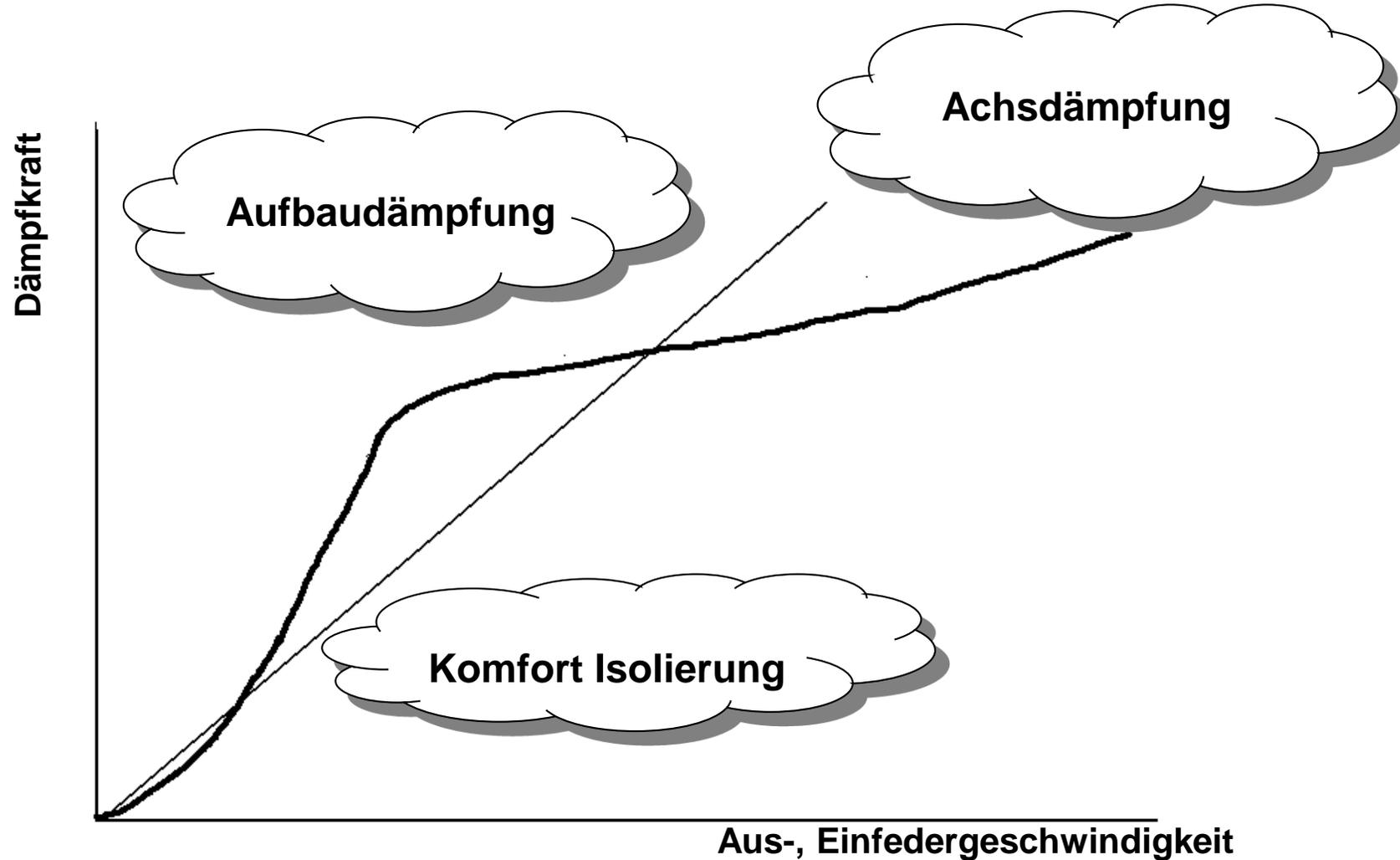


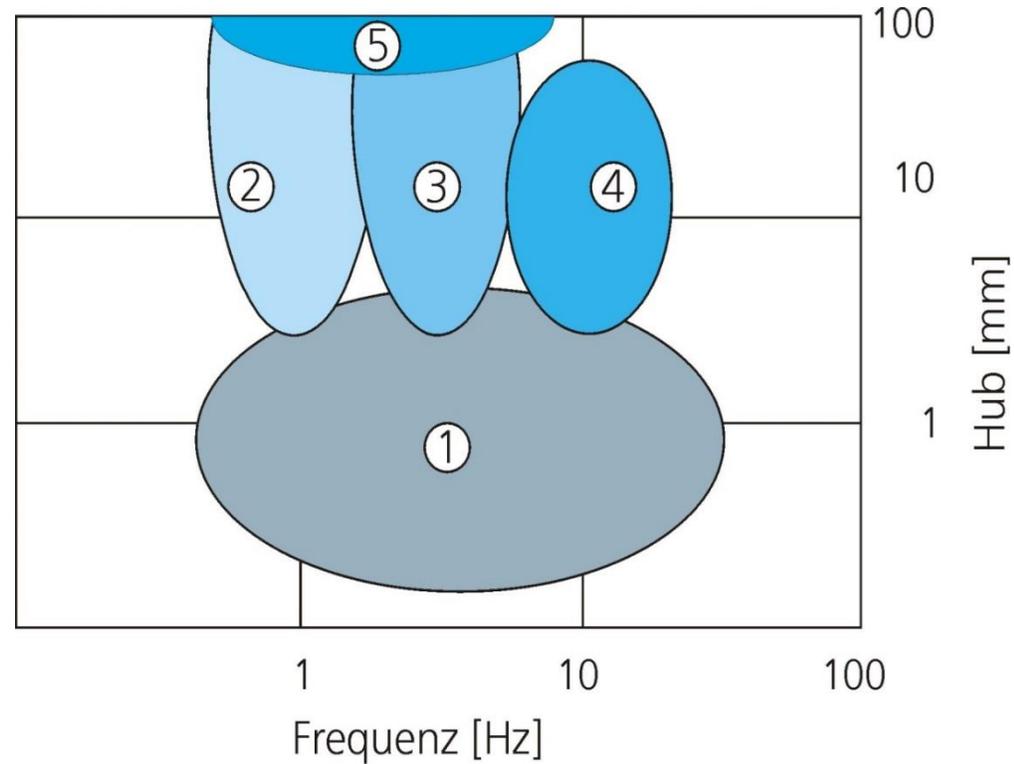
B progressiv



C linear

# Kennlinien prinzipiell

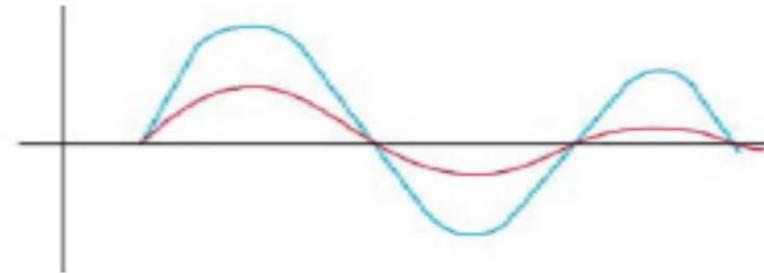
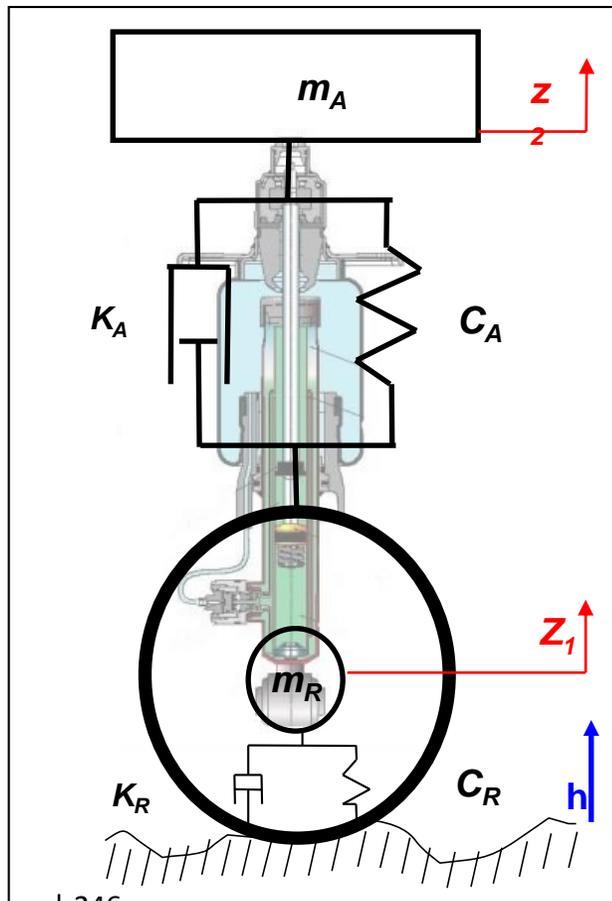




- 1 Abrollkomfort
- 2 Aufbaubewegungen
- 3 gegenphasiges Schwingen (Stuckern)
- 4 Achsbewegungen
- 5 Anschläge des Dämpfers

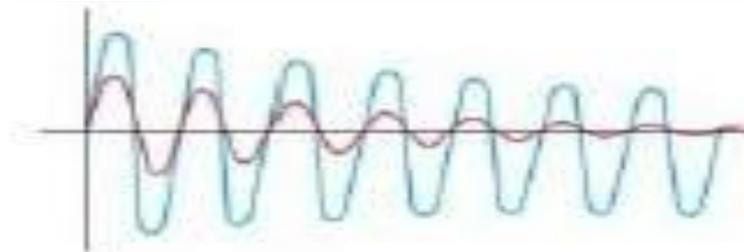
## Varianten der Dämpfung

Idealisierte Darstellung des Fahrzeuges als Zweimassenschwinger



ca. 1,5 Hz

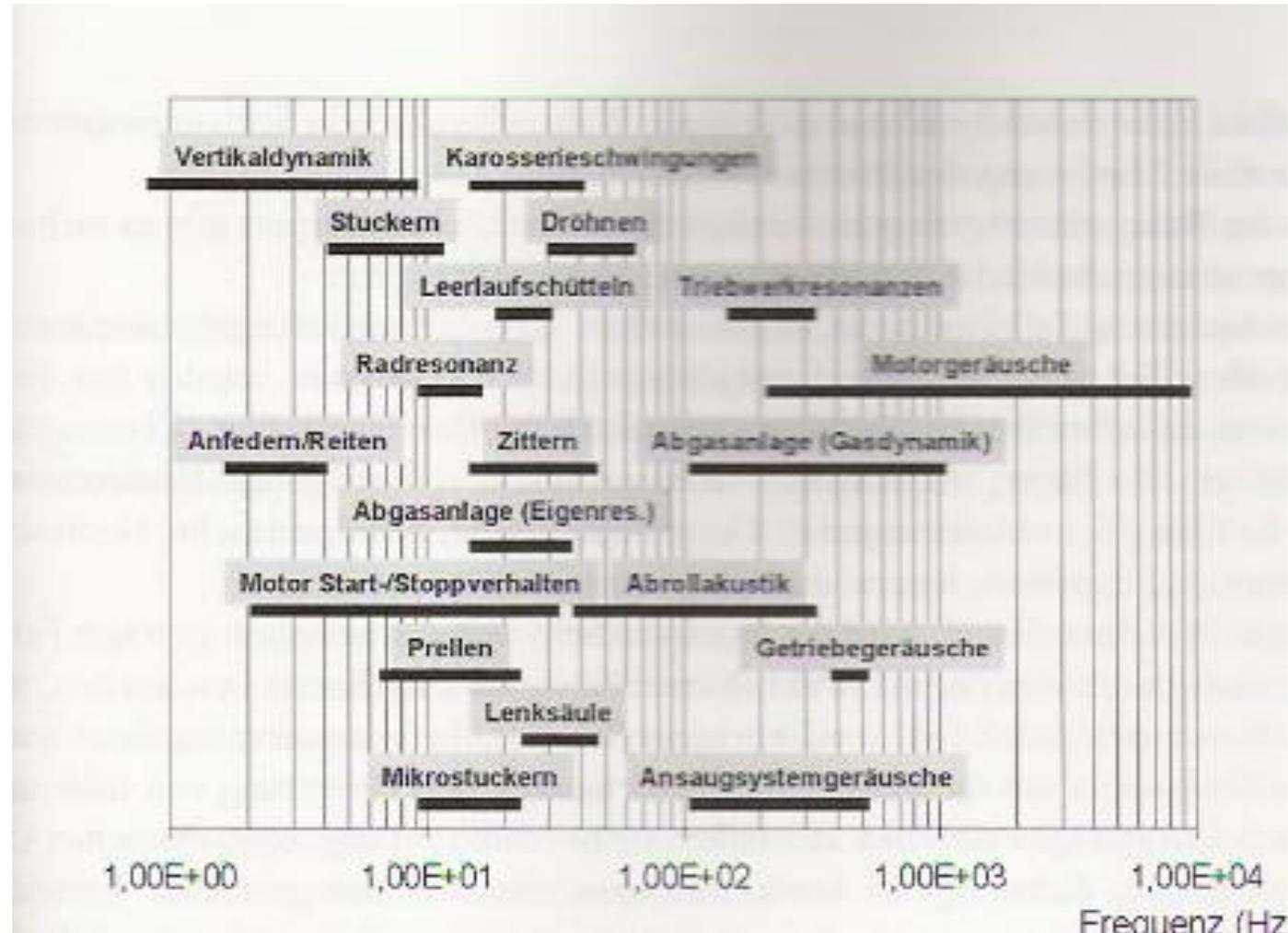
$m_A$ Aufbaumasse	$m_R$ Rad- bzw. Achsmasse
$c_A$ Steifigk. Aufbaufeder	$c_R$ Steifigk. Reifenfeder
$k_A$ Aufbaudämpfungskonst.	$k_R$ Reifendämpfungskonst.
$z_2$ Aufbauweg	$z_1$ Radweg
$h$ Anregungsweg	



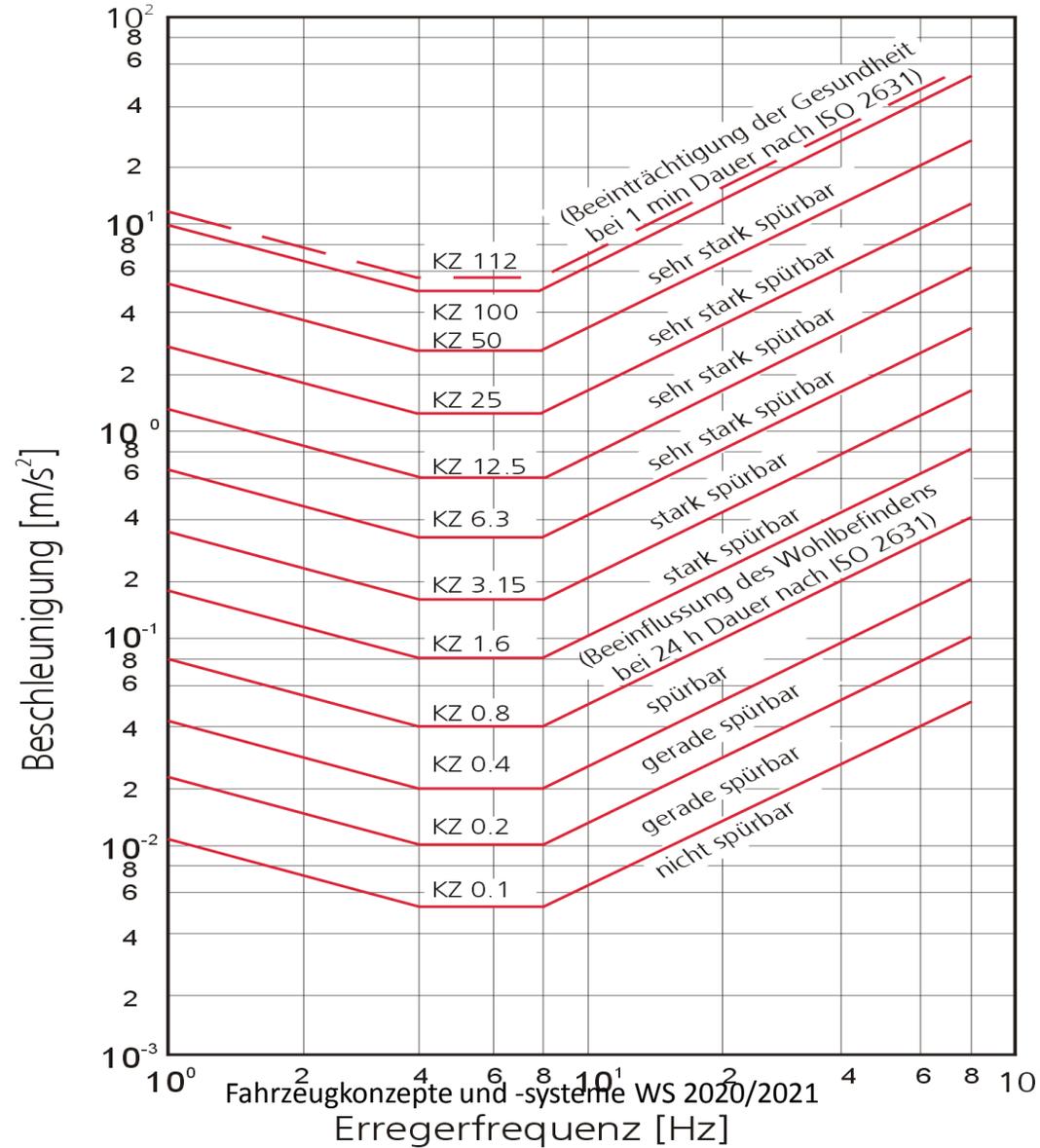
ca. 12 Hz

— ohne Schwingungsdämpfer

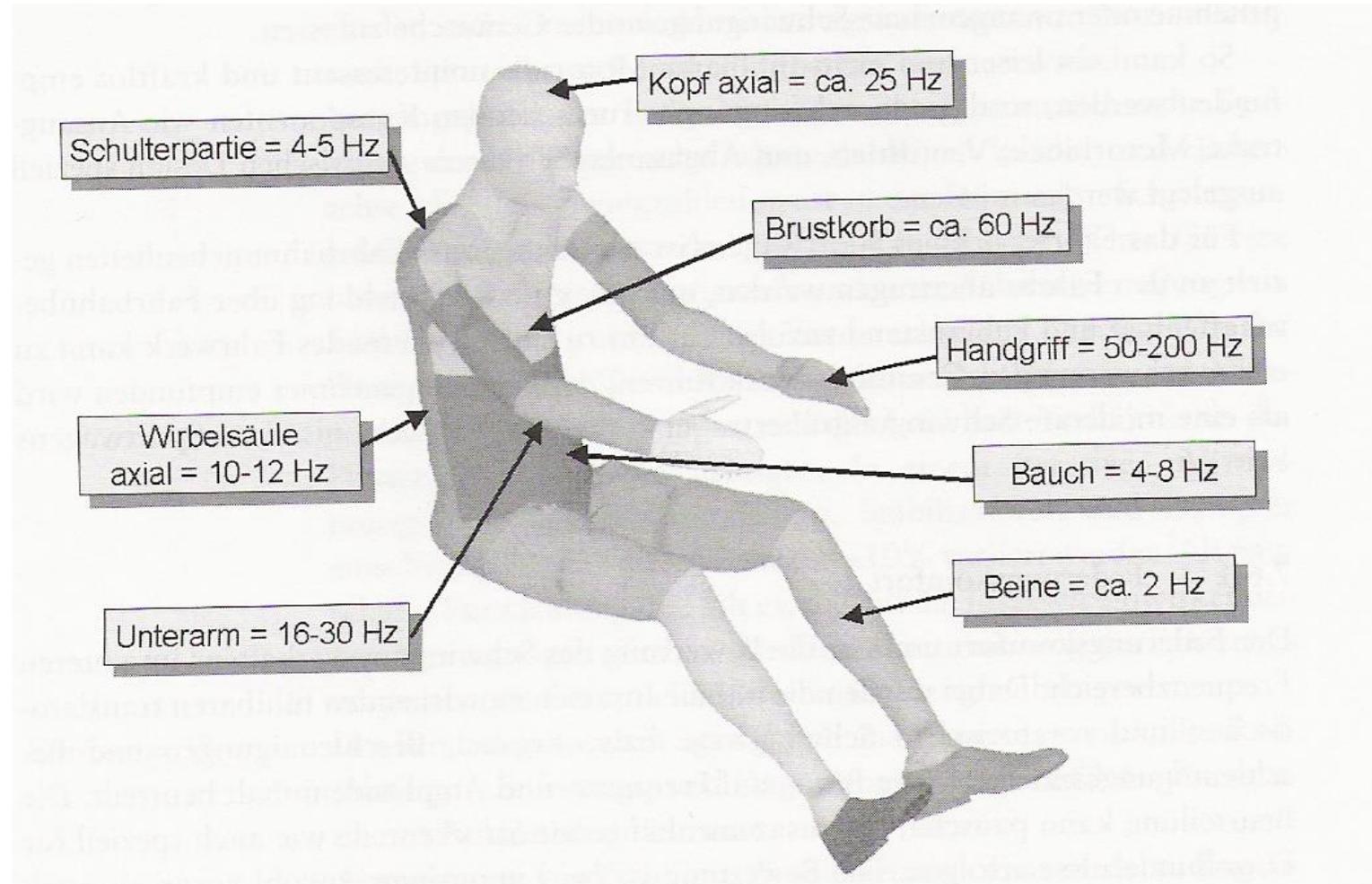
Fahrzeugkonzepte und mit Schwingungsdämpfer

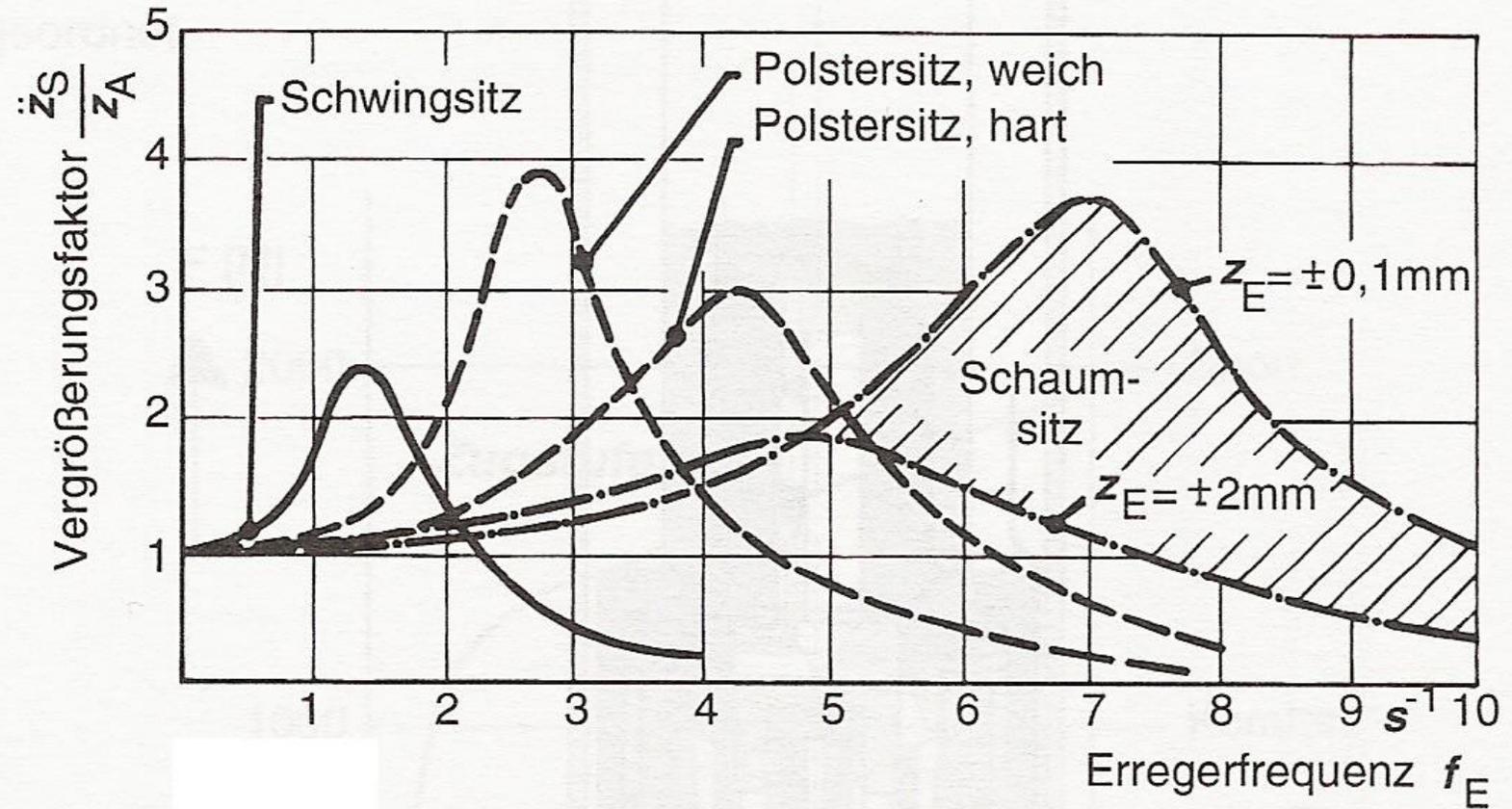


## Auswirkungen von Schwingungen auf den menschlichen Rumpf



Quelle: Mitschke, Manfred: Dynamik der Kraftfahrzeuge





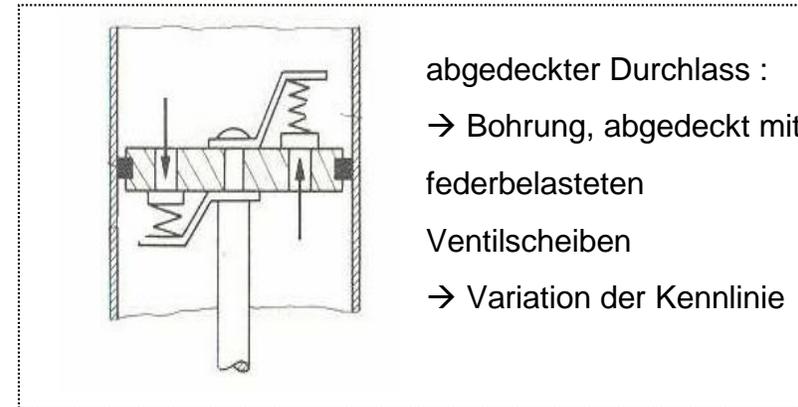
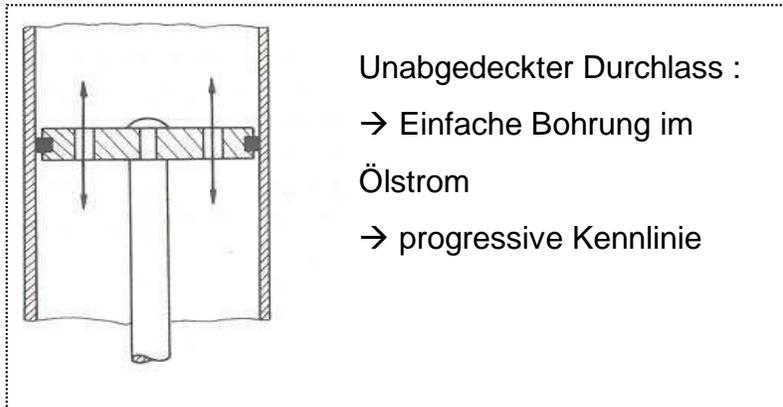
Vergrößerungsfunktionen verschiedener Fahrzeugsitze

	<b>Funktion</b>	<b>Kosten</b>	<b>Erfahrung Anwendung</b>
<b>Reibung</b>	konstant	niedrig	Verschleiß selten
<b>Flügel hydraulisch</b>	$f(v_{\text{einfeder}})$	sehr hoch	selten
<b>Hebel hydraulisch</b>	$f(v_{\text{einfeder}})$	hoch	selten
<b>Teleskop hydraulisch</b>	$f(v_{\text{einfeder}})$	sehr niedrig	Standard-Bauart
<b>Teleskop elektrohydr.</b>	geregelt	hoch	wachsend
<b>Luft Feder Dämpfer</b>	frequenzselektiv	sehr hoch	Niveauregel. erforderlich
<b>(ERF(elektorrheologisch)) MRF(magnetorheologisch)</b>	geregelt	sehr hoch	Serie, sportl.Fahrzeuge
<b>Elektromagnetisch</b>	geregelt	unbekannt	zu schwer, zu teuer

## Varianten der Dämpfung

### Wirkungsweise von Ventilöffnungen:

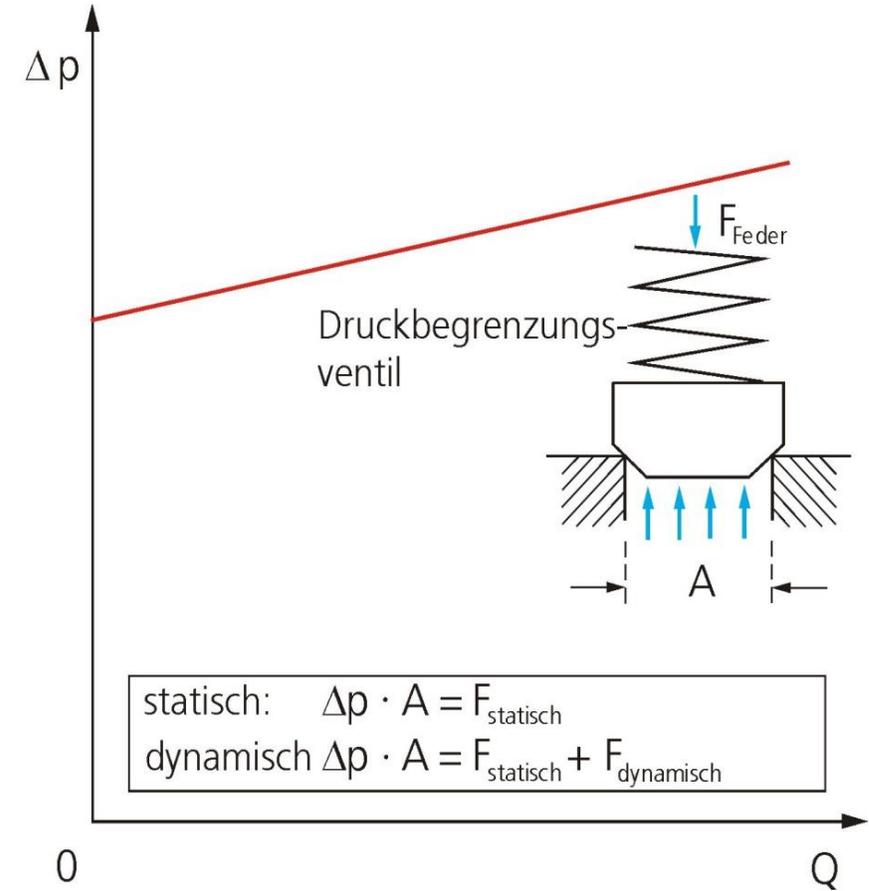
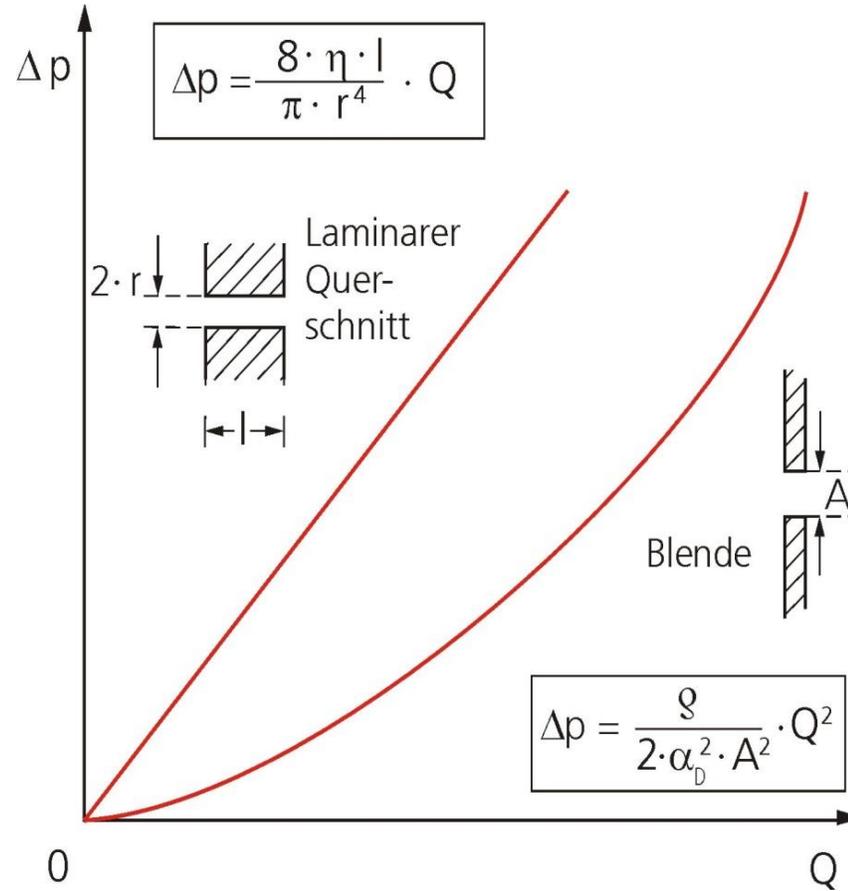
- Nutzung spezieller Mineralöle als Druckübertragungsmedium
- Dämpfungswirkung durch Strömungswiderstand des Mediums (Öls) an Drosselstellen
- Drosselstellen : unabgedeckte bzw. abgedeckte Durchlässe



