



# Vorlesung Fahrzeugmechanik (Kap. 6: Lenkung)

Hochschule Ulm, WS 2017/18

Theodor Großmann



# Vorlesungsinhalte Fahrzeugmechanik

---

## Kapitel:

1. Einführung Fahrzeugmechanik
2. Reifen
3. Federn, Dämpfer,...
4. Einmassenschwinger
5. Achsen
6. **Lenkung**
7. Regelsysteme
8. Längsdynamik
9. Luftwiderstand
10. Querdynamik
11. Vertikaldynamik&Strassen
12. Fahrzeugmodelle
13. Gesamtfahrzeug
14. menschliche Wahrnehmung /Sitze
15. Sleeping Policeman/Schlagloch
16. Fahrzeugentwicklung mit DPT



# Lenkung

## Arten der Lenkung

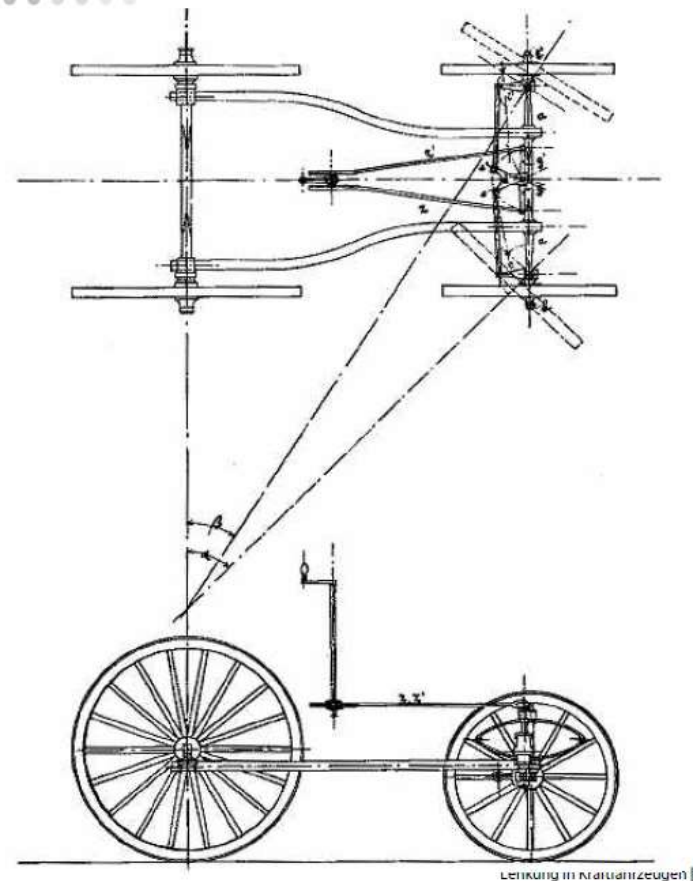
### Achsschenkellenkung nach Benz - 1893



Benz Viktoria, 1893



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





### Gesetzliche Anforderungen für Lenkvorrichtungen

#### Auszüge aus der StVZO, § 38

- „Die Lenkeinrichtung muss leichtes und sicheres Lenken des Fahrzeugs gewährleisten; sie ist, wenn nötig, mit einer Lenkhilfe zu versehen. Bei Versagen der Lenkhilfe muss die Lenkbarkeit des Fahrzeugs erhalten bleiben.“
- ... Jedes Teil, bei dessen Versagen die Gewalt über das Fahrzeug verloren werden könnte, muss aus Metall oder einem Werkstoff mit gleichwertigen Eigenschaften hergestellt sein und darf sich während des normalen Betriebs der Lenkanlage nicht nennenswert verformen.
- Höchstzulässige Betätigungskraft bei Fahrzeugen mit bauartbedingter Höchstgeschwindigkeit größer als 40 km/h  
(mit 10 km/h aus Geradeausfahrt in Spirale bis zu einem Radius von 12 m einfahren)

	max. Kraft	max. Zeit
Fzg. mit Muskelkraftlenkanlage	250 N	4 s
Fzg. mit Hilfskraftlenkanlage	600 N	6 s



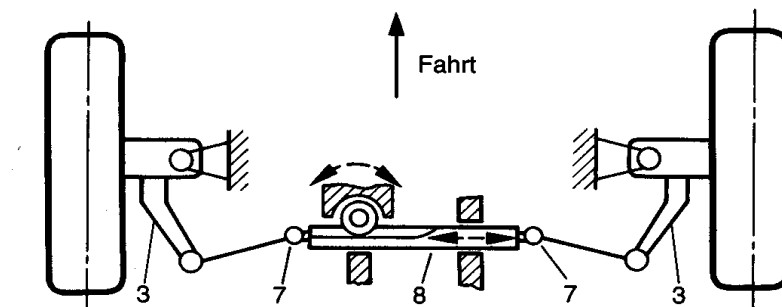


# Lenkung

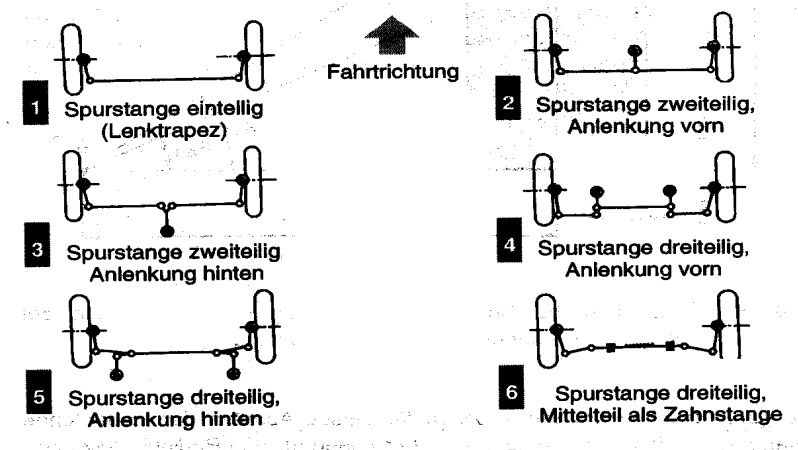
## Arten der Lenkung

Die Zuordnung der Radlenkwinkel zum Lenkradwinkel und der Radlenkwinkel untereinander wird durch nichtlineare Zusammenhänge beschrieben. Da diese Zuordnung von der momentanen Winkellage der Bauteile des Lenkgestänges zueinander abhängt, enthalten die Zusammenhänge damit Winkelfunktionen.

Diese Zusammenhänge werden durch entsprechende Anordnung und Abmessungen der Gestängebauteile, soweit die konstruktionstechnischen Randbedingungen (Bauraum, Lenkgetriebebedarf) zulassen, gezielt ausgelegt.



### Lenkgestängebauarten



Zahnstangenlenkung mit Lenkdreieck, angeordnet hinter der Vorderachse. Die Zapfen der inneren Spurstangengelenke 7 sind an den Ende der Zahnstange 8 befestigt und die äußeren an den Spurhebel 3





# Lenkung

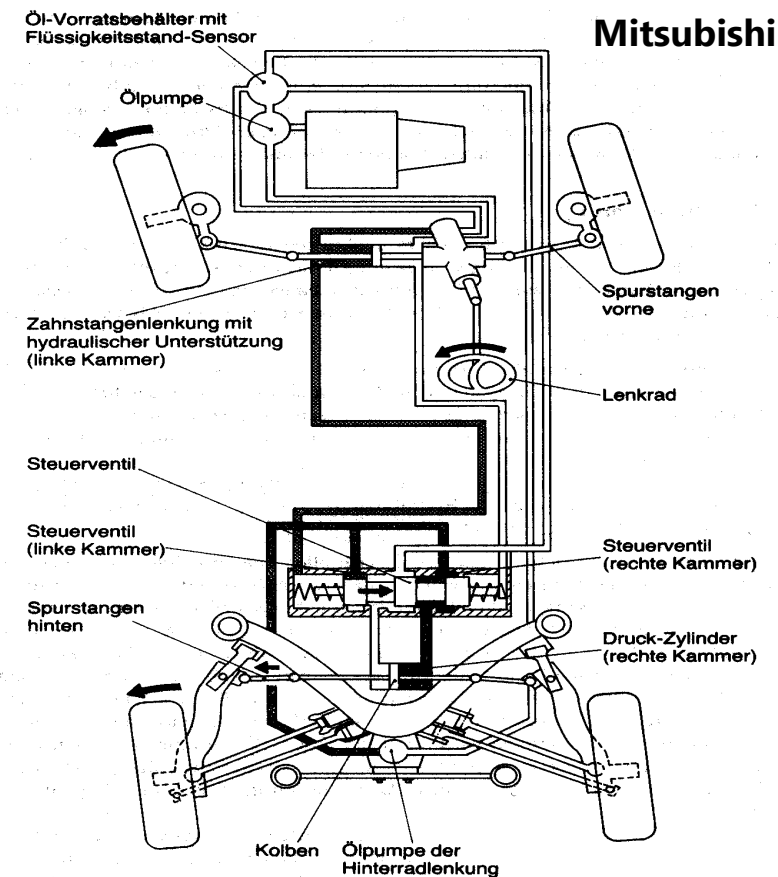
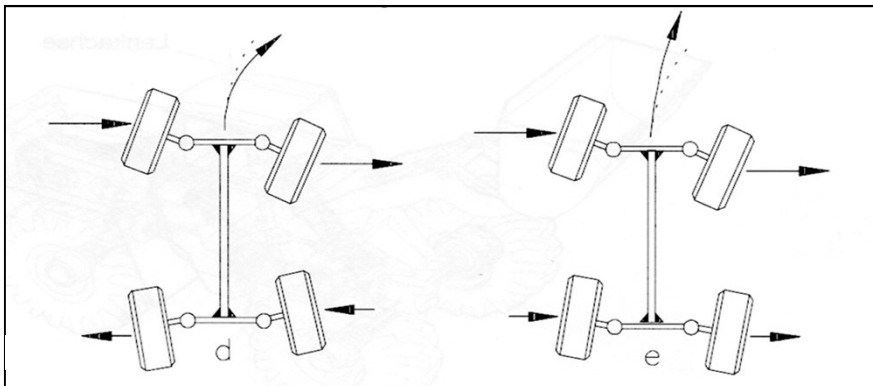
## Arten der Lenkung

### Allradlenkung

Kraftfahrzeuge bei denen zusätzlich zu den vorderen auch die hinteren Räder gelenkt werden, werden Allradlenkungen genannt. Früher wurde nur das gegenseitige Einschlagen der Vorderachsräder und Hinterachsräder zur Erhöhung der Wendigkeit langsamfahrender Fahrzeuge eingesetzt.

Allradlenkungen wurden jedoch auch bei Straßen-Pkw angeboten. Dabei werden die Hinterräder gleichsinnig mit kleinen Winkeln eingeschlagen. Dies reduziert den Schwimmwinkel und soll insbesondere die Fahrstabilität bei hohen Fahrgeschwindigkeiten z.B. beim Spurwechselvorgang verbessern.

Beim gleichsinnigen Radeinschlag an Vorder- und Hinterachse wird das Giermoment aus den Seitenkräften zur Kursänderung abgeschwächt und der Querkraftaufbau beim Einlenken beschleunigt.

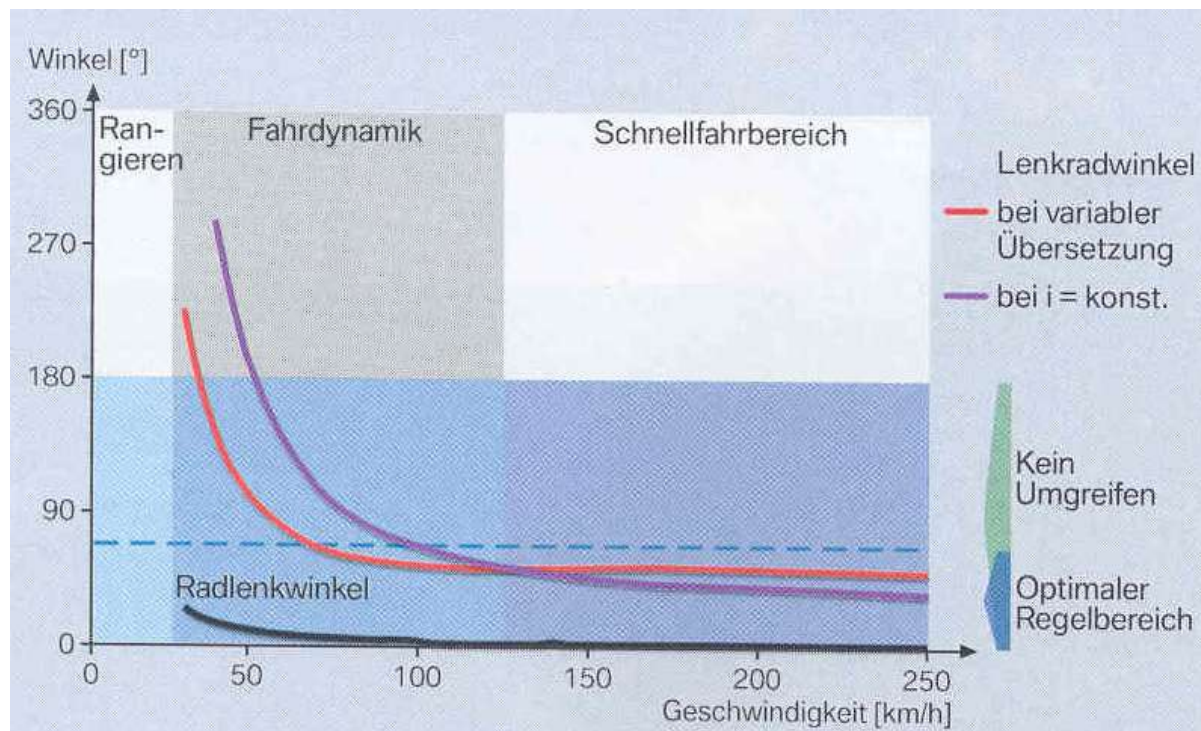


### Variation der Lenkübersetzung

Die Lenkübersetzung wird über der Fahrgeschwindigkeit variabel ausgelegt.

