



Vorlesung Fahrzeugmechanik (Kap. 5: Achsen)

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



Achsen

Achsen-Bewertung

Kriterien nach denen die Achsen bewertet werden:

- a) Auswirkung auf das Packaging des Gesamtfahrzeuges (Raumbedarf)
- b) Montage bei der Produktion und für den späteren Ausbau
- c) Herstellkosten
- d) Fahrdynamische Eigenschaften:
 - kinematisches unter- bzw. übersteuern
 - elastokinematisches unter- bzw. übersteuern
(Verhalten der Achse unter Einfluß von Kräften und Momenten)
 - Längsnachgiebigkeit (Ride-Relevant)
 - Spurweitenänderung
 - ungefederte Massen
- e) Lebensdauer
- f) Reifenverschleiß
- g) Gesamtgewicht

```
graph TD; Tragen --> Vertikaldynamik; FedernDampfen[Federn/Dämpfen] --> Wankverhalten; FedernDampfen --> Querdynamik; Lenken --> Querdynamik; Lenken --> Nickverhalten; Bremsen --> Querdynamik; Bremsen --> Längsdynamik; Antreiben --> Querdynamik; Antreiben --> Längsdynamik; Wankverhalten --> Vertikaldynamik; Wankverhalten --> Nickverhalten; Querdynamik --> Nickverhalten; Querdynamik --> Längsdynamik; Gierverhalten --> Längsdynamik; Vertikaldynamik --> Radaufhängung; Nickverhalten --> Radaufhängung; Längsdynamik --> Radaufhängung; KarosserieRahmen[Karosserie Rahmen] <--> Radaufhängung; RäderReifen[Räder Reifen] <--> Radaufhängung; Radaufhängung --> Fahrverhalten; Radaufhängung --> NVHVerhalten[NVH-Verhalten]; Radaufhängung --> Crashverhalten; Fahrverhalten --> Stabilität; Fahrverhalten --> Lenkpräzision; Stabilität --> Fahrsicherheit; Lenkpräzision --> Fahrsicherheit; NVHVerhalten --> Komfort; NVHVerhalten --> Konditionsicherheit; Crashverhalten --> Sicherheit; Fahrsicherheit <--> Konditionsicherheit; Fahrsicherheit --> AktiveSicherheit[Aktive Sicherheit]; Konditionsicherheit --> AktiveSicherheit; Sicherheit --> PassiveSicherheit[Passive Sicherheit];
```

The diagram illustrates the hierarchy of vehicle dynamics and safety. At the top, five input categories (Tragen, Federn/Dämpfen, Lenken, Bremsen, Antreiben) feed into three primary dynamic areas: Querdynamik, Wankverhalten (kinematisches Eigenlenken), and Gierverhalten (elastisches Eigenlenken). These areas further influence Vertikaldynamik, Nickverhalten, and Längsdynamik. All three dynamic areas converge on the Radaufhängung (Wheel Suspension), which is also influenced by the Karosserie Rahmen (Chassis Frame) and Räder Reifen (Wheels/Tires). The Radaufhängung then branches into Fahrverhalten (Driving Behavior), NVH-Verhalten (Noise, Vibration, Harshness Behavior), and Crashverhalten (Crash Behavior). Fahrverhalten leads to Stabilität (Stability) and Lenkpräzision (Steering Precision), which both contribute to Fahrsicherheit (Driving Safety). NVH-Verhalten leads to Komfort (Comfort) and Konditionsicherheit (Condition Safety). Crashverhalten leads to Sicherheit (Safety). Fahrsicherheit and Konditionsicherheit are interconnected and both contribute to Aktive Sicherheit (Active Safety). Finally, Sicherheit contributes to Passive Sicherheit (Passive Safety).

Hauptaufgabe der Radaufhängung:

Führung des Radträgers und die Aufnahme bzw. die Weiterleitung der an ihm wirkenden Kräfte und Momente

Fahrsicherheit/Fahrverhalten:

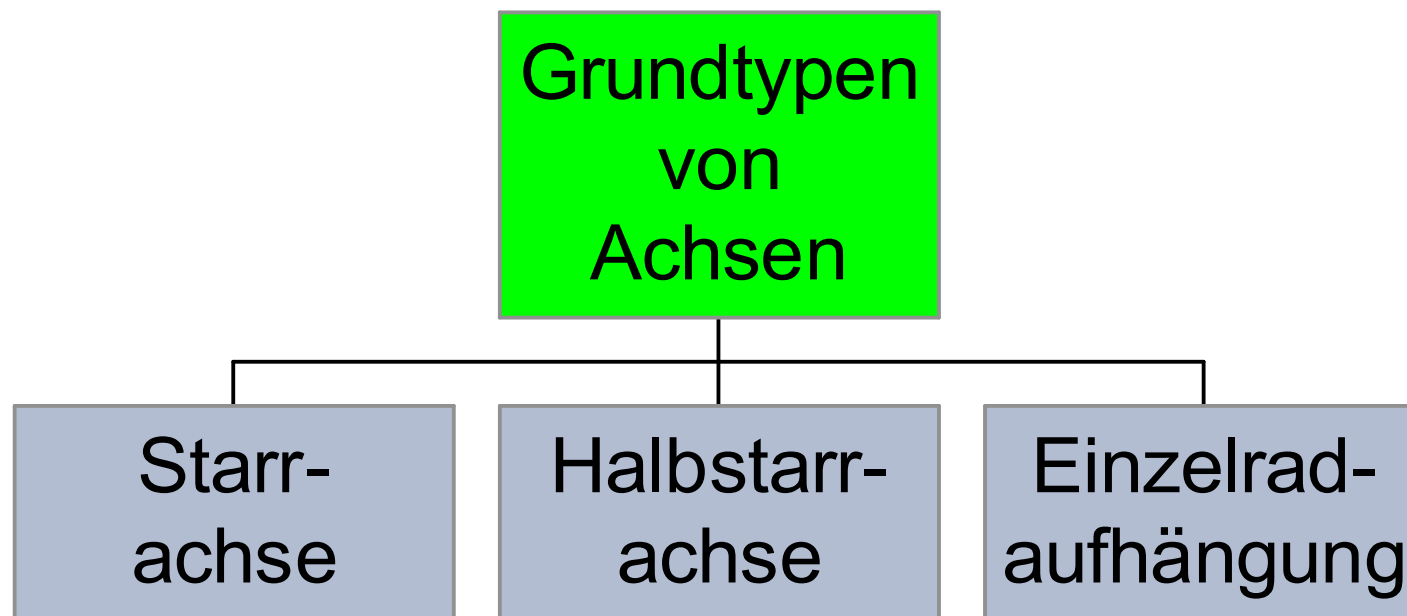
- Festlegung der Radstellungsparameter (Spur, Sturz, Nachlauf, Spreizung, Nachlaufstrecke, Lenkrollradius).
- Festlegung der Radstellungsänderung beim Einfedern, sowie unter Längs- und Querkraft.
- Festlegung der dynamischen Radlastverteilung im Fahrbetrieb (Festlegung von Wankachse und Nickpol)

Fahrkomfort:

- Ermöglichung ausreichender Federwege
- Reduzierung der Abrollhärte durch Längs- und Querfederung
- Gutes Ansprechen auf Fahrbahnunebenheiten
- Reduzierung des Bremsnickens und Anfahrtauchens

Wirtschaftlichkeit/Aufwand:

- Kosten
- Bauraum
- Gewicht
- Recycling
- Betriebsfestigkeiten





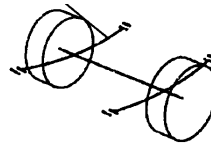
Achsen

Grundtypen von Radaufhängungen

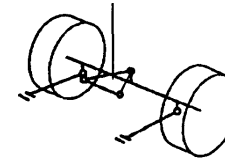
Starrachse:

Beide Räder der Achse sind starr miteinander verbunden. Jedes Rad besitzt zwei Freiheitsgrade: Hub- und Wankbewegung. Die Aufhängung muss also vier Freiheitsgrade blockieren.

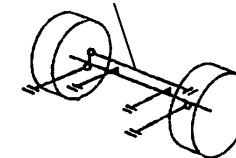
Blattfeder



Dreieckslenker



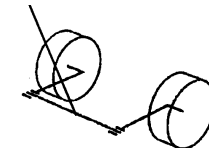
Panhardstab



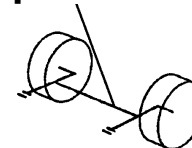
Halbstarrachse:

Eine Verbundachse läßt zwar Relativbewegungen zwischen den beiden Räder zu, diese sind jedoch nicht unabhängig voneinander, sondern vom jeweils anderen Rad mitbeeinflusst.

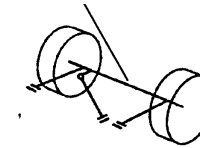
Verbundlenker



Koppellenker



Torsionlenker



Einzelradaufhängung:

Beide Räder einer Achse bewegen sich unabhängig voneinander. Jedes Rad besitzt einen Freiheitsgrad. Die restlichen Freiheitsgrade müssen von der Aufhängung aufgenommen bzw. bei gelenkten Rädern vom Lenksystem ermöglicht werden.

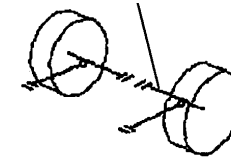
Längslenker



Schräglenker



Pendelachse



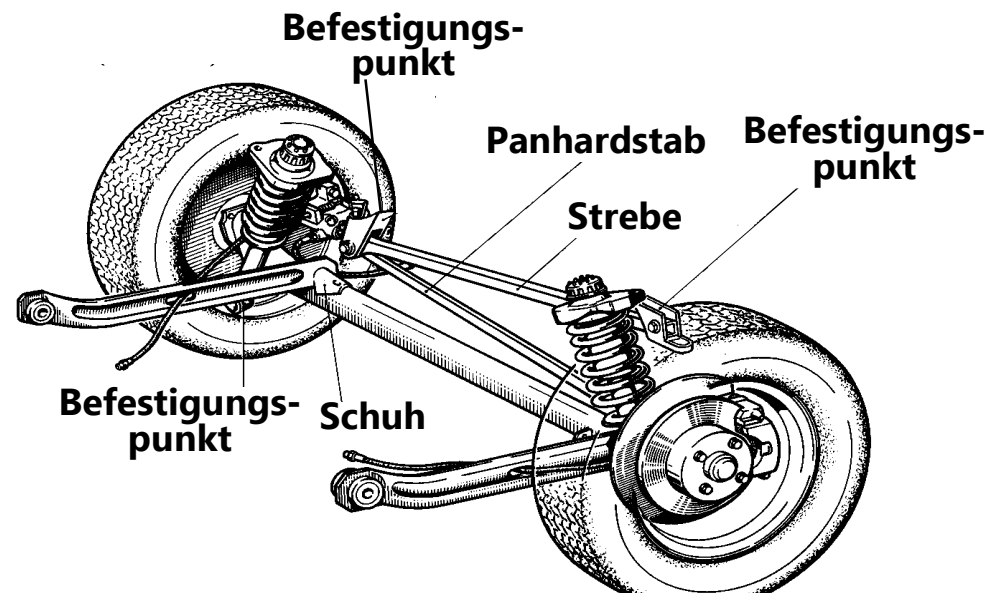


Achsen

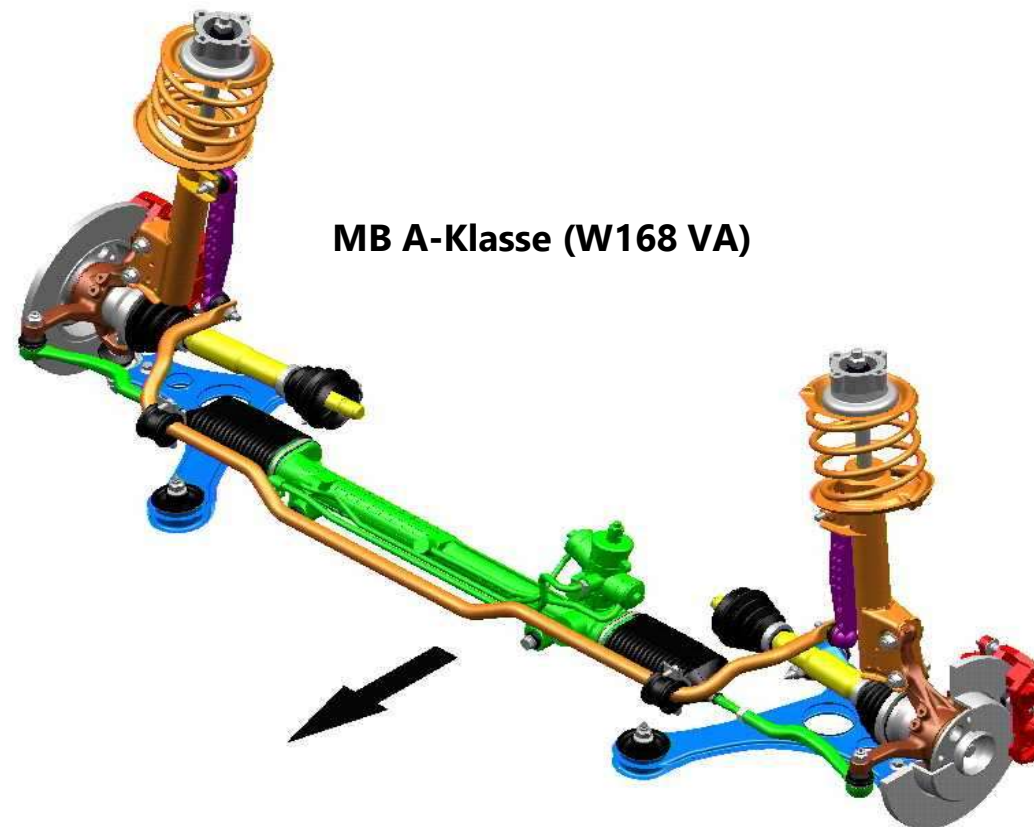
Starrachse: Allgemein

- Beide Räder der Achse sind starr miteinander verbunden. Jedes Rad besitzt zwei Freiheitsgrade: Hub- und Wankbewegung.
- Die Seiten- und Längsführungseigenschaften reichten bis in die 70er und 80 er Jahre für Pkw der Mittelklasse und Lieferkraftwagen aus
- Die Radlagerung kann bei derartigen Achsen unkompliziert sein.
- Schnellere, komfortable Fahrzeuge dagegen benötigen Schraubenfedern und zu exakten Führung der Achslängslenker und eine mittige Führung oder einen Panhardstab.

Starr-
achsen



Bei der Federbeinachse nach McPherson-Prinzip (Earl McPherson, 1945) wird der untere Dreiecksquerlenker aus einem Querlenker und einem Stabilisator gebildet. Die McPherson-Prinzip hat sich mit der Bezeichnung McPherson-Achse aber als Sammelbegriff für alle Feder-/Dämpferbeinachsen eingebürgert.