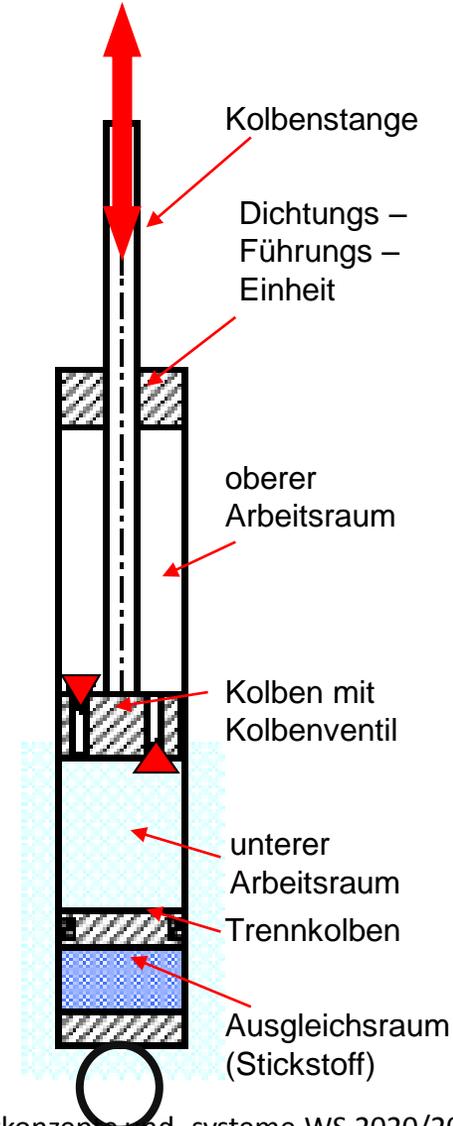
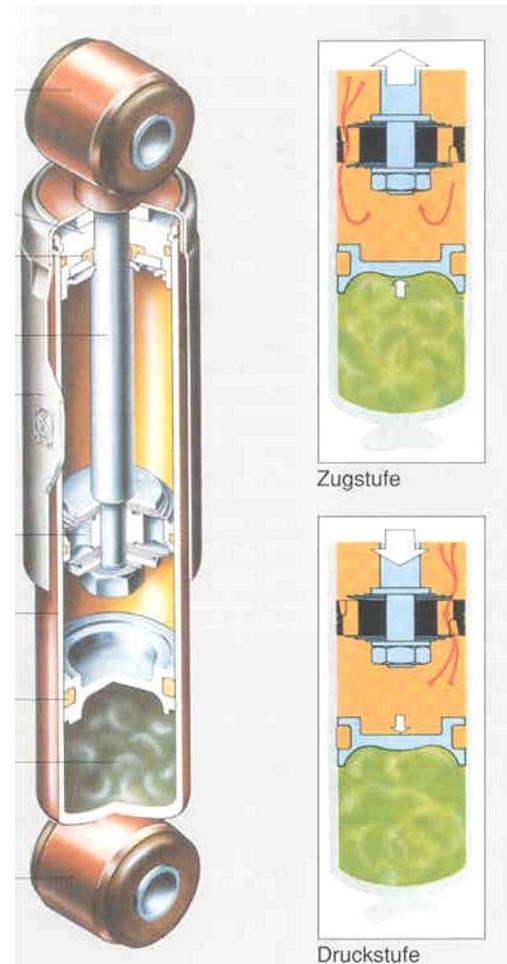
→ „Bau“ spezieller Kennlinien mit progressiven, linearen und degressiven Anteilen durch geschickte Kombination verschiedener Drosselstellen.

### Anforderungen an die Dämpferöle :

- Hohe Scherstabilität, gute Schmiereigenschaften, geringe Kavitationsneigung über den gesamten Temperaturbereich → Einsatz spezieller mit Additiven versehener Mineralöle

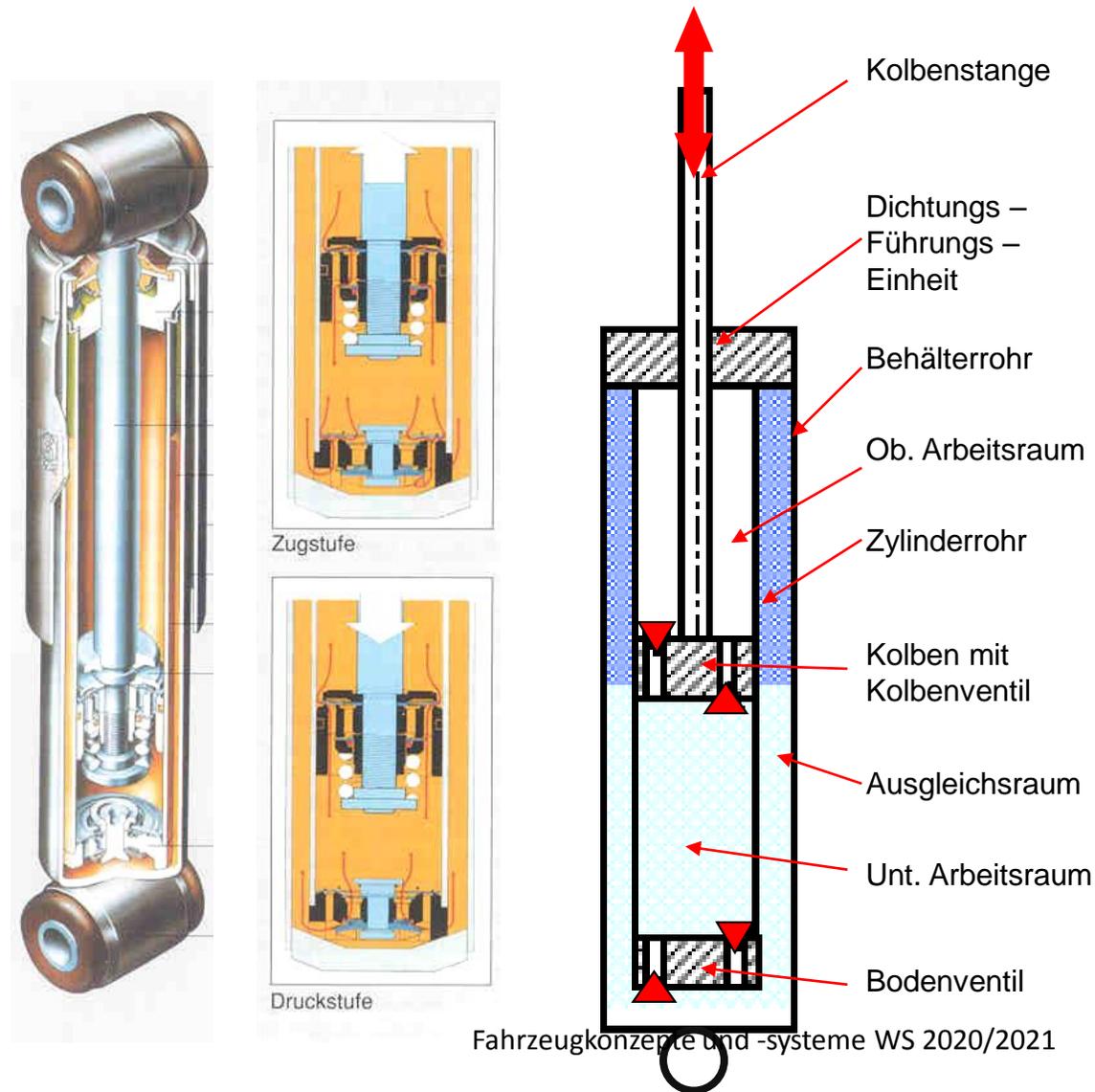


# Dämpfungssysteme - Einrohrdämpfer



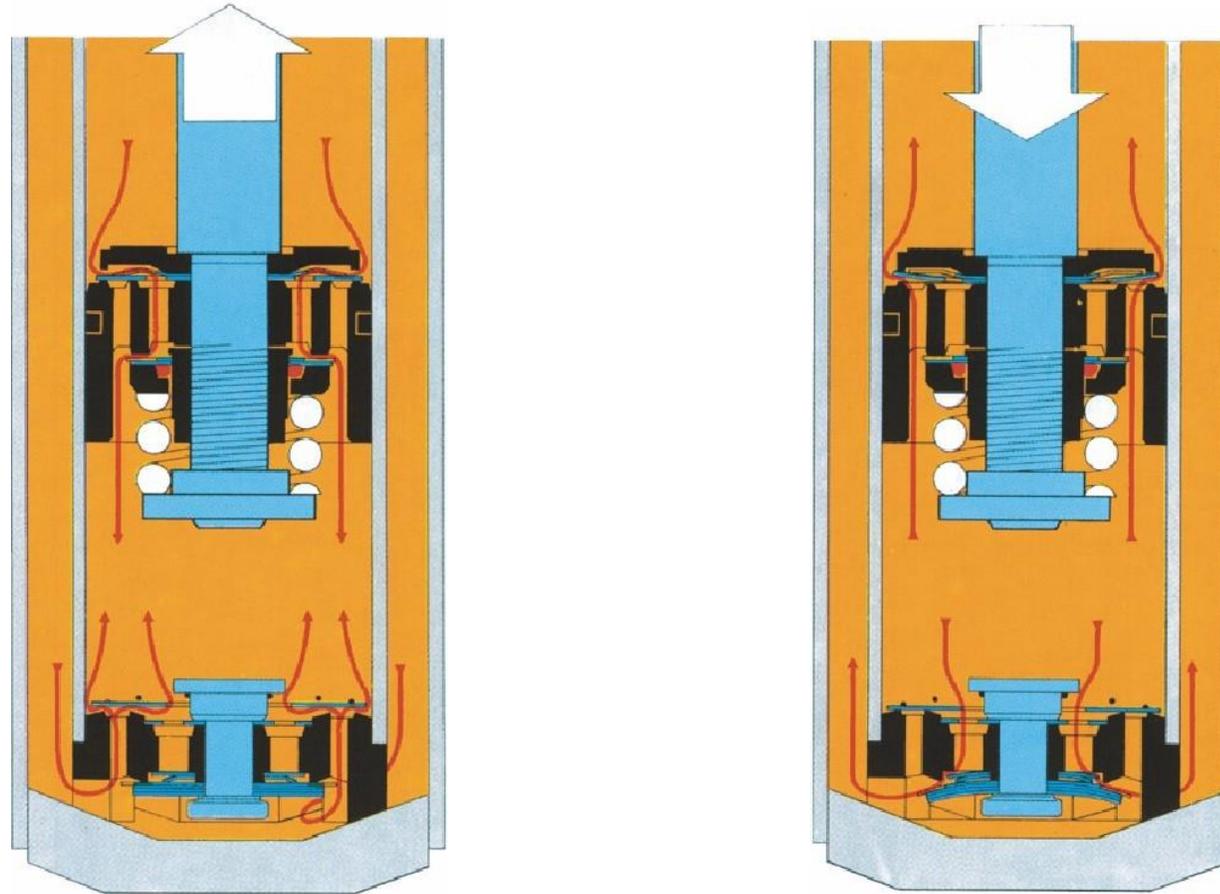
- arbeitet mit Systemdruck von ca. 30 bar (eingestellt über die Gasvorspannung im Ausgleichsraum)
- auch Gasdruckstoßdämpfer genannt
- axiale Anordnung von Arbeits- und Ausgleichsraum
- meist Trennung von Arbeits- und Ausgleichsraum durch eine Membran bzw. beweglichen Trennkolben
- Ausgleichsraum gefüllt mit vorgespanntem Gas (ca. 30 bar, meist Stickstofffüllung)
- Volumenausgleich d. Kolbenstange über Kompression des Gasraumes durch Verschiebung des Trennkolbens
- Dämpfungswirkung durch Strömungswiderstand der im Kolben angeordneten Ventile
- Ausführung mit einer Membran anstelle des Trennkolbens ebenfalls üblich

# Dämpfungssysteme - Zweirohrdämpfer

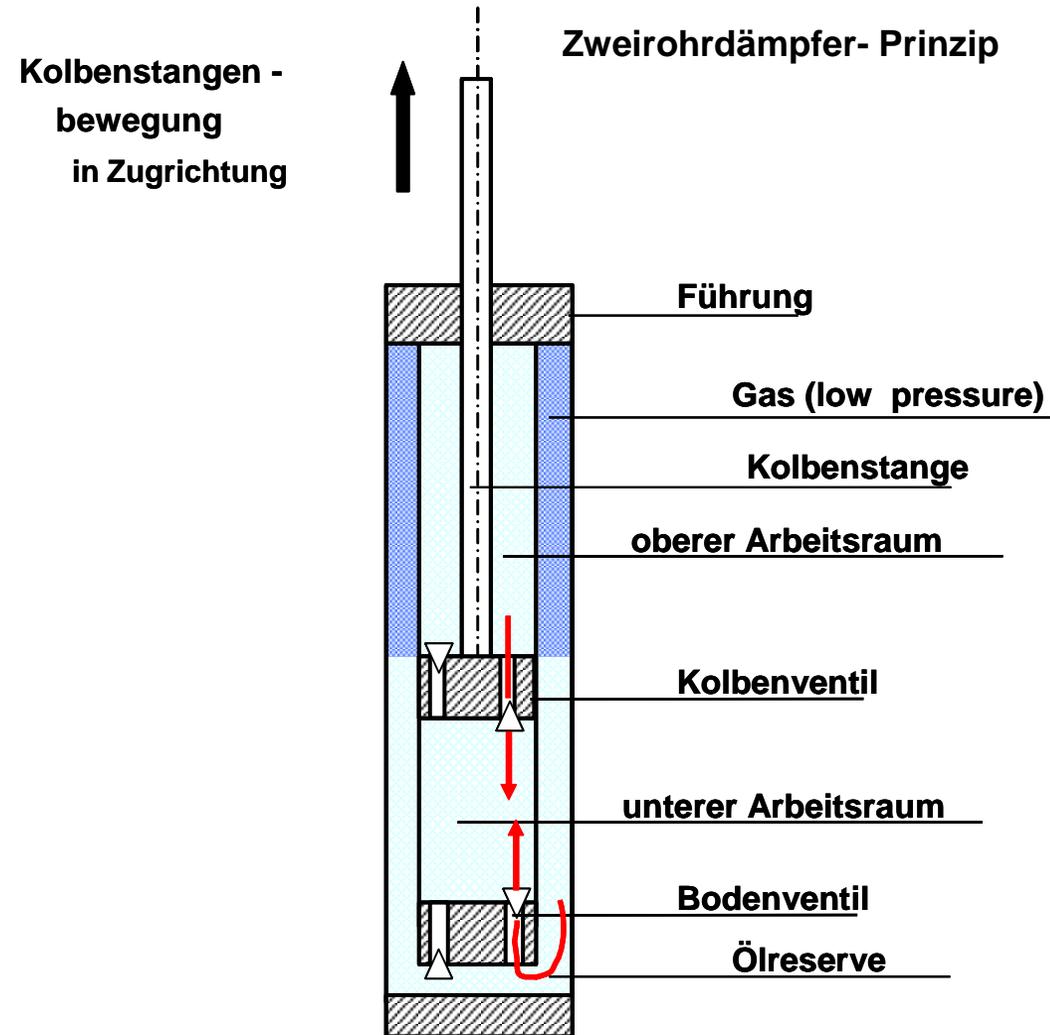


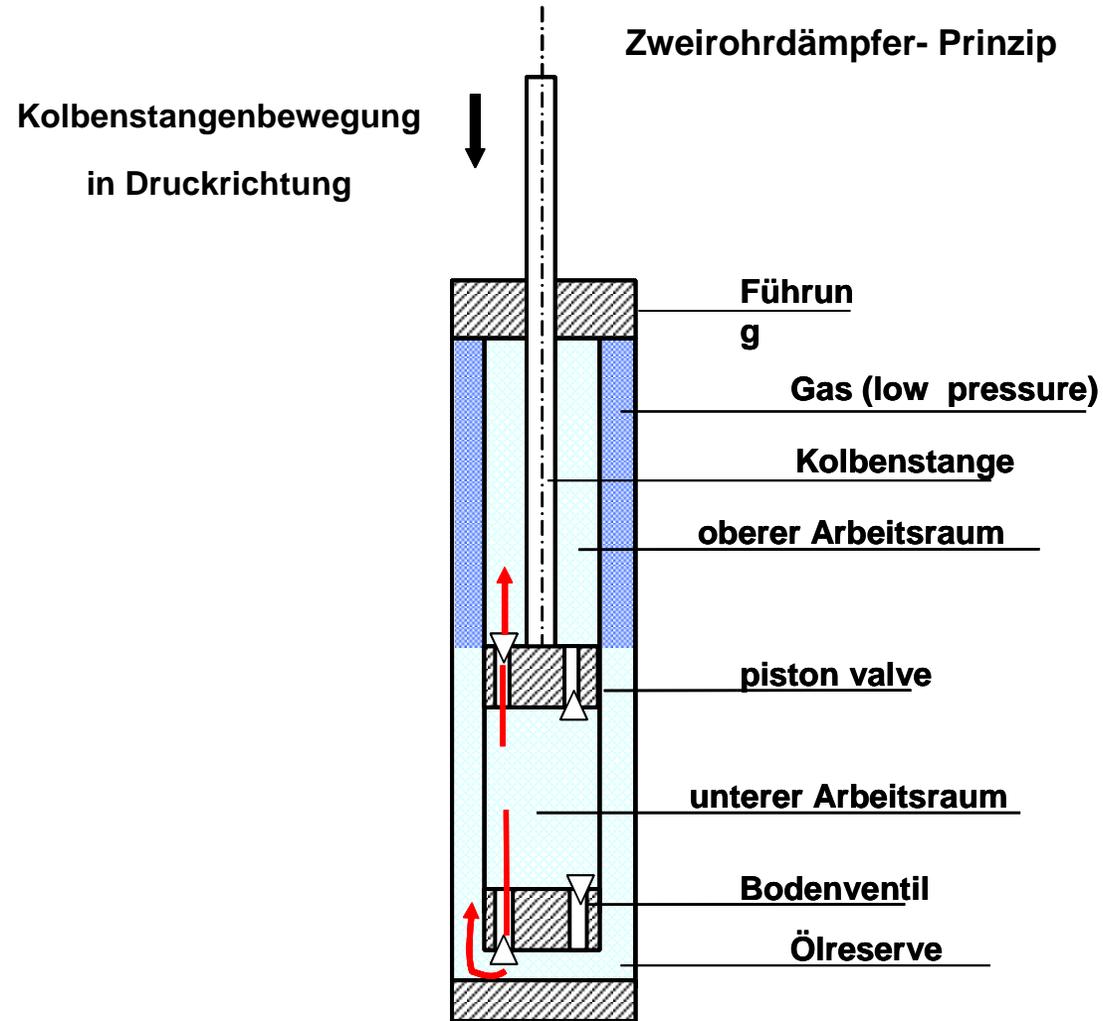
- arbeitet mit Systemdruck von ca. 6...8 bar (eingestellt über die Gasvorspannung im Ausgleichsraum)
- bestehend aus Zylinderrohr (innen) u. Behälterrohr (außen)
- Verbindung beider Rohre über Bodenventil
- Zylinderrohr komplett mit Öl gefüllt
- Behälterrohr zur Hälfte mit Öl gefüllt, zur Hälfte mit leicht vorgespanntem Gas (ca. 6...8bar)
- Volumenausgleich der Kolbenstange durch Ölstrom durch Bodenventil in das Behälterrohr
- Druckdämpfung über Kolben- u. Bodenventil,
- Zugdämpfung über Kolbenventil

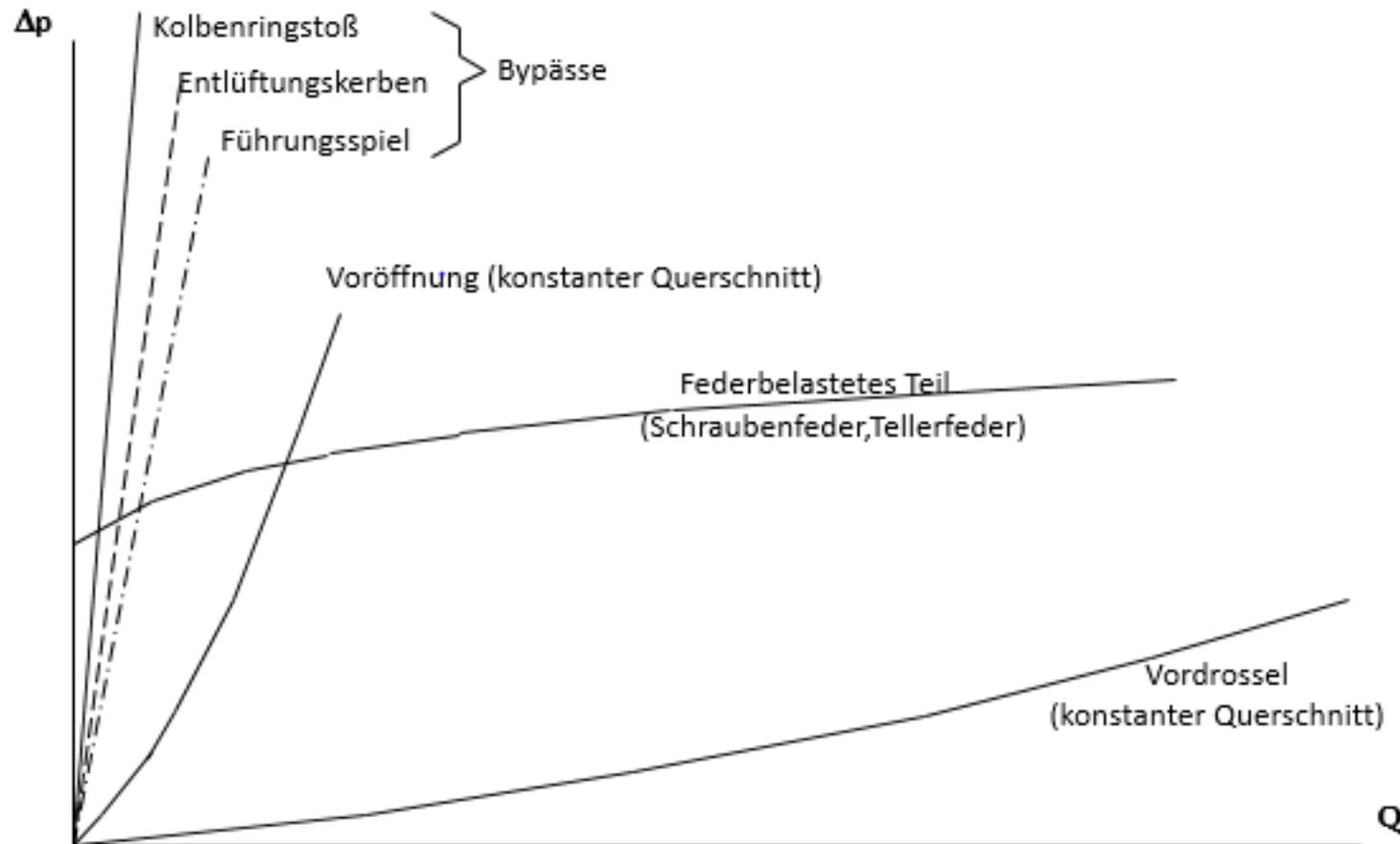
# Strömung durch die Ventile eines Zweirohrdämpfers (schematisch)



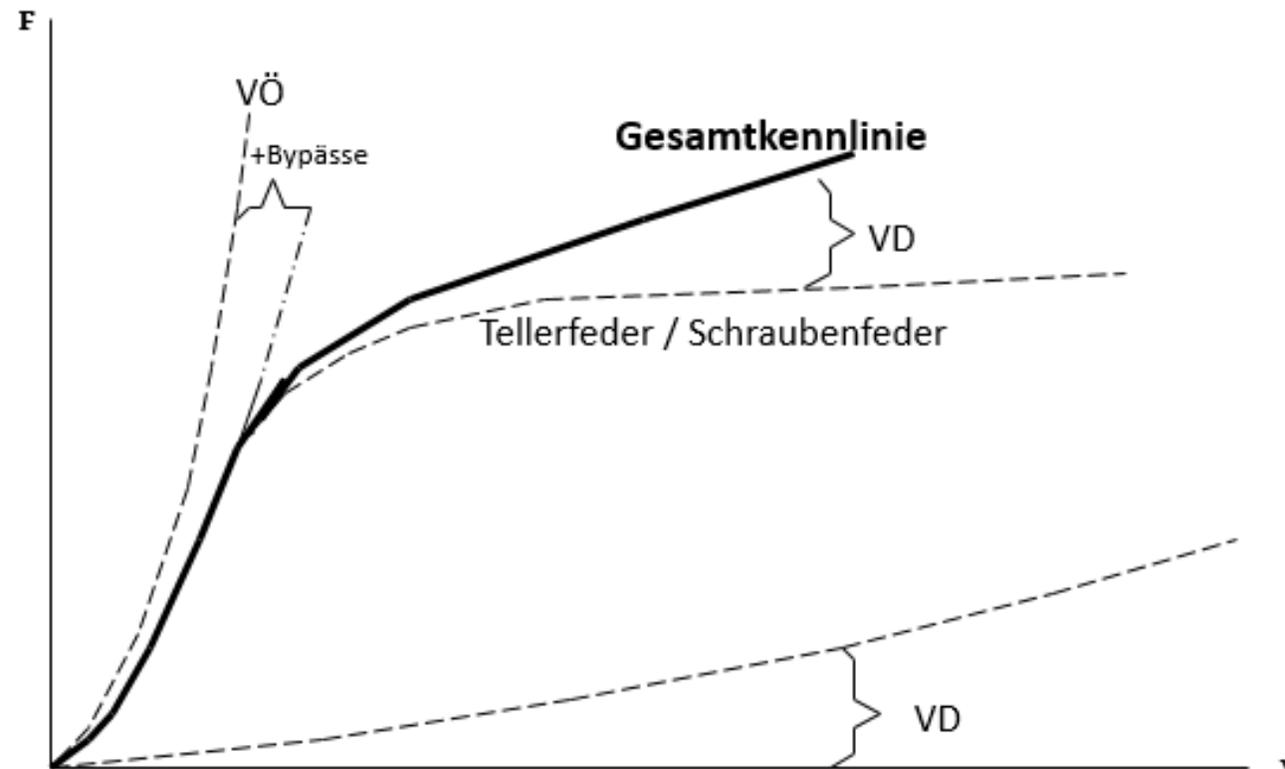
# Zweirohr- Dämpfer Dämpferfunktion in Zugrichtung

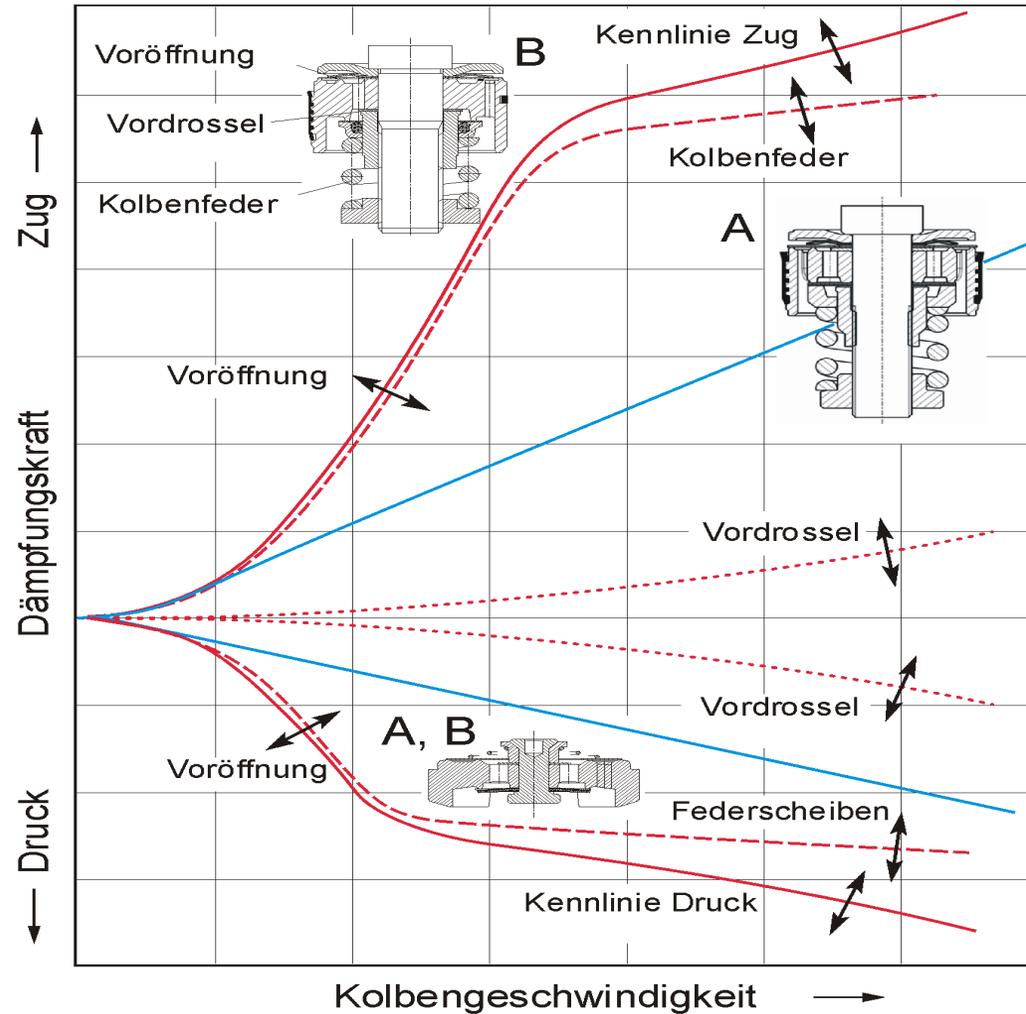






( prinzipiell gleich für KV, Bv u.ZD)