Ein direktes Ergebnis dieser Funktionalität ist, dass der Lenkaufwand über einen weiten Geschwindigkeitsbereich im Vergleich zu einer konstanten Lenkübersetzung weitgehend konstant bleibt.

#### Maximaler Lenkaufwand über der Fahrgeschwindigkeit bei stationärer Fahrt (Vgl. konstante und variable Lenkübersetzung)



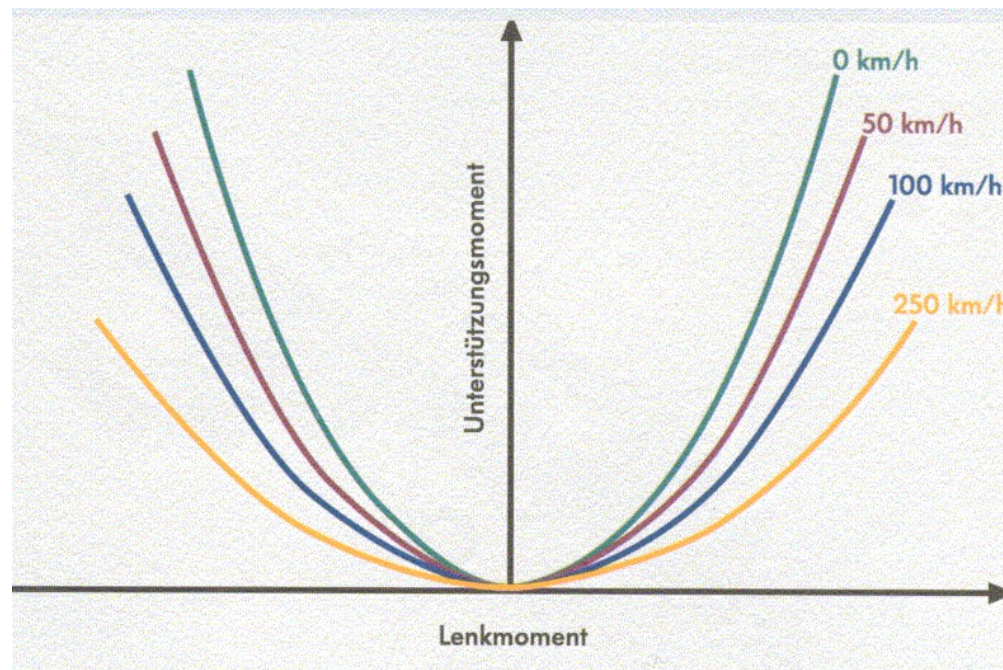


## Besonderheiten des Funktionskonzeptes

EPS kann eine geschwindigkeitsabhängige Lenkunterstützung ohne Verlust der natürlichen Lenkgefühl realisieren. d.h.:

- ⇒ eine hohe Unterstützung im Parkierbetrieb
- ⇒ weniger Unterstützung bei höherer Geschwindigkeit

### Kennlinien Unterstützungsmomente der VW Golf V Lenkung



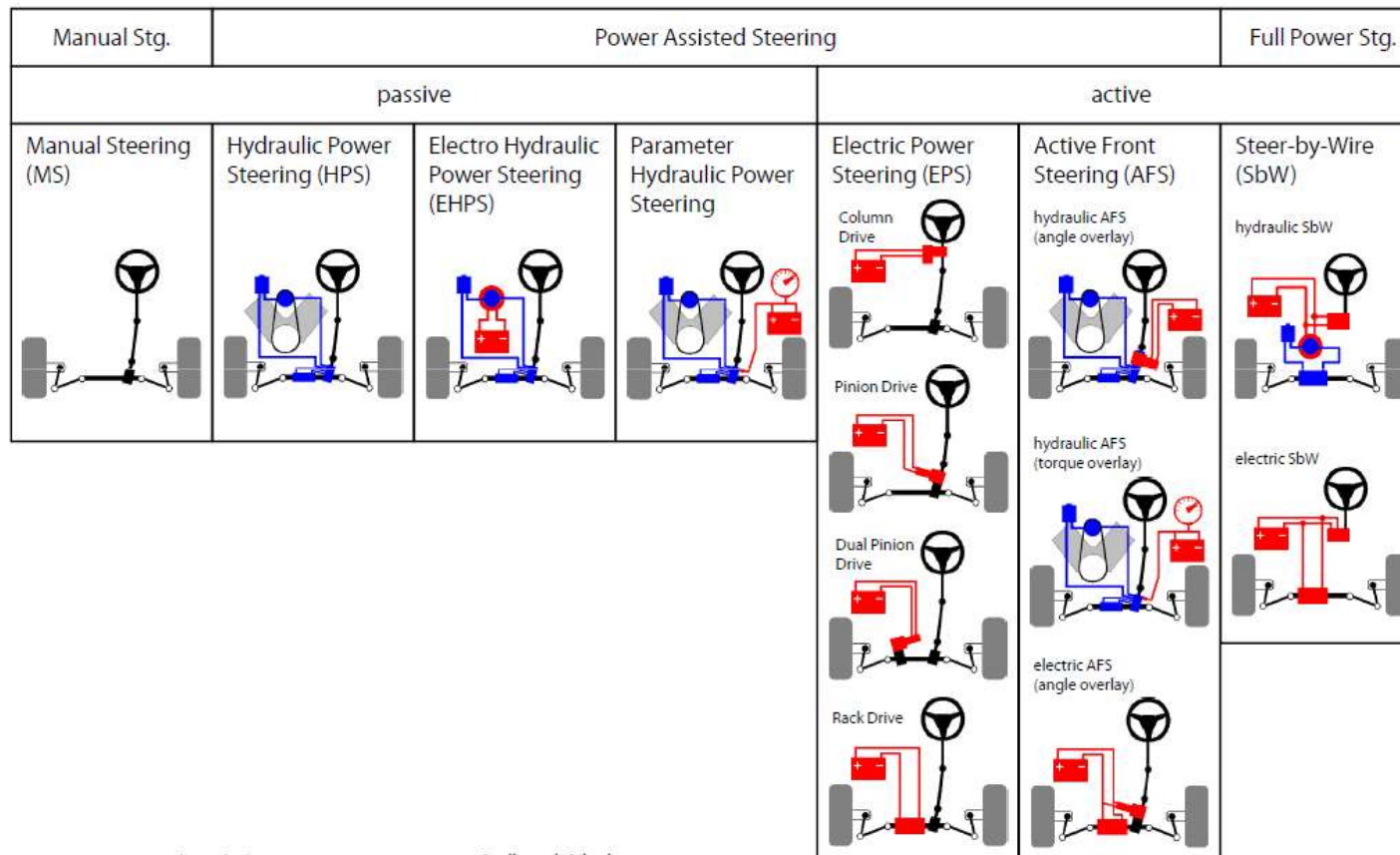




# Lenkung

## Arten der Lenkung

### Systematik der Lenksysteme



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

Quelle: nach Schachner,  
Tagung Hydraulik im Kraftfahrzeug  
hdt Essen, 12.-13.11.03

Lenkung in Kraftfahrzeugen | 34



# Lenkung

## Arten der Lenkung

### Subjektive Beurteilung der Fahreigenschaften



Subjektive Fahrzeugbeurteilung											
Fahrzeug: .....	Beladung: <input type="radio"/> Leer/Fahrer, <input type="radio"/> 2 Pers., <input type="radio"/> 3 Pers., <input type="radio"/> voll										
Kategorie: <input type="radio"/> Kompaktklasse, <input type="radio"/> unt. Mittelklasse, <input type="radio"/> obere Mittelklasse, <input type="radio"/> Oberklasse, <input type="radio"/> Sportwagen, <input type="radio"/> Roadster, <input type="radio"/> Geländewagen, <input type="radio"/> Sonstige .....	Stand: Modelljahr .....										
Bereifung: .....											
Strecke: .....											
Fahrbahn: <input type="radio"/> trocken, <input type="radio"/> feucht, <input type="radio"/> nass, <input type="radio"/> wechselnd	Fahrweise: <input type="radio"/> ruhig, <input type="radio"/> forciert, <input type="radio"/> sportlich										
ATZ-Bewertung <table border="1" style="display: inline-table;"><tr><td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td><td>5</td><td>6</td><td>7</td><td>8</td><td>9</td><td>10</td></tr></table>		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
A. Fahreigenschaften	Bemerkung										
Geradeauslauf – ebene Fahrbahn	<table border="1"><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr></table>										
– langwellige Fahrbahn	<table border="1"><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr></table>										
– kurzwellige Fahrbahn	<table border="1"><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr></table>										
Reaktion auf – Spurrillen	<table border="1"><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr></table>										
– Fahrbahnquerneigung	<table border="1"><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr></table>										
– Seitenwind	<table border="1"><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr></table>										
Anlenkverhalten – quasistationär	<table border="1"><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr></table>										
– dynamisch	<table border="1"><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr></table>										
Aufziehen	<table border="1"><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr></table>										
Zielgenauigkeit	<table border="1"><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr></table>										
Eigenlenkverhalten – kleine Radien	<table border="1"><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr></table>										
– große Radien	<table border="1"><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr></table>										
Traktion	<table border="1"><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr></table>										
Lastwechselverhalten	<table border="1"><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr></table>										
Bremsen i.d. Kurve	<table border="1"><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr></table>										

Quelle: Handbuch Kraftfahrzeugtechnik  
Braess, Seiffert (Hrsg.), Friedr. Vieweg &  
Sohn Verlagsgesellschaft, 2001



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

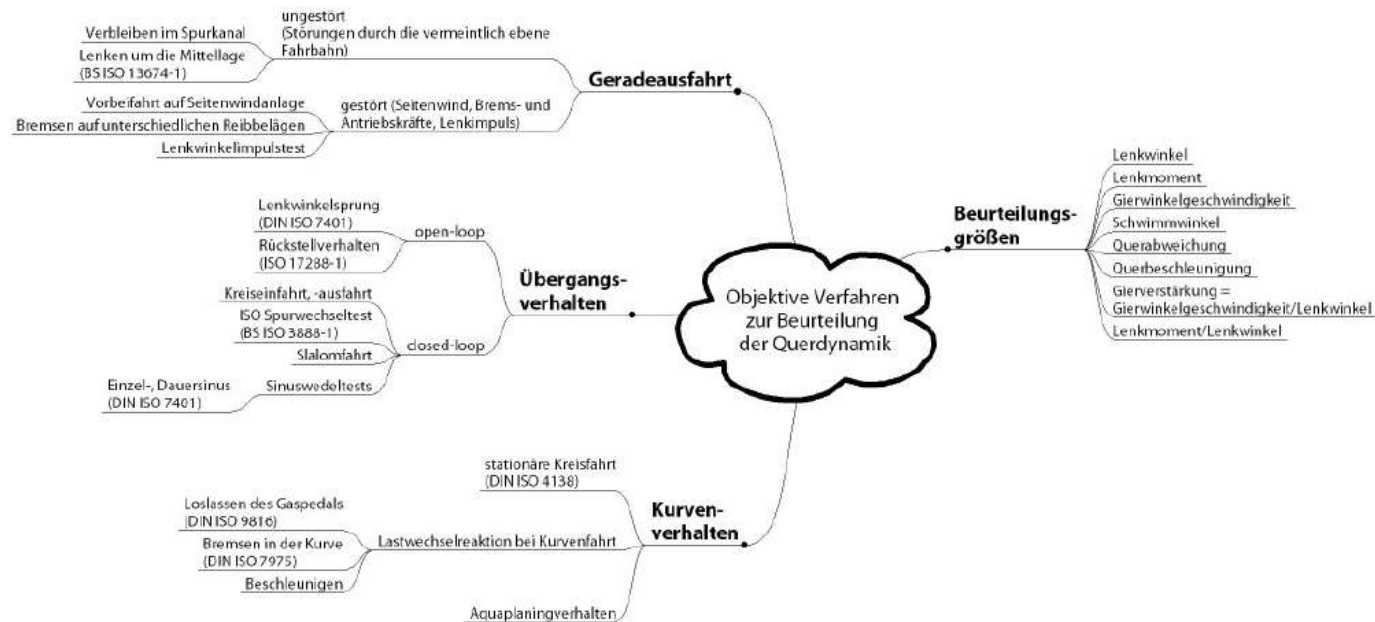
Lenkung in Kraftfahrzeugen | 25



# Lenkung

## Arten der Lenkung

### Objektive Verfahren zur Beurteilung der Querdynamik



### Definition des Lenkgefühles:

**Harmonisches Zusammenspiel von Lenkradwinkleingabe, rückstellendem Lenkradmoment und Fahrzeugreaktionsgrößen wie Querbewegung und Gierwinkelgeschwindigkeit**