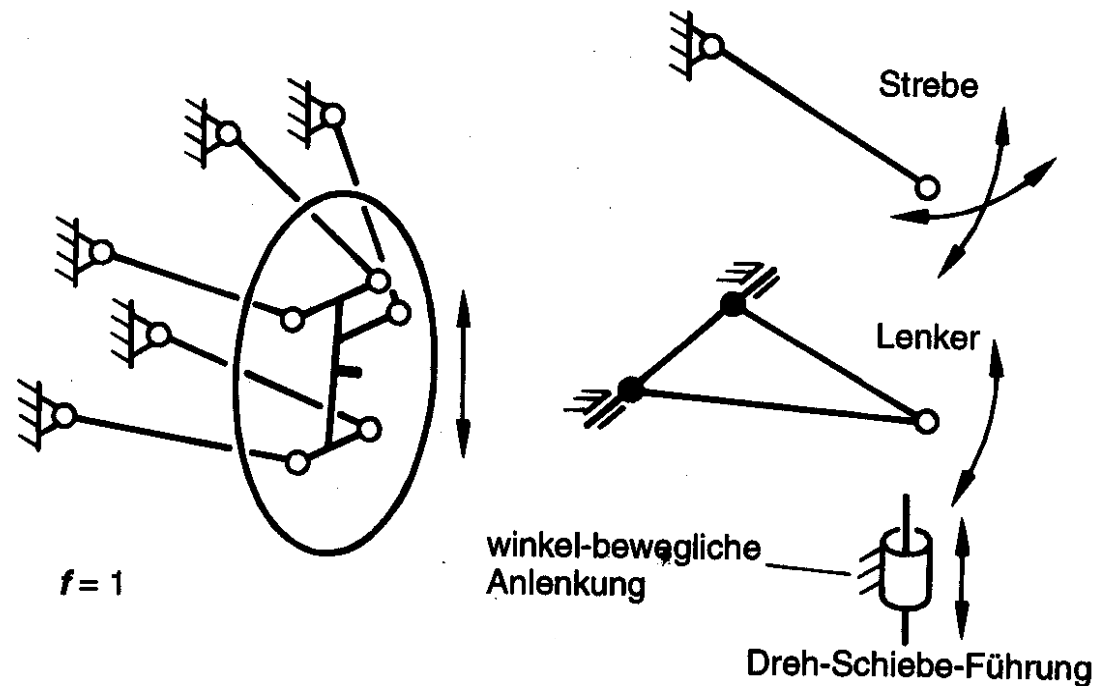


Achsen

Einzelradaufhängung: Mehrlenkerachse

Der Bauform der Mehrlenker-Radaufhängungen orientiert sich an der Grundform der räumliche Radführung, bei der der Radträger über 5 Streben mit dem Aufbau verbunden ist.

Einzelradaufhängung, schematisch





Achsen Einzelradaufhängung: Mehrlenkerachse

Vorteile:

- gezielte Auslegung der kinematischen und der elastokinematischen Achseigenschaften möglich
- Spreizachse kann als virtuelle Achse in den Bereich des Rades gelegt werden
- sehr präzise Radführung
- Möglichkeiten zur elastokinematischen Abstimmung
- sehr gute Längs- und Querfederung möglich
- geringe ungefederte Massen erreichbar

Nachteile:

- hoher Raumbedarf
- aufwendige Konstruktion
- hohe Nebenfederraten auf Grund der großen Anzahl von Gummilagern
- Längsfederung schwierig zu realisieren

Beispiele:

HA: MB S/E/C/A-Klasse, Chevrolet Corvette, BMW Z1, BMW 3er-Reihe

VA: Audi A4, MB O 404 (1992)



Achsen

Einzelradaufhängung: Fünflenkerachse

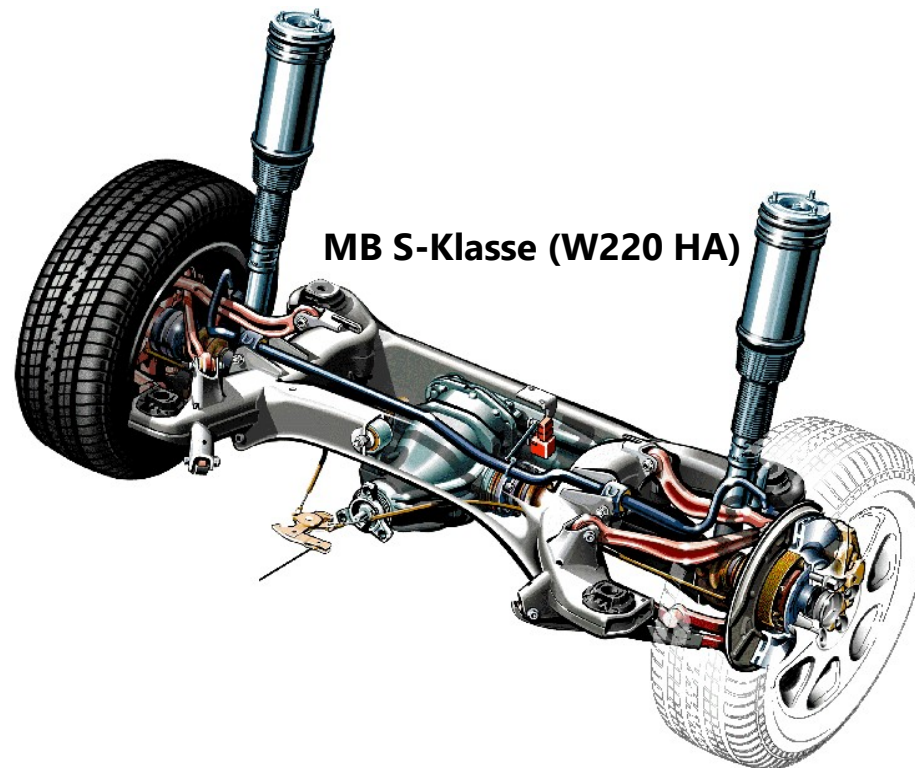
Der allgemeinsten Fall der Einzelradaufhängung stellt die Fünflenkerachse dar, auch Raumlenkerachse genannt, bei der die fünf Freiheitsgrade durch fünf Stablenker aufgenommen werden, von denen jeder zunächst nur auf Zug und Druck beansprucht wird und an beiden Enden gummielastisch gelagert ist.

In dieser Ausführung steht die Aufhängung der Doppelquerlenkerachse nahe, da je zwei der Lenker einen oberen bzw. unteren „Querlenker“ annähern, der fünfte Lenker ist die „Spurstange“.

Einzelrad-
aufhängung-
achse

Fünflenkerachse

(6a)





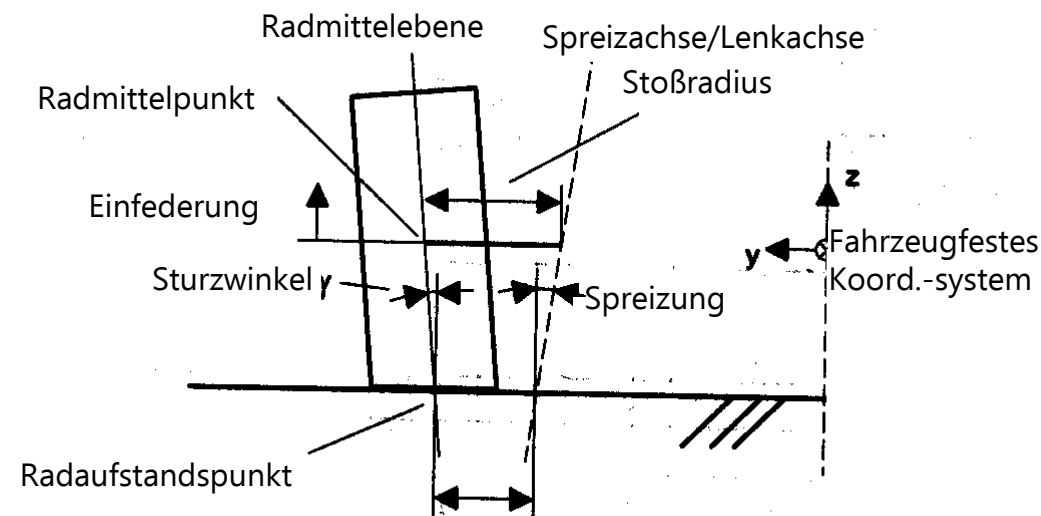
Achsen

Beschreibung und Beurteilung der Radstellung

Die Radstellung wird nach DIN 70020 festgelegten Kenngrößen beschrieben. Hierzu gehören z.B.:

- Spurwinkel (Vor-/Nachspur)
- Sturzwinkel
- Spreizung
- Nachlaufstrecke bzw. Nachlaufwinkel
- Lenkrollradius

Die Achse, um die sich das Rad dreht heißt Lenk- bzw. Spreizachse. Die räumliche Lage der Lenkachse wird durch Spreizung, Nachlaufwinkel, Nachlaufstrecke und Lenkrollradius beschrieben. Sie werden oft durch konstruktive Randbedingungen mitbestimmt.



Achsen

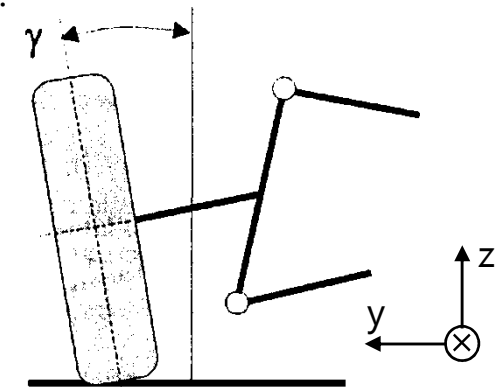
Geometrie und Einflußgrößen

Sturzwinkel γ (Fahrbahnbezogen):

Neigung des Rades zur Fahrbahnsenkrechten in Fahrzeuginnenrichtung.

- zusätzliche Seitenkraft
(Motorrad, F400 Forschungsfahrzeug von DaimlerChrysler
vorgestellt auf der Automesse in Tokyo in 2001,
Reifenverschleiß)

Positives Vorzeichen: Neigung der Radebene nach außen (wie dargestellt)



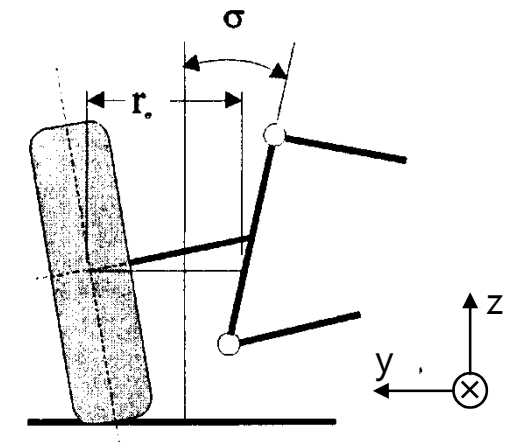
Spreizungswinkel σ :

Neigung der Lenkachse zur Fahrzeuginnenrichtung.

- Lenkmoment, Lenkgefühl, Rückstellverhalten

Spreizungsversatz r :

Horizontaler Abstand zwischen Radmitte und Lenkachse.





Achsen

Geometrie und Einflußgrößen II

Lenkrollradius r_s :

Abstand zwischen Radmitte und Durchstoßpunkt der Lenkachse durch die Fahrbahn

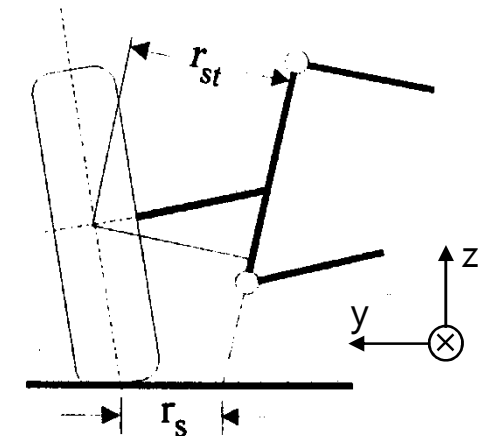
- Reaktion des Lenksystems auf Längskräfte (Bremskräfte), Lenkrückmeldung

Positives Vorzeichen: Durchstoßpunkt liegt innerhalb der Spurweite (wie dargestellt)

Störkrafthebelarm r_{st} :

Kürzester Abstand zwischen Radmitte und Lenkachse

- Einfluß von Antriebskräften auf das Lenksystem

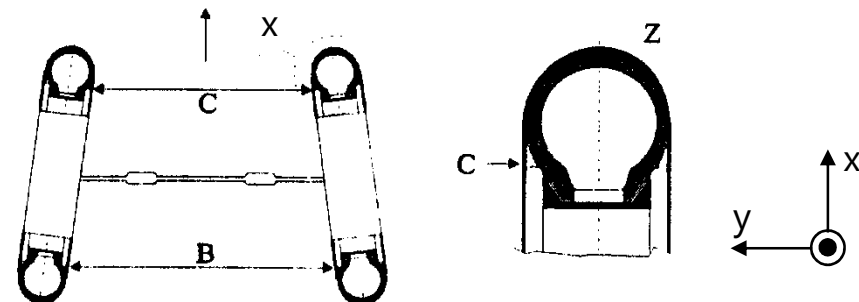


Vorspur:

Winkel zwischen Reifenmittelebene und Fahrzeuglängsachse

- Seitenkraftaufbau, Eigenlenkverhalten

$C > B$: Nachspur
 $C < B$: Vorspur





Achsen

Geometrie und Einflußgrößen III

Nachlaufstrecke n :

Abstand zwischen Radaufstandspunkt und Durchstoßpunkt der **Lenkachse/Spreizachse** durch die Fahrbahn.

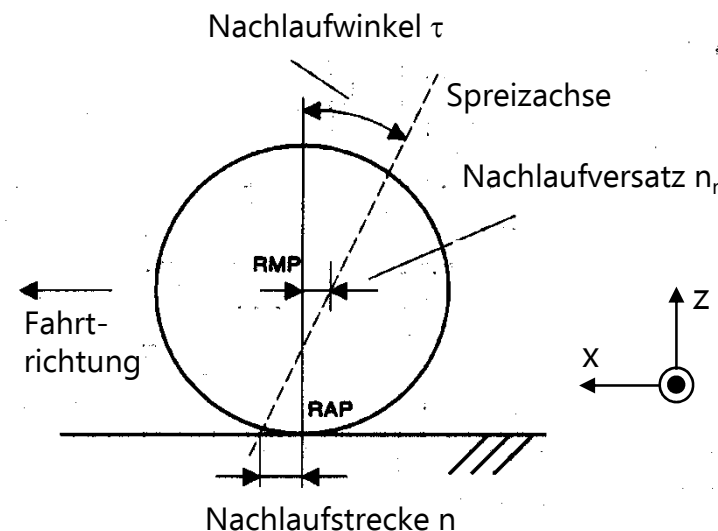
Rückstellverhalten in Geradeausstellung, Geradeauslaufstabilität, Lenkmoment bei Kurvenfahrt und Fahrbahnneigung, Lenkkräfte, Lenkungsrückmeldung

Positives Vorzeichen: Lenkachse durchstößt Fahrbahn vor Radaufstandspunkt

Nachlaufwinkel τ :

Winkel zwischen Lenkachse und Reifsenkrechter in Seitenansicht

- Größe der Nachlaufstrecke



Nachlaufversatz n_n :

Versatz (Verschiebung) der Radmitte zur Lenkachse

- Größe der Nachlaufstrecke

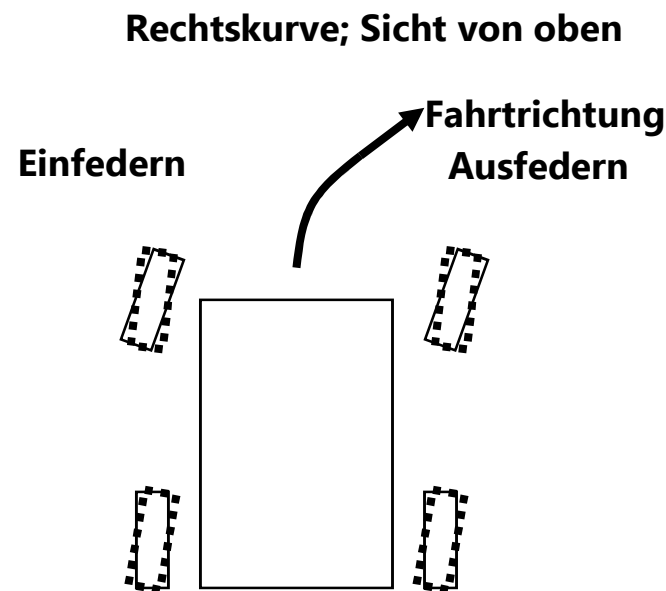
Gestrichelt sind die untersteuernden Radstellungen dargestellt.
Diese können entweder kinematisch und/oder elastokinematisch realisiert werden.