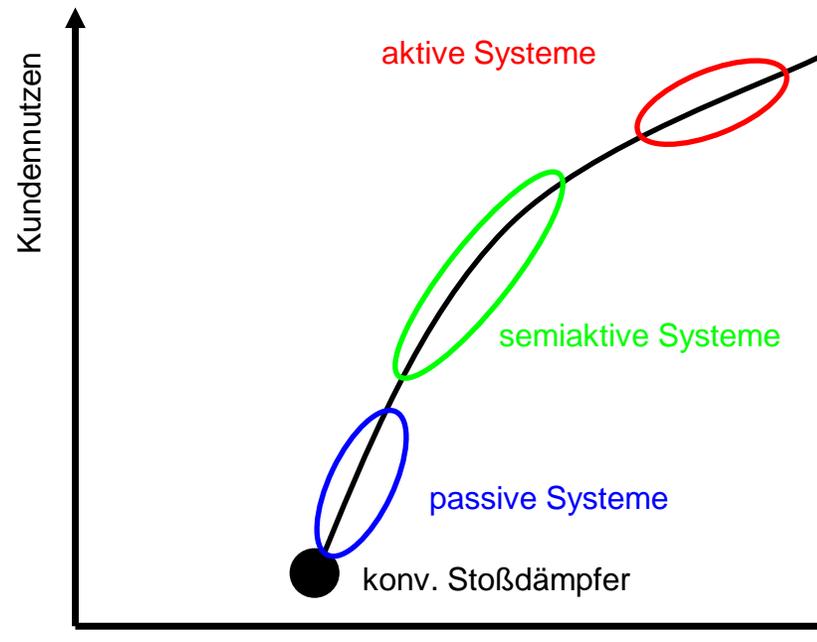
	Einrohrdämpfer	Zweirohrdämpfer
<b>Kavitationsneigung</b>	- sehr geringe Kavitationsneigung durch Gasvorspannung und Trennung beider Medien	- gering durch Gasvorspannung
<b>Kennliniengestaltung</b>	- in Druckrichtung in Abhängigkeit vom Fülldruck eingeschränkte Möglichkeiten	- nahezu beliebige Kennliniengestaltung durch Trennung der Ventilfunktionen
<b>Reibkraftniveau</b>	- wegen druckbelasteter Dichtungen höhere Reibung	- niedrige Grundreibung
<b>Bauraum</b>	- größere Baulänge wegen des axialen Gasraumes - geringer Durchmesser	- großer Durchmesser - ansonsten sehr kompakt
<b>Einbaulage</b>	- beliebig	- nahezu senkrecht
<b>Gewicht</b>	- wegen geringerer Bauteilzahl niedrigeres Gewicht	
<b>Temperaturverhalten</b>	- gute Kühlung, da Arbeitsraum nicht abgeschirmt ist	- eingeschränkt, durch Abschirmung des Arbeitsraumes
<b>Ansprechverhalten</b>	- wegen Gasvorspannung schlechteres Ansprechverhalten	
<b>Dämpfung bei geringen Hüben</b>	- besser	- gut
<b>Einsatz als Federbein</b>	- konstruktiv sehr aufwändig, daher unüblich	- möglich bei entsprechender Verstärkung

## Varianten der Dämpfung

### Konventioneller Schwingungsdämpfer :

- Festlegung der Dämpfungskraftcharakteristik bei Konstruktion
- keine Anpassung im Betrieb an Beladung, Fahrgeschwindigkeit, Fahrbahnbeschaffenheit etc. möglich

Lösung → adaptive Dämpfersysteme (passive, semiaktive bzw. aktive Dämpfungskraftverstellung)



### Semiaktive bzw. aktive Systeme

- Dämpfungskraftmodifikation mit Energiezufuhr von außen
- z.T. erheblicher Aufwand an Sensorik

### Passive Systeme

- Dämpfungskraftmodifikation ohne Energiezufuhr von außen
- Verzicht auf Sensorik

## Varianten der Dämpfung

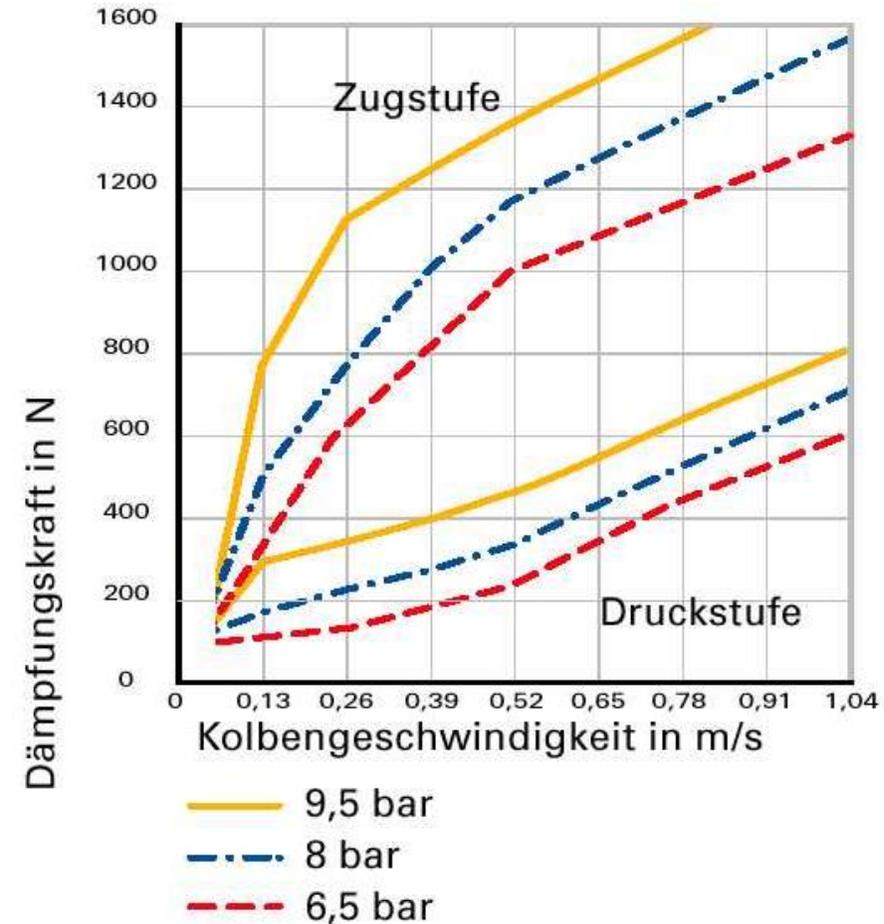
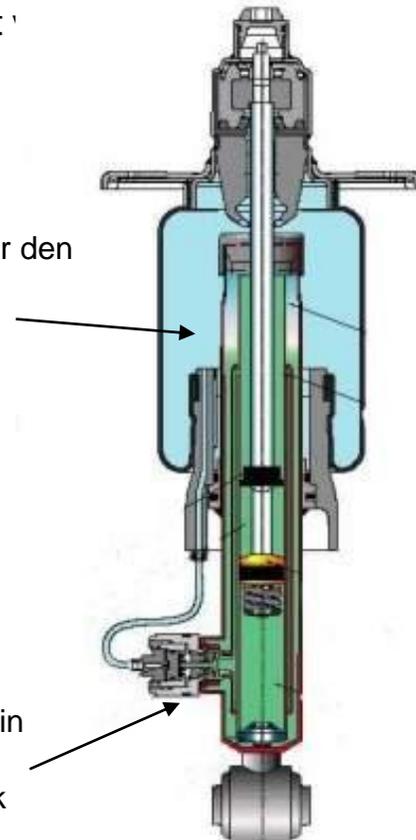
Positionsabhängige Dämpfung	sog. „Nutendämpfer“: Im Zylinder eingearbeitete Steuernuten schaffen Bypass, d.h. verminderte Dämpfung in bestimmten Bereichen des Einfahrweges (z.B. um die Nulllage)
Amplitudenselektive Dämpfung	Verwendung mehrstufiger Dämpferventile mit geringer Dämpfung bei kleinen Amplituden
Frequenz- bzw. beschleunigungsselektive Dämpfung	Steuerung des Ölstromes über beschleunigungsempfindliche Ventile mit dem Ziel der Reduzierung der Dämpfungskraft bei großen Beschleunigungen
Lastabhängige Dämpfung	Sensierung des Ladezustandes des Fahrzeuges (z.B. über Einfederung → Balgdruck bei Luftfederung) und Steuerung des Ölstromes im Stoßdämpfer auf Basis dieser Größe (vgl. nächste Folie)

## Varianten der Dämpfung

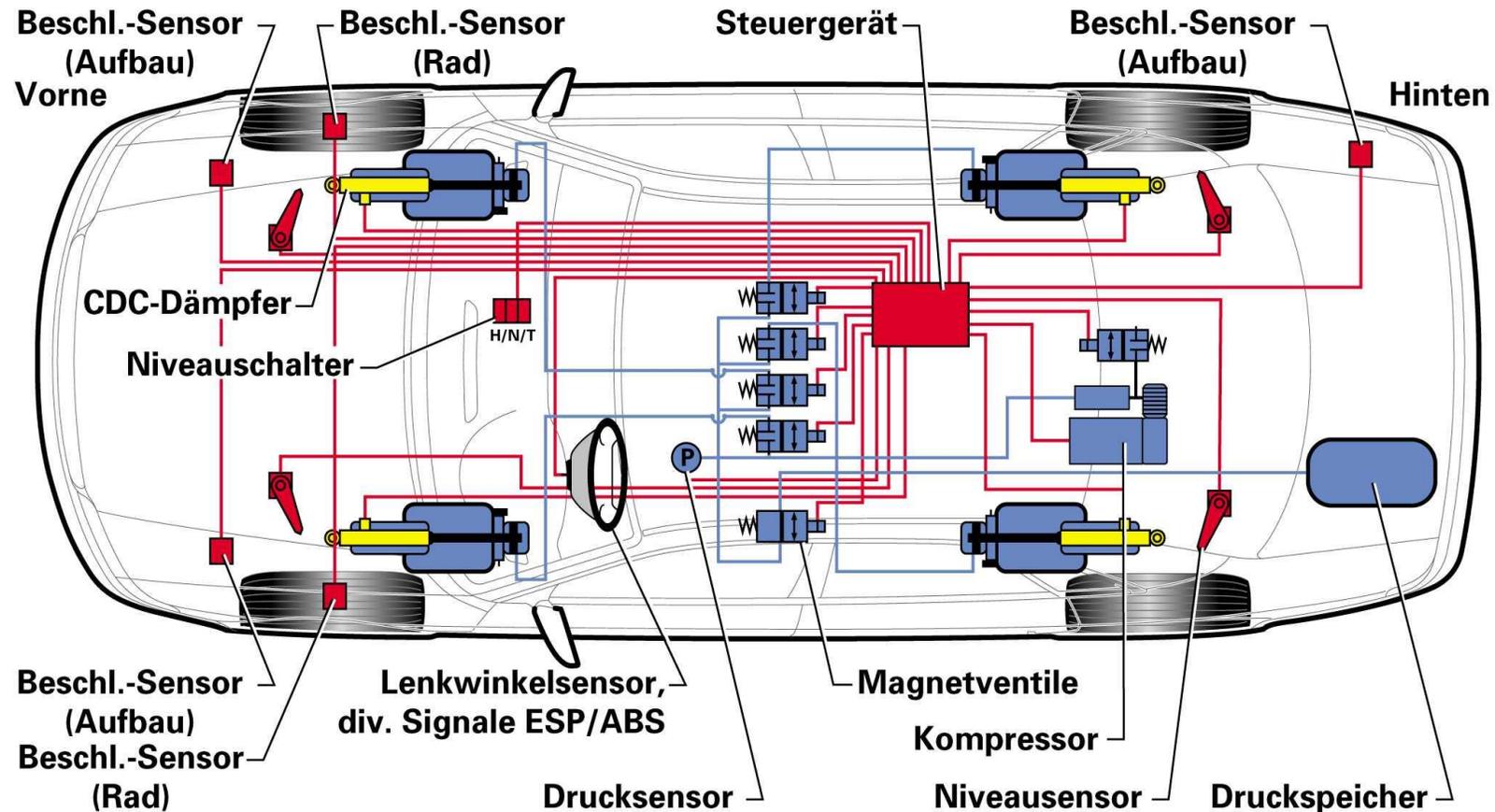
Bsp. Luftfederbein mit

Sensierung des  
Beladungszustandes über den  
Balgdruck der Luftfeder

Verstellung der  
Dämpferkennlinie in  
Abhängigkeit vom  
Luftfederbalgdruck



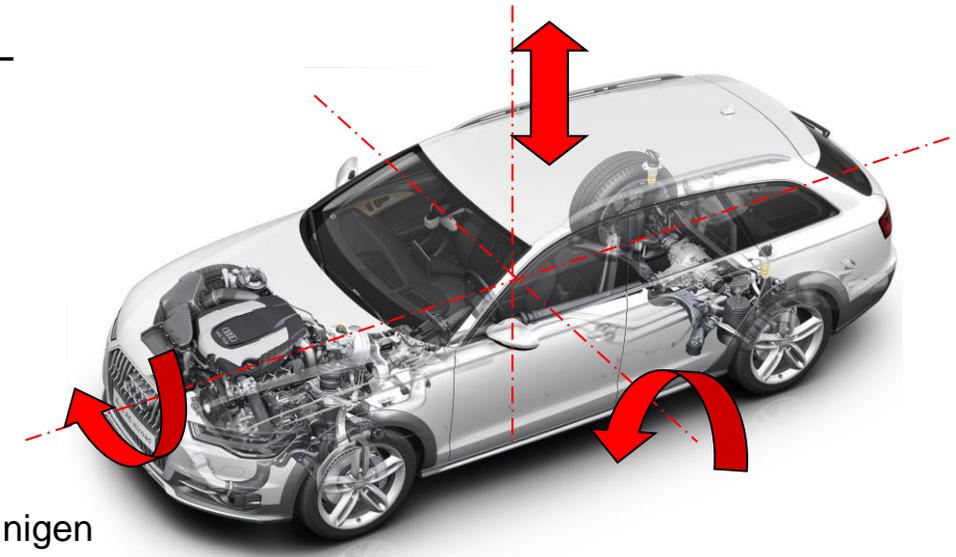
Systemschaubild eines aktiven adaptiven Systems Feder – Dämpfer – Verstellung



## Varianten der Dämpfung

Wirkung eines solchen Systems mit aktiver Feder – Dämpfer – Verstellung:

- **Fahrhöhenstellbarkeit**
  - Absenken der Karosserie bei hohen Geschwindigkeiten
  - Anheben der Karosserie bei z.B. Schlechtwegstrecken oder beim Einsatz von Schneeketten
  - Einstellen der Fahrhöhe unabhängig vom Beladungszustand
- **Ausgleich v. Aufbaubewegungen**
  - Ausgleich von Nickbewegungen beim Bremsen und Beschleunigen
  - Ausgleich von Wankbewegungen bei Kurvenfahrt
- **Fahrwerkscharakteristik**
  - Einstellung der Fahrwerkscharakteristik nach Fahrerwunsch (sportiv bis komfortorientiert)
  - aktive Fahrwerksverstellung als Reaktion auf Straßenanregung (z.B. geringe Dämpfung bei ebener Fahrbahn – erhöhte Dämpfung bei langwelliger Anregung)



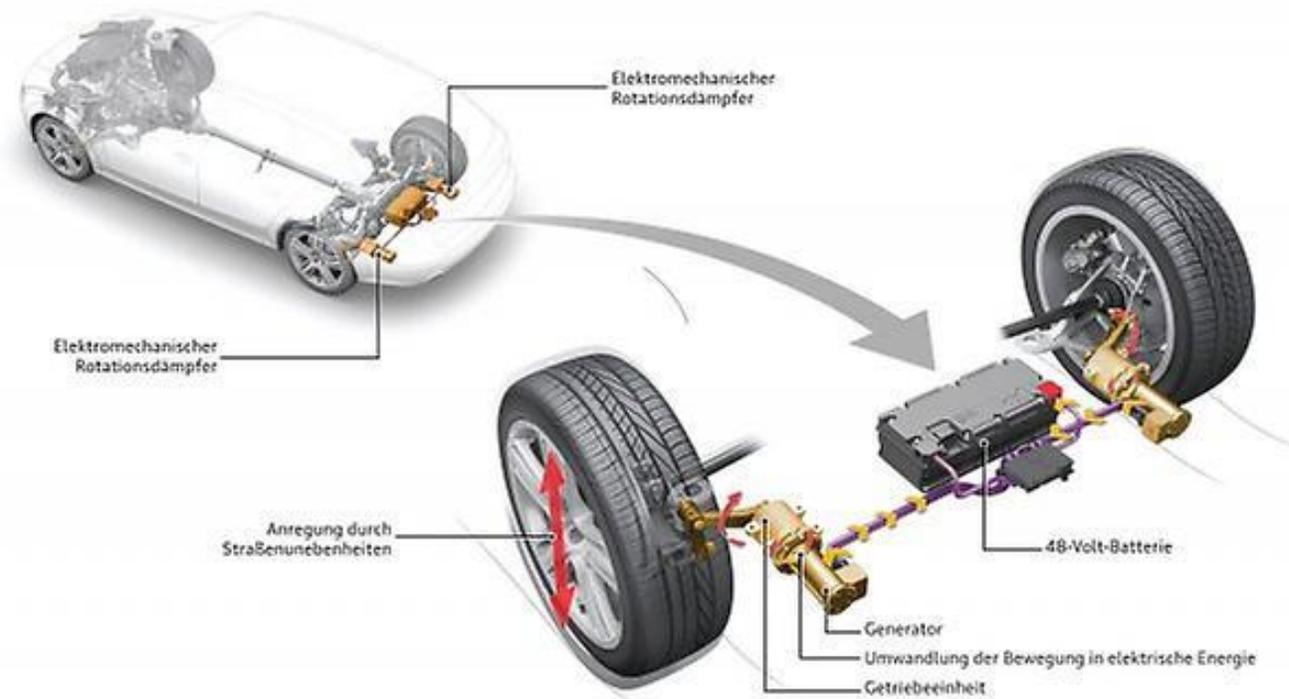
# Dämpfungssysteme

## Energie über die Stoßdämpfer zurückgewinnt: eRot



### Elektromechanischer Rotationsdämpfer

08/16



## Kinematik Audi A4 (B7) – Vorderachse

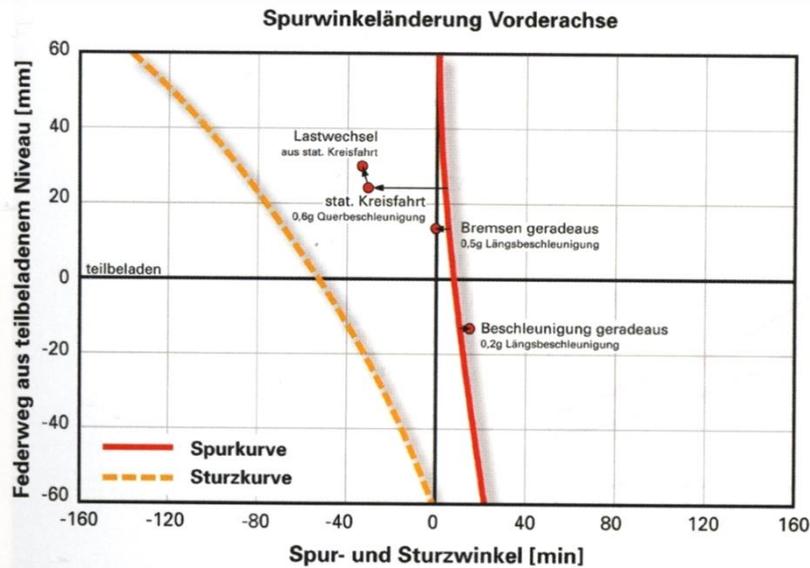


Bild 4: Kinematikennlinien und fahrdynamische Betriebspunkte der Fünflenker-Vorderachse

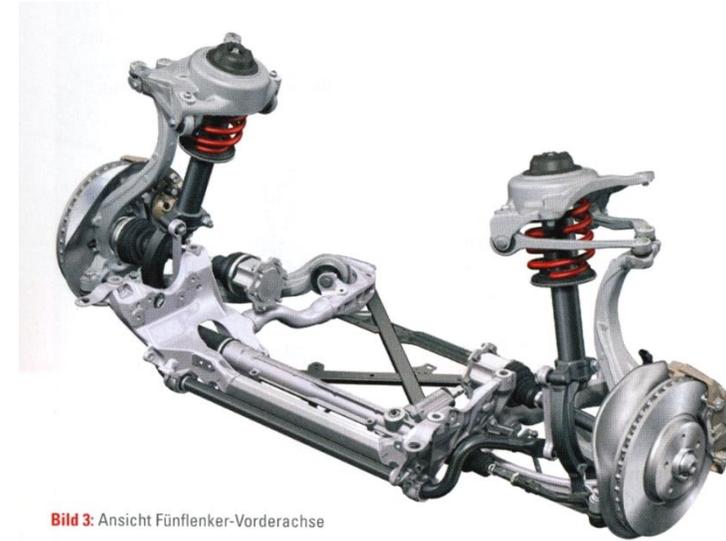


Bild 3: Ansicht Fünflenker-Vorderachse

Kennwerte der Vorderachskinematik		
Einpresstiefe	[mm]	39
Spurweite	[mm]	1564
Sturz	[°]	-0,71
Vorspur (gesamt)	[min]	20
Spreizung	[°]	4,9
Nachlaufwinkel	[°]	4,2
Nachlaufstrecke	[mm]	22,5
Nachlaufversatz	[mm]	-0,4
Lenkrollradius	[mm]	-6,6
Störkrafthebelarm	[mm]	15,7
Höhe Momentanzentrum	[mm]	86,3
Schrägfederung	[°]	-0,8
Einfederweg	[mm]	105,3
Ausfederweg	[mm]	-109,7
Federübersetzung		0,69
Dämpferübersetzung		0,69
Bremsstützwinkel	[°]	8,1

## Eigenlenkverhalten

### Maßnahmen

### Veränderung des Eigenlenk- verhaltens in Richtung

Reifendimension vergrößern  
 Reifenluftdruck erhöhen  
 Achslast erhöhen  
 Spurweite vergrößern  
 Momentanpol tiefer legen  
 Federrate erhöhen  
 Stabilisator einbauen (verstärken)  
 Ausgleichsfeder einbauen  
 (verstärken) und Hubfederrate  
 verringern  
 Vorspur vergrößern  
 positiven Radsturz verringern oder  
 negativen Radsturz vergrößern  
 Wanklenken nach kurveninnen  
 Seitenkraftlenken nach kurveninnen  
 aerodynamischen Auftrieb  
 vermindern  
 Lenkgesetz in Richtung  
 Ackermannauslegung verändern  
 Nachlaufwinkel vergrößern  
 Bremskraftanteil erhöhen (nur beim  
 Bremsen wirksam)  
 Antriebskraftanteil bei 4WD erhöhen  
 (nur unter Vortrieb wirksam)

#### Vorderachse

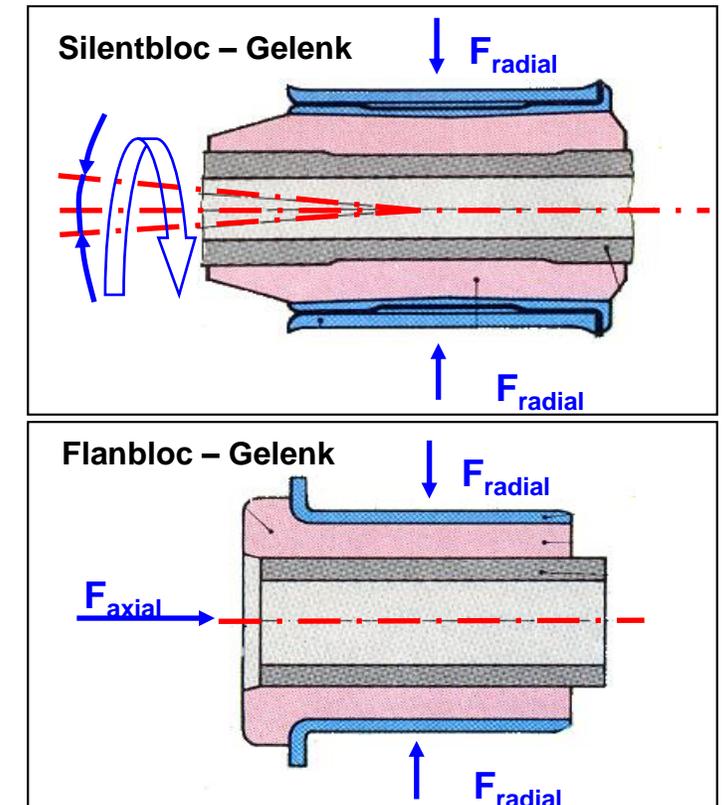
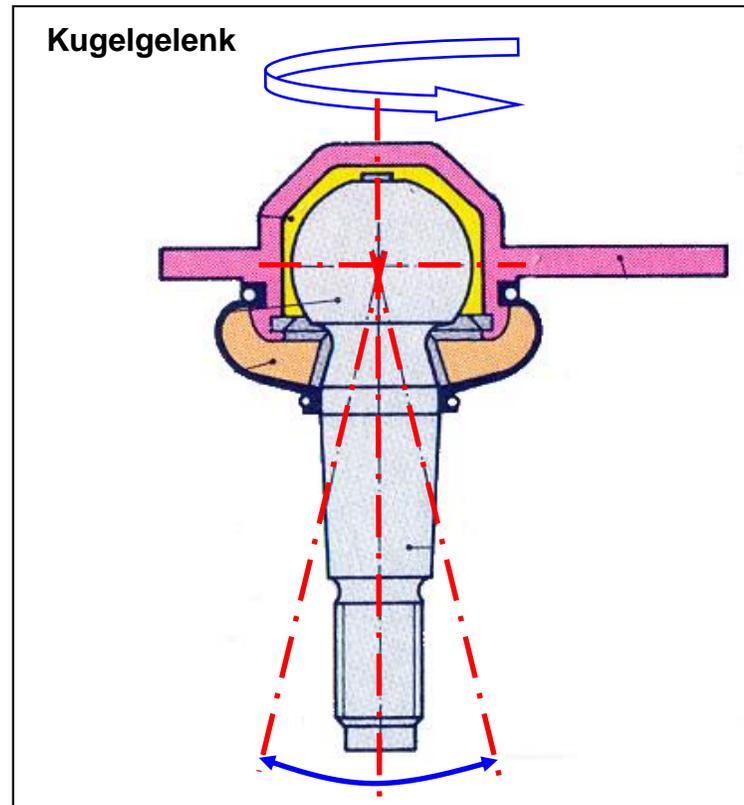
Übersteuern  
 Übersteuern  
 Untersteuern  
 Übersteuern  
 Übersteuern  
 Untersteuern  
 Untersteuern  
 Übersteuern  
 Übersteuern  
 Übersteuern  
 Übersteuern  
 Übersteuern  
 Übersteuern  
 Übersteuern  
 Untersteuern  
 Untersteuern  
 Untersteuern  
 Untersteuern  
 Untersteuern  
 Untersteuern

#### Hinterachse

Untersteuern  
 Untersteuern  
 Übersteuern  
 Untersteuern  
 Untersteuern  
 Übersteuern  
 Übersteuern  
 Untersteuern  
 Untersteuern  
 Untersteuern  
 Untersteuern  
 Untersteuern  
 Untersteuern  
 Untersteuern  
 Übersteuern  
 Übersteuern  
 Übersteuern  
 Übersteuern  
 Übersteuern

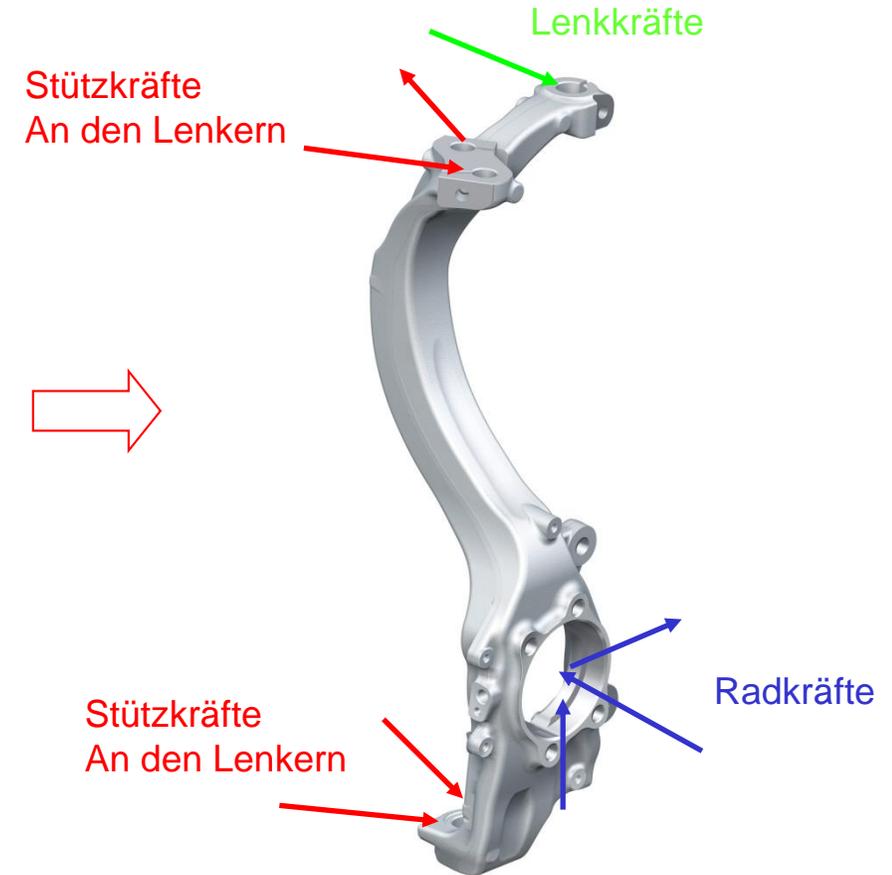
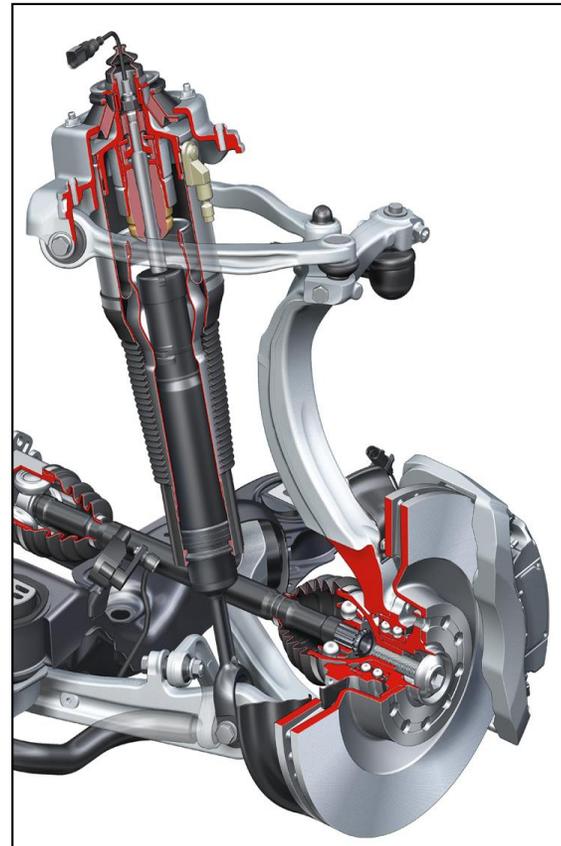
## Elemente der Radaufhängung - Lenkerlager

Stellen die bewegliche Lagerung der Lenker und Radträger sicher erfüllen folgende Anforderungen:  
 leichte Beweglichkeit /  
 geringe Nachgiebigkeit und  
 hohe Führungsgenauigkeit /  
 geräuschisolierend /  
 möglichst wartungsfrei  
 ausgeführt als Gummi-Metall-  
 Elemente (silentbloc /  
 flanbloc) oder als  
 Kugelgelenke