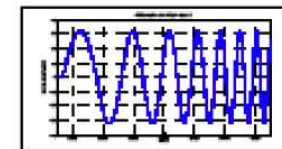
Man kann also entsprechend der Querdynamik folgende Bereiche für das Lenkgefühl unterscheiden:

- On-Center Bereich (Kleinsignalbereich analog Kapitel 2)
- Linearer Bereich (Querdynamik des Einspurmodells)
- Nichtlinearer Bereich (Grenzbereich)

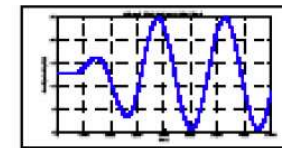
Lenkgefühl hat also im wesentlichen zwei Komponenten:

1. Fahrzeugreaktion auf eine Lenkradwinkleingabe (Lenkgefühl im erweiterten Sinn)
2. Lenksystemrückmeldung, also Handmoment (Lenkgefühl im engeren Sinn)

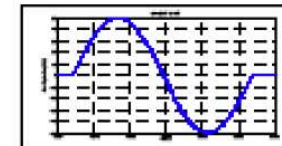
Das Lenkgefühl im engeren Sinne ist für den Fahrer von besonderer Bedeutung, da er mit dieser Information auf das Gesamtfahrzeugverhalten schließt. Damit erhält er eine Information noch bevor das Gesamtfahrzeug mit Giergeschwindigkeit, Schwimmwinkel oder Querbewegung reagiert hat.



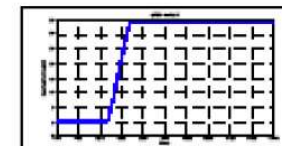
Freq. Response  
ISO 8726



Weave Test  
ISO 13674



Single Sine  
ISO 7401



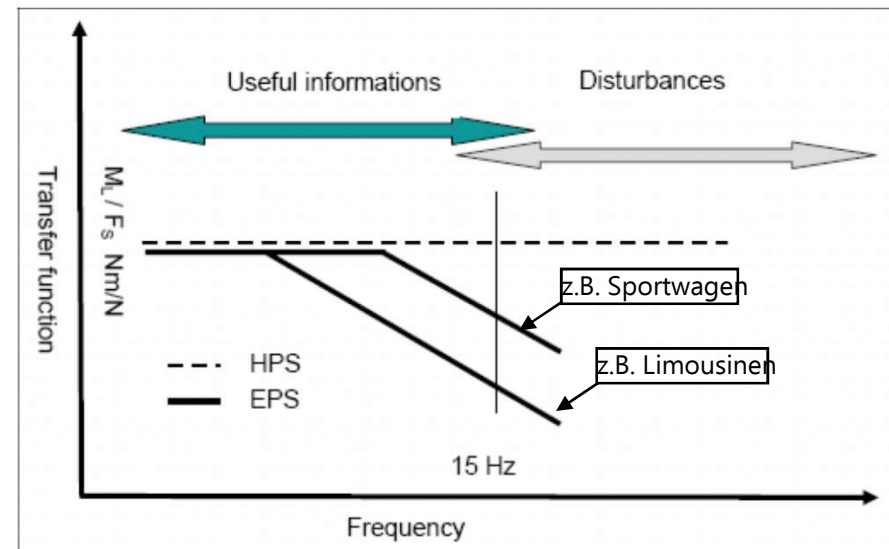
Step Input  
ISO 7401

Objektive Fahrzeugtests (z.B. zum Bewerten der Linearität der Lenkung beim Weave Test und bei der Gierverstärkung)



Die Anforderungen an das Lenkverhalten können wie folgt zusammengefasst werden:

- *Lenkpräzision:* ausgeprägtes Mittengefühl (On-Center Bereich), spontanes Ansprechen auf Lenkeingaben, synchrones Verhalten von Lenkwinkleingabe und Fahrzeugreaktion, linearer Lenkmomentenanstieg über der Querbeschleunigung, selbständiger Lenkungsrücklauf
- *Lenkcomfort:* angepasstes Lenkradmoment und geringer Lenkwinkelbedarf beim Parkieren, Abbiegevorgängen und im Fahrzeughandlin
- *Lenkungsrückmeldung:* Fahrzustands- und Fahrbahninformationen, z.B. Grenzbereich oder Strassenbeschaffenheit



- *Lenkdynamik:* kein Verhärten bei schnellen Ausweichmanövern und bei allen Lenkfrequenzen plausibles Handmoment

Quelle: Harrer: Objektivierung des Lenkverhaltens, 17. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik 2008, Seite 739-752



### **Sensibilität:**

Zusammenhang der Anforderungen nach eindeutiger und direkter Umsetzung der Lenkraddrehung in eine Lenkbewegung und die Rückmeldung an den Rädern wirkenden Kräfte.

### **Stoßdämpfung:**

Hochfrequente Störungen im Lenksystem gedämpft oder sogar kompensiert werden sollen. Das bedeutet; eine befriedigenden Lenkruhe für Fahrkomfort und Fahrsicherheit.

### **Automatische Rückstellung:**

Die Lenkung sollte ohne einen Eingriff des Fahrers in der Geradeausstellung verharren und nach einer Auswirkung selbständig wieder in die Nulllage zurückkehren.

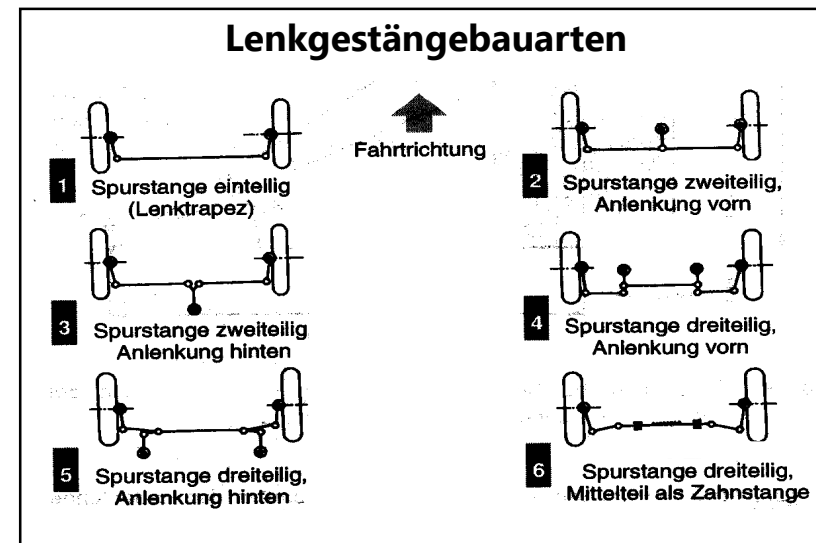
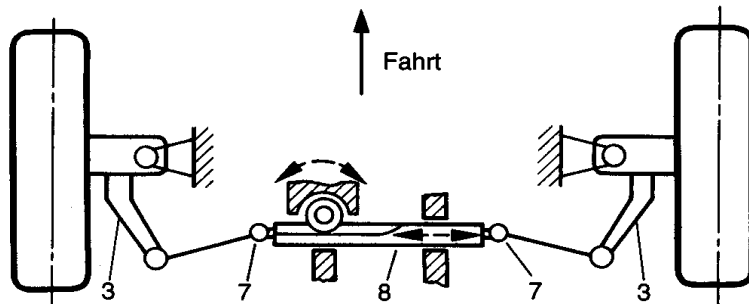
### **Passive Sicherheit:**

Bei einem Unfall muss gewährleistet sein, dass Lenkungsbauteile nicht in den Fahrgastraum eindringen und das Lenkrad einen Aufprall des Fahrers auffangen kann.



Die Zuordnung der Radlenkwinkel zum Lenkradwinkel und der Radlenkwinkel untereinander wird durch nichtlineare Zusammenhänge beschrieben. Da diese Zuordnung von der momentanen Winkellage der Bauteile des Lenkgestänges zueinander abhängt, enthalten die Zusammenhänge damit Winkelfunktionen.

Diese Zusammenhänge werden durch entsprechende Anordnung und Abmessungen der Gestängebauteile, soweit die konstruktionstechnischen Randbedingungen (Bauraum, Lenkgetriebebedarf) zulassen, gezielt ausgelegt.



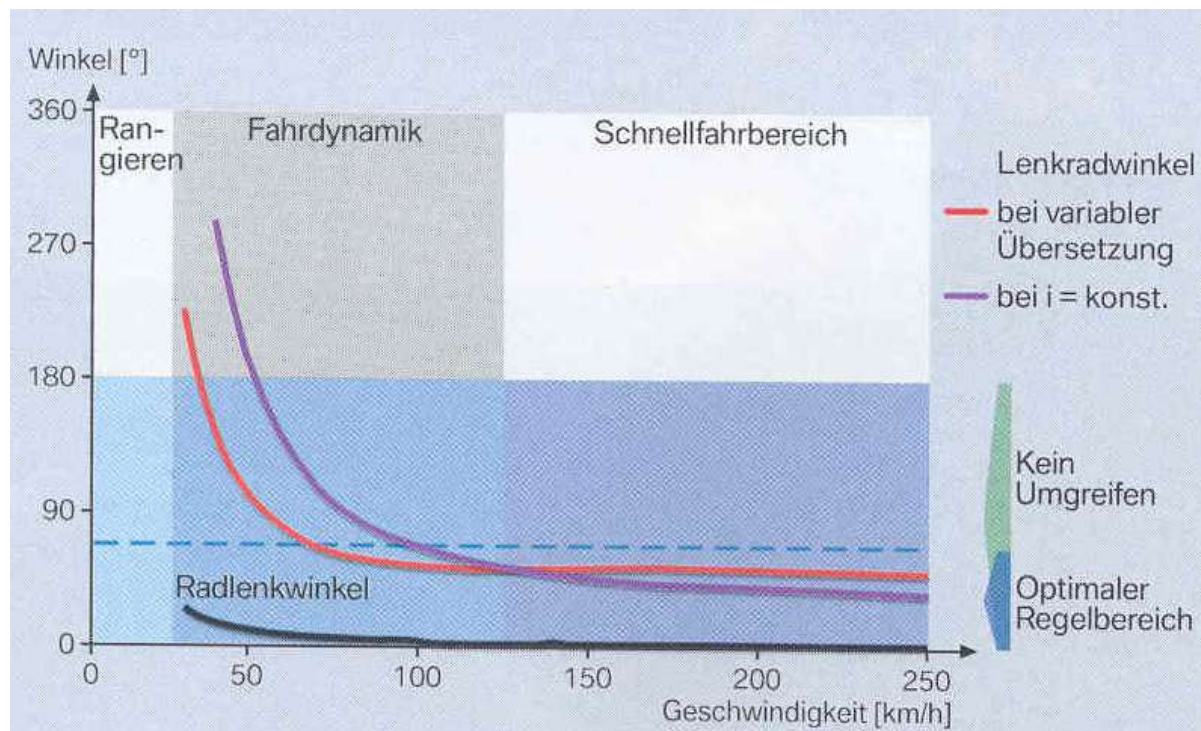
Zahnstangenlenkung mit Lenkdreieck, angeordnet hinter der Vorderachse. Die Zapfen der inneren Spurstangengelenke 7 sind an den Ende der Zahnstange 8 befestigt und die äußeren an den Spurhebel 3

### Variation der Lenkübersetzung

Die Lenkübersetzung wird über der Fahrgeschwindigkeit variabel ausgelegt.

Ein direktes Ergebnis dieser Funktionalität ist, dass der Lenkaufwand über einen weiten Geschwindigkeitsbereich im Vergleich zu einer konstanten Lenkübersetzung weitgehend konstant bleibt.