Kinematisches Untersteuern an der Vorderachse:

Beim Einfedern geht das Rad auf Nachspur und beim Ausfedern geht das Rad auf Vorspur.

Elastokinematisches Untersteuern an der Vorderachse:

Die Seitenkraft greift hinter dem Radaufstandspunkt an und aufgrund der Gummilager in der Achse stellt sich ein Spurwinkel kurvenausen in Richtung Nachspur und kurveninnen in Richtung Vorspur ein.





Die Achs-Kinematik beschreibt die beim Durchfedern und Lenken den Räder aufgezwungenen Starrkörper-Bewegungen.

Achseinstellwerte:

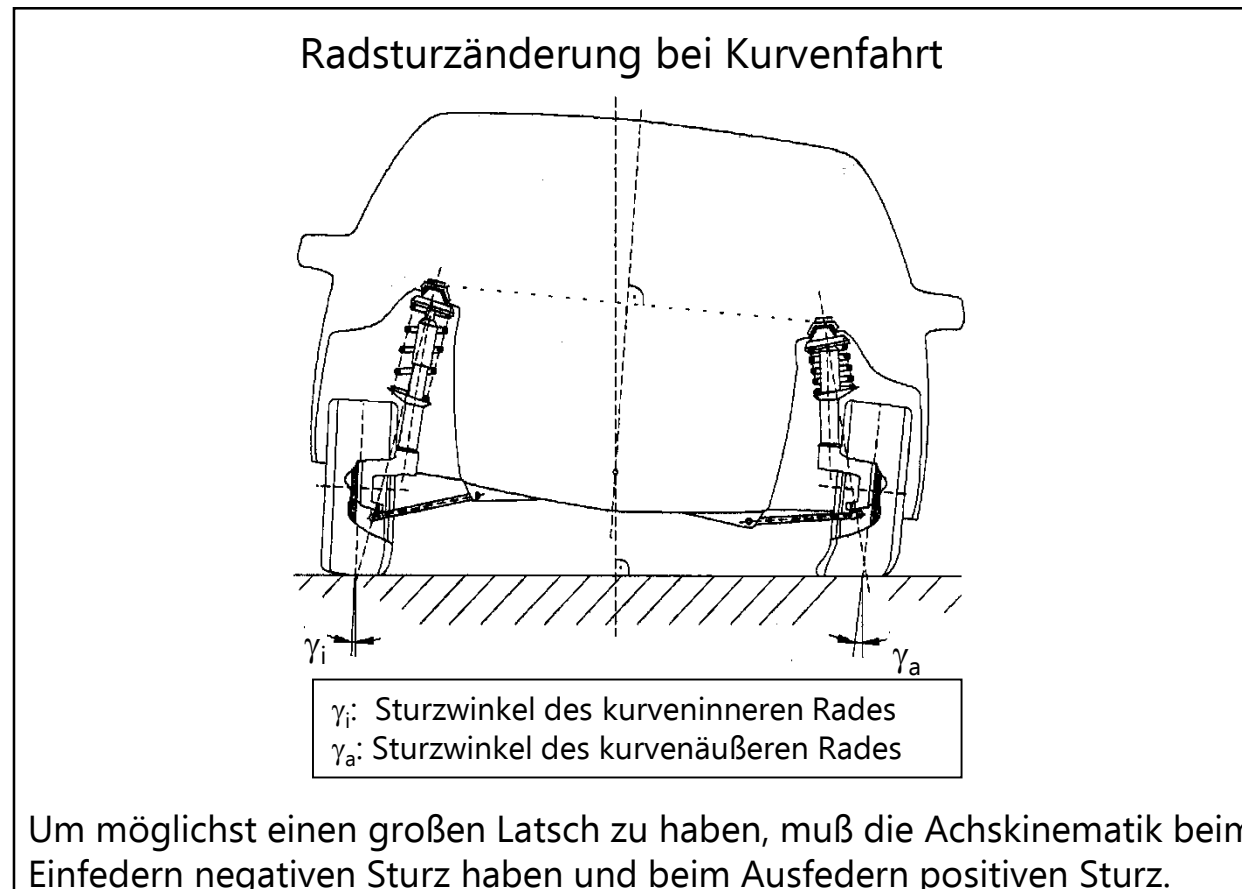
- Zur Sicherstellung der gewünschten Fahreigenschaften, des Geradeauslaufvermögens und um übermäßigen Reifenverschleiß zu verhindern, werden bei allen Fahrzeugen bestimmte Einstellwerte einschließlich zugelassener Toleranzen für die Vorder- und Hinterachse (sofern es sich nicht um eine angetriebene Starrachse handelt) festgelegt.
- Einstellen lässt sich die Vorspur über die Spurstange und einstellbar sind meist auch der Sturz- und Nachlaufwinkel.
- Bei den übrigen Achskinematikgrößen für Spreizung, Lenkrollradius und Nachlaufversatz handelt es sich um nicht einfach zu messende Konstruktionsdaten.



Achsen Radstellung beim Einfedern

Die Änderungen der Radstellung über dem Federweg können das Fahrverhalten beeinflussen, z. B.:

- Bei Kurvenfahrt beeinflussen sie das Eigenlenkverhalten.
- Bei Geradeausfahrt über Straßenunebenheiten führen sie zu Seitenkräften, die den Geradeauslauf beeinträchtigen.

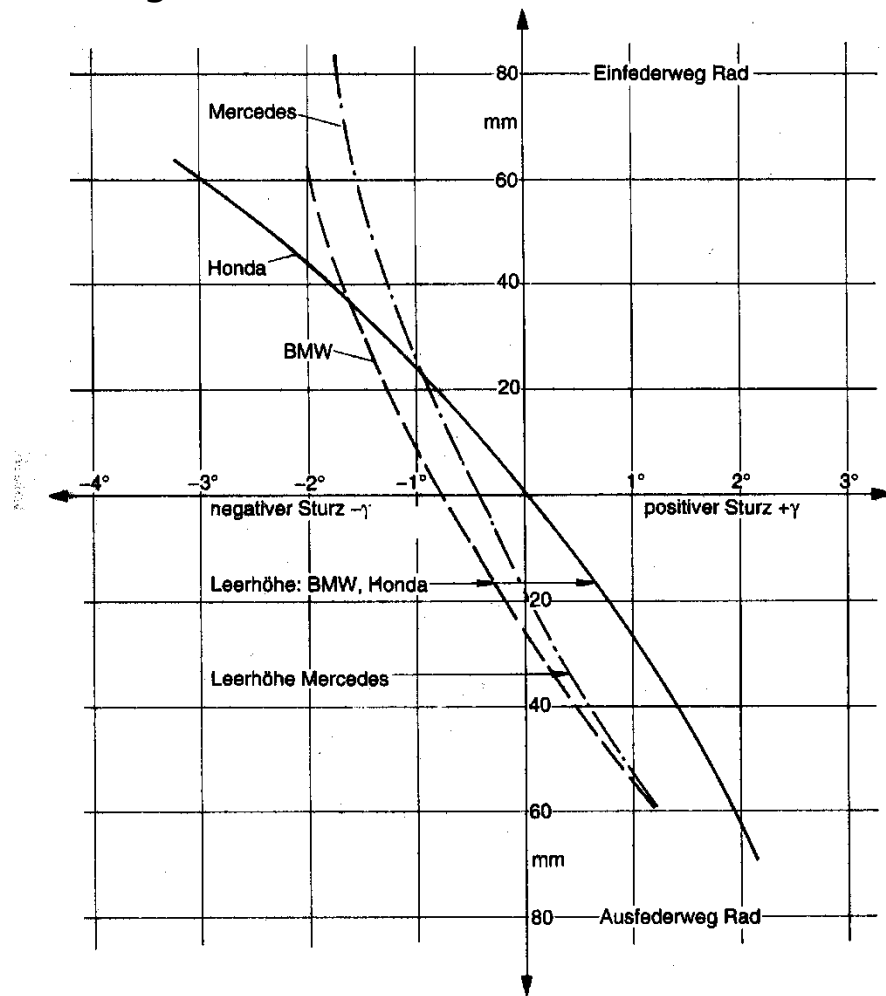




Achsen

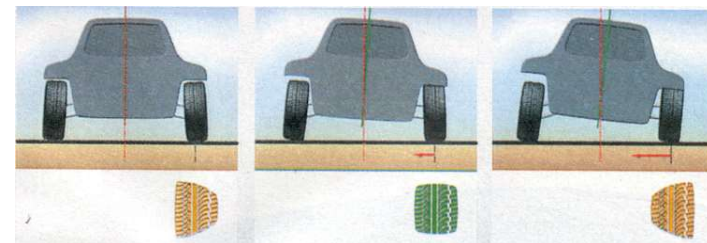
Kinematische Sturzänderung der verschiedenen Fahrzeugen

Sturzwinkel eines Rades bei der Ein- und Ausfederung, gemessen an der Vorderachse von drei Fahrzeugen



Nachteile des negativen Sturzes:

- ungleichmäßiger Verschleiß
- hohe Walkarbeit des Reifen
- ungleichmäßiger Druckverteilung im Latsch



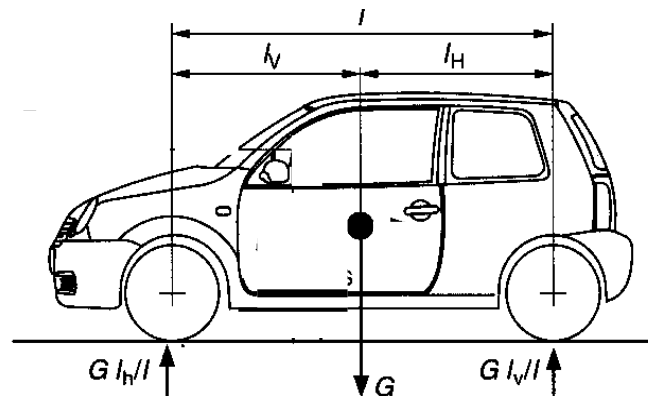


Achsen

Radstand

Der Radstand hat einen maßgeblichen Einfluss auf die Fahreigenschaften.

	Gierversärkung $\left(\frac{\dot{\psi}}{\delta}\right)_{\text{stat}} = \frac{1}{i} \cdot \frac{v}{1 + EG \cdot v^2}$	Nickbeschleunigung $\ddot{\phi} = \frac{1}{l} \cdot (\ddot{z}_H - \ddot{z}_V)$
Langer Radstand	–	+
Kurzer Radstand	+	–



- $\ddot{\phi}$: Nickbeschleunigung
- \ddot{z} : Aufbaubeschleunigung
- l : Radstand
- l_H : Abstand der Hinterachse vom SP
- l_V : Abstand der Vorderachse vom SP
- G : Fahrzeugmasse

Neben der Schwerpunktshöhe und der Zuladung ist der Radstand einer der wichtigsten Größen zur Differenzierung von Fahrzeugen.

Die kinematische Radstandsänderung beim Federn kann im Allgemeinen vernachlässigt werden.

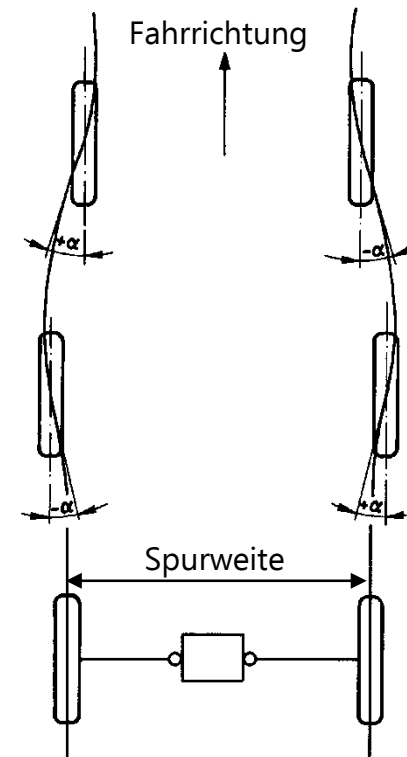
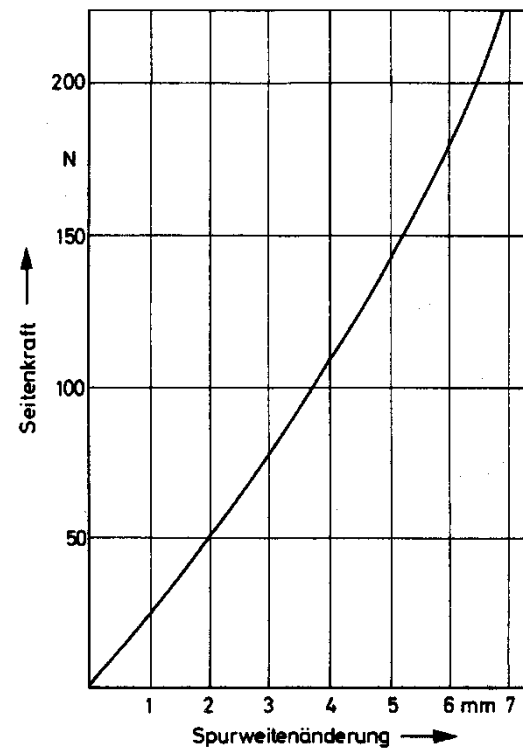


Achsen

Spurweite und Spurweitenänderung

Die Größe der Spurweite vorne und hinten hat einen maßgeblichen Einfluss auf das Kurvenverhalten des Fahrzeugs und seine Wankneigung.

Das Aus- und Einfedern der Räder hat bei fast allen Einzelradaufhängungen eine Spurweitenänderung zur Folge. Durch die Spurweitenänderung kann die Lage des Wankzentrums direkt bestimmt werden (wie im Folgenden gezeigt wird).