## Elemente der Radaufhängung - Radträger

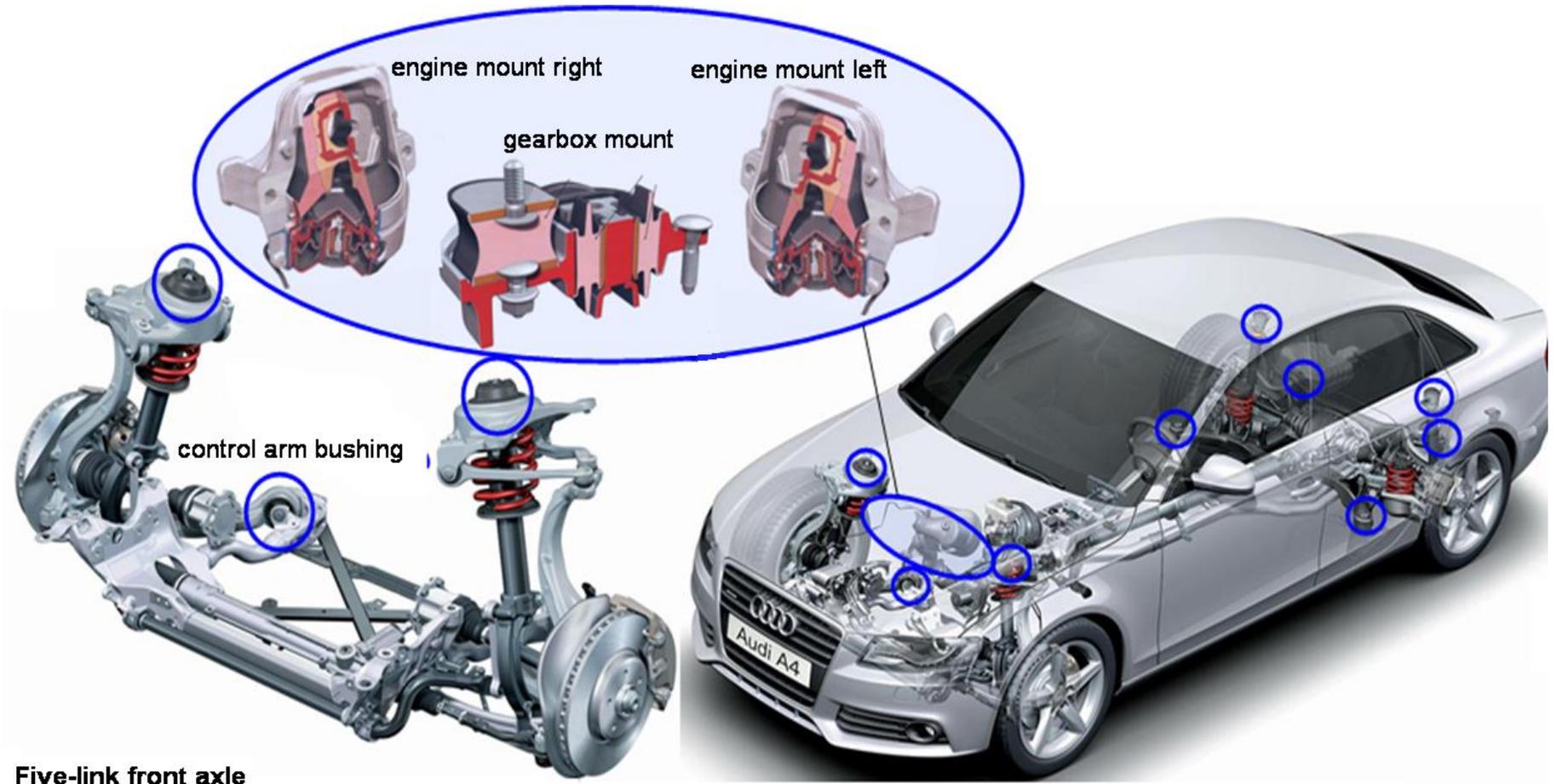
- Aufnahme der Radlagerung
- Anbindung der Lenker, des Bremssattels und des Federbeines (bei radführenden Federbeinen)



Radträger einer Vierlenkervorderachse

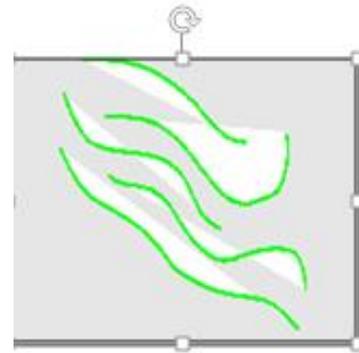
# Bauteile der Achsen

## Elastokinematische Bauteile

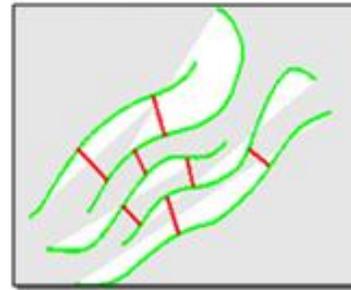


Five-link front axle

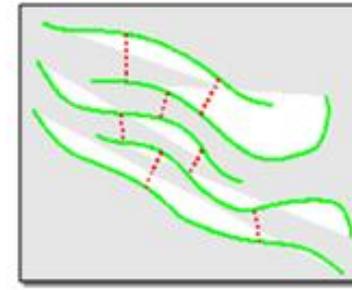
## Elastomeraufbau



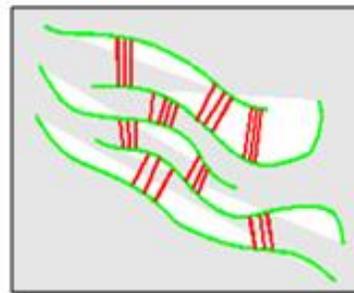
Plastomer



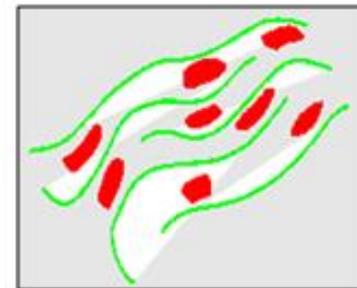
Elastomer



Thermopl. Elastomer



Duromer



Elastomere Legierung

## Elastokinematik

### Funktion

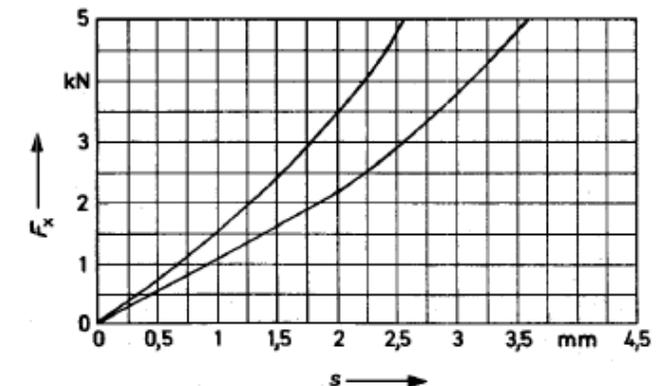
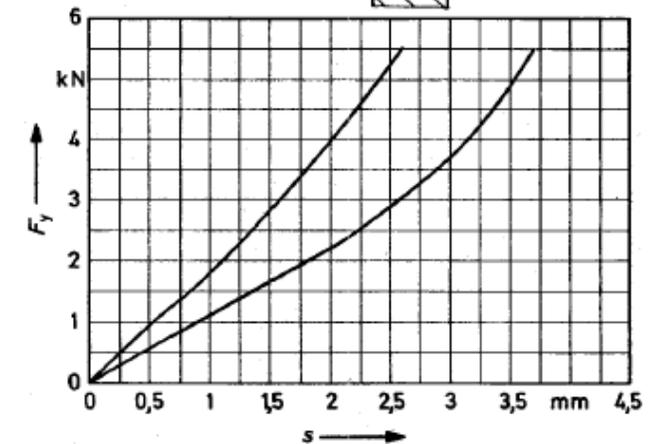
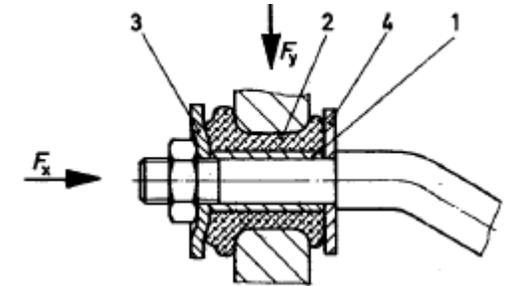
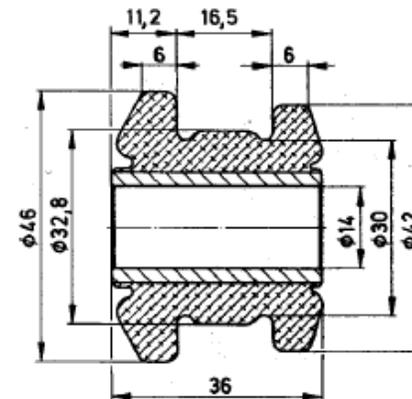
- Lagerung der Radaufhängungselemente i.d.R. elastisch in Elastomerlagern
- Kennlinien f. untersch. Belastungsrichtungen
- Lagerverformung bei Auslegung Radaufhängungen berücksichtigen

### Vorteil

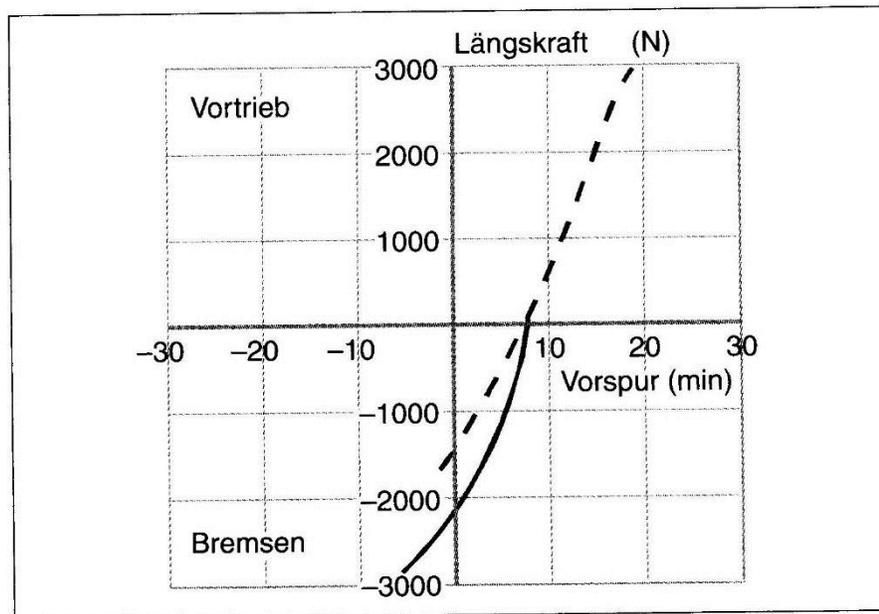
- Längs- und Querfederung
- kein Spiel
- Geräuschisolation
- Überlastschutz
- Kosten

### Aufbau

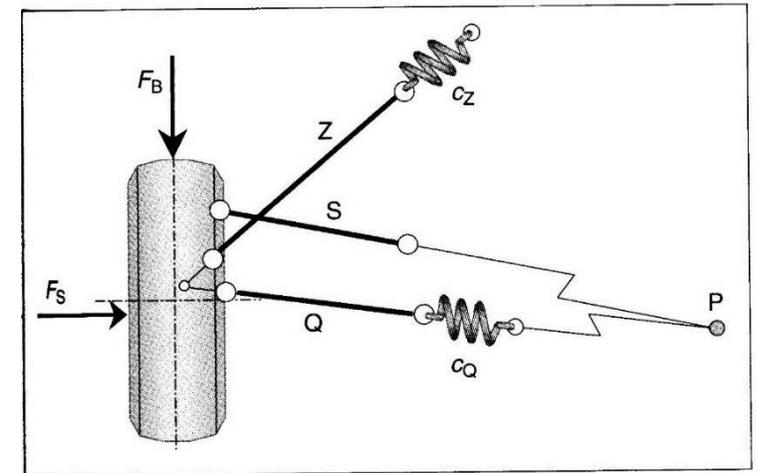
- Material: Elastomer (NR, NBR, EPDM,...), Silikon
- Elastomer ein- o. beidseitig in Stahlführung einvulkanisiert
- Elastomer nur unter Druck belasten: vorkalibriert o. verspannt bei Montage



## Elastokinematik



**Bild 7.4-13** Typischer Verlauf der Vorspur einer Federbeinachse unter Brems- und Vortriebskraft



**Bild 7.4-12** Schematische Draufsicht des Querlenkerverbandes einer Doppelgelenk-Federbeinachse

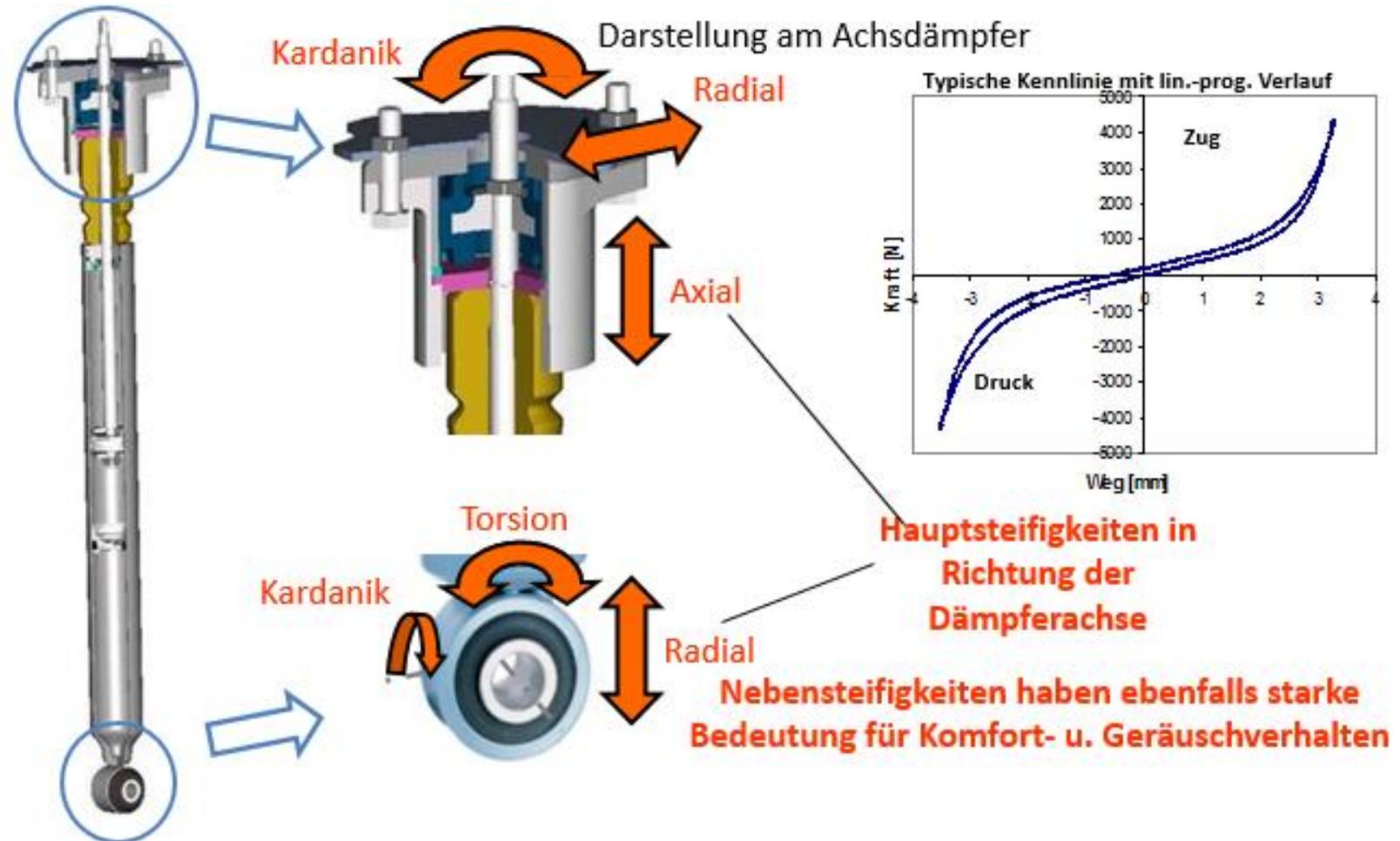
Quelle: Handbuch Kraftfahrzeugtechnik 2007

## Kinematics and Compliance Testing



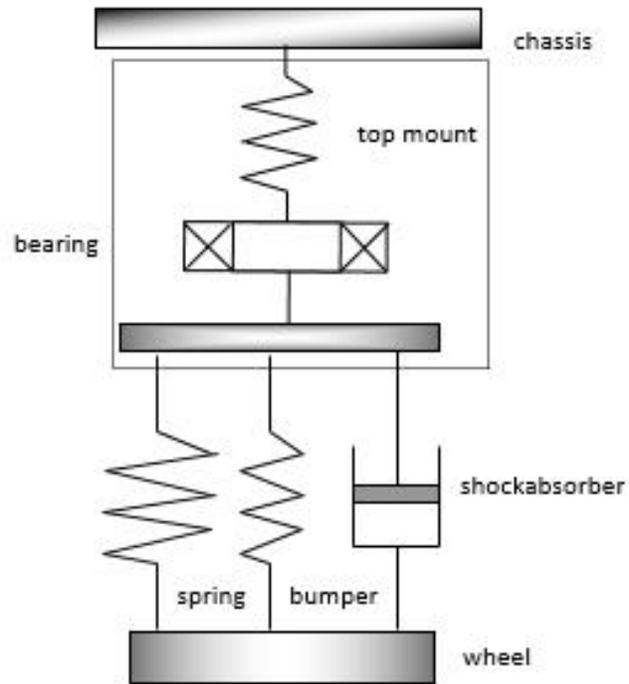
## Kinematics and Compliance Testing



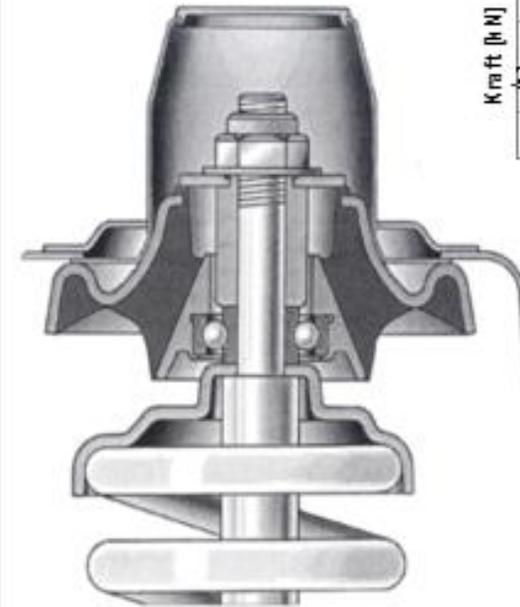


# Einfaches Domlager

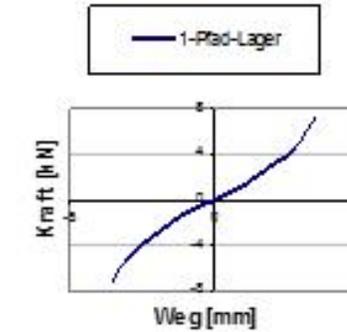
Single Path (gekoppeltes Lager) = Feder-, Dämpfer- und Pufferkräfte werden durch ein einteiliges Gummisegment abgestützt.



Schema: single path (Lager oben)



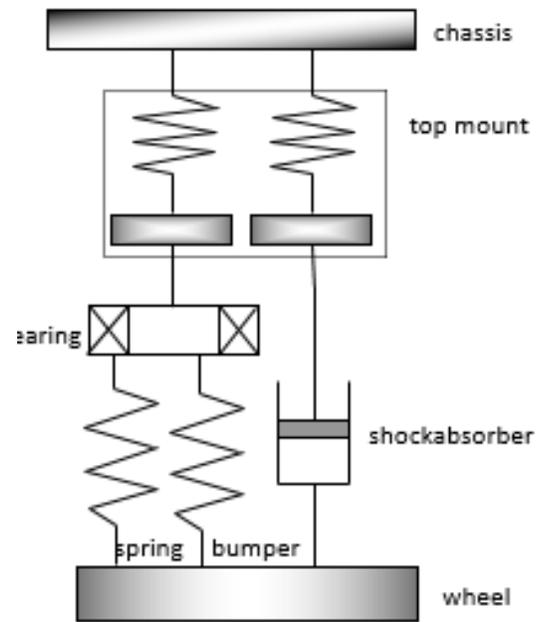
Beispiel: single path (Fiat Punto/Bravo/Brava/Y10)



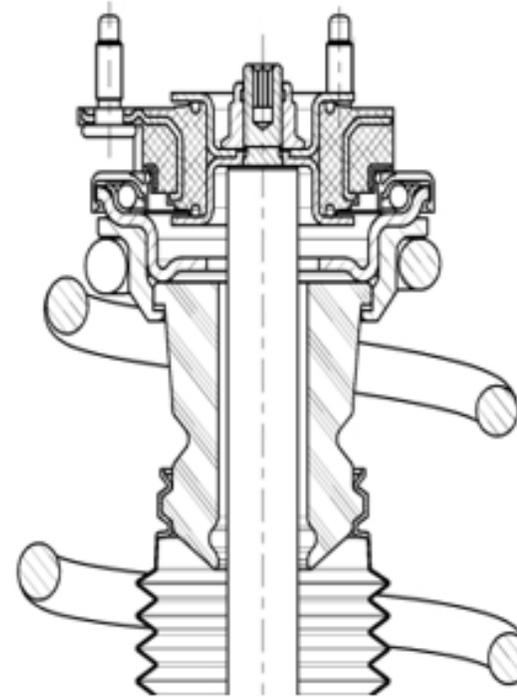
Quelle : Fa. ZF BOGE

# Entkoppeltes Domlager

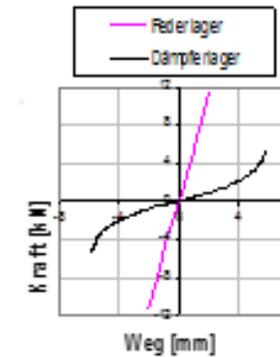
## Dual Path (entkoppeltes Lager) / Puffer auf äußerem Pfad



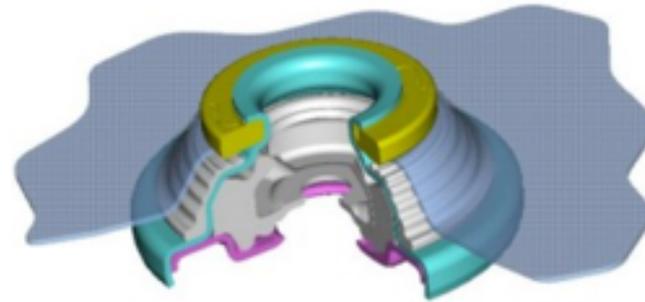
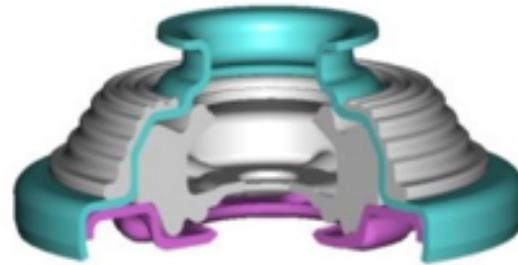
Schema: dual path



Beispiel: dual path (Ford Mondeo  
CD 132)



Quelle: Fa. ZF BOGE

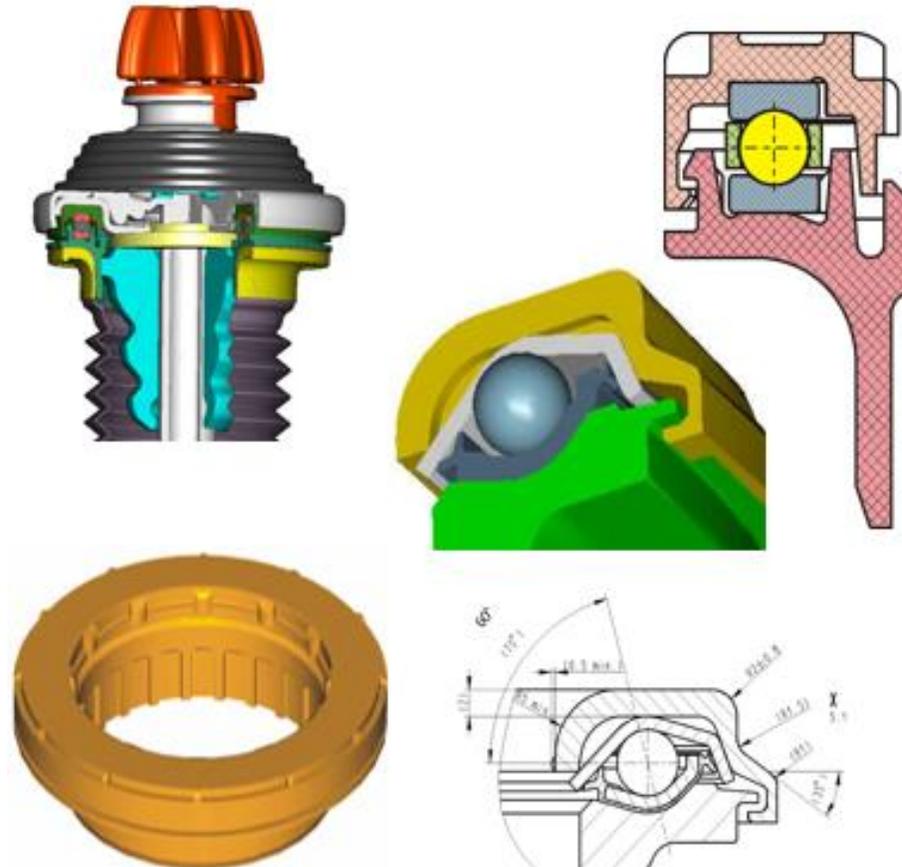


Top Mount mit Clippingbefestigung und Karosseriedomausschnitt

Quelle : Fa. ZF BOGE

## Funktionsanforderung Stützlager

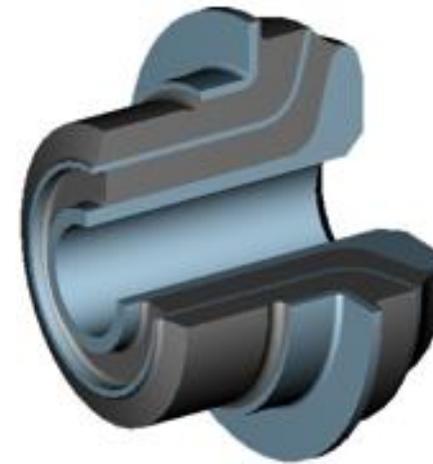
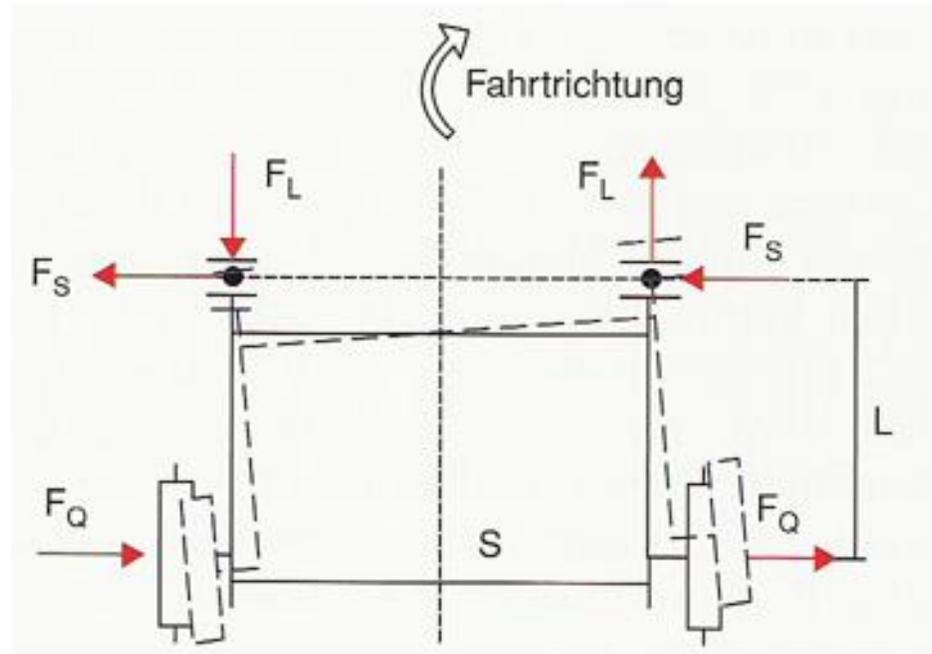
- unterschiedliche Steifigkeiten in X -; Y -; Z – Richtung
  - einfacheres Tunen bei Fahrzeugabstimmung
  - Komfortgewinn bei gleichbleibendem Handlingsverhalten
- kardanisch weich
  - Ermöglichen der Kolbenstangenauslenkung für alle Federzustände und Lenkwinkel
  - nur Schubbeanspruchung bei Kardanik
- gute Geräuschisolierung
  - getrennte Einleitung von Schraubenfeder- und Kolbenstangenkräften
  - Vermeidung von Dröhn- und Poltergeräuschen
- variable Anschlagcharakteristik in axialer Richtung
- ausreichender Korrosionsschutz der Blechteile (Lackierung; Gummierung)
- hohe mechanische Beanspruchbarkeit:
  - Aufnehmen der Dämpfkräfte (innerer Pfad)
  - Aufnehmen der Federkräfte (äusserer Pfad)
  - Aufnehmen der Pufferkräfte (Gehäuse)
- Baukastensystem: Verwendung für unterschiedliche Fahrzeugvarianten durch Variation des Vulkanisationsteils mit der Kolbenstangenbefestigung



## Anforderungen:

- Aufnehmen von Axialkräften und Querkräften
- direkte Abstützung der Feder (Federtellerfunktion)
- ausreichende Steifigkeit unter Last
- Reduktion der Anbauteile
- Gewichtsoptimierung
- Dauerhaltbarkeit (Fahrzeuglebensdauer)
- Geräuschoptimierung
- geringe Verdrehreibung
- Schutz gegen Verschmutzung und Korrosion