#### Maximaler Lenkaufwand über der Fahrgeschwindigkeit bei stationärer Fahrt (Vgl. konstante und variable Lenkübersetzung)



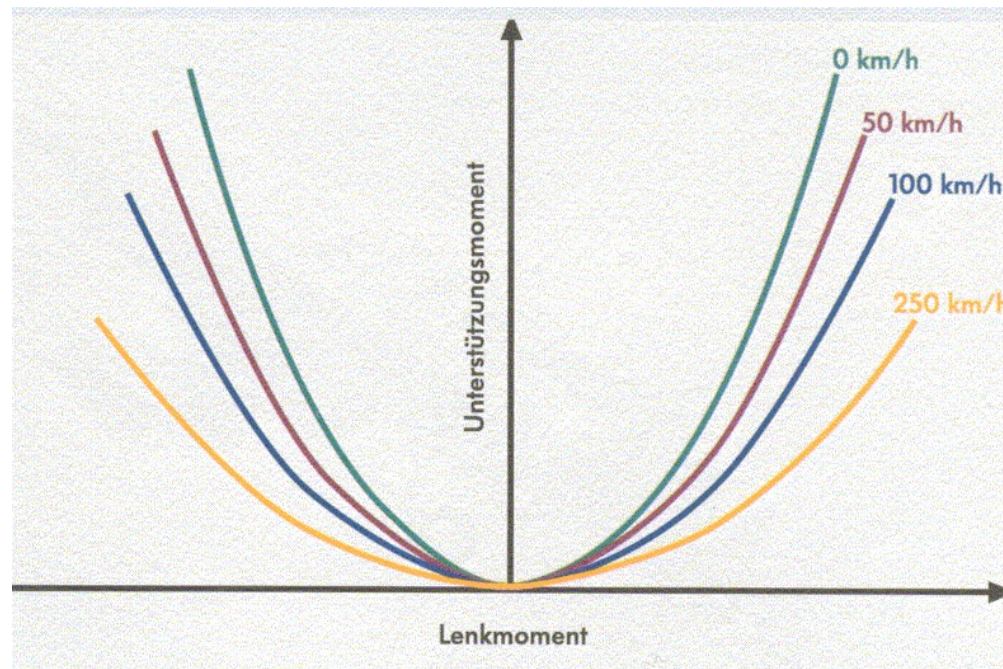


### Besonderheiten des Funktionskonzeptes

EPS kann eine geschwindigkeitsabhängige Lenkunterstützung ohne Verlust der natürlichen Lenkgefühl realisieren. D.h.:

- ⇒ eine hohe Unterstützung im Parkierbetrieb
- ⇒ weniger Unterstützung bei höherer Geschwindigkeit

### Kennlinien Unterstützungsmomente der VW Golf V Lenkung

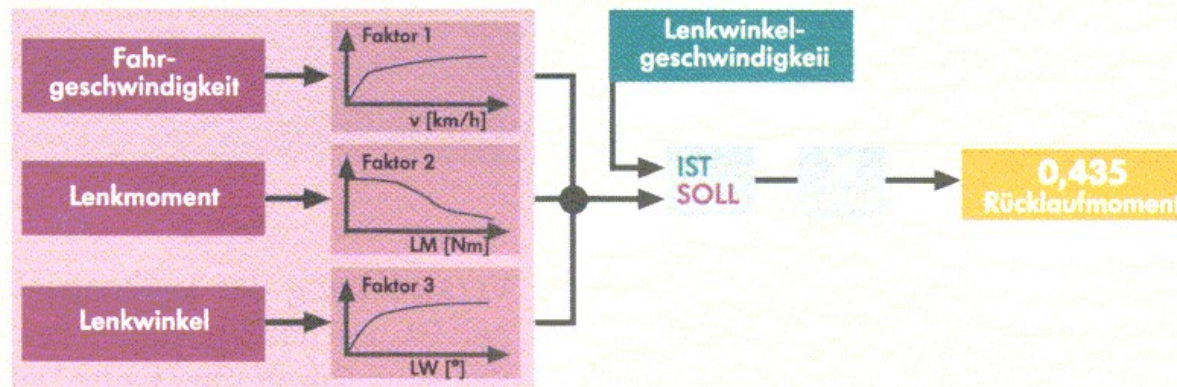


### Besonderheiten des Funktionskonzept

Weitere wichtige Funktionen sind der aktive Rücklauf und die sich daraus ergebende präzise Mittenrückstellung der Lenkung.

In Abhängigkeit vom aktuellen Lenkwinkel, der Lenkgeschwindigkeit wird die Sollrücklaufgeschwindigkeit des Lenkrads errechnet. Deren Vergleich mit der wirklichen Lenkwinkelgeschwindigkeit ist Basis für die Berechnung des erforderlichen Servomotormoments.

#### Aktiver Rücklauf der VW Golf V Lenkung

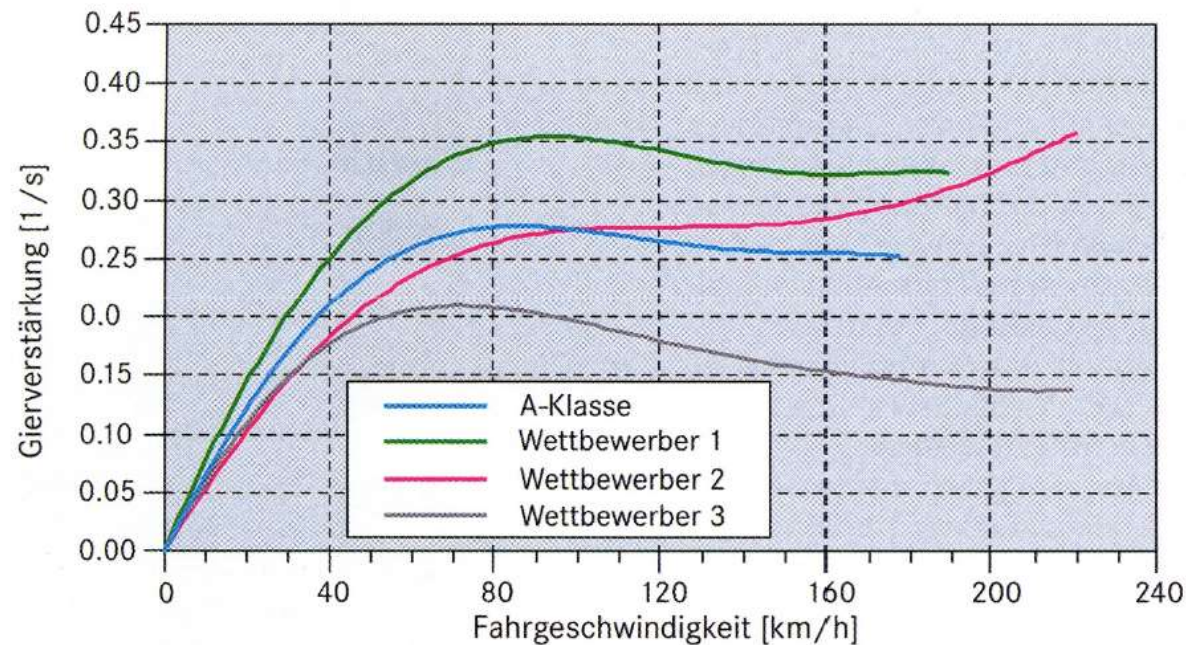




# Lenkung

## Arten der Lenkung

### Verlauf der Gierverstärkung (Gierrate/Lenkswinkel) über der Fahrgeschwindigkeit



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

Quelle: Die neue Mercedes-Benz A-Klasse  
Sonderausgabe von ATZ und MTZ, Oktober 2007

Lenkung in Kraftfahrzeugen | 27

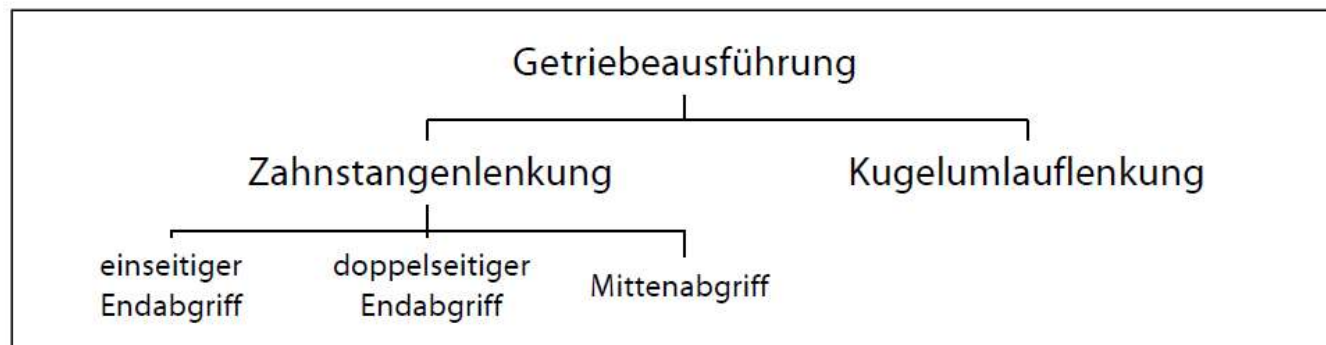
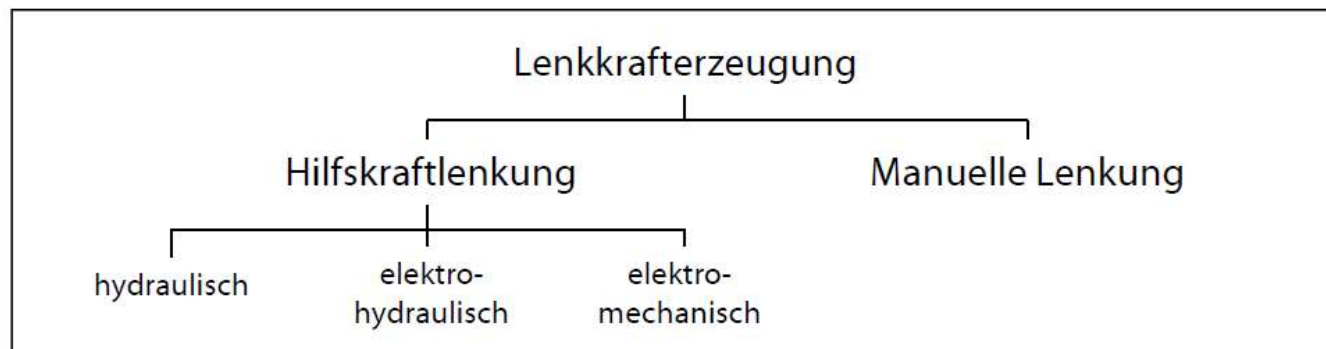




# Lenkung

## Arten der Lenkung

### Prinzipielle Bauarten von PKW-Lenkungen





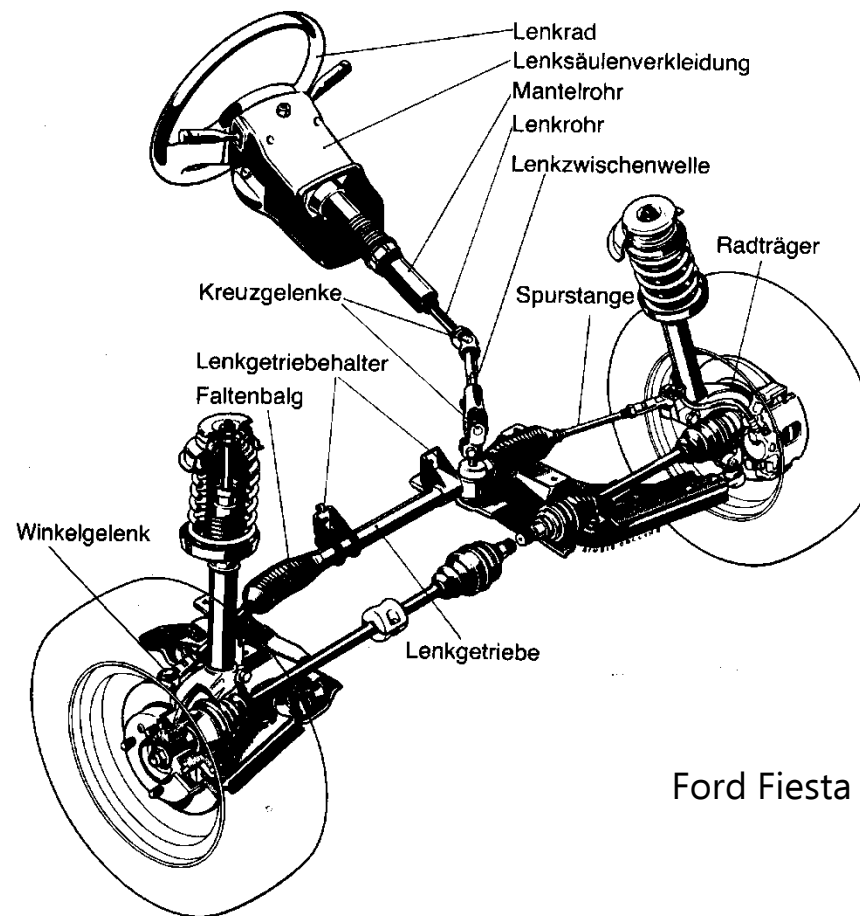


# Lenkung

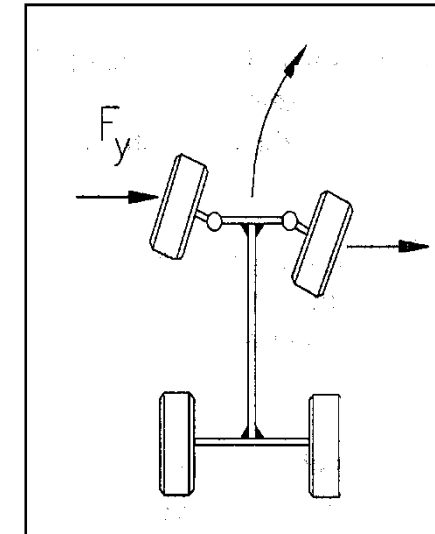
## Arten der Lenkung

### Vorderradlenkung

Die bei weitem gebräuchlichste Art der Lenkung ist die Vorderradlenkung.