Ein großer Spurweite wird heute bei den meisten Pkw's angestrebt



Achsen

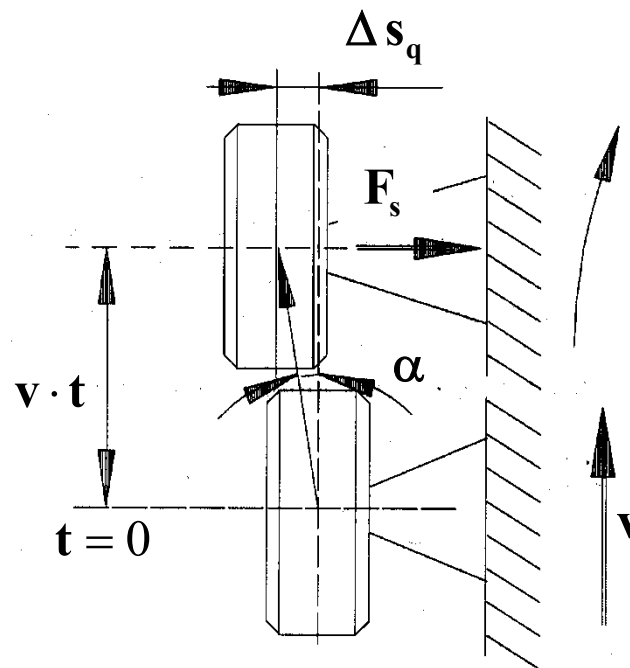
Spurweitenänderung

Querbewegung des Rades bei Spurweitenänderung:

Die Spurweitenänderungen beim Durchfedern führen bei unebener Fahrbahn zu Querbewegungen des Rades und damit zu Schräglaufwinkeln und Seitenkräften.

Folgen der Spurweitenänderungen sind:

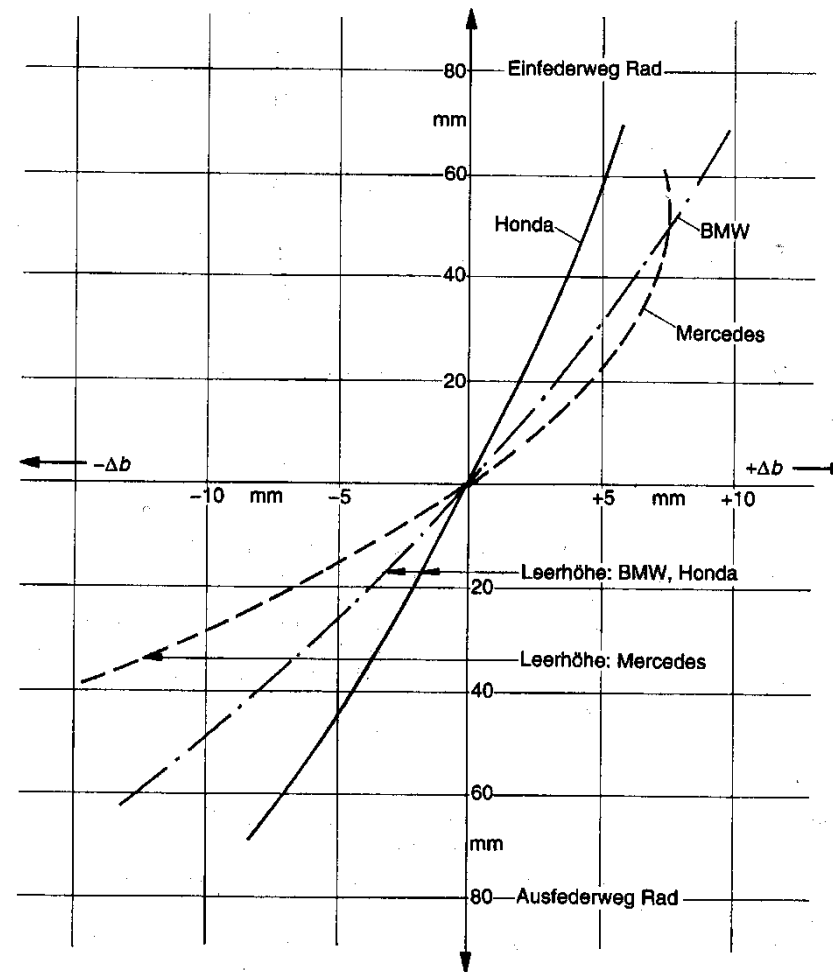
- Störung des Geradeauslaufs
- Reduzierung des Querkraftpotentials
- Erhöhter Reifenverschleiß



Δs_q :	Spurweitenänderung
F_s :	Seitenkraft
α :	Schräglaufwinkel
v :	Fahrgeschwindigkeit



Spurweitenänderung eines Rades bei Ein- und Ausfederung, gemessen an der angetriebenen Hinterachse der drei Fahrzeuge.

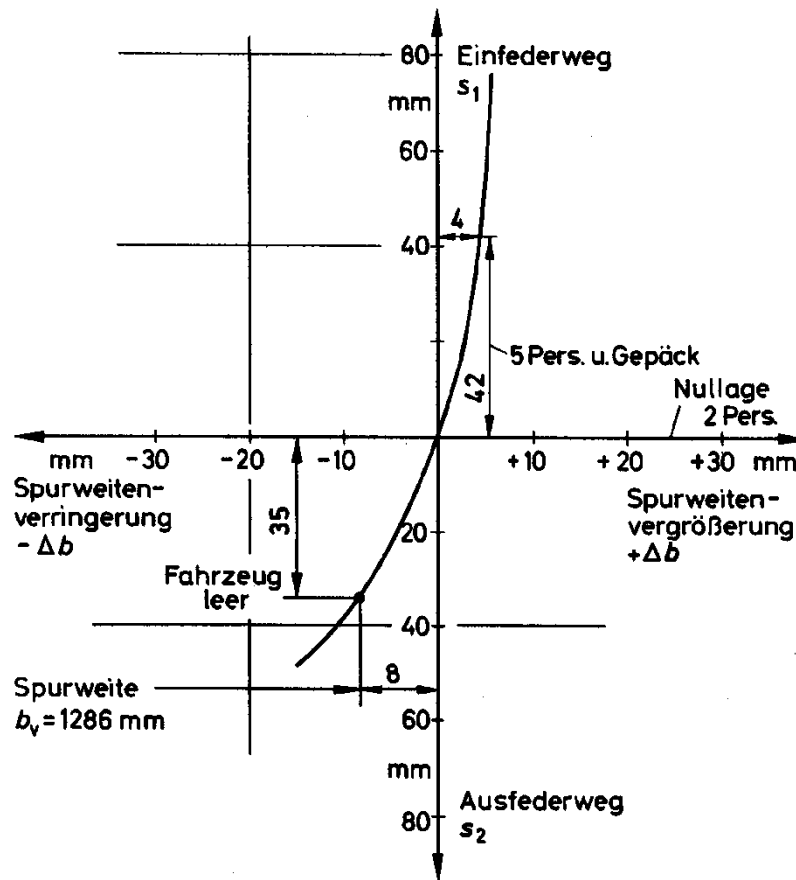




Achsen

Spurweitenänderung in Abhängigkeit der Beladung

Die zwischen den beiden Rädern einer Einzelradaufhängung vorhandene Spurweite (Vorder- bzw. Hinterachse) hängt vom Beladungszustand ab.



Die Konstruktionslage ist nicht allgemein festgelegt und entspricht in etwa einer mittleren, kundenüblichen Beladung.

Die Nulllage entspricht dem Konstruktionsgewicht (Fahrzeugleergewicht mit drei Personen zu je 68 kg).



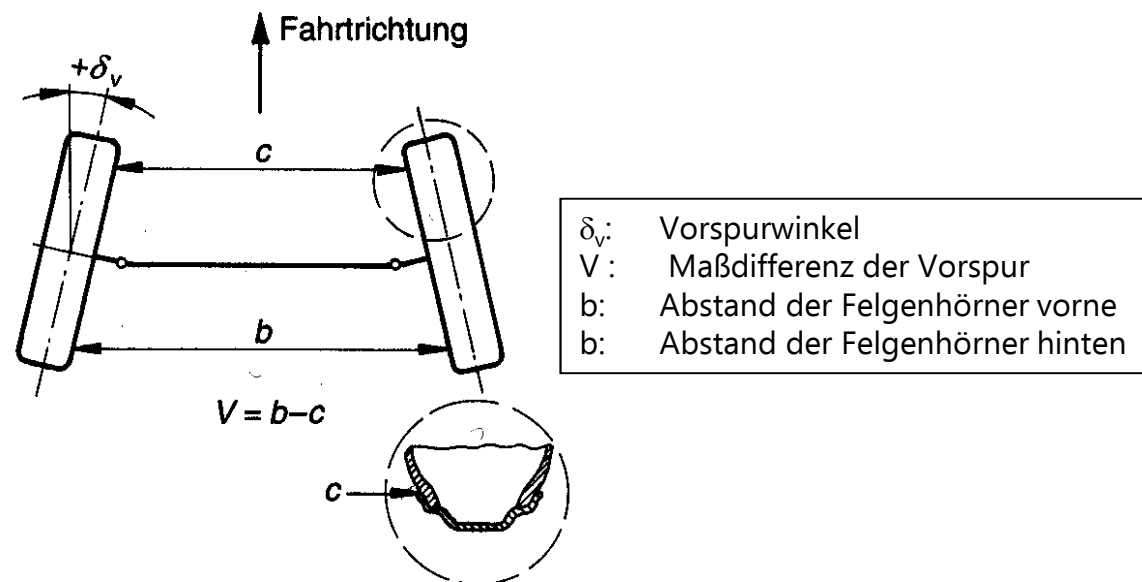
Achsen Kinematische Vorspur

Nach DIN 70000 ist der statische Vorspurwinkel δ_v der Winkel, der bei stehendem Fahrzeug zwischen Reifenmittelebene und Fahrzeuglängsachse einschließt.

Die Gesamtvorspurwinkel ergibt sich aus der Addition der Vorspurwinkel des rechten und des linken Rades.

Die Vorspur ist nach DIN 70020 die Maßdifferenz „ $V = b - c$ “, um die Felgenhörner hinten weiter auseinanderstehen als vorn.

Gemessen wird Vorspur in Höhe der Radmitten am stehenden Fahrzeug im Leerzustand, wenn sich die Räder in Geradeausstellung befinden.





Achsen Kinematische Spuränderung

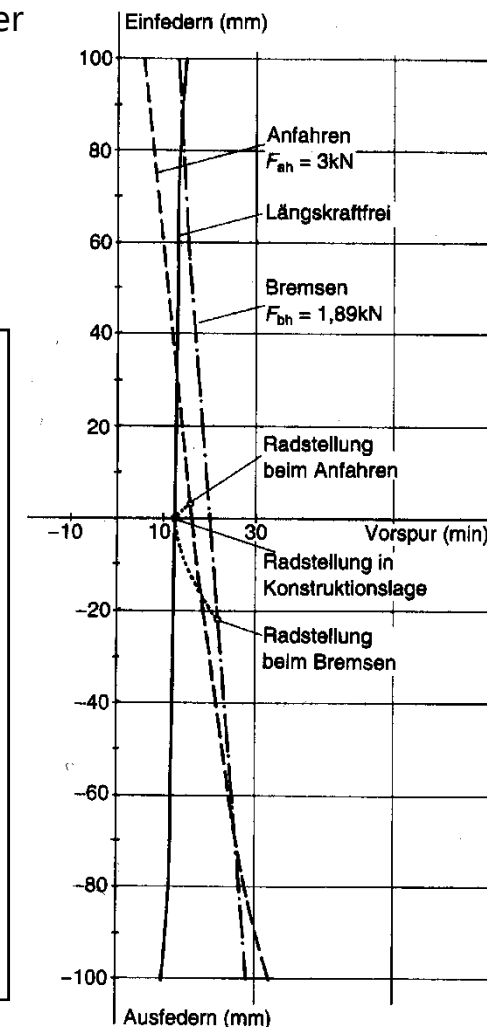
Die Vorspuränderung kann sich als Folge des Ein- und Ausfederns der Räder ändern. Letzteres kann die Folge einer unzureichenden Lenkkinematik sein oder aber gewollt herbeigeführt sein, um bestimmte Fahreigenschaften zu erreichen.

Z.B. kinematisches Rolluntersteuern, falls das elastokinematische Verhalten der Achse keinen Spielraum mehr hat.

Abbildung:
Kinematische Vorspuränderung eines Rades bei der
Raumlenker-Hinterachse der Mercedes-Benz-S-Klasse

Mit dargestellt ist das Verhalten des Rades bei einer in Radmitte eingeleiteten, konstanten Anfahrkraft von $F_a = 3 \text{ kN}$ und einer entgegengesetzt gerichtet, am Radaufstandspunkt angreifenden Bremskraft $F_b = 1.89 \text{ kN}$, alle ausgehend von der Konstruktionslage.

Beim Anfahr-Einfedern geht das Rad um $3'$ weiter in Vorspur und beim Bremsen-Ausfedern um $10'$.



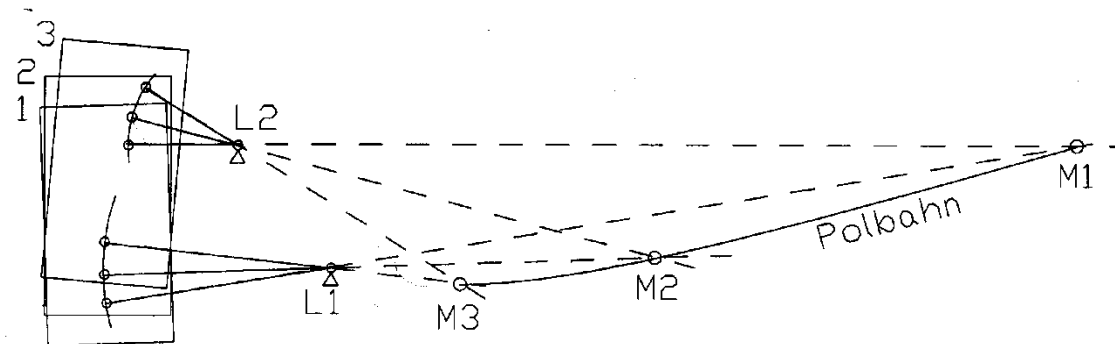


Achsen Momentanpole und Momentanachsen

Momentanpol:

Eine gedachte, auf der momentanen Bewegungsrichtung eines Punktes senkrechte Gerade zeigt zum Momentanpol. Mit den Bewegungsrichtungen zweier Punkte kann daher in der Ebene die Lage des Momentanpols bestimmt werden und aus dieser Lage die Momentanbewegung jedes anderen Punktes des Starrkörpers.

Bei Bewegung des Körpers kann sich der Momentanpol ebenfalls bewegen (mit der „Polwechselgeschwindigkeit“ entlang der „Polbahn“).



Momentanachse:

Bei räumlichen Gebilden läßt sich in jeder Schnittebene ein Momentanpol bestimmen. Die Gerade durch die einzelnen Pole ist die Momentanachse.

Nur die an einem Körper angreifende Kräfte, deren Wirkungslinie durch den Momentanpol geht, rufen kein Moment um ihn hervor. Alle anderen Kräfte erzeugen sowohl eine Reaktionskraft im Momentanpol als auch ein Moment um diesen.