Quelle : Fa. ZF BOGE



Quelle: Hoffmann/Trelleborg Automotive



## Steifigkeitsgesteuerte Top Mounts

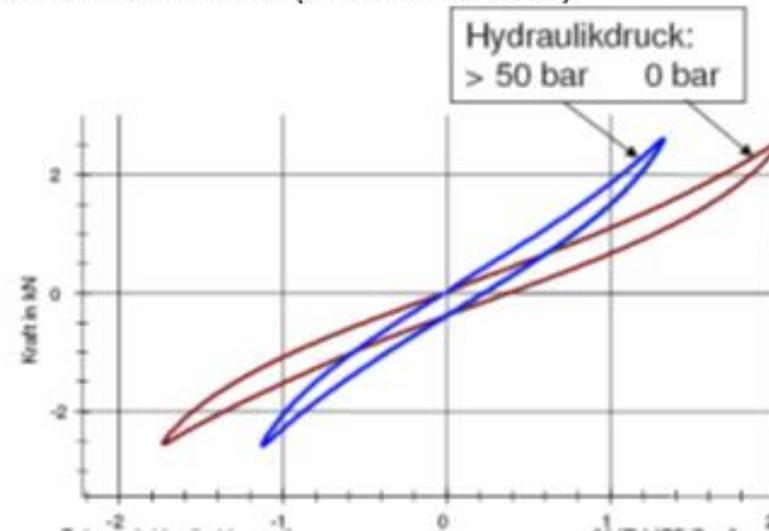


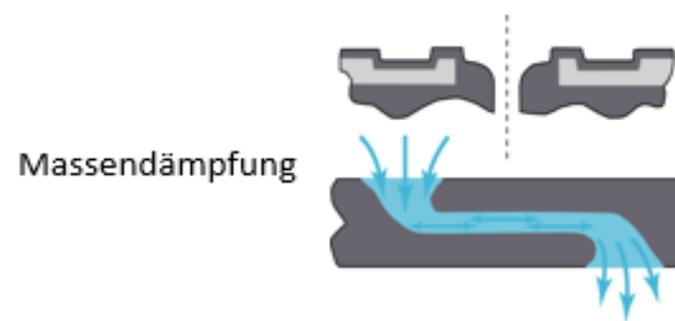
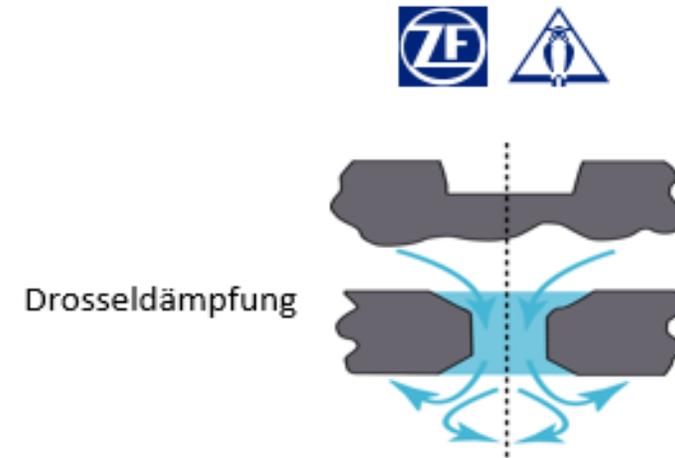
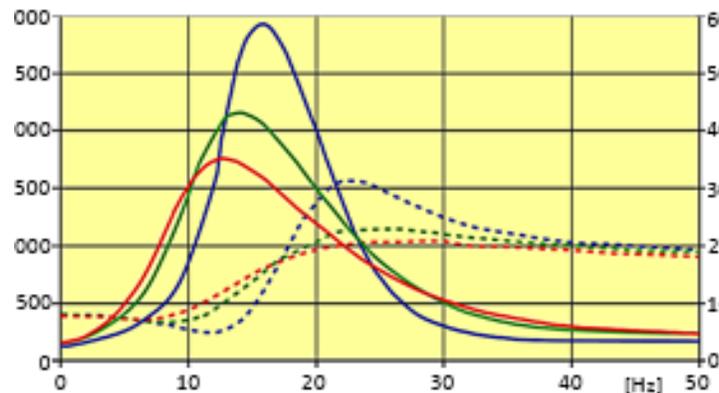
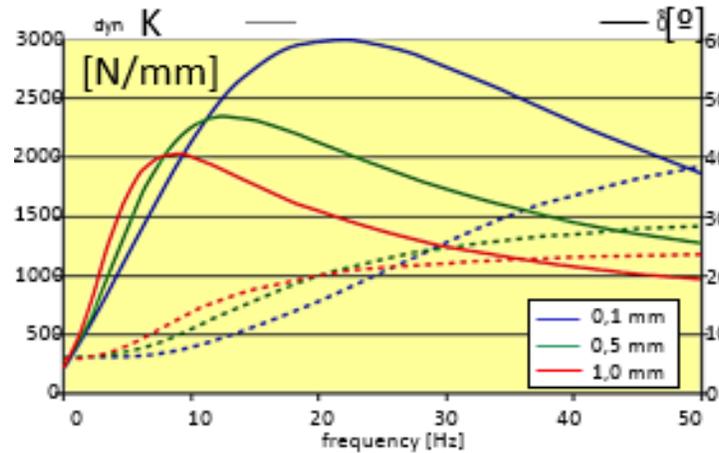
Federratenänderung durch hydraulische Verstelleinheit, Ratenänderung um Faktor 2 mit einem komprimierbaren Federpaket (s. Bild unten rechts)

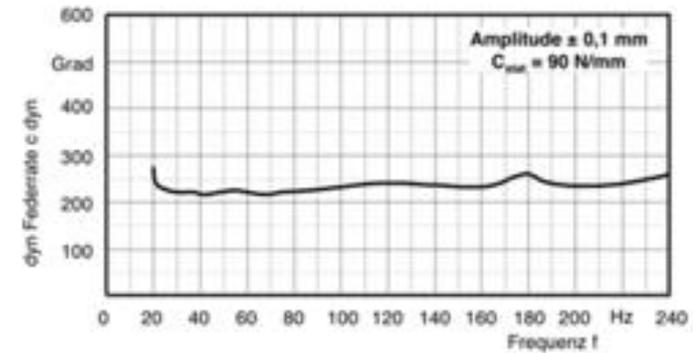
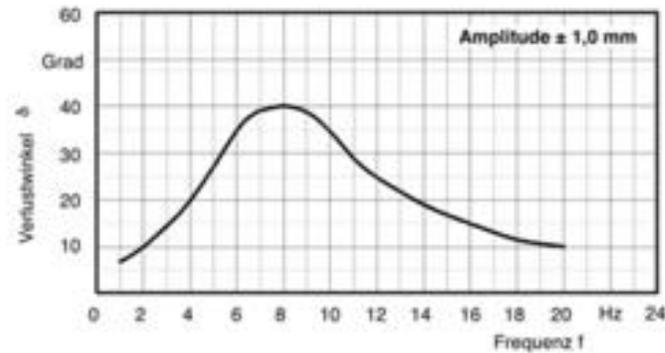
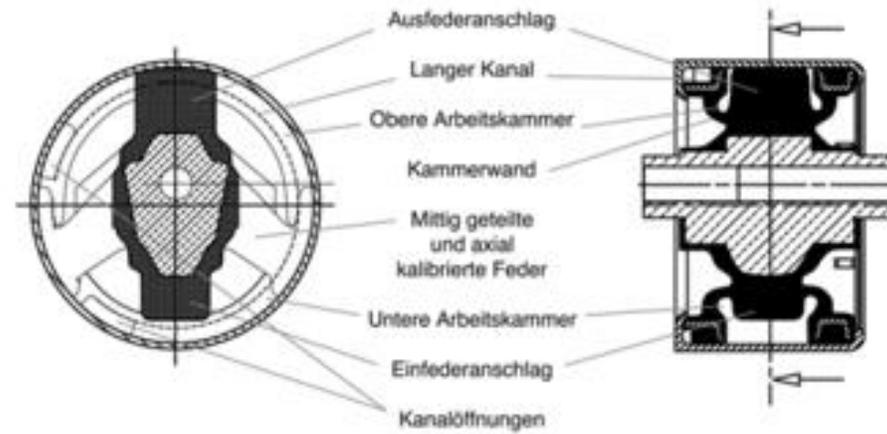
Hydraulisches Zuschalten einer Zusatzfeder, die die Gesamtsteifigkeit erhöht

Nutzung der dynamischen Verhärtung von Hydro Top Mounts durch Schließen des Überströmkanals.

Nutzung des magneto-rheologischen Schalteffektes (s. Bild unten links)

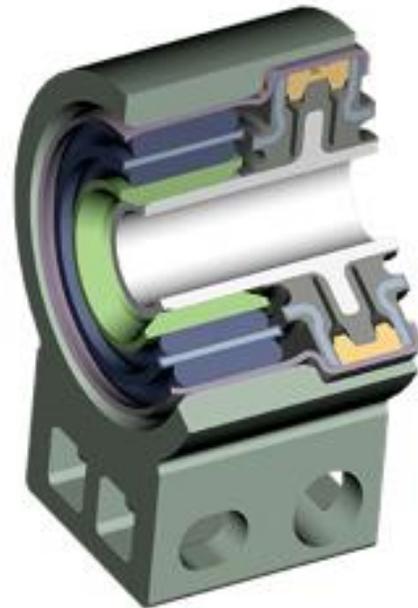




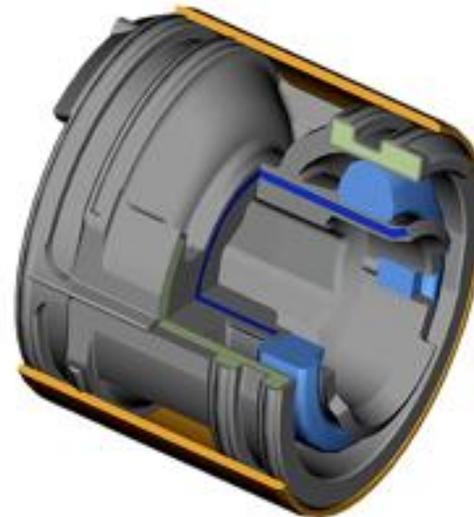


Quelle: Handbuch Fahrzeugakustik

Axial dämpfend



Radial dämpfend

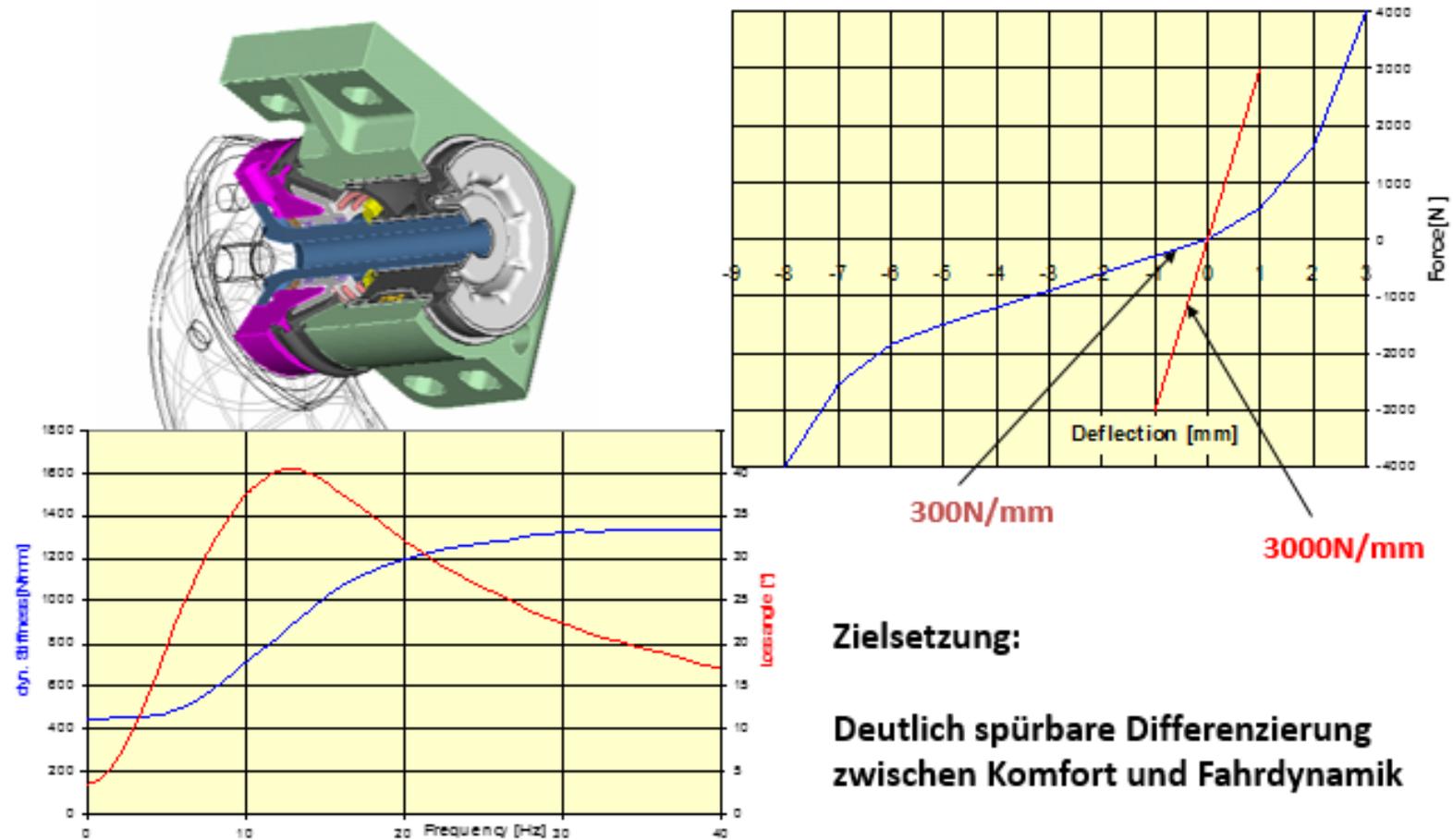


Radial dämpfend und  
vertikal eingebaut



Quelle: Causemann

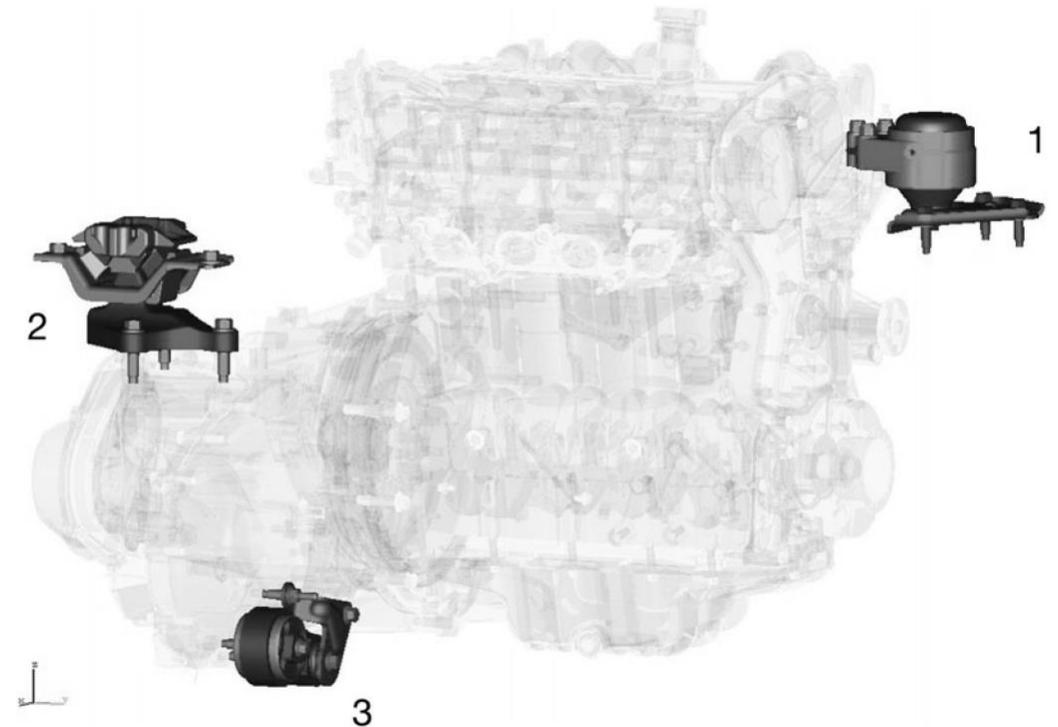


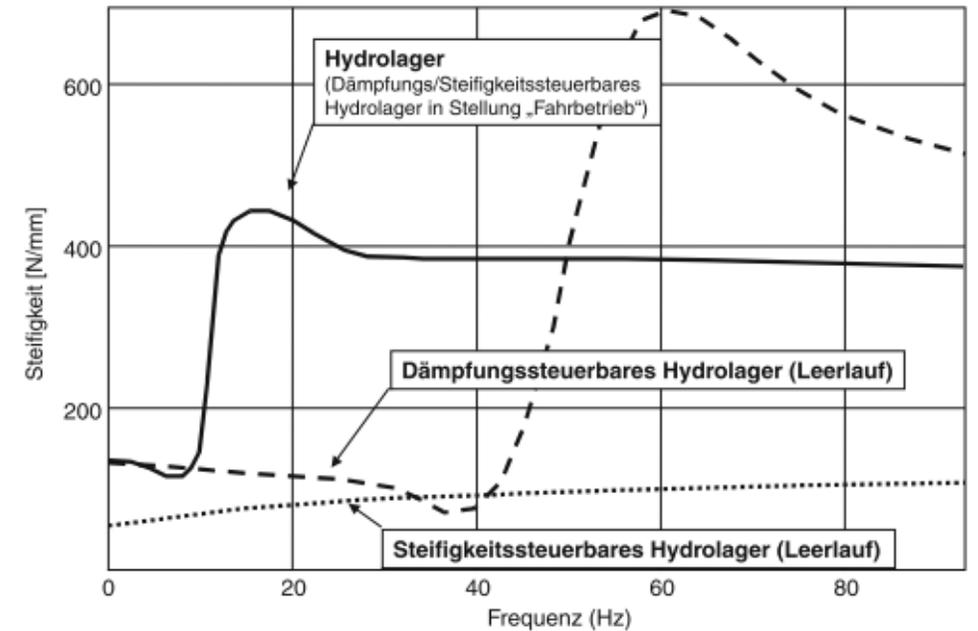
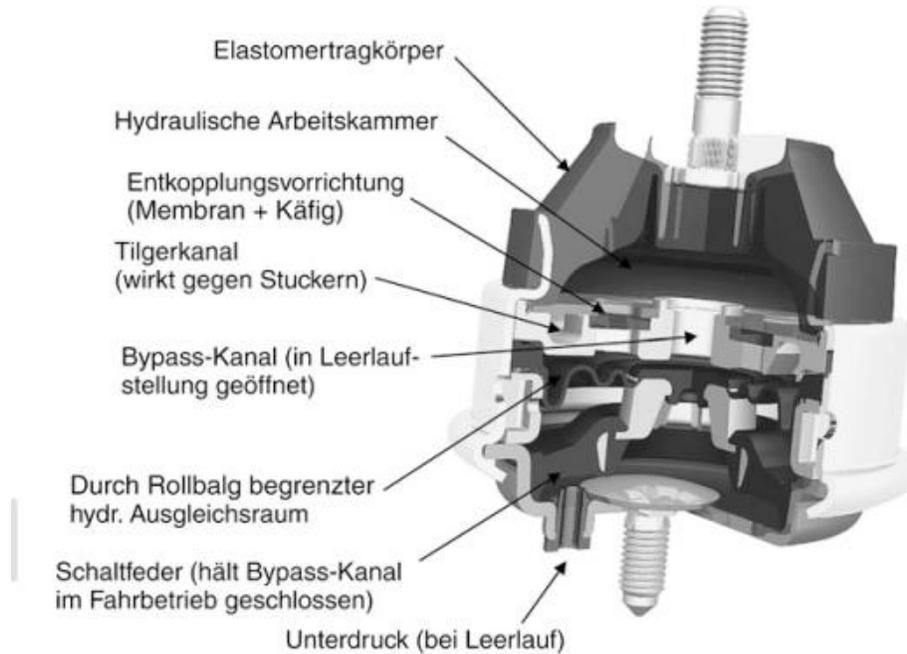


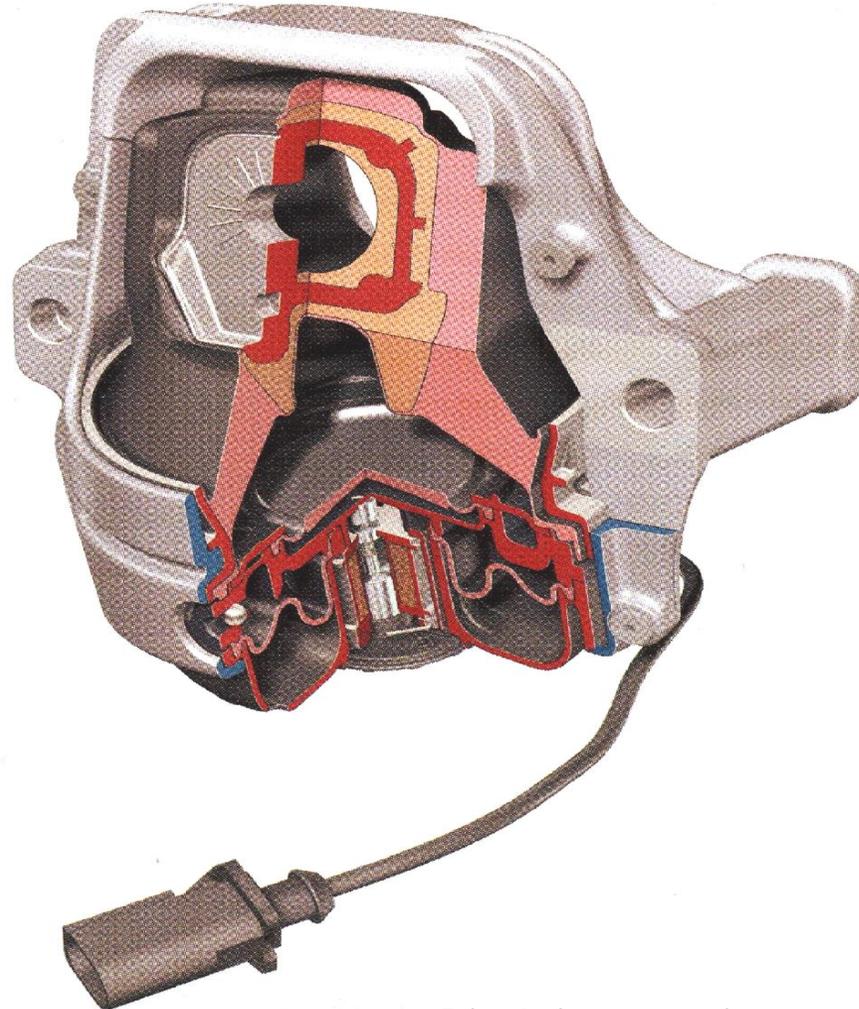
**Zielsetzung:**

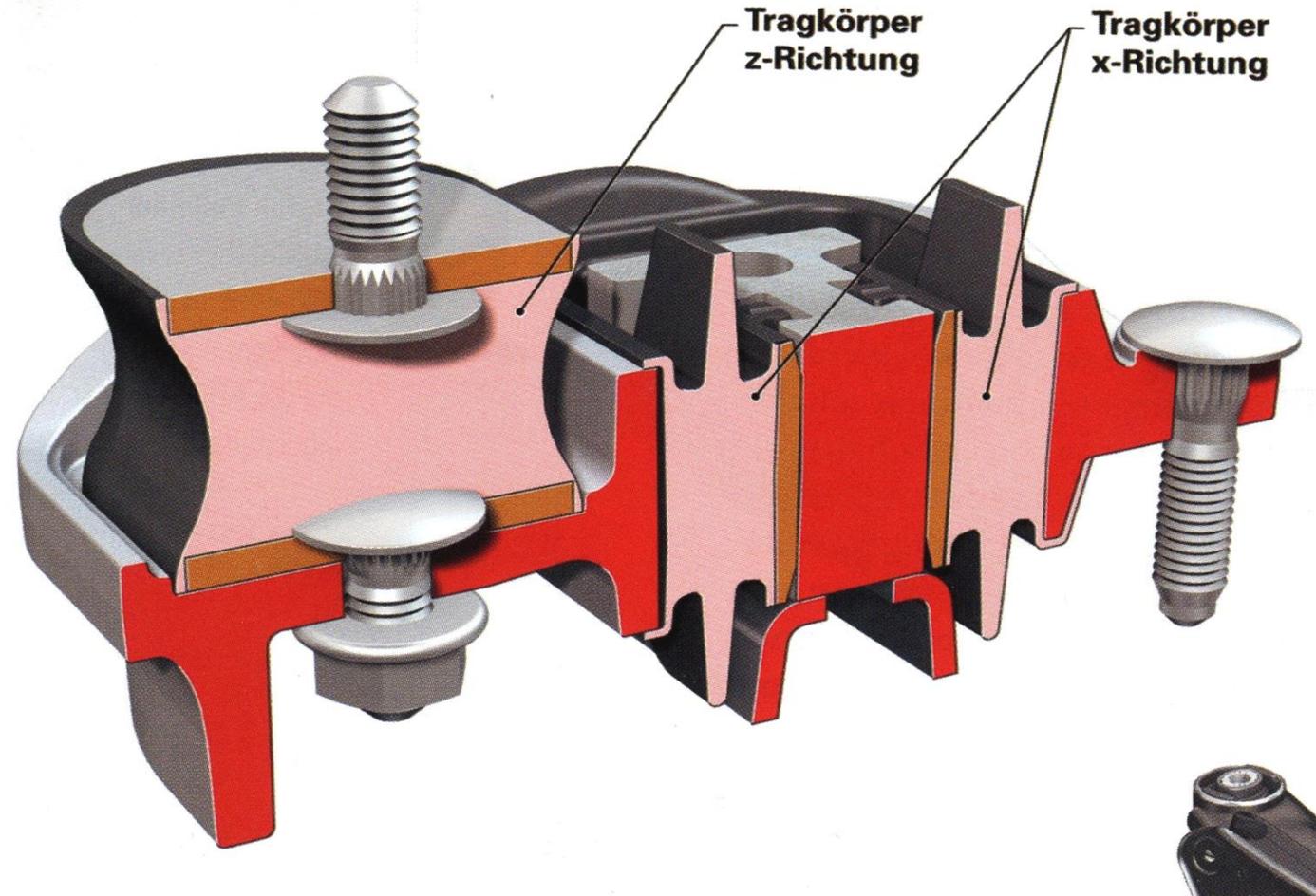
**Deutlich spürbare Differenzierung zwischen Komfort und Fahrdynamik**

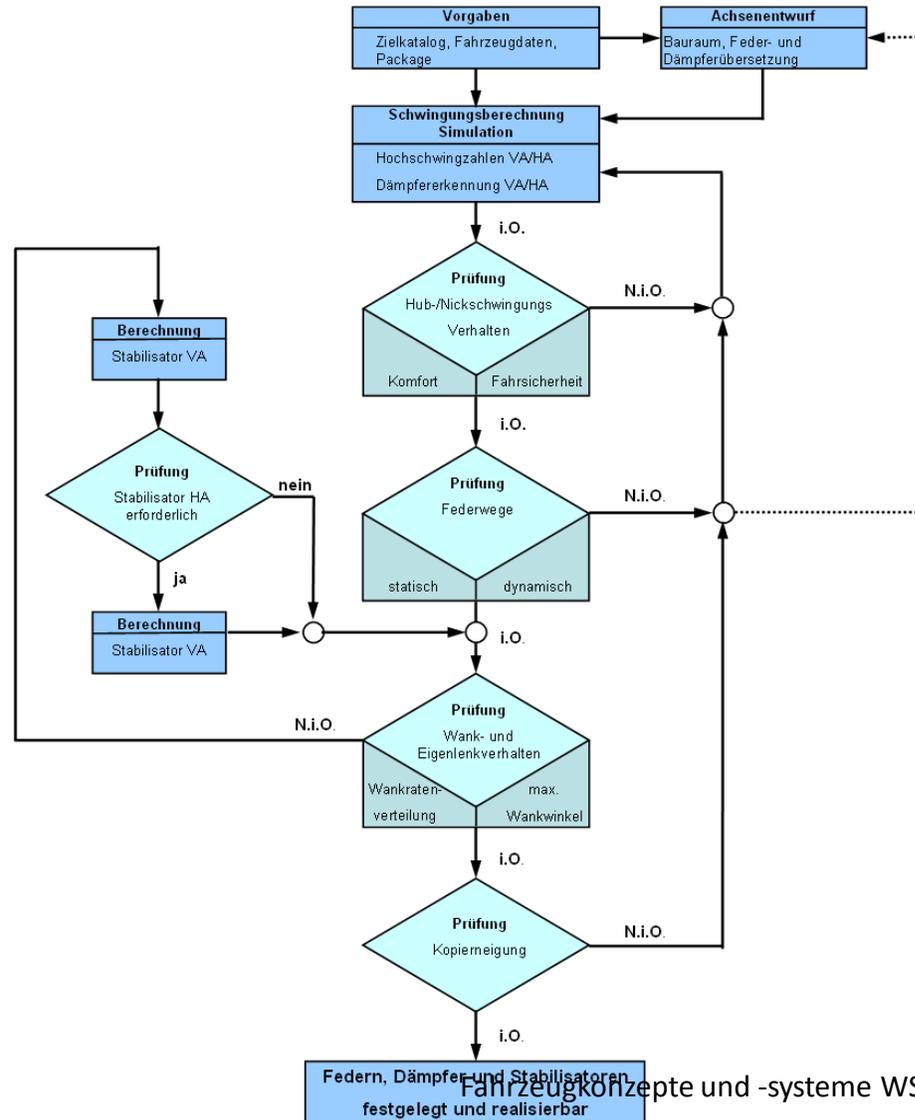
- Gewichtskraft abstützen
- Antriebsmomente abstützen
- Motor-/Getriebschwingungen isolieren
- Straßenerregte Schwingungen dämpfen











## Eigenlenkverhalten

Der Begriff Eigenlenkverhalten beschreibt die Kursänderungen eines Fahrzeuges ohne einen Eingriff des Fahrers. Die drei wichtigsten auftretenden Fahrzeugzustände dabei sind das Gieren, Schwimmen oder Rollen. Beim **Gieren** des Fahrzeuges erfährt dieses eine Drehbewegung um die Hochachse, von **Schwimmen** spricht man, wenn das Fahrzeug eine Seitenverschiebung erfährt, und von **Rollen** im Fall einer Drehbewegung um die Längsachse, also eine Seitenneigung. Da diese Bewegungsformen sich überlagern, ist eine eindeutige Definition für das Eigenlenkverhalten schwierig.

In der Fahrwerkstechnik werden deshalb oft die Schräglaufwinkel an der Vorder- und Hinterachse verglichen.

Der **Schräglaufwinkel** beschreibt den Winkel zwischen dem Vektor der Abroll- oder Umfangsgeschwindigkeit in der Radebene und dem Vektor der Aufstandspunktgeschwindigkeit. Bei ungestörter Geradeausfahrt liegen diese Vektoren übereinander, der Schräglaufwinkel ist also 0. Lenkt der Fahrer in eine Kurve (oder unterliegt das Fahrzeug anders einem Kräfteeinfluss, zum Beispiel durch Seitenwind), entsteht ein Unterschied zwischen der Bewegungsrichtung (Vektor der Aufstandspunktgeschwindigkeit) und der Ausrichtung des Rades (Vektor der Abroll- oder Umfangsgeschwindigkeit). Am Reifen des Fahrzeuges entsteht also immer zusätzlich zum Längsschlupf im Fall von Brems- und Antriebskräften – Querschlupf, sobald Seitenkräfte übertragen werden müssen.

Zur Definition des Eigenlenkverhaltens stellt man das Fahrzeug als Einspurmodell dar. Man geht davon aus, dass bei nicht allzu großen Lenkwinkeln die Schräglaufwinkel beider Räder einer Achse nahezu gleich sind, und beschränkt die weiteren Betrachtungen auf eine Seite des Fahrzeuges. Zeichnerisch lassen sich nun der Momentanpol  $M$  als Mittelpunkt der Kreisbahn, auf der sich das Fahrzeug tatsächlich bewegt, und der Momentanpol  $M_0$  als Mittelpunkt der Kreisbahn, auf der sich das Fahrzeug ohne Schräglaufwinkel an Vorder- und Hinterachse bewegen würde (wäre bei ganz geringer Geschwindigkeit der Fall), darstellen.