Ford Fiesta

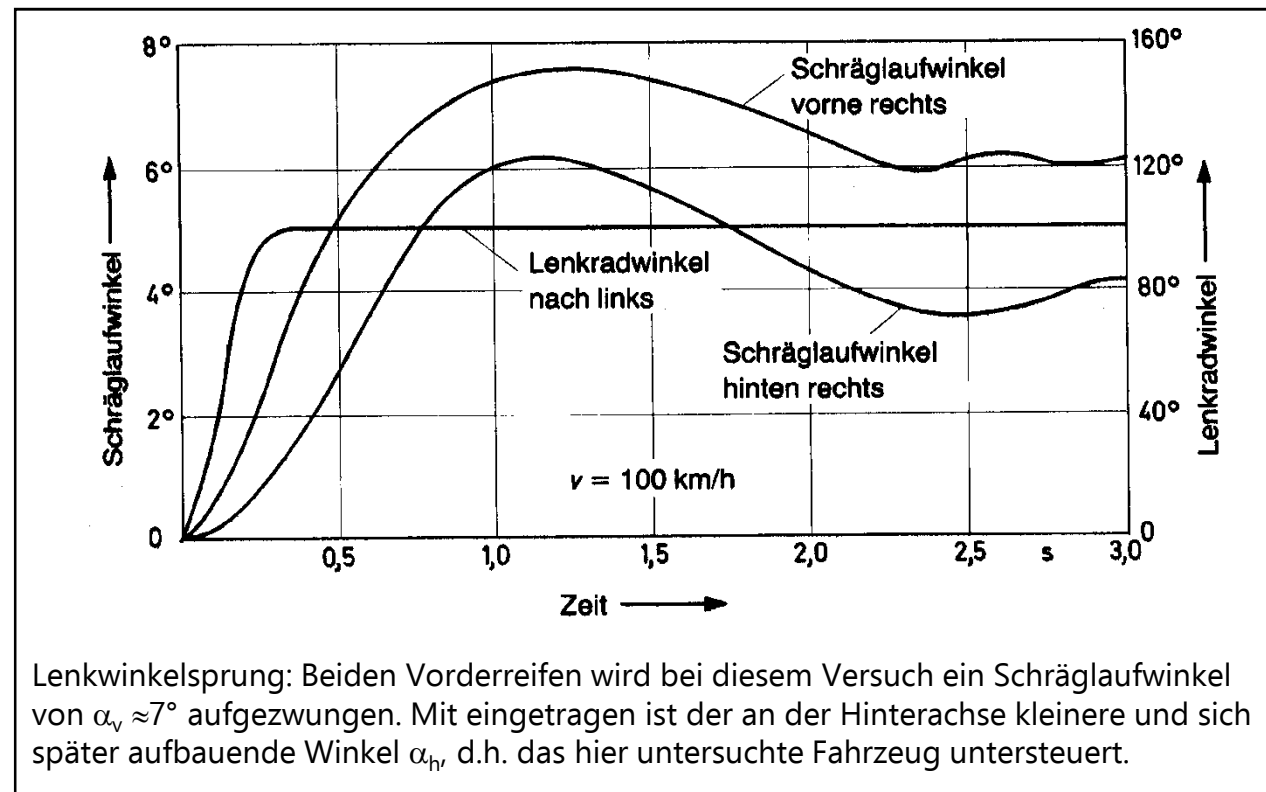




# Lenkung

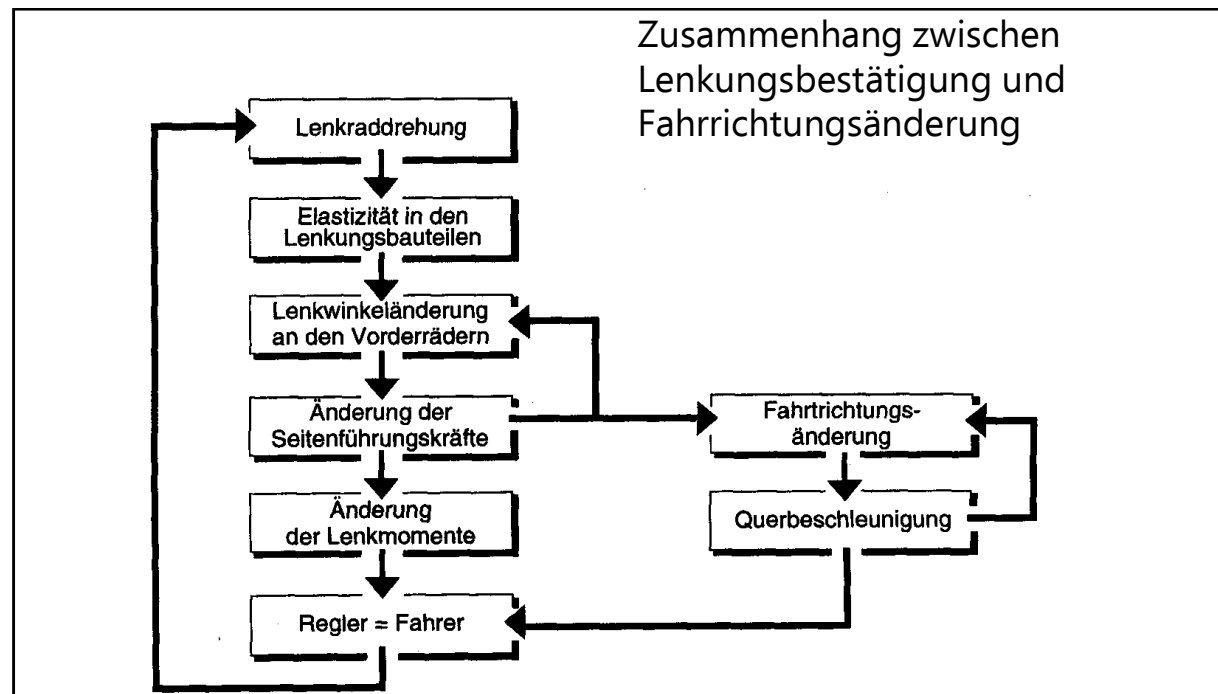
Im Regelkreis Fahrer-Fahrzeug-Umgebung bildet der Lenkradwinkel eine Stellgröße, die vom Fahrer so vorzugeben ist, dass eine Abweichung vom Sollkurs gering bleibt.

Es besteht aber zwischen der vom Fahrer vorgegebene Lenkraddrehung und der zu einer Kurskorrektur notwendigen Fahrtrichtungsänderung kein eindeutiger funktionaler Zusammenhang, weil die Kette Lenkraddrehung, Winkeländerung an den Vorderrädern, Aufbau der Seitenkräfte und Änderung der Fahrtrichtung wegen der elastischen Nachgiebigkeit in den Bauteilen des Fahrwerks nicht linear ist.



Um ein Fahrzeug in einer Sollbahn zu führen, muss der Fahrer den Zusammenhang zwischen Lenkraddrehung und Fahrtrichtungsänderung ständig neu erarbeiten. Der Fahrer (im Regelkreis Fahrer-Fahrzeug-Umgebung) regelt darin vor allem nach den folgenden Informationsgrößen, die auf ihn übertragen werden:

- ⇒ Abweichung vom Sollkurs (optische Informationen)
- ⇒ Lenkradmoment (haptische Informationen)
- ⇒ Querbeschleunigung & Wankwinkel (vestibuläre Informationen)





### Anforderungen an die Lenkung

#### A) Fahrerbezogene Anforderungen:

- Handkraft (Lenkmoment)
- Sensibilität
- Stoßdämpfung
- automatische Rückstellung
- Passive Sicherheit

#### B) Fahrzeugbezogene Anforderungen:

- Lenkkinematik
- Breitenbedarf des Fahrzeugs (Wendekreis)
- Raumbedarf der Lenkung (Package)
- Bauaufwand (Wirtschaftlichkeit)





# Lenkung

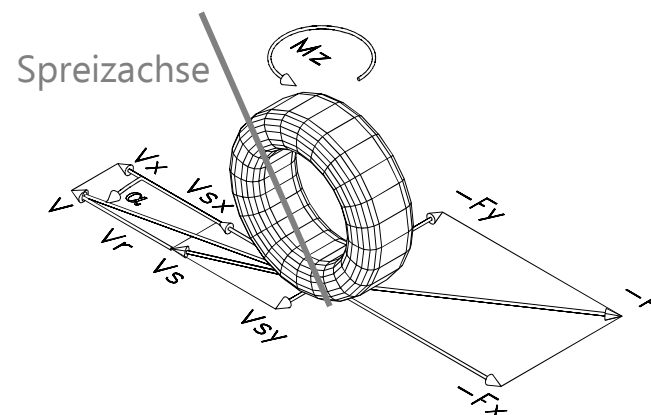
## Fahrerbezogene Anforderungen

### Lenkmoment (Handkraft):

Die am Lenkrad auftretenden Lenkmomente entstehen primär an den beiden Vorderrädern. Der Momentenfluss sieht wie folgt aus:

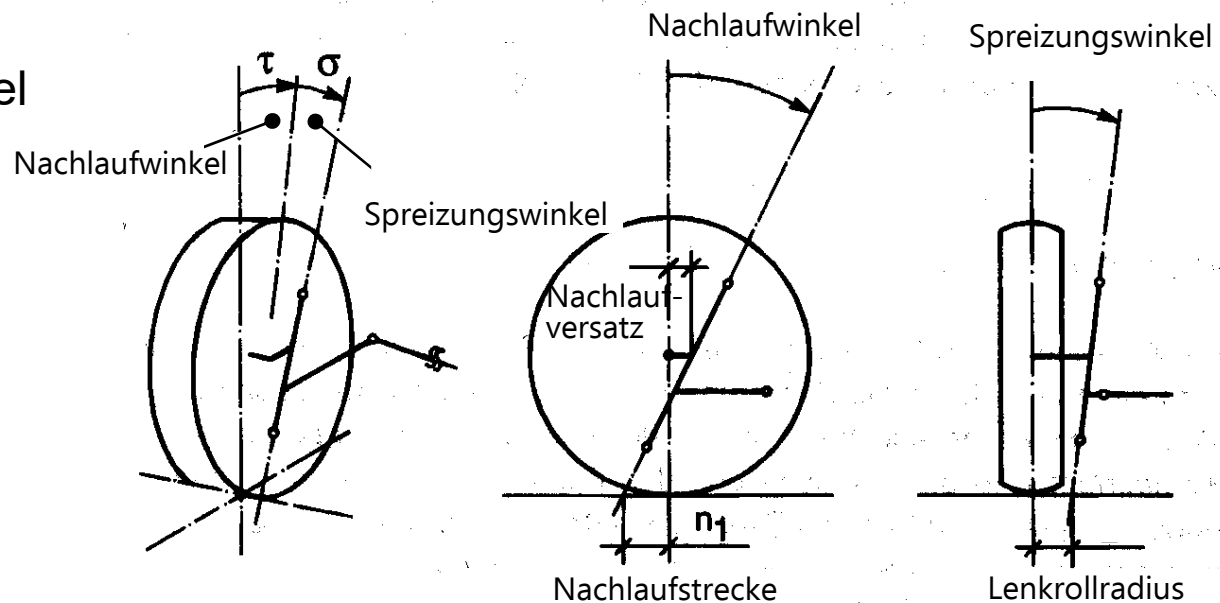
- a) Kräfte (Seiten-, Antriebs-, Brems- und Gewichtsrückstellkraft) und Momente (Reifenrückstellmoment) erzeugen ein Moment um die Spreizachse
- b) Dieses Spreizachsenmoment erzeugt eine Kraft in der Spurstange.
- c) Über das Lenkgetriebe wirkt die Spurstangenkraft auf das Lenkrad. Bei Lenkungen mit Servounterstützung wird das Lenkmoment entsprechend reduziert.