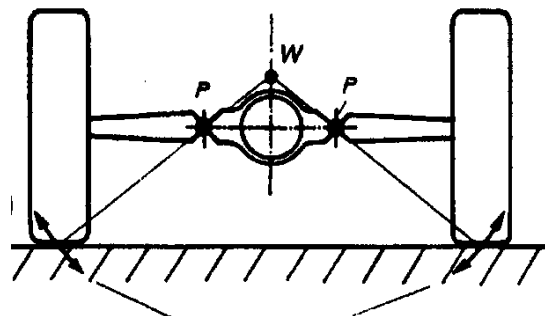
Achsen

Radpole

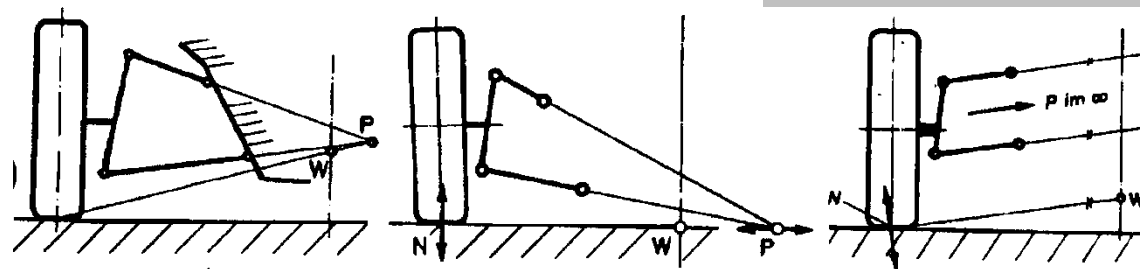
Querpol:

Der Rad-Querpol wird in der y-z-Ebene durch die Radmitte ermittelt. Er ist der Momentanpol des Rades bezogen auf den Aufbau.

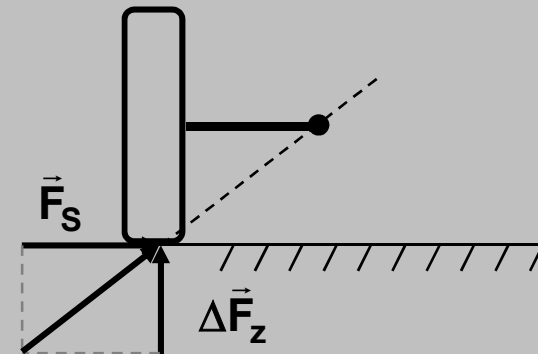
P:	Querpol
N:	Bewegungsrichtung der Räder



Bewegungsrichtung der Räder



Bei dieser Kraftsituation findet keine Federbewegung statt.



Die Lage des Querpol bestimmt die Spurweiten- und Sturzänderung beim Einfedern. Das *Wankzentrum W* ist der Drehpol des Aufbaus in der betrachteten Ebene bezogen auf die Fahrbahn.

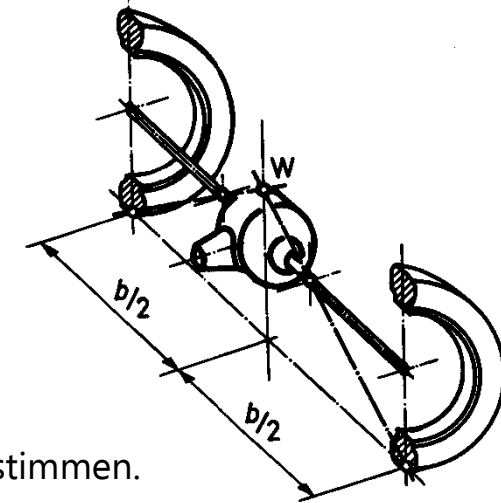


Achsen Wankzentren

Das Wankzentrum ist der Punkt, in der durch die Radmittelpunkte gehenden, senkrecht stehenden Querebene, in dem Querkkräfte (y-Richtung) auf die gefederte Masse - also den Aufbau - ausgeübt werden können, ohne dass kinematische Wankwinkel auftreten.

Das Wankzentrum liegt in Fahrzeugmitte (von vorn gesehen) und Mitte Achse in der Seitenansicht.

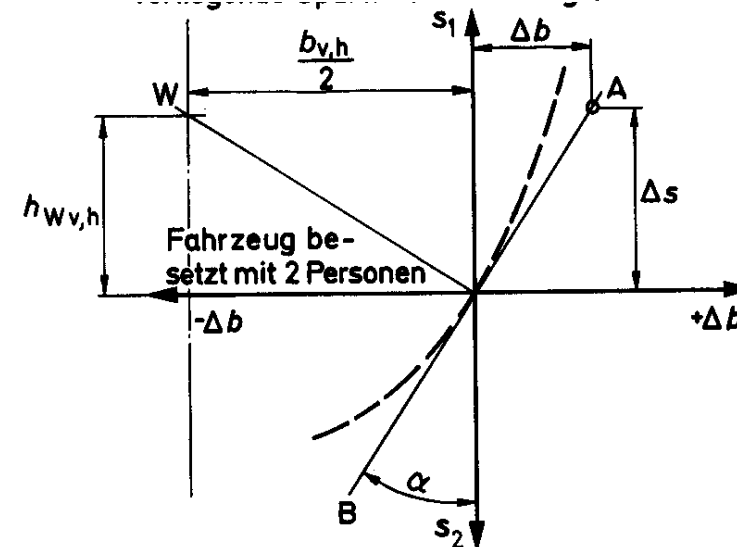
Aus der gemessenen Spurweitenänderungskurve eines Rades lässt sich die Höhe des Wankzentrums mit Hilfe einer bei dem jeweiligen Beladungszustand an die Kurve gelegten Tangente bestimmen.



$$h_{Wv} = \frac{\Delta b}{\Delta s} \cdot \frac{b_v}{2}$$

$$h_{Wh} = \frac{\Delta b}{\Delta s} \cdot \frac{b_h}{2}$$

$h_{Wv,h}$: Wankzentrumshöhe der Vorder-/Hinterachse
 b : Spurweite
 Δs : Strecke abgegriffen an der Tangente
 Δb : Strecke abgegriffen an der Tangente
 AB : Tangente im RAP an die Änderungskurve



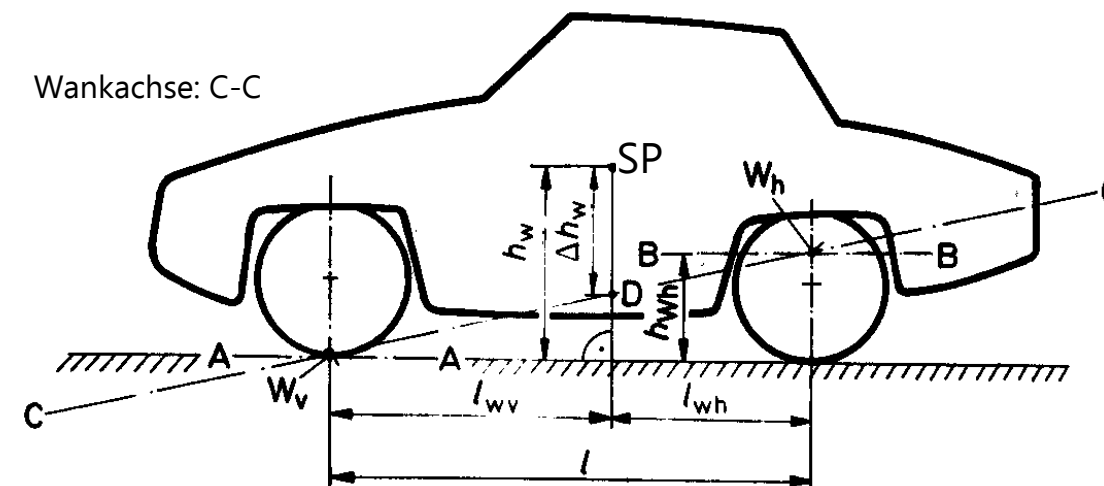


Achsen

Wankachse

Wankachse:

Die Verbindungslinie der Wankzentren vorn und hinten wird als theoretische Wankachse genannt



- W_v : Wankzentrum der Vorderachse
- W_h : Wankzentrum der Hinterachse
- h_w : Wankzentrumshöhe
- Δh_w : Strecke zwischen Wankachse und dem Aufbauschwerpunkt
- SP: Aufbauschwerpunkt
- l_v : Radstand der Vorderachse
- l_h : Radstand der Hinterachse
- l : Radstand

Hat der Pkw hinten eine Starrachse, ist die gezeigte Schräglage vorteilhaft; bei Einzelradaufhängungen vorn und hinten sollte die Wankachse nur wenig schräg liegen.

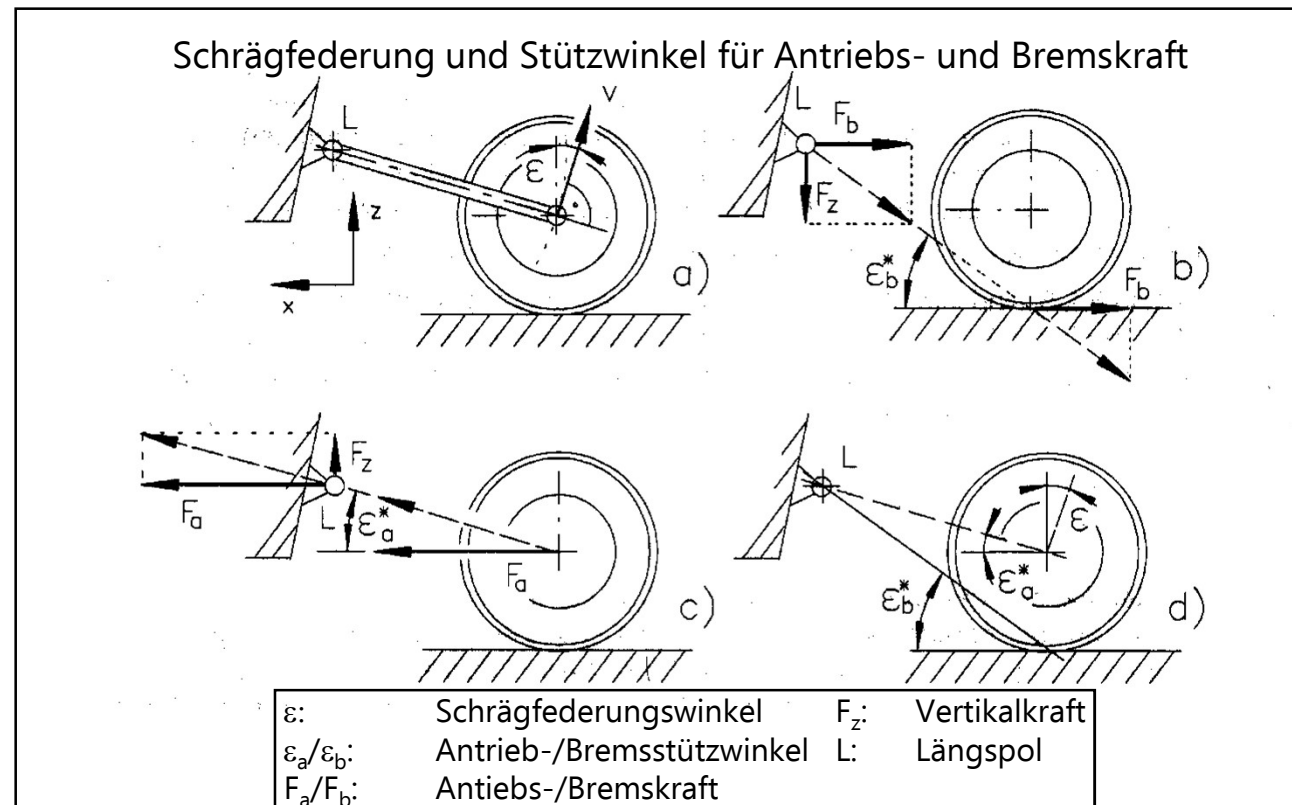


Achsen

Schrägfederung

Das Einfedern des Rades erfolgt in der Regel nicht senkrecht, sondern unter gewissen Winkeln.

Diese Schrägfederung ermöglicht dem Rad ein „Ausweichen“ bei Längsstößen (s. „a“ in Abb.), was dem Abrollkomfort dient. Bei seiner Bewegung dreht sich der Radträger um den Längspol.



Wenn die Wirkungsrichtung einer Längskraft am Radträger (Brems- oder Antriebskraft) nicht durch den Längspol geht, so erzeugt sie ein Moment um diesen. Im Pol entsteht eine Hochkraft, die den Aufbau anhebt oder absenkt.



Achsen

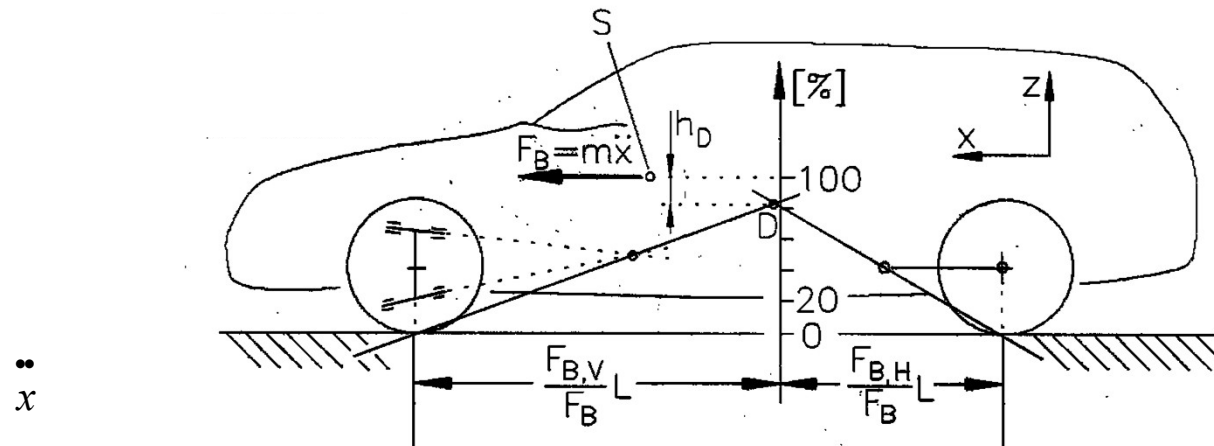
Nickzentrum

Nickachse:

Die Nickachse ist diejenige Achse, um die das Fahrzeug beim Bremsen bzw. Beschleunigen nickt.

Nickzentrum:

Das Nickzentrum ist der Momentanpol des Fahrzeugaufbaus gegenüber der Fahrbahn, der in der Seitenansicht (xz-Ebene) als Schnittpunkt der Geraden durch die Radaufstandspunkte und Längspole von Vorder- und Hinterrad oder Vorder- und Hinterachse ermittelt werden kann.



D:	Nickzentrum	m:	Fahrzeugmasse	F_B :	Bremskraft
S:	Schwerpunkt	:	Beschleunigung	$F_{B,V}$:	Bremskraftanteil der Vorderachse
L:	Radstand	h_D :	Abstand D-S	$F_{B,H}$:	Bremskraftanteil der Hinterachse

Am Gesamtfahrzeug ist der Grad der Bremsnickreduzierung abhängig von der Bremskraftverteilung. In der obigen Abbildung wird der Radstand entsprechend der Bremskraftverteilung geteilt und an dieser Stelle eine Senkrechte errichtet. Die Strahlen von den Radaufstandspunkten durch die Längspole teilen diese Senkrechte im Verhältnis des Nickausgleichs der jeweiligen Achse.