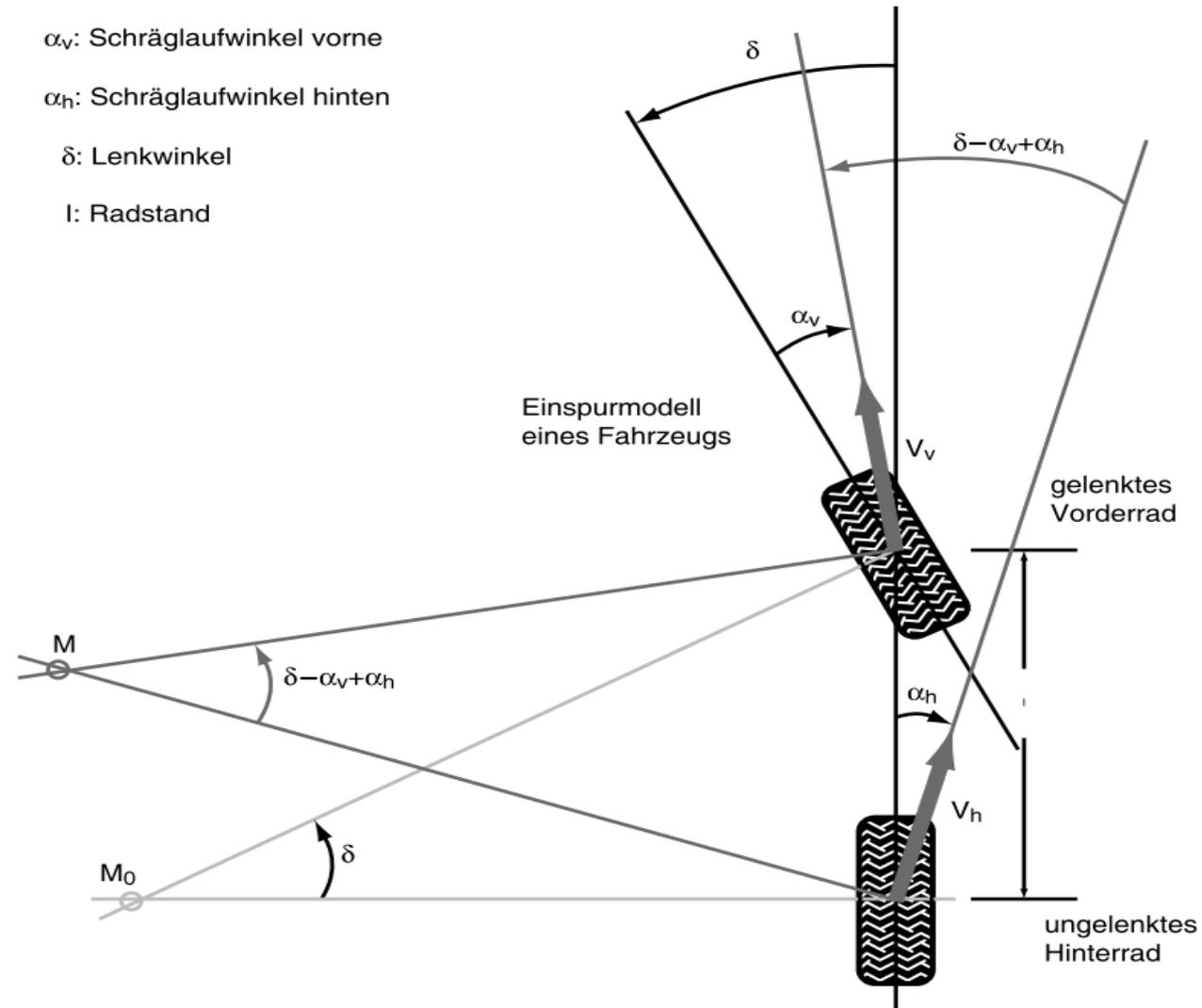
# Das Einspurmodell

$\alpha_v$ : Schräglaufwinkel vorne

$\alpha_h$ : Schräglaufwinkel hinten

$\delta$ : Lenkwinkel

$l$ : Radstand



## Fahrverhalten – Definition:

Während die „Federung“ eines Fahrzeuges in erster Linie die Aufnahme vertikaler dynamischer Kräfte und ihr Fernhalten von den Insassen zur Aufgabe hat, ist unter „Fahrverhalten“ die seitliche Abstützung verstanden, die das Fahrzeug durch die Reifen und Radaufhängung erfährt. Das Fahrverhalten beinhaltet aber außerdem die „Handhabung“ durch den Fahrer, d. h. also sein Einfluss auf das Verhalten des Fahrzeuges und seine Beanspruchung durch das Fahrzeug



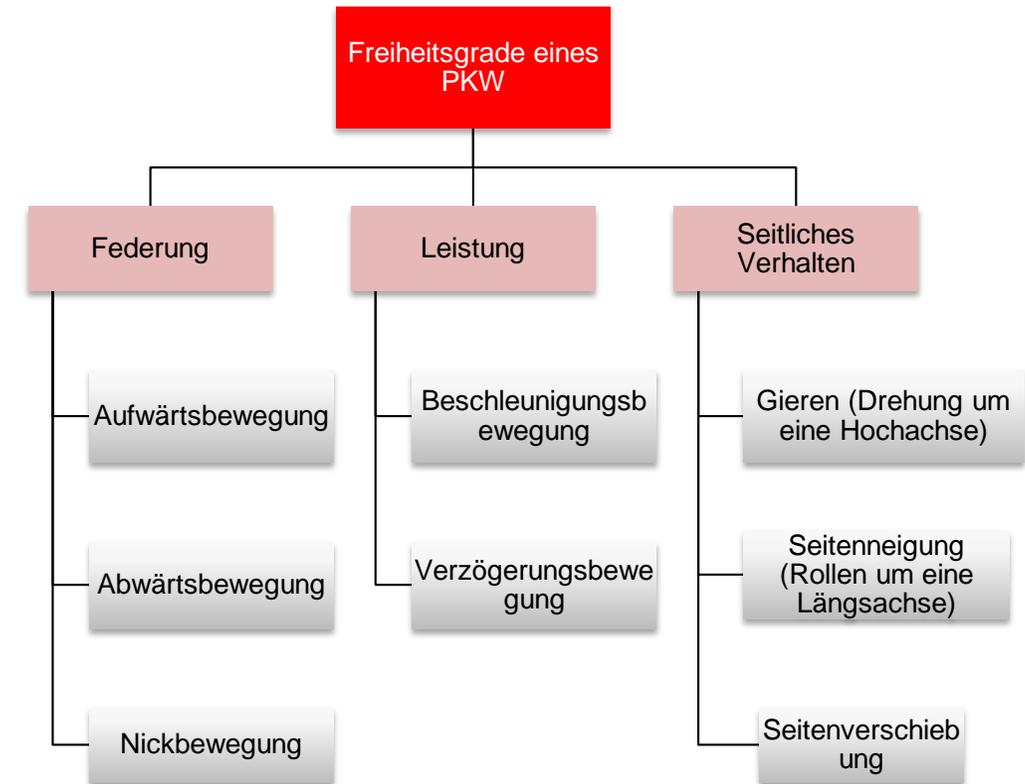
**Aus der getroffenen Definition erkennt man, dass zweierlei beachtet werden muss:**

1. Das **Kontrollsystem Wagen – Fahrer** erfordert bestimmte Eigenschaften, die objektiver und subjektiver Art sind. Für den Zweck dieser Arbeit soll der objektive Teil behandelt werden.
2. Wir wollen annehmen, dass die **Fähigkeiten des Fahrers** und die an ihn gestellten Anforderungen als Teil des Kontroll-Systems dem Automobilingenieur genügend bekannt sind, so dass er in der Lage ist, den subjektiven Teil in seine Überlegungen und Konstruktionen in ausreichendem Maße mit einzubeziehen.



Die Bewegungen oder Freiheitsgrade eines Wagens sind allgemein in drei Gruppen unterteilt:

- **Federung**
- **Leistung**
- **seitliches Verhalten**



- Die Tatsache, dass ein **Landfahrzeug sich auf einer festen Unterlage**, der Fahrbahn, bewegt und abstützt, vereinfacht das Problem im Vergleich zu Luft und Wasserfahrzeugen. Dagegen werden besondere Anforderungen an die Fahrbahnhaltung oder die **Kontrolle der Seitenbewegungen** gestellt, einfach deshalb, weil die zu benutzenden Fahrbahnen nur wenig breiter sind als die Fahrzeuge selbst.
- Die auf das Fahrzeug wirkenden Kräfte und Momente werden nach einer bestimmten **Reaktionszeit** in dem Reifenaufstandflächen aufgenommen. **Die Auswirkungen auf das Fahrzeug sollen stetig sein und vom Fahrer kontrolliert werden können.**
- Wenn wir bedenken, dass die Bedingungen so stark unterschiedliche Vorgänge umfassen wie **Geradeausfahren, Beschleunigen, Bremsen, Ausgleichen von Seitenwinden, Nicken, Gieren und Neigen**, dazu noch auf einer Vielzahl von verschiedenen Straßenoberflächen und Straßenprofilen, dann können wir den

**Umfang der Anforderungen ermessen, der bei der Entwicklung eines Fahrzeugs erfüllt werden muss, das hervorragendes Fahrverhalten aufweisen soll.**



## Die 5 wichtigsten Forderungen sind nachstehend zusammengefasst:

### **Kurvengängigkeit (cornering ability)**

- Das Fahrzeug muss im Stande sein, einen maximalen Wert seitlicher Beschleunigung pro Grad Reifenschräglaufwinkel aufzunehmen.

### **Richtungs- oder Eigenstabilität**

- Das Kraftfahrzeug muss eine Eigensteuerungseigenschaft haben, die ihm Richtungsstabilität verleiht. Es genügt nicht, dass die Steuerungstendenz lediglich neutral ist.

### **Windstabilität**

- Das Kraftfahrzeug darf bei böigen Seitenwinden nicht abwandern.

### **Reaktionsvermögen**

- Genaue Reaktion auf die Kontrollbewegungen des Fahrers ist für die Beherrschung des Fahrzeugs und das Befahren einer beabsichtigten Bahn mit geringsten Abweichungen wichtig.

### **Rückmeldung (feedback)**

- Das Fahrzeug muss dem Fahrer in irgendeiner Form das jeweilige Kräftespiel an den Reifenberührungsflächen melden.

Alle oben genannten **5 Forderungen hängen vom mechanischen Teil des Systems**, dem Automobil ab. Sie gelten immer, gleichgültig, ob der Fahrer dabei in Betracht gezogen wird oder nicht, und sie bestimmen

**den Beharrungszustand und das dynamische Verhalten des mechanischen Teils unseres Systems.**

Das **Seitliche Verhalten eines Kraftfahrzeugs** kann beeinflusst werden durch Ausnützung der

- **Einflüsse von Reifen,**
- **der Gewichtsverteilung.**
- **der Radaufhängungsgeometrie,**
- **der Radaufhängungs-Nachgiebigkeit,**
- **der Neigungswiderstands-Verteilung und**
- **der Lage des aerodynamischen Druckmittelpunktes.**



Die dabei in Betracht zu ziehenden Kräfte und Momente werden teils vom Fahrer durch Bestätigung des Lenkrads und teils von außen durch Wind und Straßenunebenheiten hervorgerufen.

## Beherrschung der Nickbewegung

Ehe wir nun eine ins einzelne gehende Untersuchung der fünf Hauptforderungen anstellen, wollen wir kurz ein Gebiet behandeln, das eine

### **Beschränkung in der Wahl der verfügbaren Mittel zur Erreichung besten Fahrverhaltens verursachen kann.**

- Das ist die Kontrolle der **dynamischen Lage (attitude) des Wagens** oder die Beherrschung der **Nickbewegungen während des Beschleunigens und des Bremsens**, eine Maßnahme, die insbesondere für leistungsstarke und weichgefederte Wagen sehr sorgfältig beachtet werden muss.
- Das Nicken des Fahrzeugs wird durch **dynamische Gewichtsverlagerung** beim Beschleunigen und Bremsen verursacht. Der Einfluss dieser Gewichtsverlagerung kann durch die Wahl einer **geeigneten Geometrie** der vorderen und hinteren Radaufhängung stark verringert, aber nicht gänzlich ausgeschaltet werden.
- Betrachten wir einige der Möglichkeiten, die dem Konstrukteur zur Verminderung des Nickens zur Verfügung stehen. Bild 1 ist ein vereinfachter Kräfte – Plan eines üblichen

### **Hinterachsgetriebenen Kraftfahrzeugs mit ungefedertem Differential und Bremsen (Starrachse).**

## Beherrschung der Nickbewegung

Die Beschleunigungskraft  $a \cdot W/g$  wirkt am Schwerpunkt und an den Hinterrädern. Die dynamische Gewichtsverlagerung von vorn nach hinten ist durch die Gleichung

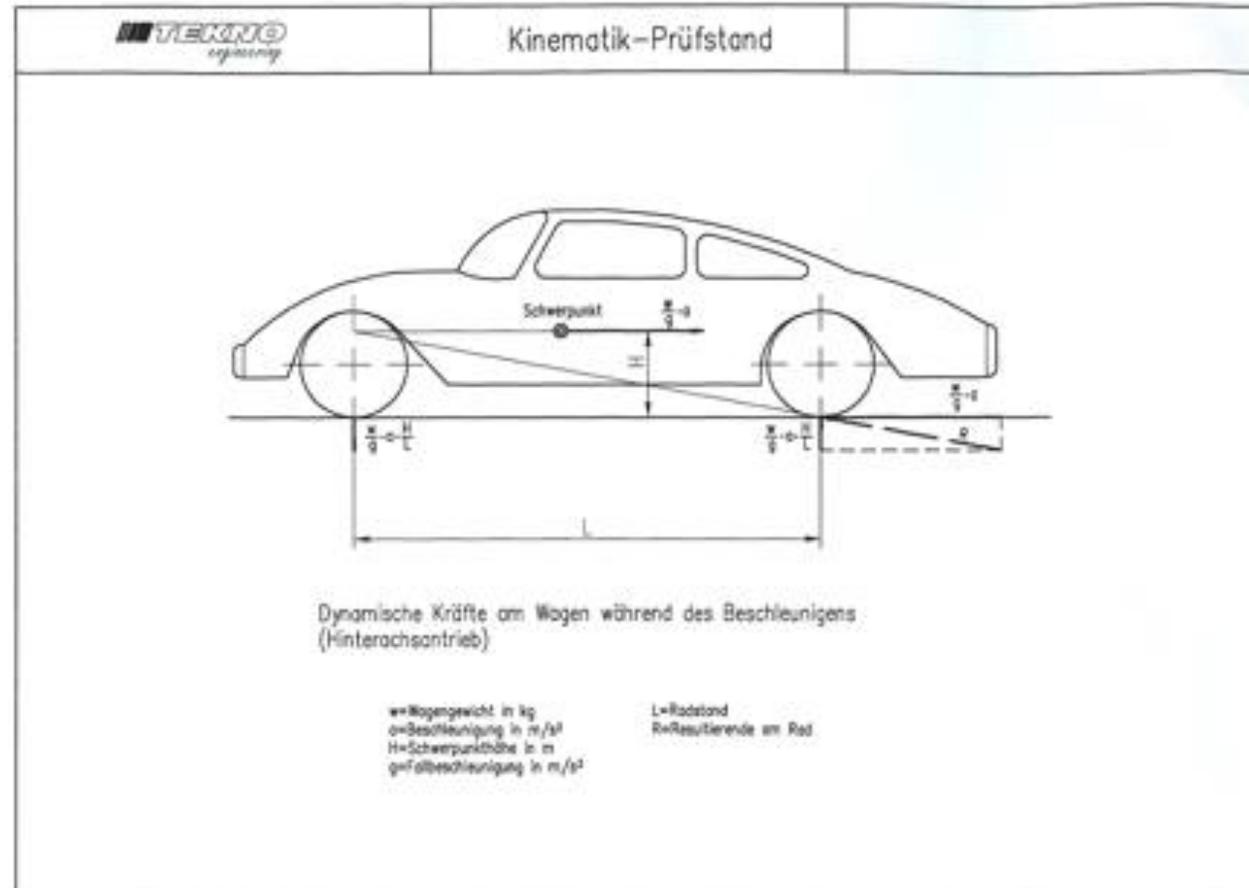
$$P = \frac{W}{g} * a * \frac{h}{l}$$

gegeben.



Befindet sich der kinematische Momentendrehpunkt der hinteren Radaufhängung an irgendeiner Stelle auf der Kraftlinie der Resultierenden  $R$ , dann erfolgt beim Beschleunigen keine Deformation der Hinterfedern, denn die Resultierende hat keinen Momentenarm, mit dem ein Drehmoment um den Momentendrehpunkt ausgeübt werden könnte.

## Beherrschung der Nickbewegung



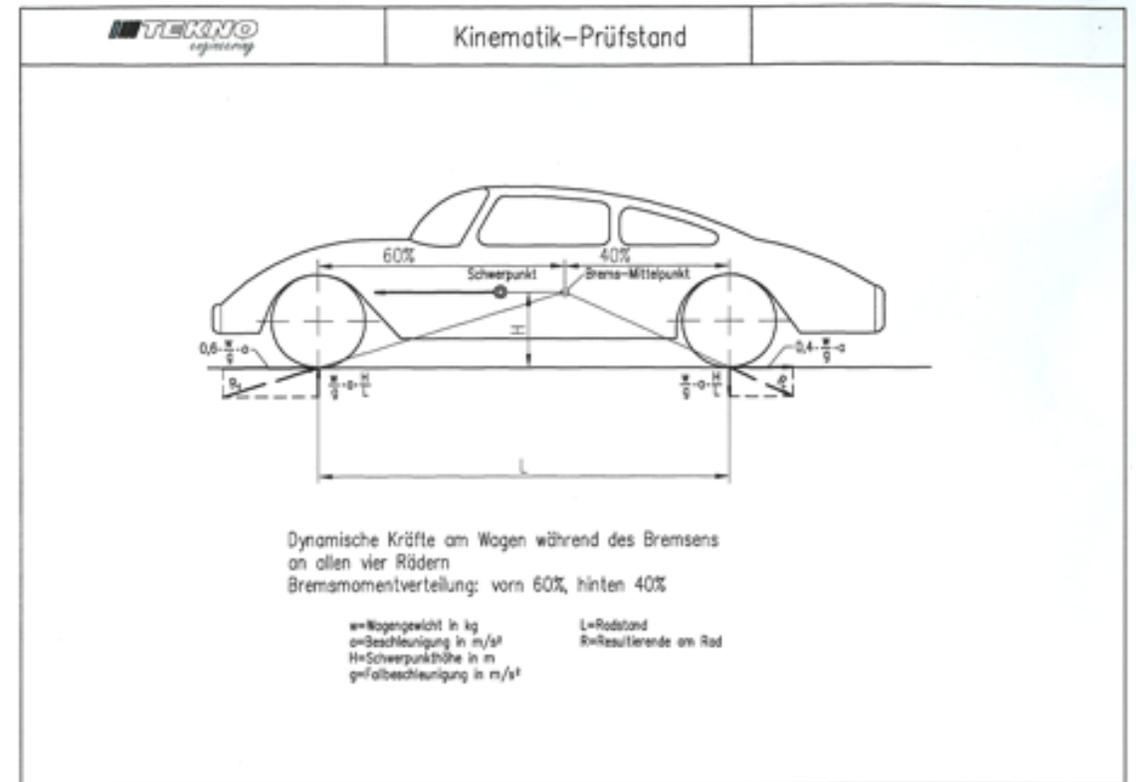
## Beherrschung der Nickbewegung

- Da aber beim **Beschleunigen keine vorwärts oder rückwärts gerichtete Kraft auf die vordere Radaufhängung wirkt**, können wir mit deren Geometrie nichts Ähnliches unternehmen, um ein **Hochgehen der Vorderpartie des Kraftfahrzeugs beim Beschleunigen zu verhindern**.
- Wir können dieses **Hochgehen jedoch verringern durch Verwendung einer geringen spezifischen Federung von der Normalage aufwärts**. Um das Nicken noch weiter zu reduzieren, oder sogar auszuschalten, können wir eine **Momentandrehpunktlage für unsere hintere Radaufhängung** oberhalb der neutralen Linie wählen, so dass sich das Heck des Kraftfahrzeugs mit dem Vorderwagen aufwärts bewegt.

## Beherrschung der Nickbewegung

Bild rechts zeigt den Kräfteplan des gleichen Wagens beim Bremsen mit einer Bremsmomentverteilung von 60% vorn und 40% hinten.

Auch hier wird das Kraftfahrzeug während des Bremsens in seiner normalen **statischen Höhe und Lage bleiben**, wenn die Drehpunkte der vorderen und hinteren Radaufhängung **auf den Kraftlinien der beiden Resultierenden  $R_f$  und  $R_r$**  liegen.



## Beherrschung der Nickbewegung

- Der Kräfteplan mit den neutralen Linien für Bremsung und Beschleunigung ist in Bild 3 dargestellt. Wie bereits gesagt, kann vor der neutralen Linie abgewichen werden; das hängt vom Konstruktionsvorhaben ab.
- In der Praxis kann der Momentendrehpunkt innerhalb der Fläche eines Sektors oder einer freien Fläche als wünschenswert und die dunkleren Flächen als fraglich betrachtet.
- Offensichtlich muss in jedem Fall ein Kompromiss zwischen dem Verhalten des Kraftfahrzeuges beim Beschleunigen und beim Bremsen gemacht werden. Darüber hinaus darf nicht übersehen werden, dass eine weitgehende Vermeidung der Nickbewegung des Vorderwagens beim Bremsen durch die vordere Radaufhängungsgeometrie **unzulässige Nachlaufveränderungen** beim Durchfedern verursacht, die **bekanntlich Rauhigkeit (harshness)** zur Folge haben.
- Außerdem ist für die hintere Radaufhängung leistungsstarker und weich gefederter Wagen die beste Lage des Momentendrehpunkts zur Vermeidung von Nickbewegungen beim Bremsen oder Beschleunigen **nicht gleichzeitig die beste Lage für optimale Seitensteifigkeit (Seitenbeschleunigung/Grad Reifenschräglaufwinkel) des Hinterwagens. Das gilt für Starrachsen und insbesondere für Einzelradaufhängungen.**

## Beherrschung der Nickbewegung

- Starre Hinterachse / ungefedertes Differential
- 4 Bremsen an den Rädern

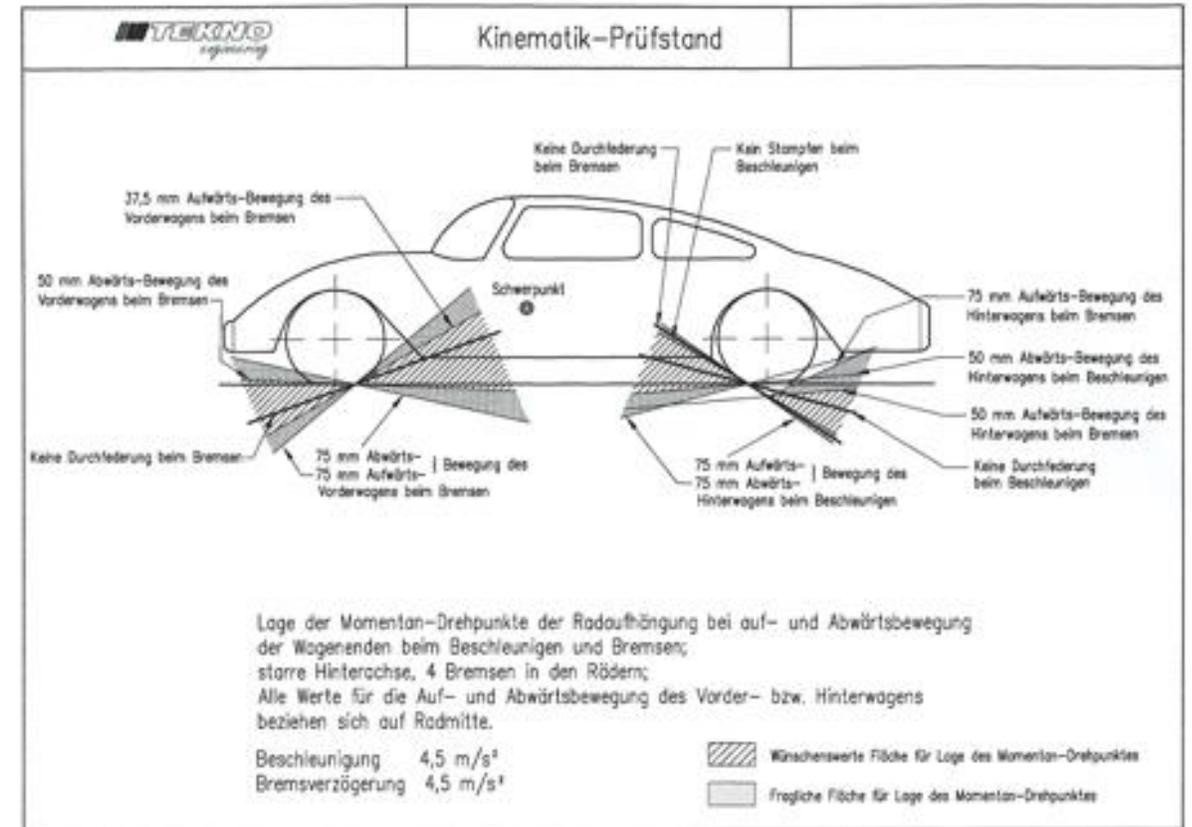


Bild I

## Beherrschung der Nickbewegung

Das Bild stellt die Bedingungen für ein Kraftfahrzeug mit **gededertem Differential und gedederten Hinterradbremmen** dar. Man beachte, dass der **Momentendrehpunkt der Hinterradaufhängung ziemlich hoch liegen muss**. Da dadurch andere Konstruktionsmerkmale des Wagens beeinflusst werden können, muss der Konstrukteur einen **größeren Kompromiss im dynamischen Verhalten** bei dieser Ausführung eventuell in Kauf nehmen.

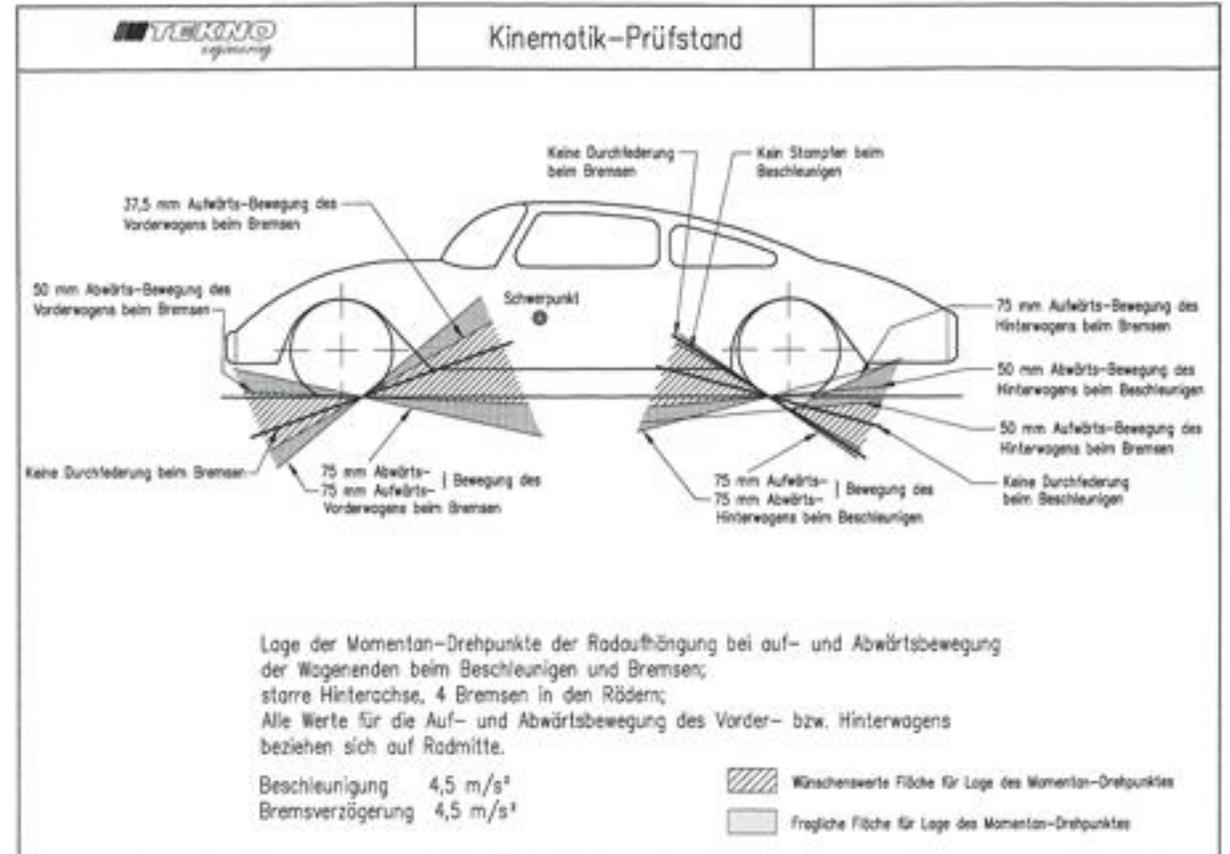
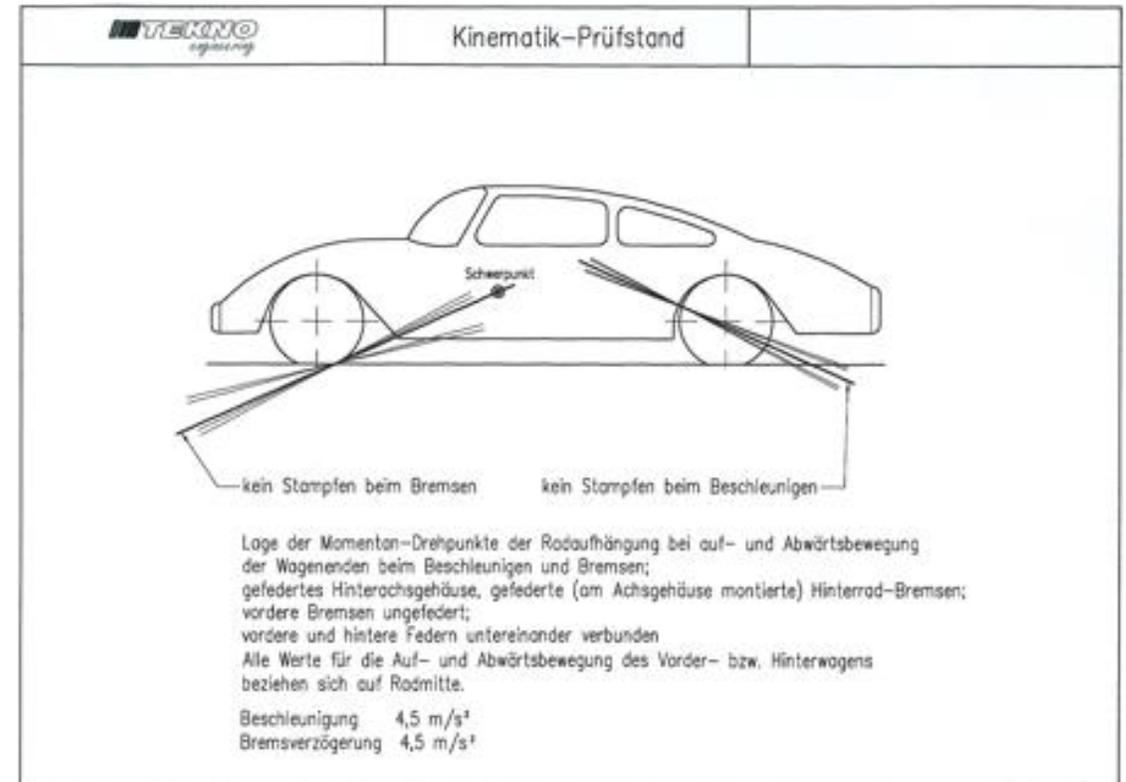


BILD 1

## Beherrschung der Nickbewegung

- **Gefedertes Hinterachsgehäuse**
- **Gefederte am Achsgehäuse montiert Hinterachsbremse**
- **Vordere und hintere Federung verbunden**

Wegen der außerordentlich niedrigen Nickkennlinie einer solchen Konstruktion sind die möglichen Lagen für die Momentendrehpunkte sehr beschränkt.



## Beherrschung der Nickbewegung

Diese Einschränkungen in der Geometrie der Vorderrad- und Hinterradaufhängung komplizieren das Problem des Fahrverhaltens eines Kraftfahrzeugs, weil sie die Wahl der

**Neigungssteuerung (rollsteer), der Lage der Rollachse und die physikalische Lage der Radaufhängungsdrehpunkte beeinflussen können.**

Außerdem müssen wir darauf achten, dass durch die Kontrolle der Lage (attitude) des Wagens

- keine übergroße Reifenabnutzung,
- kein Brems-Radhüpfen (brake hop) oder
- Antriebs-Radhüpfen (power hop) in die Konstruktion hineingegangen wird.

Nach diesen Betrachtungen über das Nicken des Fahrzeuges können wir jetzt die oben genannten 5 Bedingungen des guten Fahrverhaltens besprechen.