Weitere meistens unerwünschte Lenkmomente entstehen durch Reibungen an den unterschiedlichen Stellen der Lenkung.



Die Lage der Spreizachse wird durch folgende kinematischen Größen beschrieben:

- ⇒ Nachlaufstrecke
- ⇒ Nachlaufwinkel
- ⇒ Spreizungswinkel
- ⇒ Lenkrollradius
- ⇒ Nachlaufversatz



Als weitere Kennwerte der Vorderradeinstellung werden zur Charakterisierung der Radstellung des Fahrzeugs der Vorspurwinkel und der Sturzwinkel angegeben.



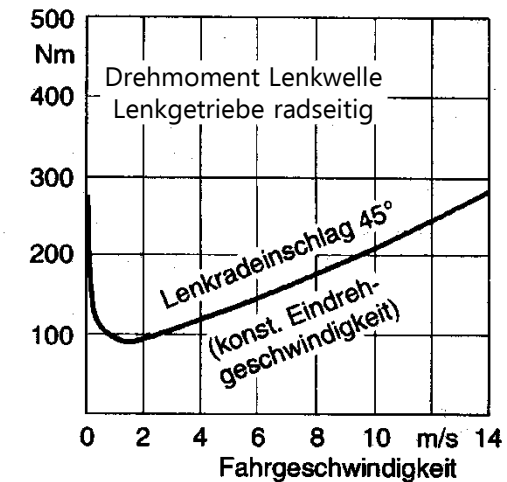
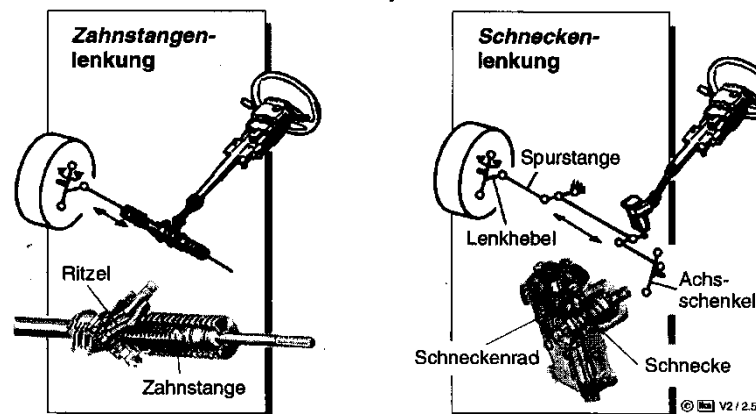
# Lenkung

## Fahrerbezogene Anforderungen: Lenkmoment

### Lenkmoment (Handkraft)

Das zur Drehung der gelenkten Räder erforderliche Lenkmoment hängt stark von der Fahrgeschwindigkeit ab.

Durch eine Übersetzung (Lenkgetriebe) zwischen der Lenkraddrehung und der Drehung der Vorderräder wird die zur Lenkbewegung erforderliche Handkraft auf die vom Menschen aufzubringenden Werte reduziert.



Eine große Lenkübersetzung erhöht aber den Lenkradweg und damit die physikalische Belastung des Fahrers.



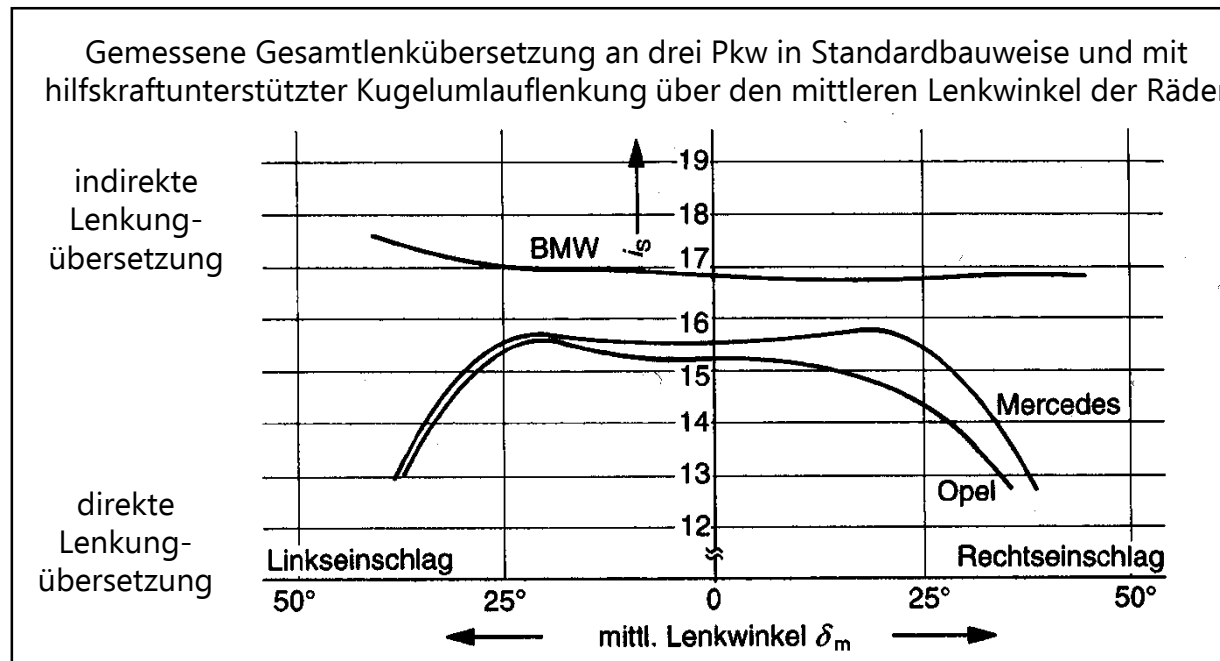
# Lenkung

## Fahrerbezogene Anforderungen: Kinematische Lenkübersetzung

Die kinematische Lenkübersetzung  $i_s$  ist das Verhältnis der Änderung des Lenkradwinkels zur Änderung des mittleren Lenkwinkels eines Paares gelenkter Räder, und zwar bei momentenfreier Lenkbetätigung und ausgehend von der Geradeausstellung. Bei der Berechnung der kinematischen Lenkübersetzung wird die Lenkelastizität und die Änderung der Übersetzung beim Einschlag nicht berücksichtigt. Es sind:

$$i_s = \frac{\Delta\delta_H}{\Delta\delta_m} \quad \text{mit} \quad \Delta\delta_m = \frac{\delta_a + \delta_i}{2}$$

Diese Ansätze haben nur Gültigkeit, wenn es sich um einen größeren Einschlagbereich handelt (z.B.  $\Delta\delta_m = 20^\circ$ ) oder um eine über den ganzen Bereich etwa gleichbleibende Übersetzung.





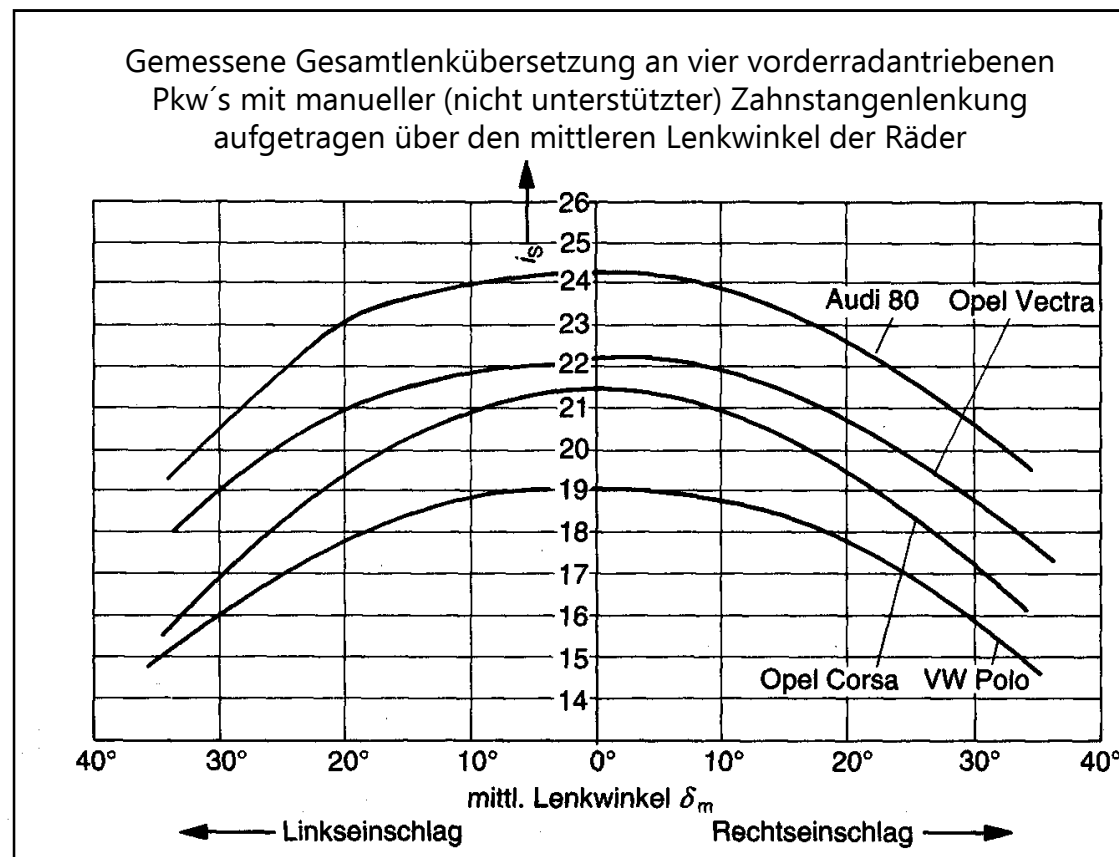


Ändert sich die kinematische Lenkübersetzung dagegen, sind die Differentiale für Lenkradwinkel  $\Delta\delta_{\text{Hh}}$  und mittleren Lenkwinkel  $\Delta\delta_{\text{HS}}$  zu verwenden:

$$i_s = \frac{\Delta\delta_{\text{Hh}}}{\Delta\delta_{\text{HS}}}$$

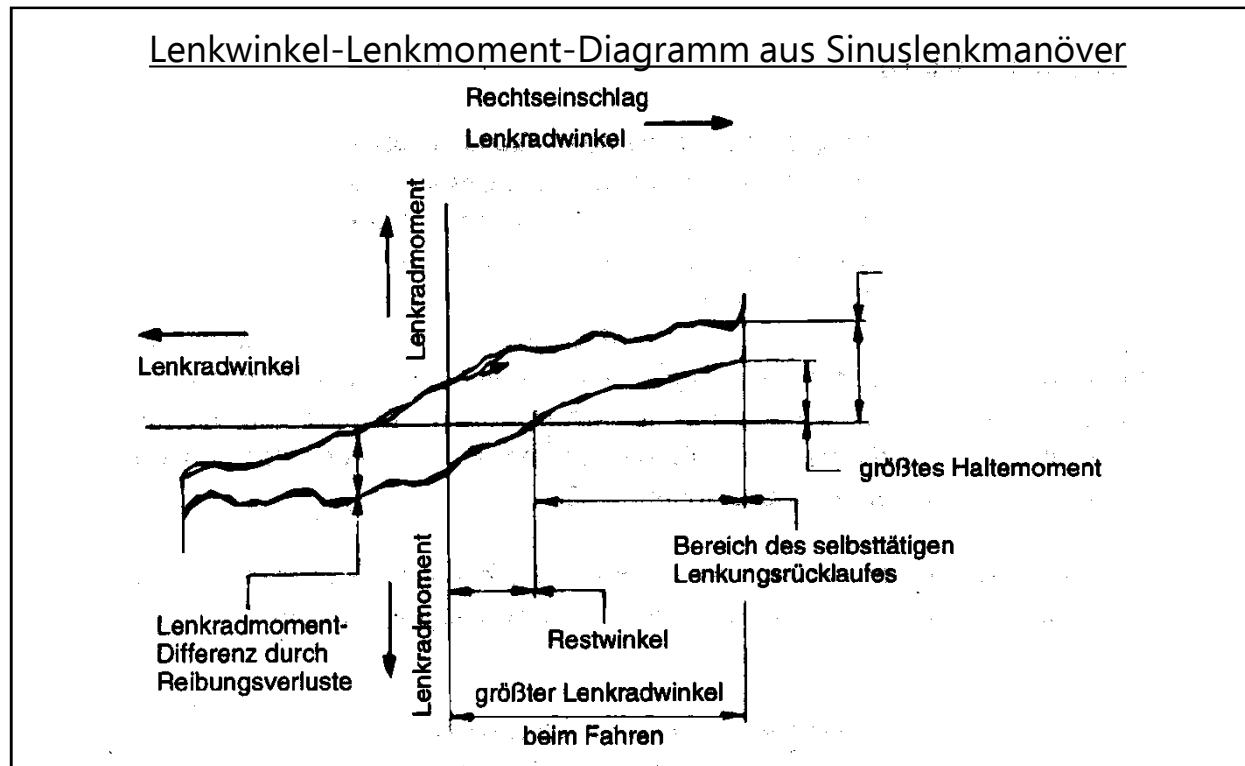
Die direktere Lenkübersetzung bei größeren mittleren Lenkwinkeln ist günstig für das Parkieren.

steigendes  
Fahrzeug  
gewicht



Variation der Lenkübersetzung wird in diesen Fällen durch die Kinematik des Lenkgestänges erzeugt.