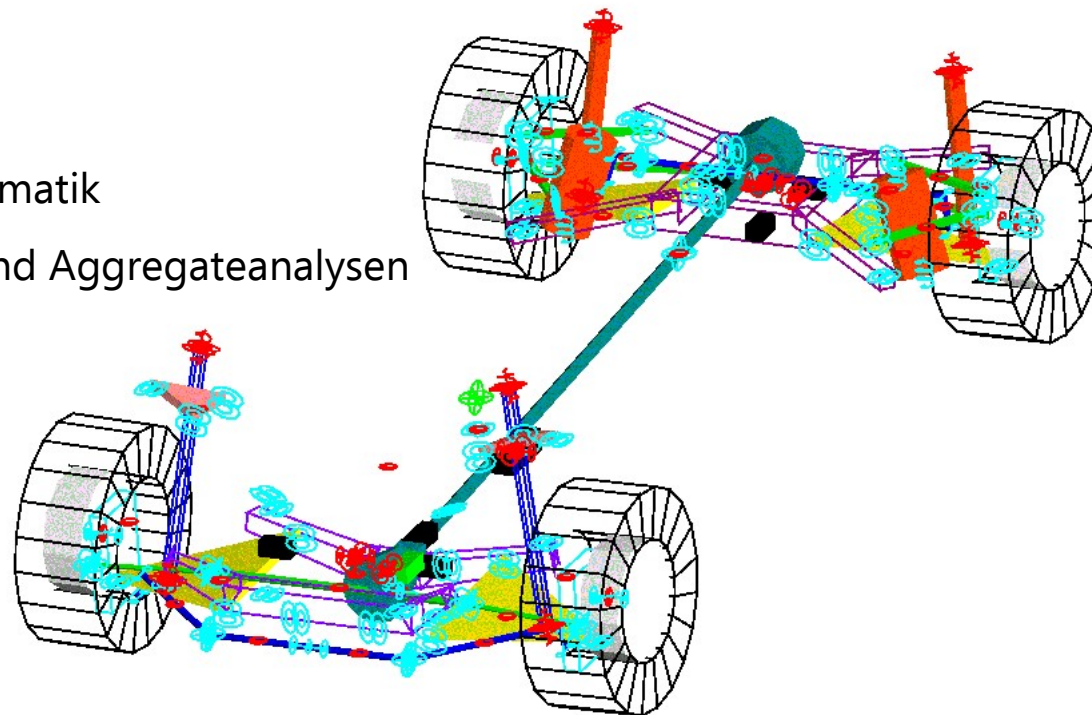


Achsen

Analyse der Achse

Entwicklungsaufgaben

- Federung
- Kinematik
- Elastokinematik
- Bauteil- und Aggregateanalysen



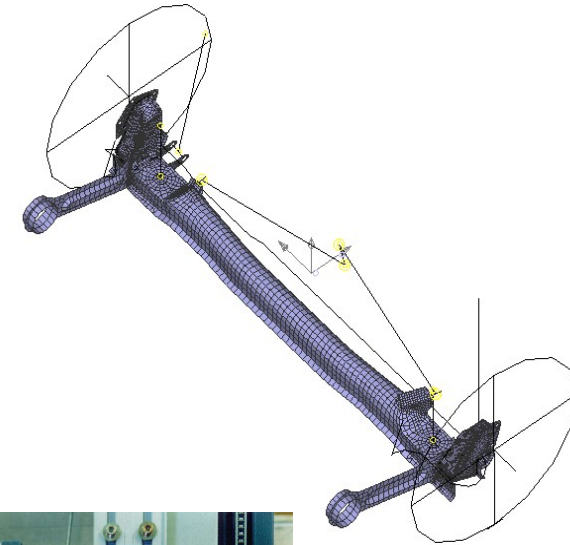
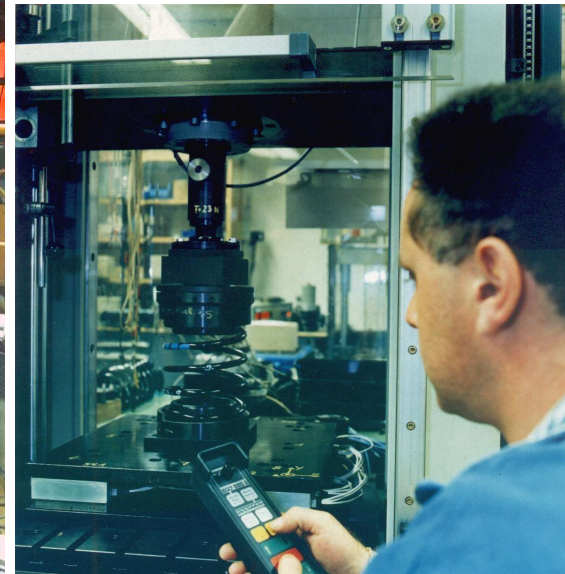
Die für die Berechnung notwendige Achsdaten werden mittels verschiedener Methoden gewonnen. Dabei arbeitet das Simulationsmodell sowohl mit gemessenen als auch mit gerechneten Daten.



Achsen

Analyse der Achse

- Entwicklungswerkzeuge:
 - Berechnungsmodelle
 - Fahrdynamikprüfstände
 - Komponentenprüfstände





Achsen

Analyse der Achse

Entwicklung der Achse	Berechnungs- methode	Prüfstands- messung
Federungs- Analyse	FE-Modell: ABAQUS NASTRAN ANSYS MKS-Modell: ADAMS SIMPACK VL-Motion	Fahrzeug- Federung Bauteil-Federung
Kinematik- Analyse	MKS-Modell: Krim VL-Motion SIMPACK	Kinematikmessung
Elastokinematik- Analyse	FE-Modell: ABAQUS NASTRAN ANSYS MKS-Modell: ADAMS SIMPACK VL-Motion	Elastokinematikmessung



Achsen

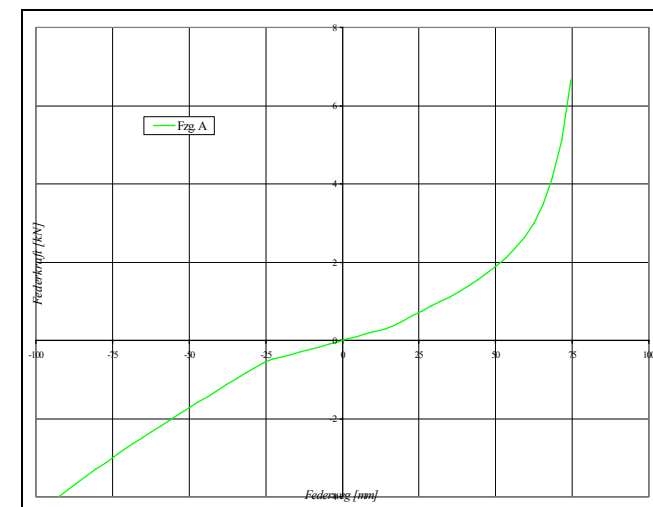
Federung: Allgemein

Die Abhängigkeit der Radlast in Vertikalrichtung vom Federweg wird Federkennlinie genannt.

Für die Fahrdynamiksimulation werden die Federkennlinie in der Regel nicht in einzelne Bauteile, sondern am kompletten Fahrzeug vermessen.

Die sich ergebende Federkennlinie gibt somit das Zusammenwirken von Federn und den, bei größerem Federweg eingreifenden, Gummipuffern und ggf. Zuganschlagfedern wieder. Weiterhin wird das elastische Verhalten der verschiedenen Gummilager in der Federkennlinie mit berücksichtigt.

Konstruktive Details wie z.B. die Einbaulage der Feder, sowie deren Eigensteifheit oder die Punkte der Federkrafteinleitung in die Lenker werden damit i.d.R. für die Fahrdynamiksimulation nicht benötigt.

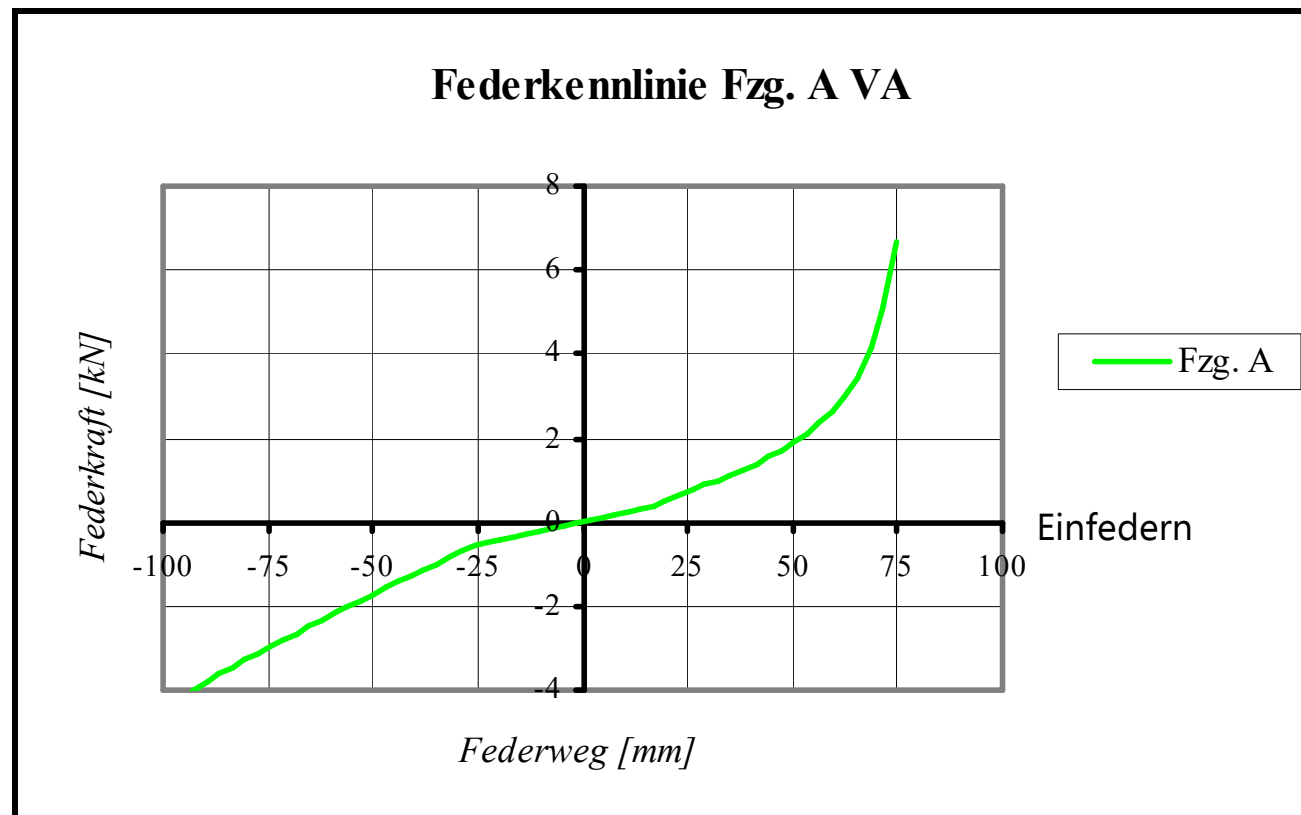




Achsen

Federung: Allgemein

Kraft/Weg-Zusammenhang für gleichseitiges Einfedern



Deutlich erkennt man hier das lineare Verhalten der Feder bei Federwegen +/- 25 mm. Der stark progressive Anstieg der Federkraft bei stärkerem Einfedern ist durch das Einsetzen der Gummipuffer bedingt.



Achsen

Federung: Prüfstandsmessungen

Die Federmessung ist ein Teil der sogenannten FKE-Vermessung (Federn/Kinematik/Elastokinematik). Hier wird das Federungsverhalten der Vorder- und Hinterachse bestimmt. Wichtig dabei ist, daß damit das Verhalten des kompletten Fahrzeugs beschrieben wird.





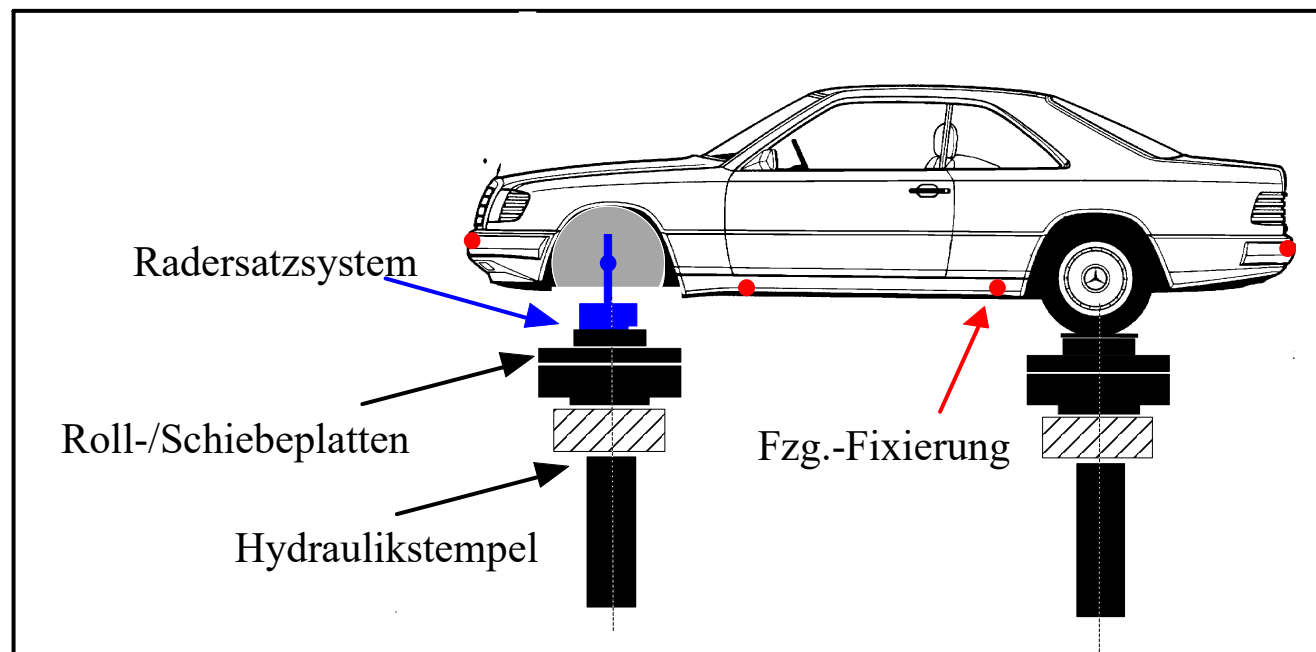
Achsen

Federung: Prüfstandsmessungen

Meßaufbau und -ablauf:

Zuerst wird die Karosserie fixiert, indem sie an den 4 Wagenheberpunkten und jeweils zwei mal an den vorderen und hinteren Querträgern verspannt wird. Vorder- und Hinterachse werden nacheinander vermessen.