## Kurvengängigkeit

Optimale Kurvengängigkeit oder –Standfestigkeit oder Seitensteifigkeit ist ein wichtiges Kriterium für das Fahrverhalten eines Kraftfahrzeugs. Obwohl vollständige Reifendaten bei hohen Schräglaufwinkel fehlen, kann die Standfestigkeit dennoch in einem weiten Bereich rechnerisch ermittelt werden. Um den Gewichtsfaktor auszuschalten und Vergleiche zu erleichtern, ist es üblich, einen Koeffizienten zu verwenden, der die

**Wagen-Steifigkeit pro Einheit Wagengewicht darstellt,  $\text{kg/Grad} \cdot \text{kg}$ , wobei die Seitensteifigkeit die seitliche Beschleunigungskraft pro Grad Schräglaufwinkel ist,  $\text{kg/Grad}$ .**

Man muss also ein Kraftfahrzeugsystem konstruieren, bei welchem die Reifen ihre maximale Seitenkraft pro Grad Schräglaufwinkel entwickeln können. Theoretisch erhält man das bestmögliche Ergebnis – um das einfachste Beispiel anzuführen – mit einem Fahrzeug, dessen

**Reifensturzwinkel null Grad ist, das gleiche Reifengröße und Reifendrucke hat und bei dem keine Vortriebskraft von den Reifen übertragen wird.**

## Kurvengängigkeit

- Obwohl die meisten Kraftfahrzeuge gleiche Reifengröße und Reifendrucke angeben, sind die anderen Eigenschaften unseres Idealfahrzeugs in der Praxis nicht zu erreichen.
- Der **Schwerpunkt** liegt selbstverständlich unvermeidbar irgendwo oberhalb der Fahrbahn. Deshalb findet auch während des Kurvenfahrens eine **dynamische Gewichtsverschiebung** auf die äußeren Räder statt, die eine Verminderung der Summe der Seitenkräfte aller vier Räder bei einem gegebenen Schräglaufwinkel zur Folge hat. Dies entsteht durch die wohlbekannte Tatsache, dass der Verlauf der Seitenkraft über der vertikalen Belastung bei einem typischen Reifen nicht linear aufwärts, sondern konvex ist.

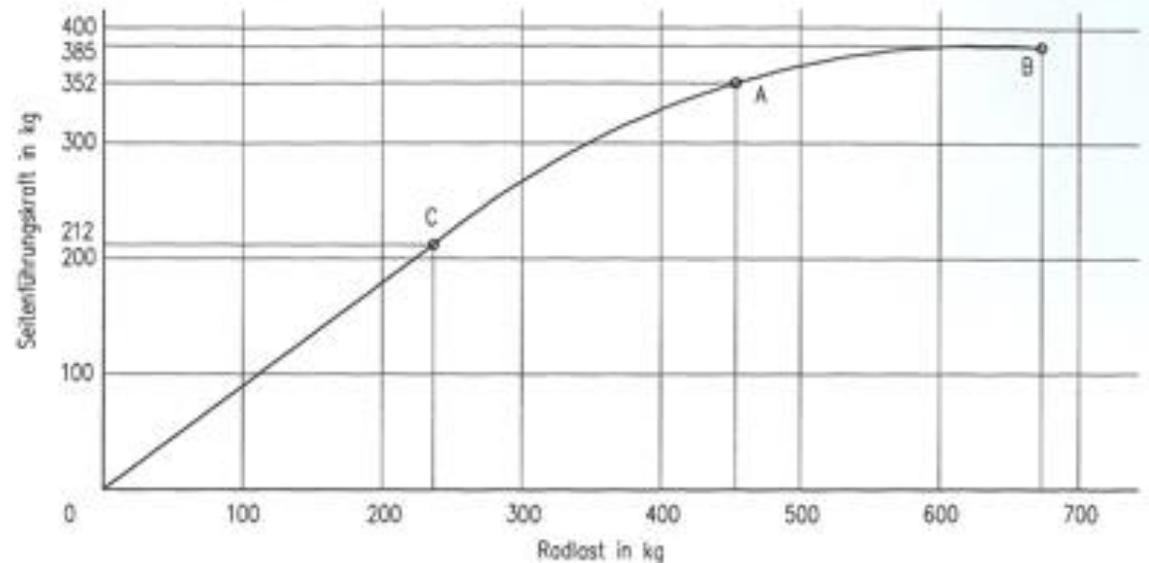
## Kurvengängigkeit

Man sieht dies in Bild 6, in welchem für den Reifen ein Schräglaufwinkel von  $12^\circ$  angenommen ist.

$$\mathbf{A} \quad - \quad 4 \times 352 \text{ kg} = \mathbf{1408 \text{ kg}}$$

$$\mathbf{B + C} \quad - \quad 2 \times 385 \text{ kg} + 2 \times 212 \text{ kg} = \mathbf{1194 \text{ kg}}$$

Bei  $0,6 \text{ g}$  Querbewegung ergibt sich eine Reduzierung der Seitenführungskraft von  $214 \text{ kg}$ .



Seitenführungskraft normaler Personenwagen-Reifen bei  $12^\circ$  Schräglaufwinkel, in Abhängigkeit von der Radlast.  
Einfluß veränderter Radlasten:

P u n k t A : Normal, 4 Reifen ergeben bei statischer Radlast  $454 \text{ kg}$  zusammen  $4 \times 352 = 1408 \text{ kg}$

P u n k t e B und C : Seitliche Wagenbeschleunigung von  $0,6 \text{ g}$  ergibt außen je  $+ 218 \text{ kg}$  Radlast;  
d. h. die Seitenkraft ist bei B jetzt  $2 \times 385 \text{ kg} = 770 \text{ kg}$ ;

innen ist die Radlast je  $- 218 \text{ kg}$  und damit die Seitenkraft zusammen  $2 \times 212 = 424 \text{ kg}$ ;  
alle 4 Reifen haben demnach nur  $424 + 770 = 1194 \text{ kg}$ ; d. h.  $214 \text{ kg}$  weniger als bei A.

## Kurvengängigkeit

- Bei einer vertikalen Belastung von 454 kg pro Reifen ist die gesamte erzeugte Seitenkraft 1408 kg. Wenn angenommen wird, dass eine Gewichtsverlagerung von 48% auf die äußeren Reifen erfolgt, also 218 kg pro Reifen bei 0,6 g seitlicher Beschleunigung, so ergibt sich, dass die gesamte Seitenkraft auf 1194 kg heruntergegangen ist, d. h. ein Nettoverlust von 214 kg Seitenkraft für das Fahrzeug.
- **Ein zusätzlicher Verlust an Seitenkraft kann durch die dynamische Gewichtsverlagerung in der Längsrichtung während des Bremsens oder des Beschleunigens eintreten.**
- Weitere Ursachen für reduzierte Seitenkräfte, im Zusammenhang mit der
- **Schwerpunktlage**, sind der
- **Hebe – Effekt (jacking effect)** gewisser, unabhängig gefederter Hinterräder, ungleiche vordere und hintere
- **Neigungssteifigkeit** und eine
- **nicht-horizontale Rollachse**, die in den meisten Kraftfahrzeugen vorhanden ist. Die letzten beiden Eigenschaften wirken sich auch auf das Eigensteuerungsverhalten des Kraftfahrzeugs aus.
- Ungleichmäßige Gewichtsverteilung durch statische Belastung beeinflusst die Seitensteifigkeit nachteilig in gleicher Weise wie **dynamische Gewichtsverlagerung**.
- Da die **Vortriebskraft des Wagens** einen beträchtlichen Teil der vom Reifen an seiner Berührungsfläche mit der Fahrbahn erzeugbaren horizontalen Kräfte in Anspruch nimmt, wird die Seitenkraft der Antriebsräder, ob vorn oder hinten dadurch ebenfalls reduziert.

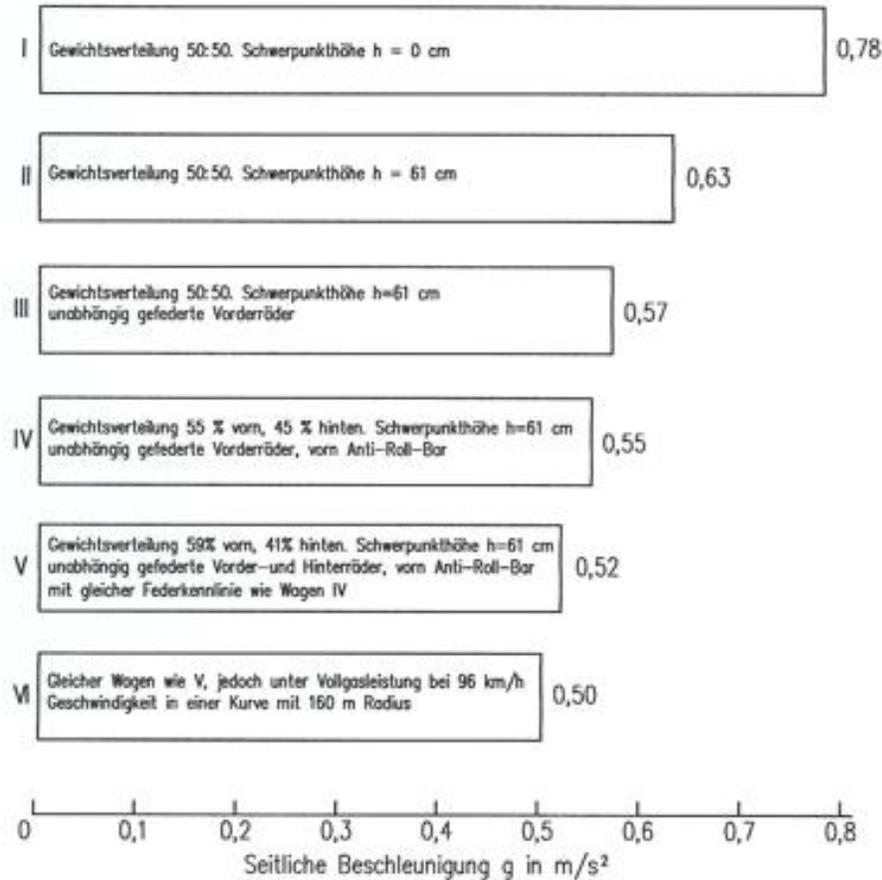
## Kurvengängigkeit

- Der **unvorteilhafte Sturz**, hervorgerufen durch entsprechende vordere und hintere Radaufhängungen, verringert ebenfalls die Seitensteifigkeit.
- Eine Radaufhängung, die den Außenrädern jeweils einen **negativen und den Innenrädern einen positiven Sturz gibt**, würde den Verlust nicht nur vermeiden, sondern sogar eine größere Seitenkraft pro Schräglaufwinkel entwickeln als unser Idealfahrzeug mit Null Grad Sturzwinkel.

**Bild 7** zeigt die zusammengefasste nachteilige Wirkung auf die Seitenkraft bei einem Schräglaufwinkel von max.  $12^\circ$ , die durch die Abweichungen von unseren ideal und symmetrischen Fahrzeug, hervorgerufen wird.

- Der erste Balken gilt für das symmetrische Fahrzeug mit gleicher Gewichtsverteilung, mit Schwerpunkt auf der Fahrbahn und ohne Antriebsmoment an den Rädern. Dieses Fahrzeug kann  $0,78\text{ g}$  seitliche Beschleunigung aufnehmen.

Bild 7



Mögliche seitliche Beschleunigung bei 12° Schräglaufwinkel und verschiedenen Fahrzeugbedingungen

## Kurvengängigkeit (Erklärung zu Bild 7)

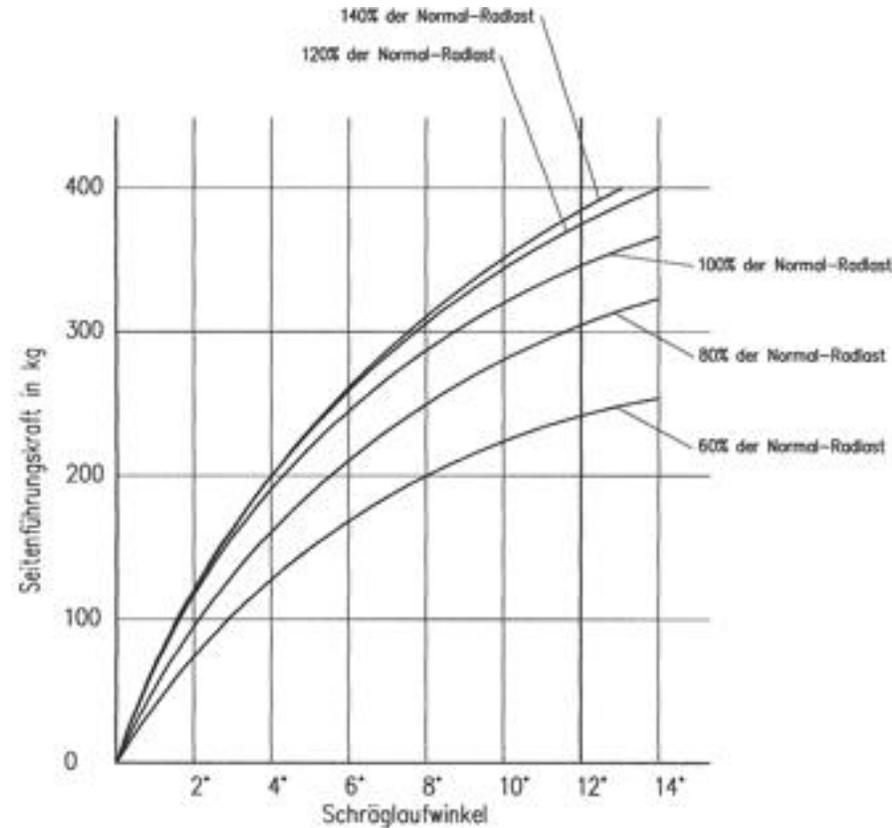
Bei Berücksichtigung einer angemessenen Schwerpunkthöhe, wie in Balken II, verringert sich die zulässige seitliche Beschleunigung auf 0,63 g.

- In Balken III vermindert die Hinzunahme einer unabhängigen Vorderradaufhängung mit der damit verbundenen Radsturzänderung die seitliche Beschleunigung auf 0,57g.
- Der Übergang auf eine Gewichtsverteilung von 55 : 45 und der Einbau eines vorderen Torsionsstabilisators belässt uns noch 0,55 g seitliche Beschleunigung.
- Das Hinzufügen einer nach neuesten Gesichtspunkten entwickelten unabhängigen hinteren Radaufhängung, zusammen mit erhöhter vorderer Rollsteifigkeit zur Erhaltung des gleichen Untersteuerungseffektes wie bei einer starren Hinterachse, bringt die seitliche Beschleunigung auf 0,52 g.
- Schließlich kann das Fahrzeug unter dem vollen Antriebsmoment auf die Hinterräder bei 96 km/h in einer Kurve mit 146 m Radius noch 0,50 g aufnehmen, wie es durch den Balken VI dargestellt wird.

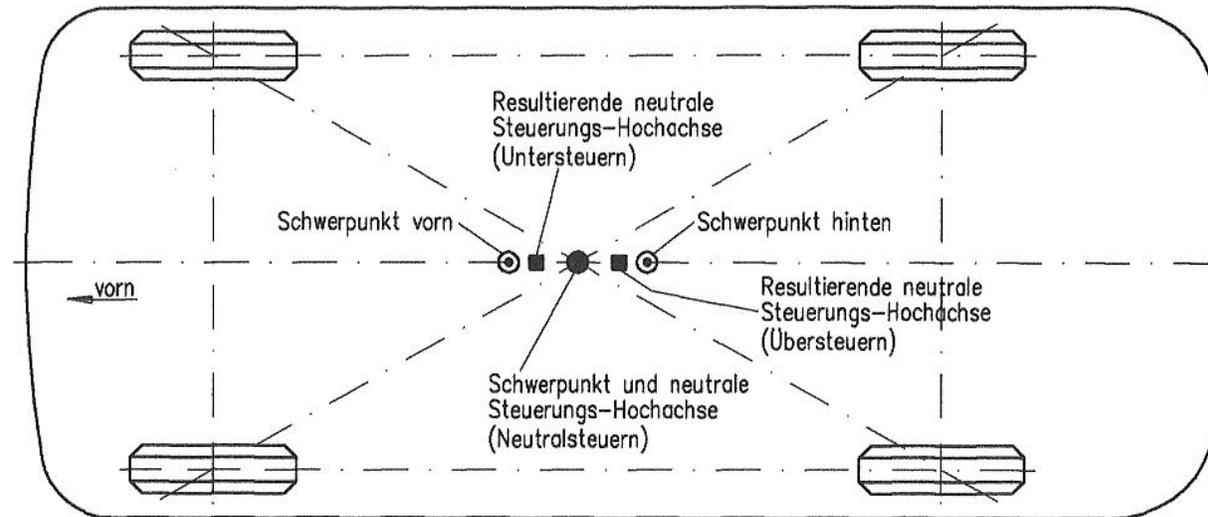
## Kurvengängigkeit (Erklärung zu Bild 7)

- Hier muss erwähnt werden, dass sich der  $12^\circ$  Schräglaufwinkel an allen vier Reifen des Fahrzeugs nur in den ersten zwei Beispielen einstellt. In den nächsten drei Beispielen nur an den Vorderrädern und im letzten Beispiel nur an den Hinterrädern.
- Sämtliche Berechnungen beruhen auf den in Bild 8 (nächste Folie) wiedergegebenen Reifendaten.

Bild 8



Seitenführungskraft abhängig vom Schräglaufwinkel bei verschiedenen Radlasten



Einfluß der Schwerpunktlage des Fahrzeugs auf die Lage der neutralen Steuerungshochachse

## Richtungs- und Eigenstabilität

Es wurde bereits erwähnt, dass es nicht genügt, wenn ein Kraftfahrzeug eine neutrale Eigensteuerungscharakteristik hat.

- Der wesentliche Grund dafür ist folgender: da ein solches Fahrzeug verschiedenen **Lade-, Fahr- und Wartungsbedingungen unterliegt**, würde die **Eigensteuerungstendenz ständig zwischen Untersteuerung und Übersteuerung hin- und herschwanken**, so dass dadurch verwirrende Kontrollbedingungen für den Fahrer entstehen würden.

Wie in Bild 9 gezeigt, hat ein symmetrisch aufgebautes Fahrzeug seinen Schwerpunkt und seine neutrale Steuerungs-Hochachse im Mittelpunkt des Fahrzeugs. Wir wollen die neutrale Hochachse als diejenige Linie definieren, an welcher seitlich auf das Fahrzeug wirkende Kräfte kein Schrägstellen bzw. Gieren hervorrufen.

- Diese Linie ist selten senkrecht, sondern meistens nach hinten geneigt. Verläuft **diese Linie durch den Schwerpunkt**, wie bei einem symmetrischen Fahrzeug, so können wir sehen, dass Außenkräfte oder Trägheitskraft, die auf den Schwerpunkt wirken, **kein Schrägstellen hervorrufen**. Wir nennen ein solches Fahrzeug ein Fahrzeug mit **neutraler Eigensteuerung**.

## Richtungs- und Eigenstabilität

- Da ein Fahrzeug mit **neutraler Steuerung nicht wünschenswert** ist, müssen der **Schwerpunkt und die neutrale Linie voneinander getrennt werden**. Eine Möglichkeit, dies zu tun, ist ganz einfach die **Verlegung des Schwerpunktes nach vorn oder hinten**. Es gibt noch andere Möglichkeiten für den Konstrukteur, die später angedeutet werden.
- **Bei der Verschiebung des Schwerpunkts zeigt sich, dass die neutrale Steuerungs-Hochachse diesem in derselben Richtung folgt, jedoch etwas zurückbleibt.**
- Der Grund für die geringere Verschiebung der neutralen Hochachse sind die bereits besprochenen **Reifenmerkmale**, die einen kleineren Seitensteifigkeits-Koeffizienten für die **überbelasteten Hinterreifen** ergeben. Deshalb liegt die Linie, an welcher eine seitliche Last wirken kann, ohne Gieren hervorzurufen – die neutrale Steuerungs-Hochachse - ,hinter dem Schwerpunkt .
- **Das gleiche gilt umgekehrt, wenn wir den Schwerpunkt nach rückwärts verschieben.**

## Richtungs- und Eigenstabilität

Ganz einfach gesagt:

- **wenn die neutrale Steuerungs-Hochachse hinter dem Schwerpunkt liegt, wird das Fahrzeug untersteuern.**
- **Der Abstand zwischen dem Schwerpunkt und der neutralen Achse, in Prozent des Radstands ausgedrückt – aber nicht von der Lage zum Mittelpunkt des Radstands abhängig - ,ist ein Maß für die Größe des Eigensteuerungseffekts.**

**Ein untersteuertes Fahrzeug ist richtungsstabil.** Die Ursache dafür ist die am Schwerpunkt durch eine Abweichung aus der Fahrtrichtung hervorgerufene Zentrifugalkraft, die der Störung, welche die Abweichung hervorruft, entgegenwirkt und diese dadurch verringert.

Umgekehrt wird **ein übersteuertes Fahrzeug nicht stabil sein**, weil die Wirkung einer Seitenkraft vor, hinter oder im Schwerpunkt durch die **Zentrifugalkraft vergrößert wird**. Die Zentrifugalkraft erhöht sich mit dem Quadrat der Fahrzeuggeschwindigkeit und

- **jedes übersteuerte Fahrzeug hat eine kritische Geschwindigkeit, bei welcher selbst die kleinste Störkraft eine Bodenspirale (ground loop) verursacht, wenn nicht der Fahrer schnell die richtige Korrektur vornimmt.**

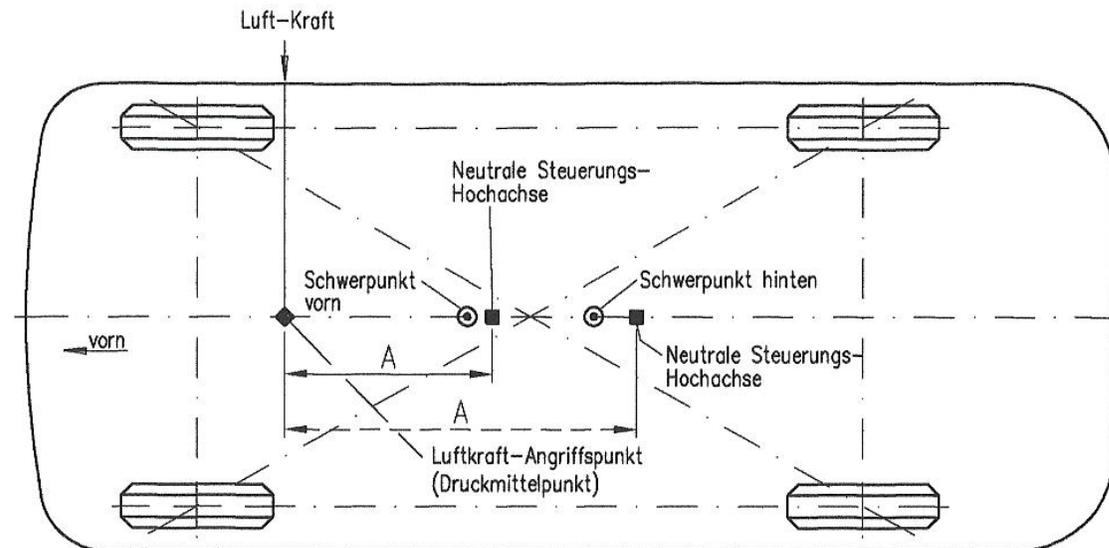
## Richtungs- und Eigenstabilität

- **Die Stabilität des untersteuernden Fahrzeugs ist für den Fahrer von unmittelbarem Vorteil.**
- Er kann es sich leisten, seinen Blick **einen Augenblick von der Straße abzuwenden**, ohne Gefahr zu laufen, dass sich das Fahrzeug inzwischen in eine **andere Richtung bewegt**. Er kann das Fahrzeug von einer geraden in eine gekrümmte Bahn führen, oder von einer gekrümmten Bahn in eine andere mit verschiedenem Krümmungsradius übergehen, oder zur Geradeausfahrt zurückkehren, ohne Schwierigkeiten zu haben, einen **Gleichgewichtszustand mit Hilfe des stabilen Verhaltens des Wagens in ausreichender Zeit zu erreichen**.
- Soweit haben wir uns auf nur eine Möglichkeit zur Trennung des Schwerpunkts und der neutralen Steuerungs-Hochachse beschränkt. Man kann dieses **Ziel, einen über- oder untersteuernden Effekt in den Wagen einzubauen, auch auf andere Weise erreichen**, hauptsächlich **durch Reifen und zweckmäßige Radaufhängungssysteme**.
- Eine Aufzählung schnell und langsam verlaufender gebräuchlicher Eigensteuerungseffekte dieser Art wird unter Punkt 4 „Reaktionsvermögen“ gegeben.
- Es soll noch darauf hingewiesen werden, dass die Größe des verwendeten Steuerungseffekts klein sein soll, um die optimale Kurvenstandfestigkeit oder Seitensteifheit weitgehendst zu erreichen.
- **Also muss auch hier wieder ein Kompromiss geschlossen werden.**

## Windstabilität

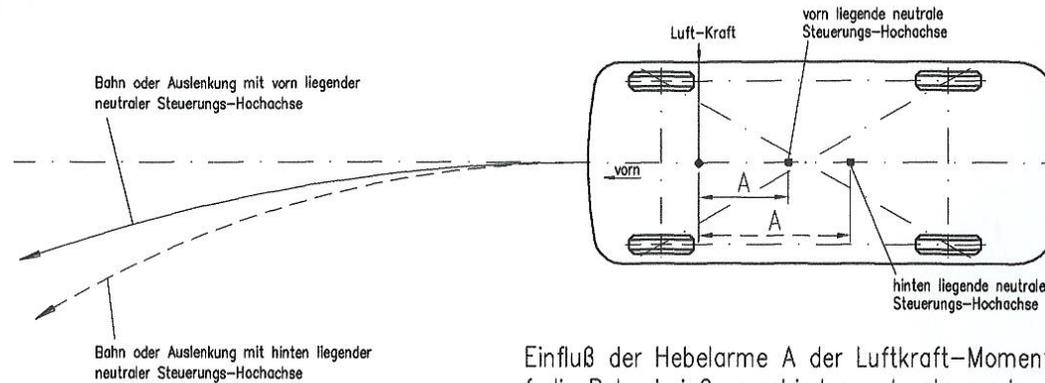
- Es wurde bereits gesagt, dass zur Erreichung **besten Richtungsstabilität in Kurven und bei Geradeausfahrt der Schwerpunkt vor der neutralen Steuerungshochachse liegen soll**. Nur diese Anordnung soll bei der Besprechung der noch verbleibenden Richtungseigenschaft des Fahrzeugs, nämlich der Windstabilität, in Erwägung gezogen werden.
- **Bild 10** zeigt ein **untersteuerndes Fahrzeug** mit zwei verschiedenen Anordnungen von Schwerpunkt und neutraler Steuerungsachse. Ebenfalls gezeigt ist die Windkraft, die auf der **aerodynamischen Druckmittelpunkt** des Fahrzeugs wirkt.
- **Die Lage des Druckmittelpunkts ist der Hauptfaktor bei der Betrachtung der Windstabilität eines Automobils.**
- **Bei den heutigen Personenwagen liegt der Druckmittelpunkt normalerweise in der Nähe der Vorderräder, vor dem Schwerpunkt und vor der neutralen Steuerungsachse. Dies ist unerwünscht in Bezug auf die Erfordernisse für Windstabilität.**
- Wie man in **Bild 10** sieht, wirkt die Windkraft an einem Momentenarm A um die neutrale Steuerungsachse und veranlasst das Fahrzeug zu gieren.

## Windstabilität

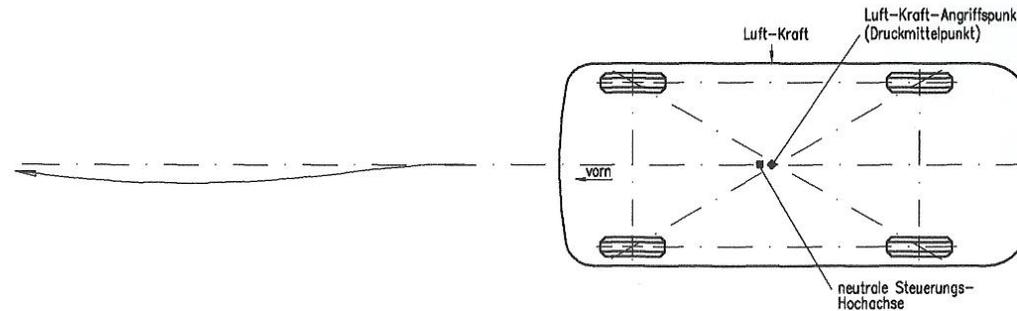


Hebelarme A der Luftkraft-Momente (Gier-Momente)  
bei 2 verschieden untersteuernden Wagen

## Windstabilität



Einfluß der Hebelarme A der Luftkraft-Momente auf die Bahn bei 2 verschieden untersteuernden Wagen



Bahn eines praktisch windstabilen Wagens (Druckmittelpunkt hinter der neutralen Steuerungshochachse)

## Windstabilität (Erklärung zu Bild 10)

Die Windkraft verursacht also nicht nur eine **Seitenverschiebung (drift)**, sondern veranlasst **außerdem das Fahrzeug von der Straße weg in die Richtung des Windes zu drehen**. Offensichtlich ist bei einer hinter dem Schwerpunkt liegenden neutralen Steuerungsachse der Momentenarm der Windkraft bedeutend größer als bei einer Lage vor dem Schwerpunkt, und die Auswirkung auf den Wagen ist entsprechend schwerwiegender.



In **Bild 11** sieht man, dass der längere Momentenarm des Windes bei weiter hinten liegendem Schwerpunkt und neutraler Achse eine stärkere Abweichung von der beabsichtigten Fahrtrichtung erzeugt, als der kürzere Momentenarm. Obwohl der Fahrer in beiden Fällen eine Korrektur vornehmen muss, um auf der Straße zu bleiben, ist **das Fahrzeug mit hinten liegendem Schwerpunkt das weniger windstabile**.

Die Windstabilität beider Fahrzeuge kann durch **Verlegung des Druckmittelpunktes nach hinten**, durch Verwendung von Flossen oder durch andere Maßnahmen verbessert werden. Wenn es möglich wäre, den Druckmittelpunkt sogar hinter die neutrale Steuerungsachse zu verlegen, hätten wir vom praktischen Standpunkt ein ausreichend automatisch windstabilisiertes Fahrzeug.

## Windstabilität

**Bild 12** zeigt diesen Zustand. **Die erste Reaktion des windstabile Fahrzeugs auf eine Seitenwindkraft ist seine Seitenverschiebung in Richtung dieser Kraft.** Allmählich aber erzeugt der kleine Unterschied in den Schräglaufwinkeln der Vorder- und Hinterreifen einen Gierungs- oder Steuerungswinkel, der diesem **Abwandern entgegenwirkt** und das Fahrzeug veranlasst, seine ursprüngliche Bahn zu kreuzen. Diese Abweichung von der ursprünglichen Fahrtrichtung ist so gering, dass die notwendigen Lenkkorrekturen durch den **Fahrer selbst bei starken seitlichen Windstößen nicht mehr Aufmerksamkeit erfordern** als seitliche Störungen, die durch kleine Unebenheiten auf der Straße hervorgerufen werden.



## Reaktionsvermögen

- Die vierte Anforderung an gutes Fahrverhalten, die erfüllt werden muss, ist, dass der Wagen auf die **Lenkbewegungen des Fahrers ohne spürbare Nacheilung oder Vorseilung und ohne Überschießen (overshoot) und Nachschwingen reagiert.**
- **Dagegen sollen Störungen von außen, hervorgerufen durch Straßenoberflächen und Windkräfte, praktisch keine Steuerbewegungen zur Folge haben.**

**Das Übergangs (transient) – Verhalten von Kraftfahrzeugen, mit dem Fahrer als subjektiven Teil der geschlossenen Kontroll-Schleife noch nicht völlig erforscht.**

Wir wollen jedoch nicht übersehen, dass schon durch die nur teilweise Kenntnis der dynamischen Vorgänge hervorragendes Fahrverhalten für eine Anzahl von Wagen entwickelt wurde.