Einige wichtige Lenkungeigenschaften lassen sich anhand eines während der Fahrt mit Hilfe eines Messlenkrades aufgezeichneten Lenkwinkel-Lenkmomentdiagramms bestimmen.



Das Diagramm gibt einerseits Auskunft über das Lenkkraftniveau, andererseits lassen sich aus der Form der Hysteresekurve um die Nulllage Aussagen über das vom Fahrer wahrgenommene „Lenkgefühl“ ableiten, das einen wichtigen Aspekt bei der Beurteilung des Geradeausverhaltens eines Fahrzeugs darstellt.



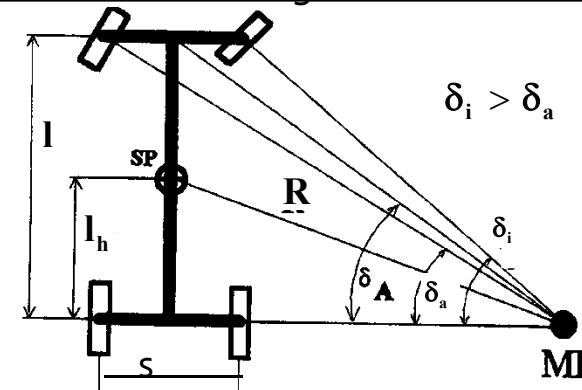
# Lenkung

## Lenkgeometrie, Eigenlenkverhalten: Statische Lenkungsauslegung

Nach Rudolf Ackermann rollen bei geringer Fahrgeschwindigkeit die Räder bei Kurvenfahrt Schräglaufwinkelfrei (Seitenkraftfrei) ab, wenn die Verlängerungen aller Raddrehachsen sich in einem Punkt, dem Kurvenmittelpunkt, schneiden.

### Geometrische Bedingung für Schräglaufreies Abrollen bei langsamer Kurvenfahrt

- SP: Schwerpunkt  
 MP: Kurvenmittelpunkt  
 l: Radstand  
 $\delta_i, \delta_a$ : Radlenkwinkel  
 s: Spurweite  
 $l_h$ : Abstand Schwerpunkt-Hinterachse  
 R: Kurvenradius  
 $\delta_A$ : Ackermannwinkel

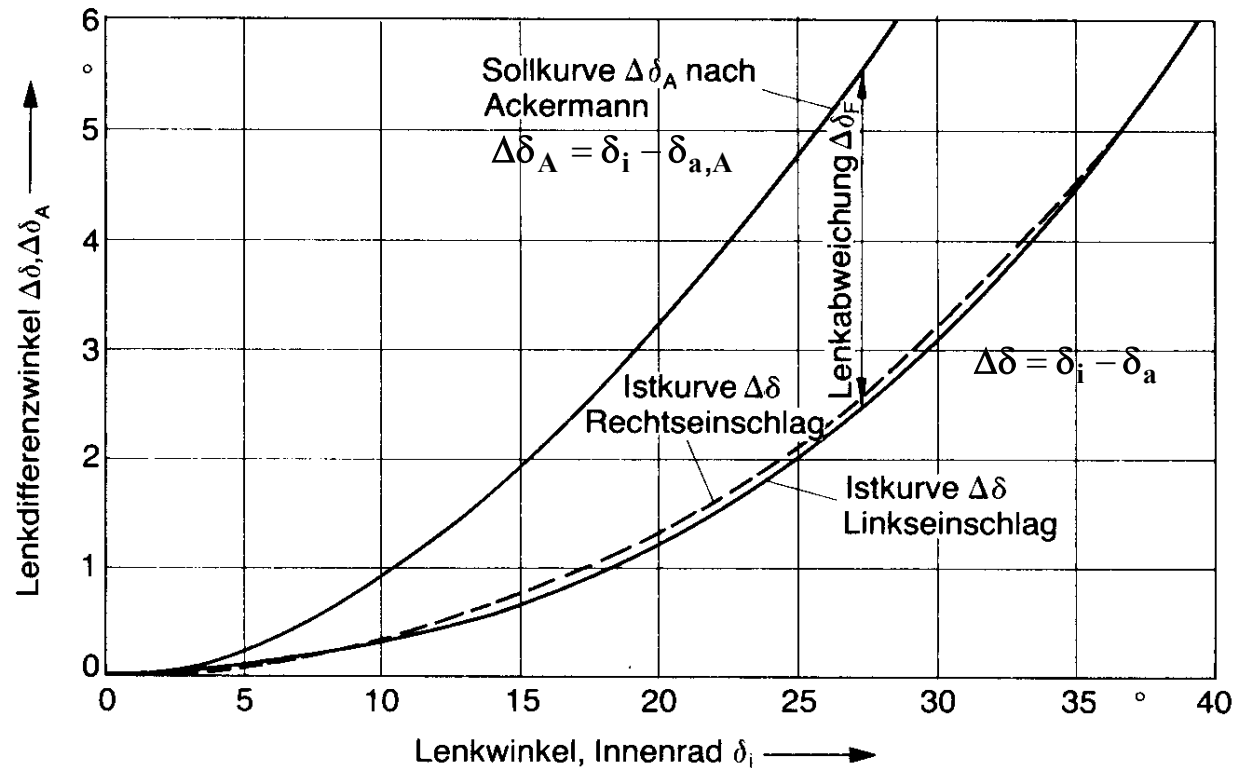


Ackermannwinkel:  $\tan \delta_A = \frac{l}{\sqrt{R^2 - l_h^2}}$  für kleine Winkel gilt:  $\delta_A = \frac{l}{R}$

$$\tan \delta_i = \frac{l}{R - \frac{s}{2}} \quad \text{und} \quad \tan \delta_a = \frac{l}{R + \frac{s}{2}} \quad \Rightarrow \quad \cot \delta_a - \cot \delta_i = \frac{s}{l} \quad \delta_i > \delta_a$$

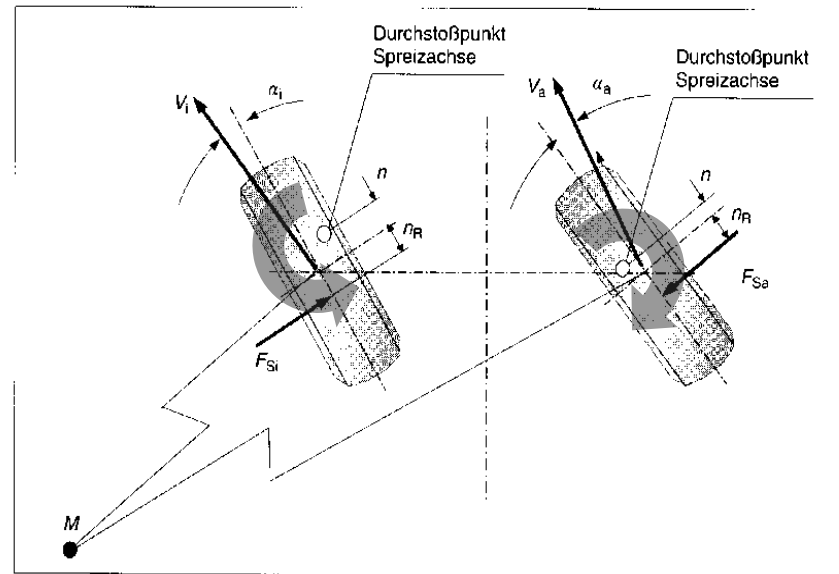
Eine vollkommene Lenkung würde die Lenkwinkel an den **Innen-** und Außenrädern bei jedem Lenkwinkel dem Ackermannwinkel entsprechend einstellen.

Während bei Geradeausfahrt die Radebenen der gelenkten Räder parallel zueinander in Fahrrichtung liegen, ergibt sich aus der Ackermannbedingung, dass bei Kurvenfahrt der Spurdifferenzwinkel zwischen kurvenäußerem und kurveninnerem Rad Werte im Sinne von Nachspur annimmt.



Der Spur- bzw. Lenkdifferenzwinkel wird durch eine etwas paralleleren Stellung des kurvenäußeren Rades realisiert. Man muss darauf achten, dass immer eine ausreichende Rückstellung des Lenkrades insbesondere bei langsamer Kurvenfahrt möglich ist.





Parallele Radstellung:

Die dargestellte Auslegung ist ungünstig für die Lenkungsrückstellung, da sich die Momente um die Spreizachse zum Teil wieder aufheben.

Die Auslegung entsprechend Ackermann-Bedingung hat folgende Nachteile:

⇒ Wendekreis zu groß

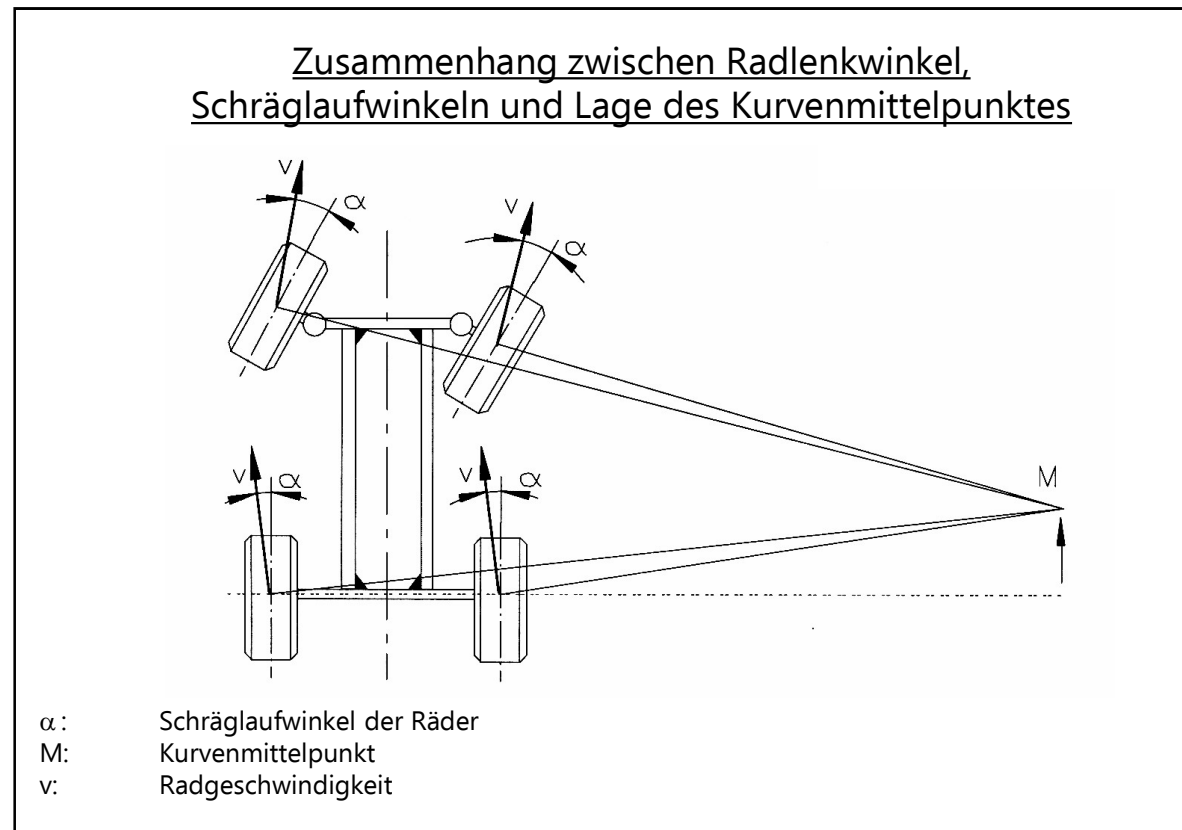
⇒ Seitenkraftaufbau ungenügend (kurvenäußeres Rad wird nicht entsprechend der Radlast verwendet)