Federprüfstand





Achsen

Federung: Prüfstandsmessungen

Messablauf am Beispiel von gleichseiter Federung:

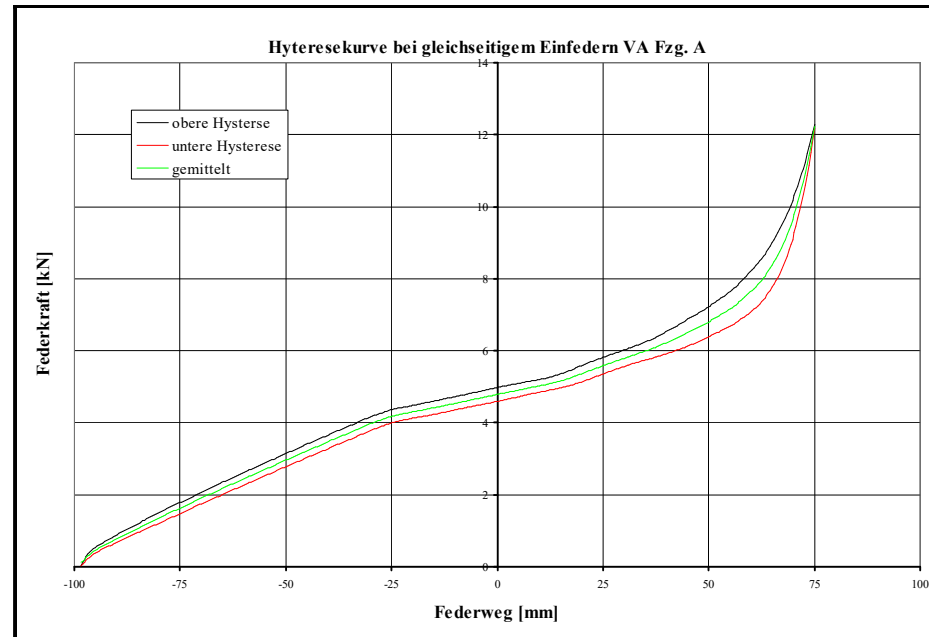
1. Bei der zu vermessenden Achse wird das Rad durch ein Radersatzsystem substituiert. Damit wird die, für die Federmessung verfälschende, radiale Eigensteifheit der Anordnung Rad/Reifen entfernt.
2. Jedes Rad bzw. Radersatzsystem steht bei der Messung auf einer Schlittenkonstruktion, welche wiederum auf einem Hydraulikstempel montiert ist. Die Schlittenkonstruktion erlaubt es dem Radersatzsystem sich frei in x- und y-Richtung, sowie um die z-Achse zu bewegen. Somit werden verfälschende Umfangs- und Seitenkräfte sowie Momente um die Radhochachse ausgeschlossen.
3. Anfangs wird die Konstruktionslage (KO-Lage) des Fahrzeugs eingestellt, indem die zwei Räder (nicht vermessene Achse) und die 2 Radersatzsysteme (zu vermessende Achse) durch die vier von unten an die Räder angreifende Hydraulikstempel eingefedert werden.
4. Mit einem Laser wird der Abstand zwischen dem Stempel und einem Funktionsmaß (Maß mit geringer Toleranz, z.B. Anschraubpunkte der Achse an die Karosserie) gemessen und nach einer Beladungstabelle eingestellt.
5. Zur Bestimmung des Federungsverhalten fährt nun der Master-Zylinder (linke Seite der zu vermessenden Achse) einen definierten Weg x nach oben und der Slave-Zylinder (rechte Seite) folgt mit maximal 1mm Verzögerung (gleichseitiges Einfedern) Währenddessen wird kontinuierlich die resultierende Kraft an beiden Zylinder gemessen.



Achsen

Federung: Prüfstandsmessungen

6. Von der KO-Lage heraus werden die Hydraulikstempel bis zur max. Einfederung der Achse ausgefahren, dann fahren die Stempel wieder ein bis zur KO-Lage und weiter bis zur max. Ausfederung, und wieder zurück in KO-Lage.
7. Da sich für die verschiedene Phasen der Messung unterschiedliche Kraft/Weg-verläufe einstellen spricht man von einer Meßhysterese:



Eine weitere Messung ist das wechselseitige Einfedern. Der Meßverlauf entspricht dem oben beschriebenen gleichseitigen Einfedern, nur daß sich Master- und Slave-Zylinder genau entgegengesetzt bewegen.

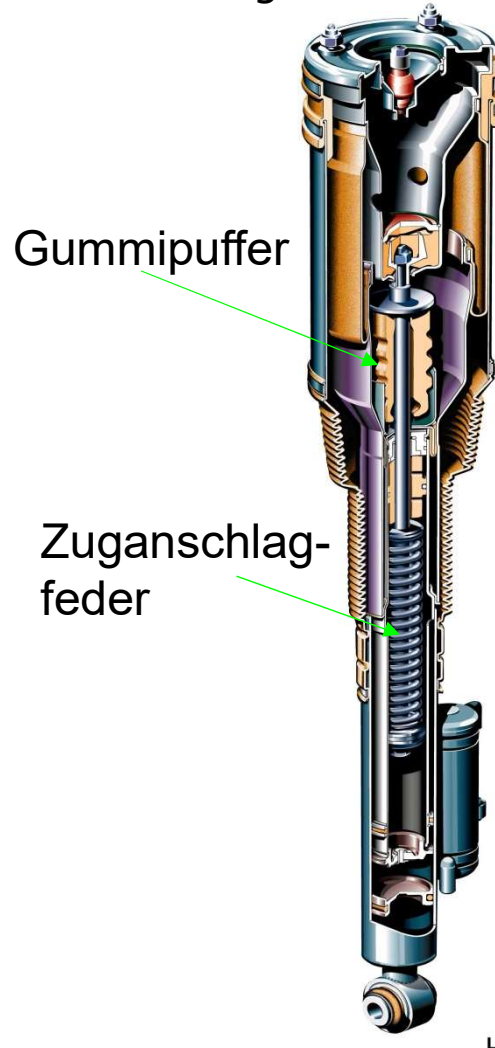
Werden die Ergebnisse dieser Messung mit denen aus dem gleichseitigen Einfedern verrechnet, so erhält man die Drehstabfederhärte.



Achsen

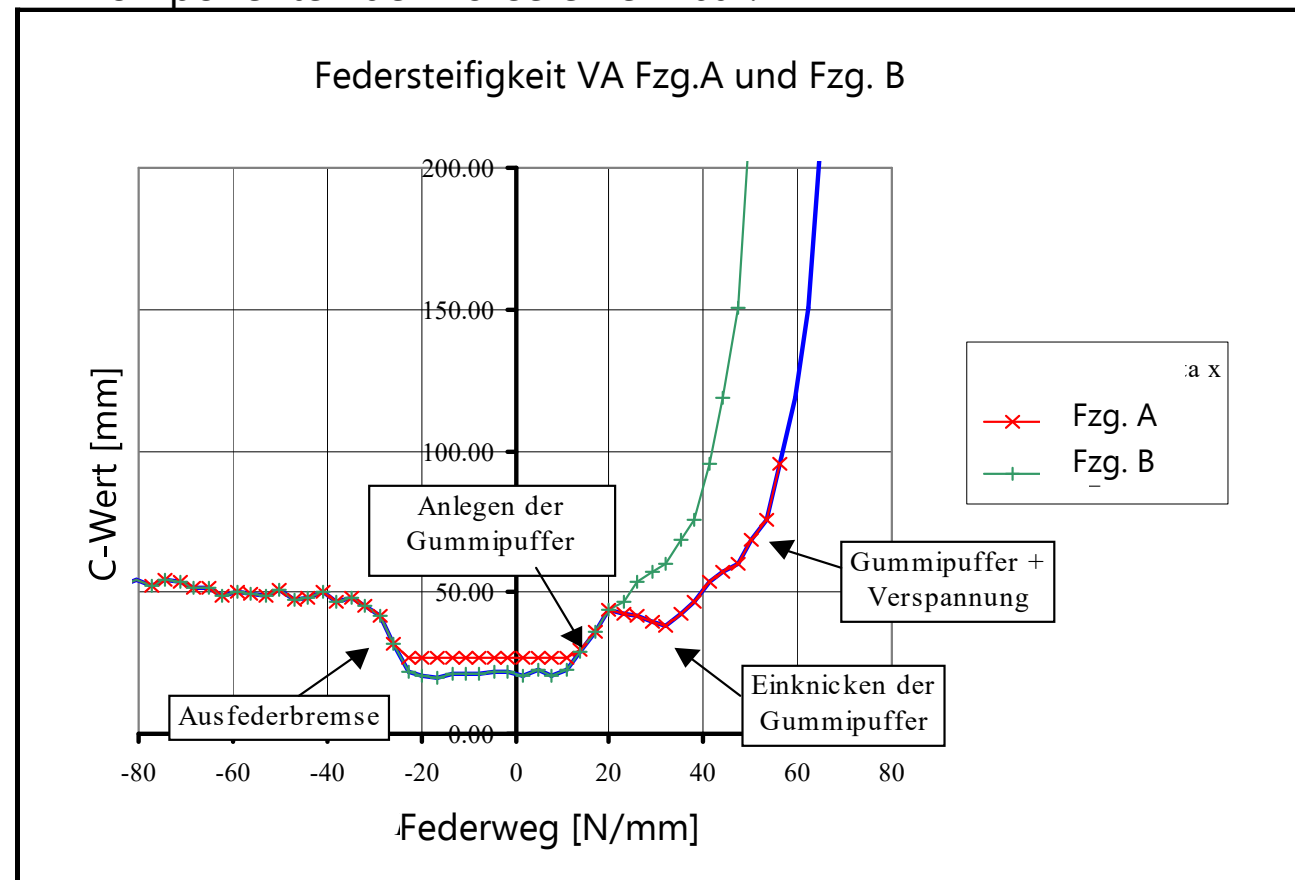
Federung: Prüfstandsmessungen

Luftfederung S-Klasse-HA



Leitet man nun beim gleichseitigen Einfedern die Federkraft nach dem Federweg ab, so erhält man die Federsteifigkeit der Achse in Abhängigkeit vom Federweg.

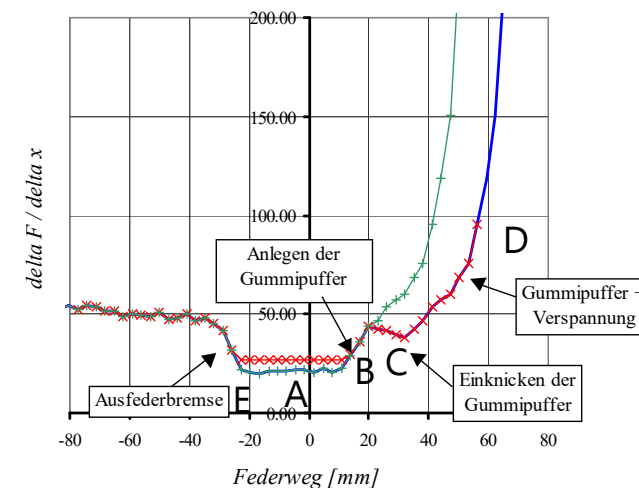
In dieser Darstellung sind die einzelnen federnden Komponenten der Achse erkennbar:





Achsen Federung: Prüfstandsmessungen

- A: Die konstante Steifigkeit um die KO-Lage gibt das Verhalten der eingebauten Schraubenfeder wieder.
- B: Ab Einfederwegen von ca. 15mm beginnen die Gummipuffer zu wirken, und die Steifigkeit steigt an.
- C: Bei einem Federweg von ca. 30mm fällt die Steifigkeit leicht ab. Dies kann mit der zunehmenden Verformung der Gummipuffer erklärt werden, die dabei etwas einknicken können.
- D: Bei noch größeren Federwegen steift die Steifigkeit stark progressiv an. Dies ist zum einen damit zu erklären, daß die Gummipuffer in diesem Gebiet voll anliegen, zum anderen tritt auch eine Verspannung der Lenklager ein. Damit stimmt die Bewegungsrichtung der Lenker nicht mehr mit der aus der Gummikinematik vorgegebenen Richtung überein. Jede Bewegung braucht daher noch mehr Kraft, die Steifigkeit der Achse steigt.
- E: Beim Ausfedern wirkt bei Federwegen ab ca. 20mm die Ausfederbremse, damit steigt die Federsteifigkeit auf ca. den doppelten Wert des linearen Bereiches an, und bleibt dann konstant.



Zusammenfassung:

Charakteristische Messgrößen:

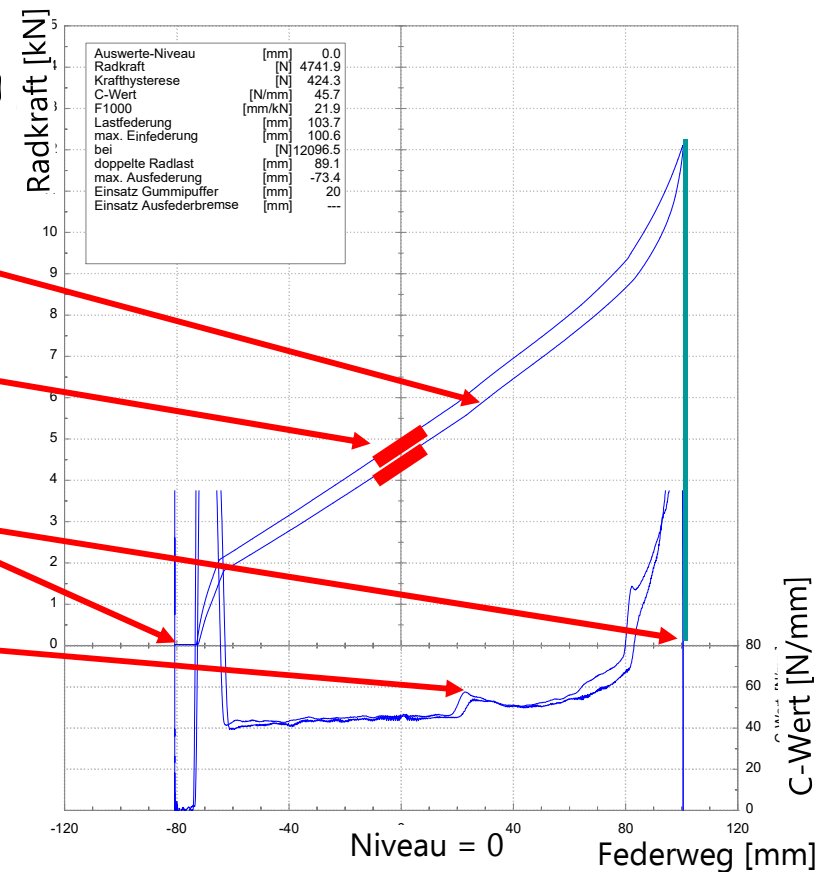
- ⇒ Maximale Ein- und Ausfederung
- ⇒ Gummipuffer- und Zuganschlagfedereinsatz
- ⇒ Federsteifigkeit der Achse (gleichseitig, wechselseitig)
- ⇒ Achsreibung, Hysterese