Die seitliche Reaktion des Wagens zu einer Winkelbewegung des Lenkrades, (oder seine drei seitlichen Bewegungen: Gieren, Seitenneigung und Seitenverschiebung) hängt von einer Reihe von Faktoren ab.

**Unter Reaktion wird hier der gesamte zeitliche Verlauf der vom Fahrer verursachten Änderung der Fahrrichtung des Wagens verstanden.**

Dabei kann der Fahrer entweder eine gewisse Winkelbewegung des Lenkrades ausführen und dann dasselbe sich selbst überlassen (**Step input**) oder aber nach dem erfolgten Winkelausschlag das Lenkrad mit dem dazu erforderlichen Drehmoment festhalten (**fixed input**).

## Reaktionsvermögen

In beiden Fällen ist die **Reaktionszeit, also die Zeit von einem Beharrungszustand zum anderen**, hauptsächlich von der

- **Seitensteifigkeit (kg/Grad) des Wagens** abhängig,
- **seinen Eigensteuerungseigenschaften** (Abstand und Lage der neutralen Steuerungsachse zum Schwerpunkt) und
- **mit welchen Mitteln diese Eigenschaften erreicht sind**,
- **seiner Fahrgeschwindigkeit** und der davon abhängigen
- **Gierungsdämpfung**,
- **seiner Seitenneigungsdämpfung**, seiner
- **Trägheitsmomente um die Hochachse** und
- **die Seitenneigungs- oder Rollachse**,
- **seiner seitlichen Massenträgheit**,
- **der Größe der Winkelbewegung des Lenkrades** und schließlich von den
- **Eigenschaften des Fahrers als Glied dieser geschlossenen Kontrollschleife in Bezug auf seine Federkennlinie, Dämpfung, Wahrnehmungsvermögen und Eigenreaktion.**

- Ein Fahrzeug, das von einer geraden in eine gekrümmte Bahn mit konstantem Radius gelenkt wird,**
- **muss von Null** auf eine bestimmte **Gierungsgeschwindigkeit** und auf einen bestimmten **Gierungswinkel**, bezogen auf die Fahrbahn, beschleunigt werden.
  - **Die Gierungsgeschwindigkeit in (Grad/s) ist von der Fahrgeschwindigkeit und**
  - **dem Krümmungsradius,**
  - **der Gierungswinkel von der Seitenbeschleunigung und**
  - **der Seitensteifigkeit (kg/Grad) des Wagens abhängig.**

**Der Winkelausschlag des Lenkrades**, der erforderlich ist, um den Beharrungszustand der Geradeausfahrt zu stören und einen neuen Beharrungszustand auf der gekrümmten Bahn einzuleiten und schließlich zu erreichen, sowie **die erforderliche Zeit für den Wechsel von einem Zustand zum anderen, ist demnach von dem statischen und dynamischen Verhalten des Wagens und des Fahrers bestimmt.**

## Reaktionsvermögen

Die rechnerische Erfassung dieser Bewegungsvorgänge erfordert die Aufstellung von Bewegungsgleichungen des Wagens in seinen drei seitlichen Freiheitsgraden. Dazu müssen die statischen und dynamischen Eigenschaften des Wagens und des Fahrers zahlenmäßig angegeben werden können. Hier liegen die eingangs erwähnten Schwierigkeiten, die hauptsächlich darin bestehen, dass eine Anzahl der den mechanischen Teil bestimmenden Einzelfunktionen noch nicht vollständig bekannt ist und dass insbesondere die subjektiven Anteile weiterer Erforschung bedürfen.

**Die zur Verfügung stehenden und bereits aufgezählten Mittel, mit denen das Reaktionsvermögen des Wagens bestimmt wird, sind solche mit kurzer und langer Reaktionszeit.**

**Kurze Reaktionszeit wird z. B. durch folgende Steuerungseffekte erreicht:**

- **Ungleiche Belastung an Vorder- und Hinterachse,**
- **Ungleiche Reifengrößen oder Reifendrucke an**
- **Vorder- und Hinterräder**
- **Geneigte Rollachse in der Seitenansicht,**
- **Steuerung durch elastische Radaufhängung.**



## Reaktionsvermögen

**Der letzte Effekt ist durch eine Nachgiebigkeit der Achs- oder Radaufhängung erreicht.** Wegen der relativ kleinen Masse und der steilen Federkennlinie **ist dies ein System mit hoher Eigenfrequenz** und kurzer Reaktionszeit. Es ist dabei interessant festzustellen, dass dieser Steuerungseffekt die Seitensteifigkeit nicht wesentlich verringert, eine Tatsache die ebenfalls für die langsamer reagierende Roll-Steuerung gilt.

### Steuerungseffekte mit längerer Reaktionszeit sind:

- **Verschiedene Verteilung der Seiten-Neigungssteifheit vorn und hinten**
- **Reifensturz-Änderung, hervorgerufen durch Seitenneigung des Wagens**
- **Anheben eines Fahrzeugendes unter seitlicher Beschleunigung, verursacht durch unerwünschte Radaufhängungsgeometrie**
- **Rollsteuerung, verursacht durch Radaufhängungs-Geometrie**

**Der übrigbleibende Faktor, der die seitliche Reaktion beeinflusst, ist die Dämpfung.** Ein Lenkeinschlag soll weder eine Seitenneigungs- oder eine Gierungs- oder Vertikalschwingung zwischen den Beharrungszuständen hervorrufen. Die Sicherstellung ausreichender **Gierungsdämpfung** bei hoher Fahrgeschwindigkeit ist von besonderer Bedeutung, weil mit **zunehmender Fahrgeschwindigkeit die Gierungsdämpfung abnimmt, was bei übersteuernden Wagen sogar dazu führen kann, dass die an anderer Stelle erwähnte kritische Geschwindigkeit im Fahrbereich des Wagens liegt.**

## Rückmeldung an den Fahrer (Feedback)

Die letzte unserer Forderungen für die Erreichung zufriedenstellenden Fahrverhaltens ist **die laufende Information des Fahrers über die Reaktion des Wagens**. Ohne diese „Rückmeldung“ oder „Rückkopplung“ wäre die Schleife unseres Kontrollsystems nicht geschlossen.

**Der Fahrer sieht, hört und fühlt die seitliche Reaktion des Wagens auf seine Lenkradausschläge und die von ihm aufgebraachten Lenkrad-Drehmomente.**



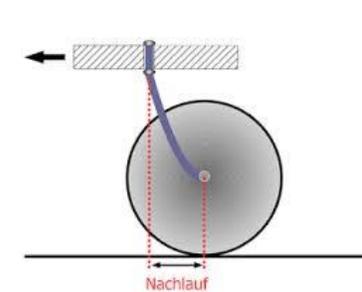
**Er bemerkt also Beschleunigungen, Geschwindigkeiten und Bewegungen**, wenn der Wagen giert, seitlich abwandert und sich seitlich neigt. Diese Beobachtungen werden **sein weiteres Verhalten beeinflussen**. Zusätzliche Informationen erhält er durch das **Reaktionsmoment am Lenkrad**, das von den Reifen durch das Lenkgetriebe und Gestänge übermittelt wird. Dieses Rückstellmoment ist durch verschiedene Einflüsse hervorgerufen. Für die Information des Fahrers ist jedoch nur **das Rückstellmoment der Reifen wichtig**. Welches durch die unsymmetrisch Anordnung der Reifenauflagefläche und deren horizontalen Kräfteverteilung zur Steuerachse der Vorderräder entsteht. Mit Hilfe der Abhängigkeit dieses Rückstellmoments vom Reifenschräglaufwinkel kann der Fahrer, wenn eine schnelle Abnahme des Momentes mit zunehmendem Winkel hervorgerufen wird, ein bevorstehenden Rutschen rechtzeitig bemerken bzw. sich an die Rutschgrenze herantasten.

## Rückmeldung an den Fahrer (Feedback)

- **Geringe mechanische und hydraulische Reibungsverluste** in den bewegten Lenkungsteilen einschließlich Servolenkungen ist natürlich für eine praktische Ausnutzung dieser Informationsquelle Voraussetzung.
- **Nachlauf-Veränderungen beim Durchfedern** der Vorderräder können Rückstellwirkungen störend beeinflussen. Andererseits aber kann ausreichend großer Nachlauf die Umkehrung des Reifen-Rückstellmoments bei großen Schräglaufwinkeln vermeiden.
- **Die Achsschenkelbolzen-Neigung und die Vorspur** geben dem Fahrer nur geringe Informationen.



#57102686



## Rückmeldung an den Fahrer (Feedback)

Da wir uns bei der **Entwicklung eines Automobils** mehr mit dem praktischen als mit dem Idealzustand beschäftigen, müssen wir bei dem Bemühen, **unser Konstruktionsziel zu erreichen**, die **bestmöglichen Kompromisse** zwischen den Forderungen für **gutes Fahrverhalten** und den **möglicherweise widersprechenden Forderungen** auf Grund anderer Überlegungen schließen.



## Zusammenfassung der Anforderungen an ein gutes Fahrverhalten des Wagens

1. Maximale Seitenbeschleunigung pro Grad Schräglaufwinkel
2. Richtungsstabilität durch Anordnung der neutralen Steuerungshochachse hinter dem Schwerpunkt
3. Windstabilität durch Anordnung des aerodynamischen Druckmittelpunktes so nahe wie möglich bei der neutralen Steuerungshochachse
4. Korrektes Reaktionsvermögen für sichere Kontrolle
5. Rückmeldung der Reaktion des Wagens an den Fahrer.

- Fahrwerksgrundlagen
- Fahrphysik – Reifen
- Querdynamik
- Federung- Dämpfung
- Radaufhängung
- Achskonzepte
- **Fahrwerk spüren**



## Das Problem:

Der Kunde ist unzufrieden  
mit seinem Fahrzeug



## Das Problem:

Fahrzeugtests bewerten und beanstanden die Fahrzeuge



### Wo lenken sie hin?

Wohl Vaterschaft nicht bedeutet, sich nicht mehr für Kurven zu interessieren, war uns die Ford S-Max immer der Liebling unter den geklungenen 5-2-sitzigen Groß-Vans. Nun kommt nach zehn Jahren und länger Anklöpfung die zweite Generation. Wir testeten sie mit Alfaud und 180 Diesel-PS. Was hat Ford aus dem S-Max gemacht?



**Die** Redaktion hat sich vor ein paar Wochen mit dem neuen Ford S-Max beschäftigt. Das ist ein großer Schritt für die Marke, denn es ist das erste Fahrzeug der Klasse, das sich nicht nur als Transporter, sondern auch als Familienvan eignet. Die S-Max ist ein 5-2-sitziges Fahrzeug, das sich sowohl für den Alltag als auch für den Urlaub eignet. Die neue Generation des S-Max ist ein Schritt in die richtige Richtung, denn sie ist nicht nur ein Transporter, sondern auch ein Familienvan. Die S-Max ist ein 5-2-sitziges Fahrzeug, das sich sowohl für den Alltag als auch für den Urlaub eignet. Die neue Generation des S-Max ist ein Schritt in die richtige Richtung, denn sie ist nicht nur ein Transporter, sondern auch ein Familienvan.

## Wichtigkeit der Fahrwerkskriterien in der Bewertung durch die Fachpresse

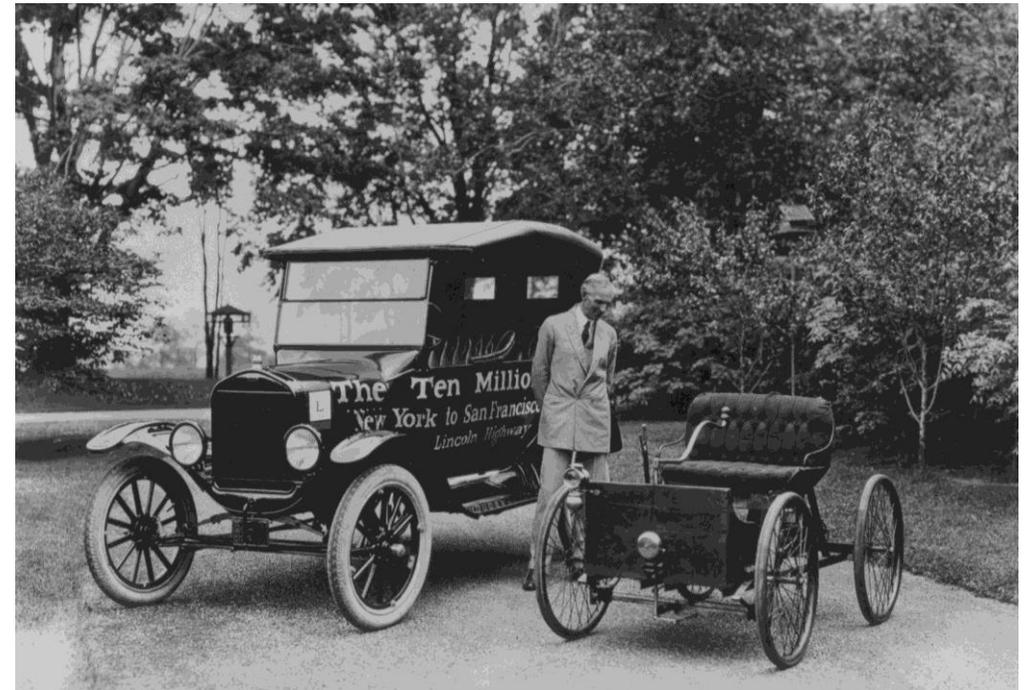
Karosserie	Fahreigenschaften
Innenmaße (15)	Fahrsicherheit leer (20)
Raumgefühl (15)	Fahrsicherheit beladen (15)
Kofferraum (15)	Fahrdynamik (10)
Zuladung (5)	Handling (20)
Bedienung/Funktionalität (15)	Lenkung (10)
Ausstattung (10)	Wendigkeit (10)
Zusatzausst. (10)	Traktion (10)
Qualitätsanmutung (20)	Geradeauslauf/Windempf. (5)
<b>Summe (100)</b>	<b>Summe (100)</b>
Fahrkomfort	Sicherheit
Federung leer (25)	Bremsverzög. Kalt leer (15)
Federung beladen (10)	Bremsverzög.80%Vmax (10)
Sitze vorn (20)	Bremsverzög. Kalt bel. (10)
Sitze hinten (15)	Bremsverzög. Warm bel. (10)
Klimatisierung (10)	Ansprechverhalten Bremse (5)
Innengeräusch-Messw. (5)	Sicherheitsausst.(40)
Geräuscheindruck (15)	Sicht/Licht (10)
<b>Summe (100)</b>	<b>Summe (100)</b>

Die Beurteilung der Fachpresse ist meistens subjektiv!

Eigenschaftsbewertung		500
Fahrdynamik Eigenschaften	190	(38%)
Beeinflussung durch Fahrdynamik	120	(24%)

„Wenn ich die Menschen gefragt hätte,  
was sie wollen, hätten sie gesagt  
schnellere Pferde.“

*Henry Ford*



## Ein Missverständnis - das Anlenkverhalten "



## Konflikt in der Fahrzeugbewertung

### Subjective Language

1. Subjective Evaluation of Ride and Handling
2. Systematic processing of evaluation criteria's within the rating system
3. Comparison to reference vehicles within the rating system



Checkliste Versuchsablauf Onroad-Tests

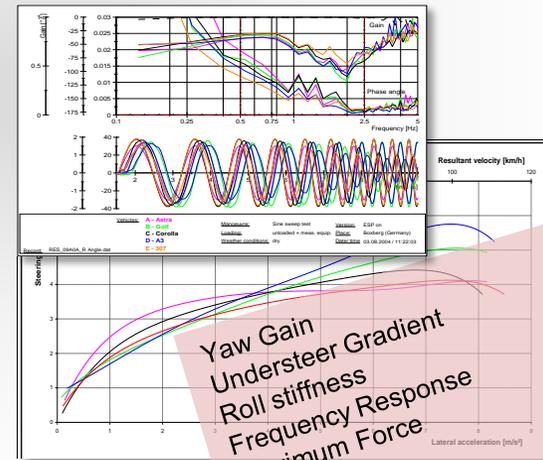
Projekt: MCL

Subjektive Bewertung

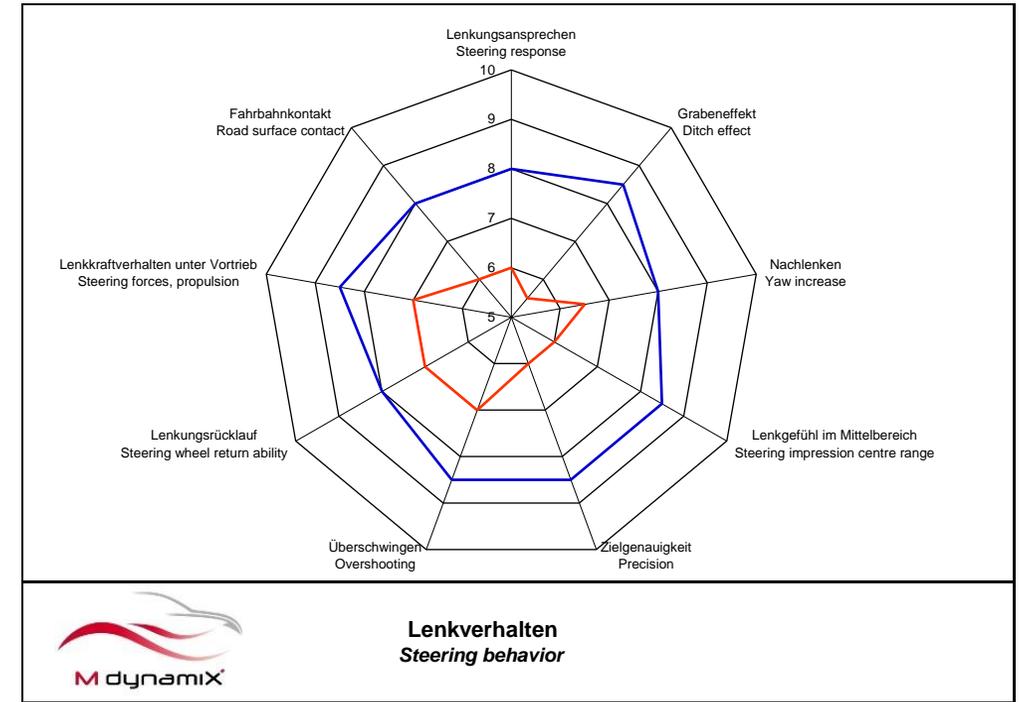
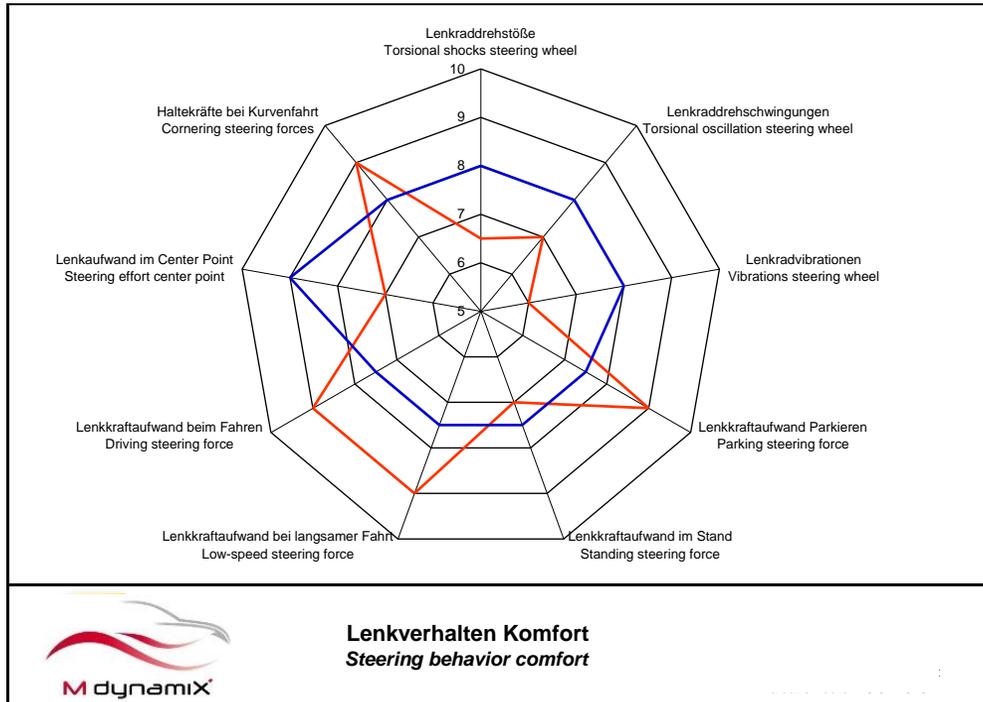
Kriterium	1	2	3	4
Center Point Feeling				
Force Feedback				
Road Surface Contact				
Roll Behaviour				
Spring / Damper Balance				
Steering Effort				
....				

### Objective Language

1. Generation of measurable data's
2. Generation of characteristic values



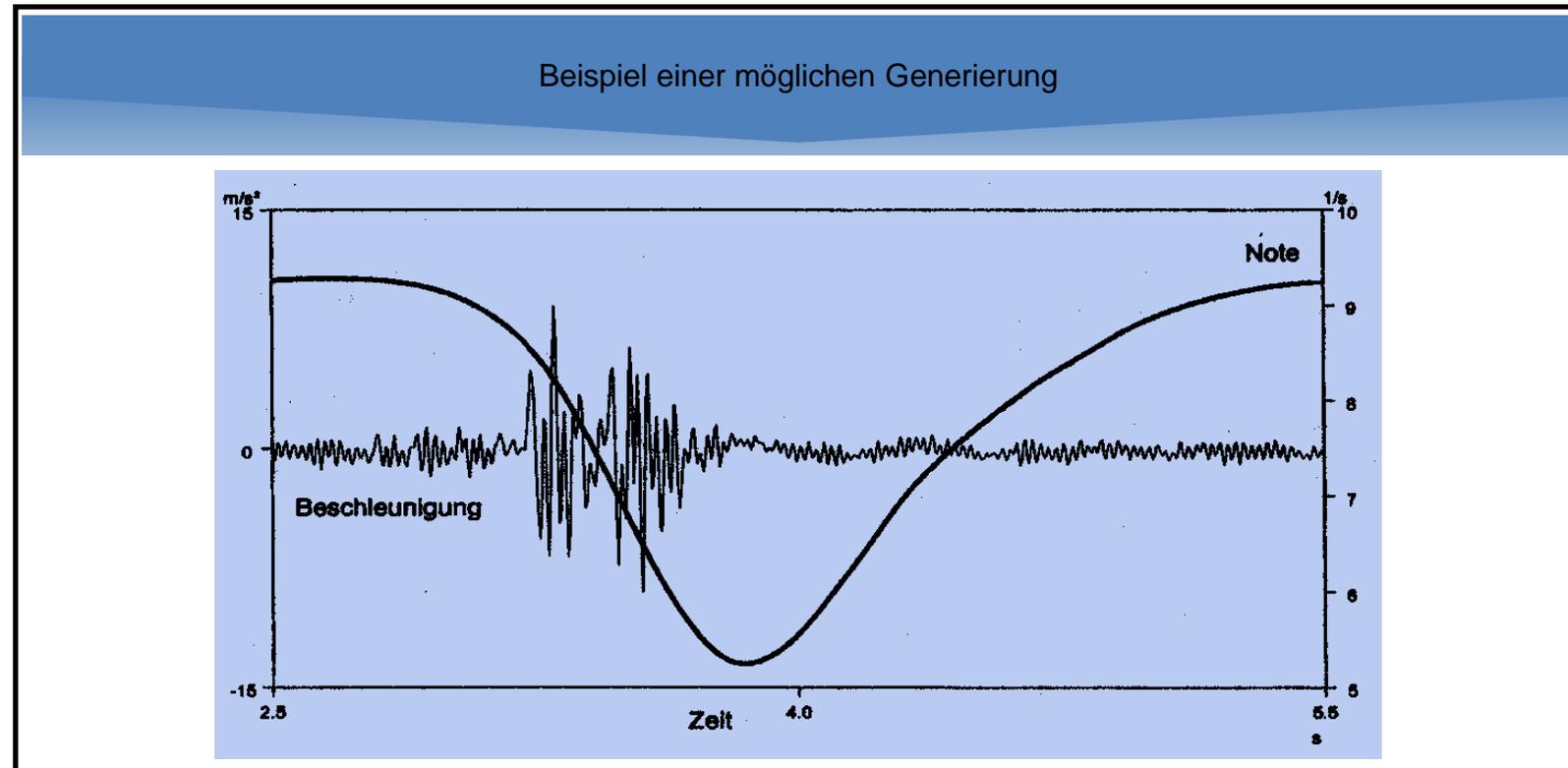
## Dynamik vs. Komfort



# Die Welt der Fahrdynamik

Subjektivurteile aus objektiven Daten generieren

Umsetzung von Messwerten in subjektive Noten



## Fahrzeuge - Anfahrverhalten



- Anfahrstiefziehen
- Anfahrpendeln
- Anfahrerausheben
- Traktion
- Radspringen
- Lenkreaktion beim Anfahren

## Fahrzeug - Kurvenverhalten



- Eigensterverhalten
- Lastwechselreaktionen
- Spurstabilität
- Korrigierbarkeit im Grenzbereich
- Wankverhalten
- Absoluter Wankwinkel
- Eigenlenken
  - Unebenheitslenken
  - Rolllenken
  - Federungslenken zweiseitig
- Bodenhaftung der Räder

## Fahrzeug - Lenkverhalten

- Anlenkverhalten
  - Lenkungsansprechen scharf/träge
  - Grabeneffekt flach/steil
  - Nachlenken VA/HA
- Lenkgefühl im Mittelbereich
- Zielgenauigkeit
- Überschwingen
- Lenkungsrücklauf
- Lenkkraftverhalten unter Vortrieb
- Fahrbahnkontakt



## Fahrzeug - Komfort



## Fahrzeug - Federungs-/ Dämpfungscomfort

- Federungs- und Dämpfungscomfort
- Nickfederverhalten
- Wankfederverhalten
- Abrollkomfort
- Schluckvermögen mechanisch



## Fahrzeug - Aufbaucharakteristik

- Vorderbauunruhe
- Stuckern
- Unterbauvibrationen
- Querschütteln
- Puffereinsatz
- Aushängen



## Fahrzeug - Lenkradreaktion

- Lenkraddrehstöße
- Lenkraddrehschwingungen
- Lenkradvibrationen vertikal
- Lenkkraftaufwand beim Parken
- Lenkkraftaufwand beim Fahren
- Haltekräfte bei Kurvenfahrt



## Fahrzeug - Ergonomie und Akustik

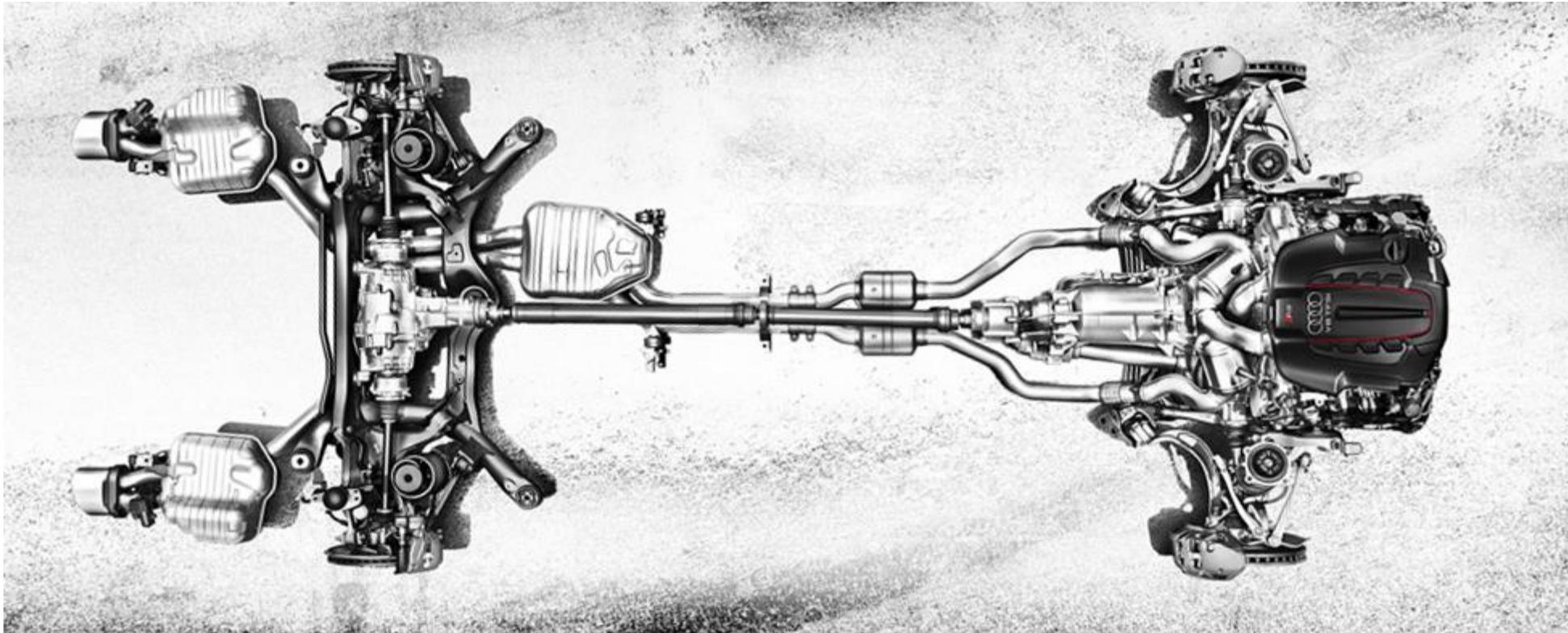


- Übersichtlichkeit und Funktionalität
- Sitzkomfort und Isolation
- Sitzseitenführung
- Abrollgeräusch
- Schluckvermögen akustisch
- Dröhnen

## Fahrzeug - Fahrzeugbeurteilung anders aber mit den gleichen Inhalten

		Geschlossener Regelkreis	Offener Lenk-rad fest	Regelkreis Lenk-rad frei	Lenk-winkelvorgabe
Geradeausverhalten	Geradeauslauf – Spurhaltung	●	●	●	–
	Lenkungsansprechen/Anlenken	●	–	–	–
	Anreißen – Lenkung loslassen	–	–	●	–
	Lastwechselreaktion	●	●	●	–
	Aquaplaning	●	●	●	–
	Geradeausbremsen	●	●	●	–
	Seitenwindempfindlichkeit	●	●	●	–
	Auftrieb bei hohen Geschwindigkeiten	–	●	–	–
Übergangs-/Übertragungsverhalten	Reifenschlitzen	●	●	●	–
	Lenkwinkelsprung	–	–	–	●
	Einfache Sinuseingabe	–	–	–	●
	Kontinuierliche Sinuseingabe	–	–	–	●
	Dreieckimpuls	–	–	–	●
	Stochastische Lenkwinkel-eingabe	●	–	–	●
	Einfahrt in einen Kreis	●	–	–	–
	Ausfahrt aus einem Kreis	●	–	–	–
	Rückstellverhalten	–	–	●	–
	Doppelter Fahrbahnwechsel	●	–	–	–
Kurvenverhalten	Stationäre Kreisfahrt	–	●	–	–
	Instationäre Kreisfahrt	●	●	–	–
	Lastwechselreaktion bei Kreisfahrt	●	●	–	–
	Reinfallen der Lenkung	–	–	●	–
	Bremsen in der Kurve	●	●	–	–
	Aquaplaning in der Kurve	●	●	–	–
Wechselkurvenverhalten	Wedeln, Slalom um Pylonen	●	–	–	–
	Handling-Kurse	●	–	–	–
	Pendeln – Anreißen und Beschleunigen	–	–	●	–
Gesamtverhalten	Kippsicherheit	●	–	–	●
	Reaktions- und Ausweich-tests	●	–	–	–

## Powertrain



## Powertrain - Motor an/aus



- Kaltstart
- Neustart bei warmem Motor
- Heißstart

**Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit**



## Quellen

- TEKNO Engineering
- FH München
- TU Dresden

**Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit**