# Lenkung

## Dynamische Lenkungsauslegung

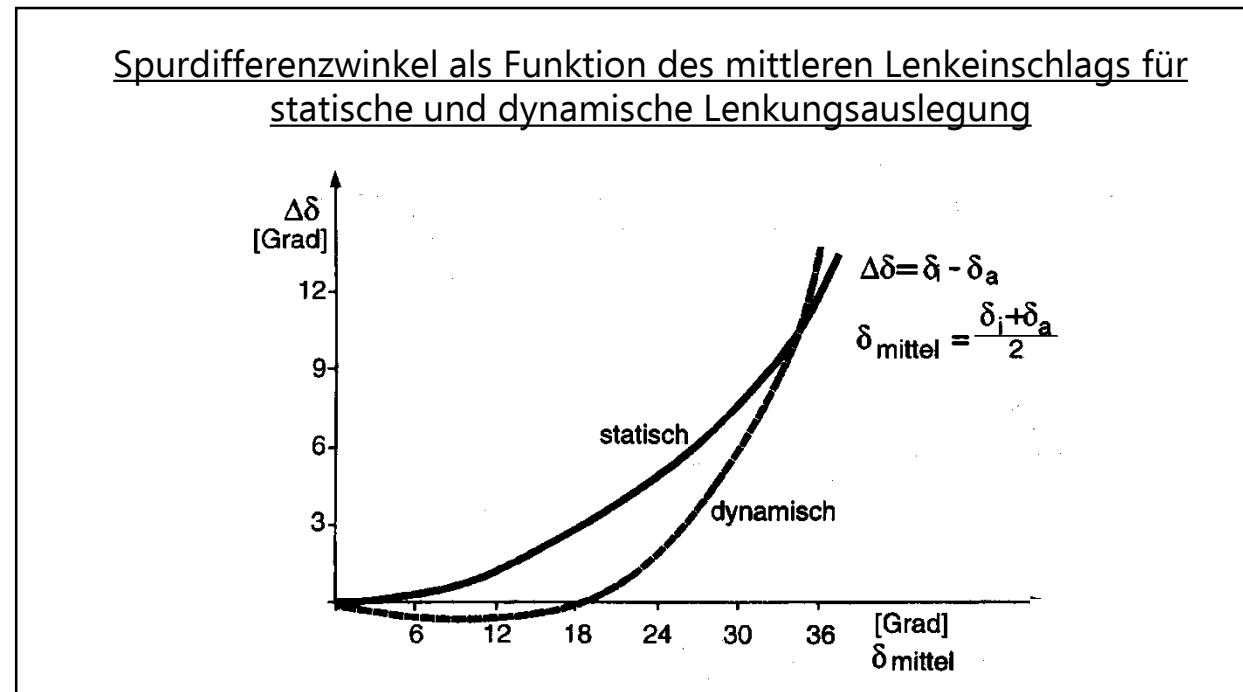
Bei Kurvenfahrt mit höherer Fahrgeschwindigkeit treten an den Räder Schräglaufwinkel auf. Der Kurvenmittelpunkt ergibt sich aus der Schnittpunkt der Normalen auf die Bewegungsrichtungen der Räder in deren Aufstandspunkt.



Die kurvenäußeren Schräglaufwinkel sind jeweils größer als die Kurveninneren, wenn Lenkkinematik nach der Ackermann-Bedingung ausgelegt ist.

Es sollte bei der Auslegung der Lenkung darauf geachtet werden, dass die Schräglaufwinkel der kurvenäußeren größer als die der kurveninneren sind, um an den mit höheren Radlasten beaufschlagten kurvenäußeren Rädern den gleichen Kraftschlusswert ausnutzen zu können wie an den Kurveninneren.

Eine dynamische Lenkungsauslegung erfordert daher eine Abweichung von der Ackermannbedingung, sodass die Räder eher parallel einschlagen werden, als mit zunehmender Nachspur.



Der Paralleleinschlag der gelenkten Räder wird in der Praxis bis zu einem Winkel von ca. 20° angestrebt und erst bei größeren Einschlagwinkel wird eine Annäherung an die Ackermann-Auslegung verwirklicht.



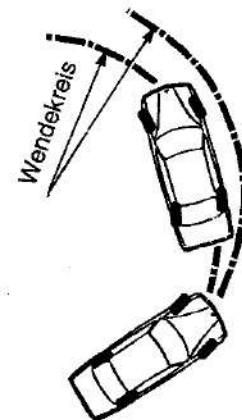
# Lenkung

## Hinterachslenkung

Durch aktives Lenken der Hinterachse werden die an der Hinterachse wirkenden Seitenkräfte und dadurch das Lenkverhalten des Fahrzeugs beeinflusst.

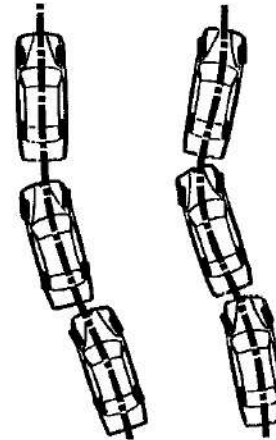
Grundsätzlich gelten folgende Überlegungen :

- Bei sehr kleinen Fahrgeschwindigkeiten (Parkierbereich) kann durch einen zum Lenkeinschlag der Vorderräder gegensinnigen Lenkeinschlag der Hinterräder der Wendekreis verkleinert werden.
- Im fahrdynamisch interessanten Geschwindigkeitsbereich wirkt sich ein gegensinniger Lenkeinschlag stabilitätsmindernd aus.



**Gegensinniger Radeinschlag:**

Verringerung des Wendekreises



**Gleichsinniger Radeinschlag:**

Steigerung  
der Hochgeschwindigkeitsstabilität

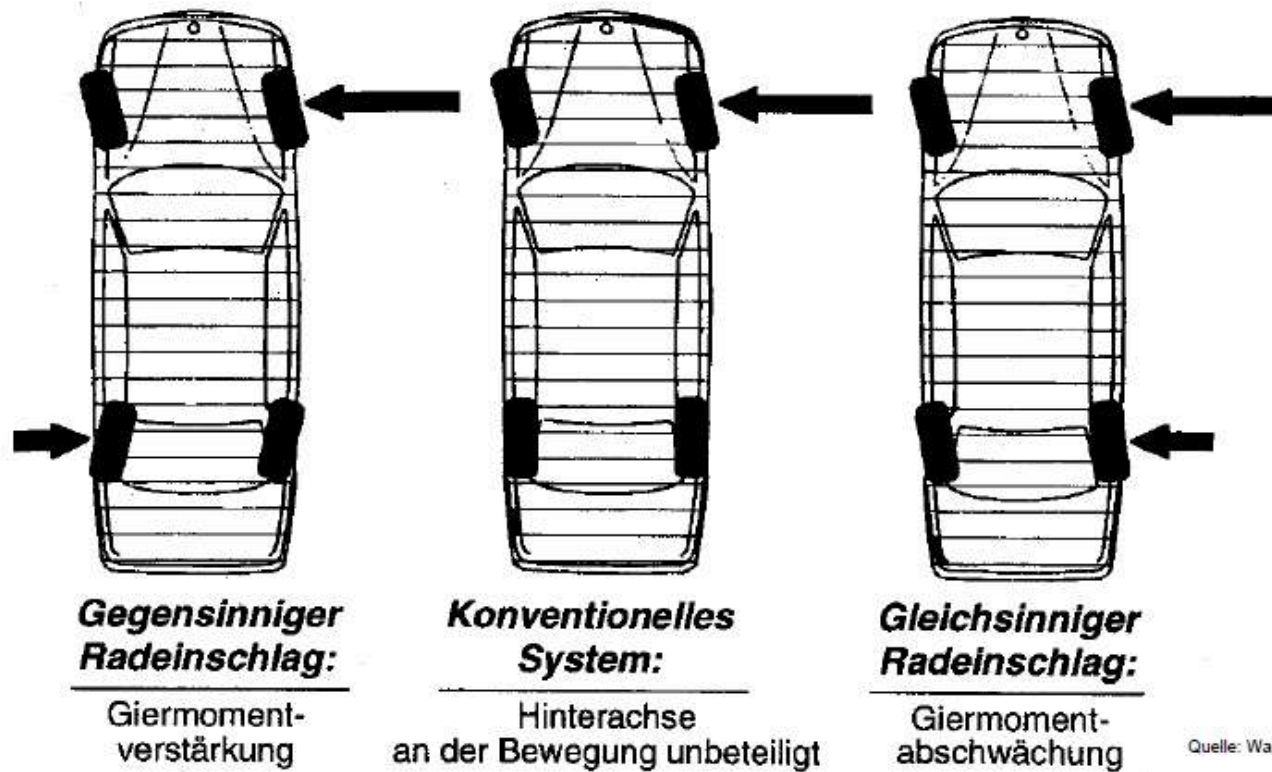
Quelle: Wallentowitz





# Lenkung

## Hinterachslenkung



Seitenkraftaufbau bei Hinterachslenkung



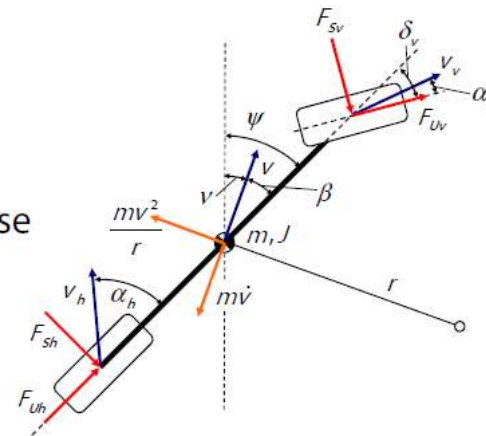
# Lenkung

## Arten der Lenkung

### Einspurmodell - Querdynamik Lineares Gleichungssystem

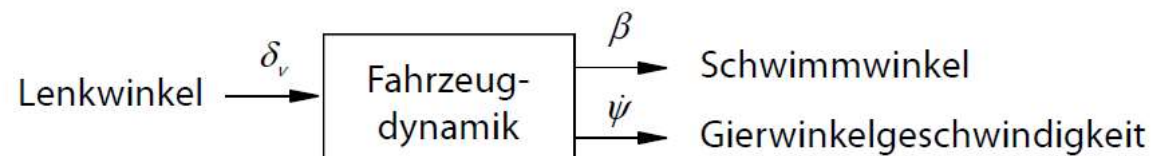
#### Vereinfachende Annahmen

- keine Vertikalbewegungen
- mittlere Radlasten an Vorder- und Hinterachse
- lineare Seitenkraftcharakteristik
- kleine Lenk- und Schwimmwinkel
- konstante Geschwindigkeit



$$\left( \frac{l_h k_h}{v} - \frac{l_v k_v}{v} - mv \right) \ddot{\psi} + mv \cdot \dot{\beta} + (k_h + k_v) \cdot \beta + (F_{uv} + k_v) \cdot \delta_v = 0$$

$$J \cdot \ddot{\psi} + \frac{1}{v} (l_h^2 k_h + l_v^2 k_v) \cdot \ddot{\psi} + (l_h k_h - l_v k_v) \cdot \dot{\beta} + l_v (-F_{uv} - k_v) \cdot \delta_v = 0$$

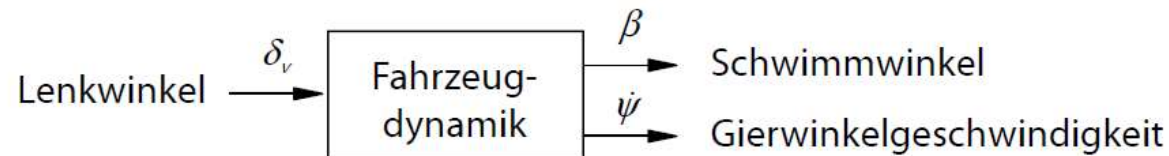




# Lenkung

## Arten der Lenkung

### Einspurmodell - Querdynamik Lineares Gleichungssystem



DGL der Gierwinkelgeschwindigkeit  $\dot{\psi}$

$$\ddot{\psi} + 2D\omega_0 \cdot \dot{\psi} + \omega_0^2 \cdot \psi = \frac{l_v(k_v + F_{uv})}{J} \cdot \dot{\delta}_v + \frac{v k_h(k_v + F_{uv}) \cdot (l_h + l_v)}{J m v^2} \cdot \delta_v$$

DGL des Schwimmwinkels  $\beta$

$$\ddot{\beta} + 2D\omega_0 \cdot \dot{\beta} + \omega_0^2 \cdot \beta = -\frac{k_v + F_{uv}}{m v} \cdot \dot{\delta}_v - \frac{(k_v + F_{uv}) \cdot (k_h l_h l_v + k_h l_h^2 - l_v m v^2)}{J m v^2} \cdot \delta_v$$

Giereigenfrequenz

$$\omega_0^2 = \frac{l_h k_h - l_v k_v}{J} + \frac{k_h k_v (l_h + l_v)^2}{J m v^2}$$

Gierdämpfung

$$D = \frac{1}{2\omega_0} \cdot \frac{k_h(J + m l_h^2) + k_v(J + m l_v^2)}{J m v}$$