Achsreibung,
Hysterese

Federsteifigkeit
der Achse

Maximale Ein- und
Ausfederwege

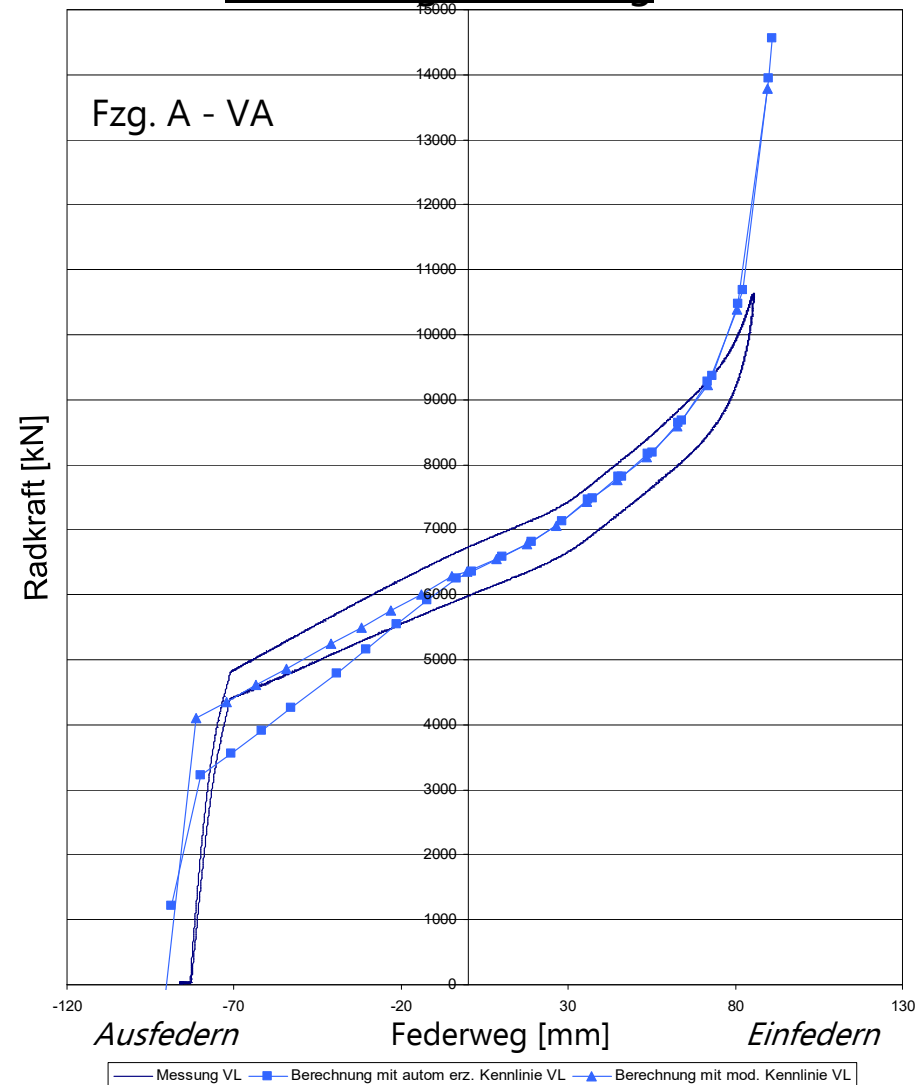
Puffereinsatz





Achsen Federung: Anwendungs-Beispiel „Luftfeder“

Gleichseitige Federung

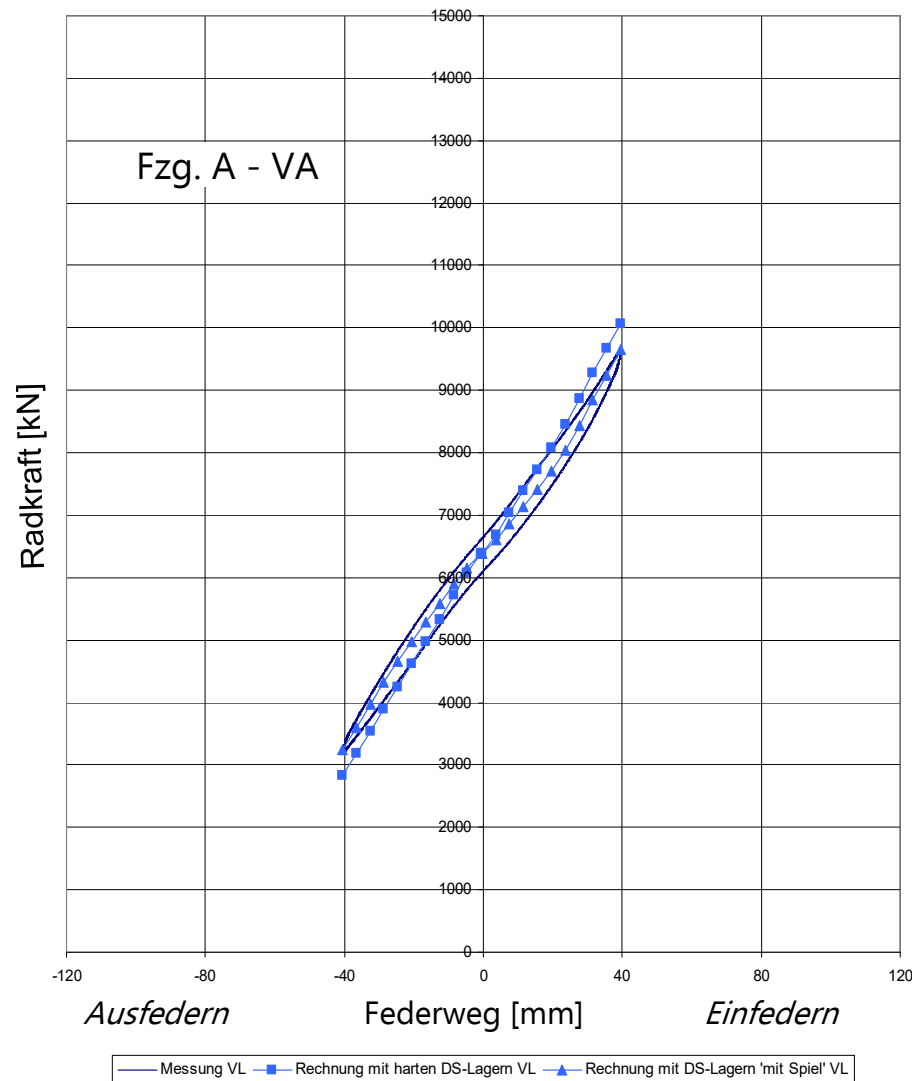




Achsen

Federung: Anwendungs-Beispiel „Luftfeder“

Wechelseitige Federung





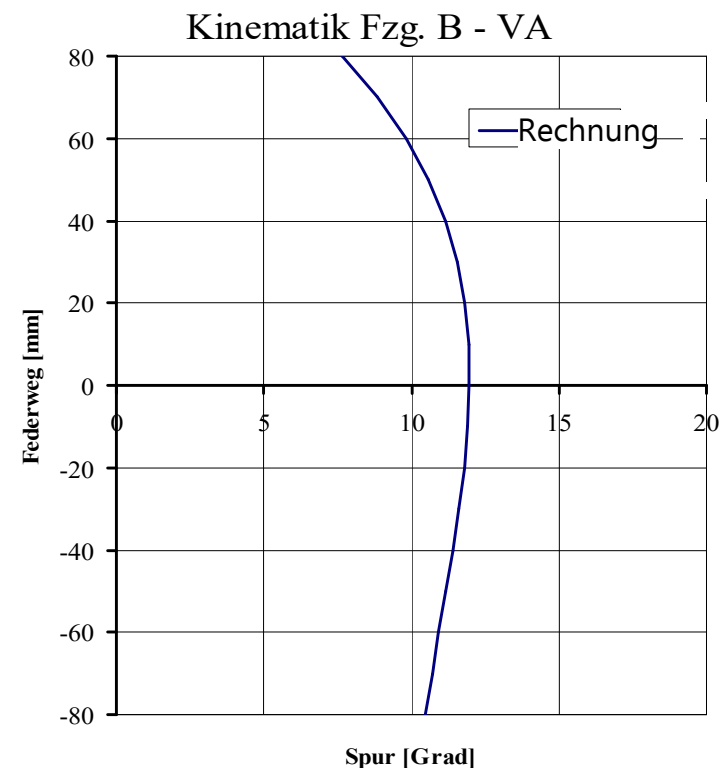
Achsen

Kinematik: Allgemein

Anwendungsgebiet des Kinematikfelds:

- Abstimmung der Spurwinkeländerung zur Optimierung des Fahrverhaltens (Rollsteuern) und des Reifenverschleißes
- Ermittlung der Momentanzentren und der Nickpole zur Optimierung des Wank- und Nickverhaltens

Die Kinematik des Fahrzeuges kann gerechnet oder gemessen werden:





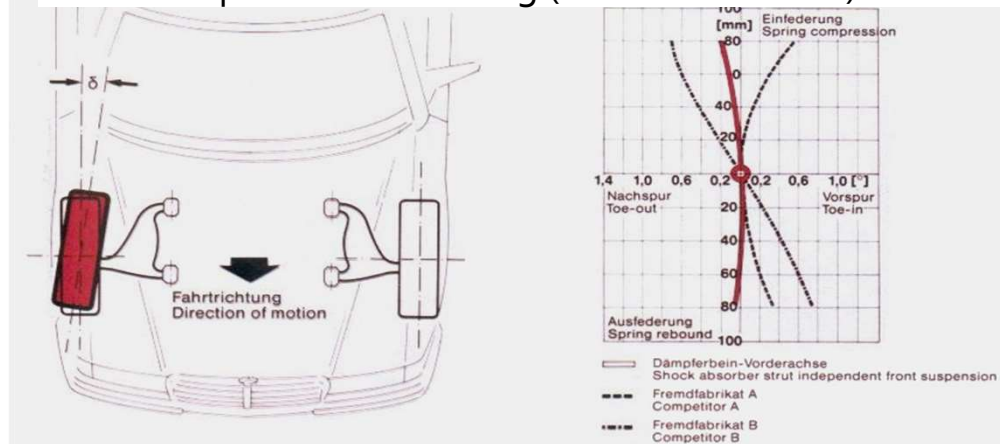
Achsen

Kinematik: Allgemein

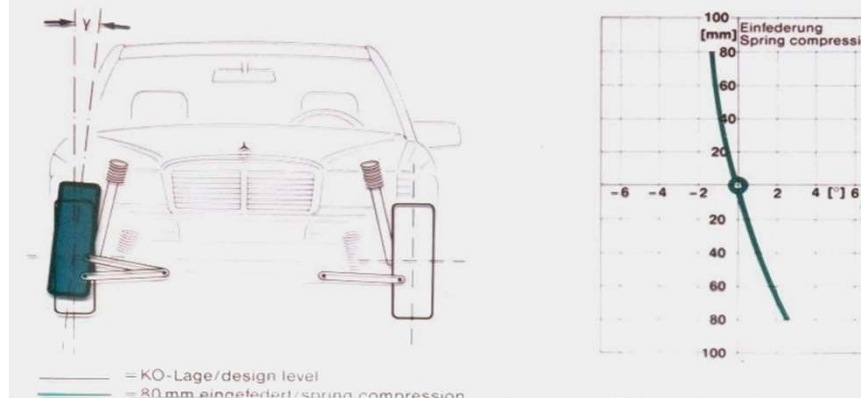
Ermittlung der Änderung von:

- Spur, Sturz- und Nachlaufwinkel
- Spurweite
- Schrägfederung

Spurwinkeländerung (Frontantrieb-VA)



Sturzwinkeländerung (Frontantrieb- VA)





Achsen

Kinematik: Berechnung

Die Rechnung folgt dabei der Lehrbuchdefinition von Kinematik:

"Kinematik ist die Lehre von der geometrischen und analytischen Beschreibung der Bewegungszustände von Punkten und Körpern. Sie berücksichtigt nicht die Kräfte und Momente als Ursache der Bewegung"

Bei der Kinematikrechnung werden die Koordinaten der Anlenkpunkte von Lenkern und Spurstange aus dem Konstruktionsplot von Fahrgestell und Radträger in das Berechnungsprogramm eingegeben. Damit wird eine kinematische Kette gemäß mit dem Freiheitsgrad $f=1$ gebildet. In Abhängigkeit dieses Freiheitsgrades (dem Federweg) können dann die davon abhängigen Größen z.B. Momentanzentrums-höhe, der Brems- und Anfahrnickausgleich kinematische Sturzwinkel und der kinematische Vorspurwinkel berechnet werden.

Federweg	MZH/0.5* Spurweite	Bremsnick- ausgleich	Anfahrnick- ausgleich	Kin. Spurw.	Kin. Sturzw.
-120	0.3041	0.0245	-0.0478	-0.4678	-0.4890
-110	0.2895	0.0140	-0.0332	-0.2773	-0.3076
-100	0.2736	0.0048	-0.0213	-0.1343	-0.1749
. . .					
-10	0.1149	-0.0555	0.0355	0.1725	-0.3634
0	0.0981	-0.0612	0.0391	0.1662	-0.5004
10	0.0814	-0.0669	0.0425	0.1601	-0.6567
. . .					
100	-0.0552	-0.1194	0.0643	0.3758	-3.0995
110	-0.0675	-0.1257	0.0659	0.4571	-3.5090
120	-0.0788	-0.1321	0.0675	0.5555	-3.9535

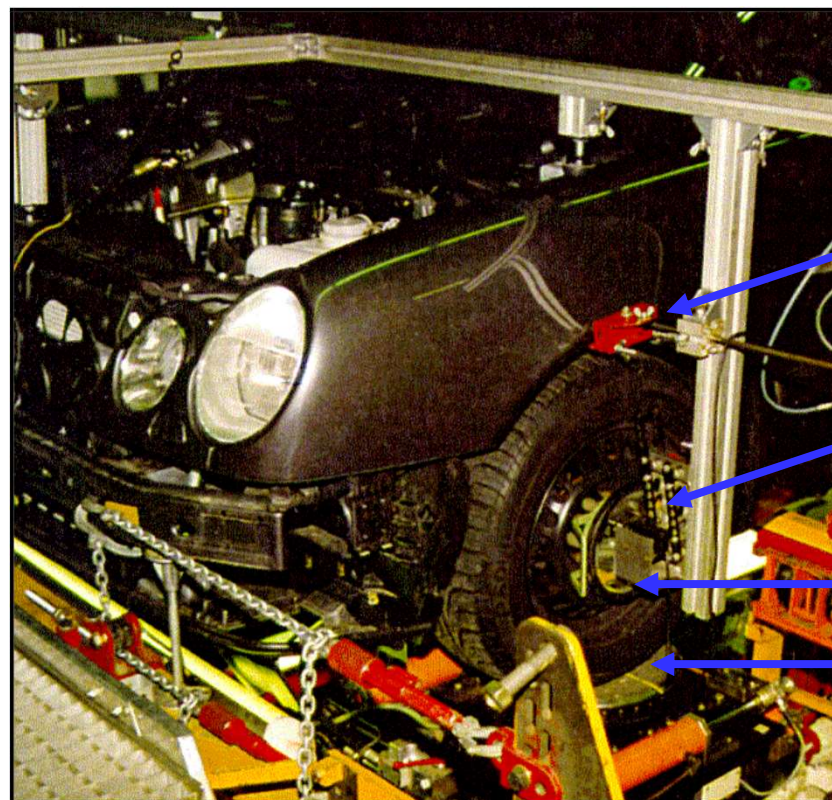


Achsen

Kinematik: Prüfstandsmessungen

Meßaufbau und -ablauf:

1. Das Fahrzeug wird verspannt und mittels Hydraulikzylinder belastet, so daß sich die KO-Lage einstellt.
2. Bei der Messung werden von der KO-Lage ausgehend beide Hydraulikstempel der zu messenden Achse bis zur maximalen Einfederung der Achse ausgefahren, dann fahren die Stempel wieder ein bis zur KO-Lage und weiter bis zur maximalen Ausfederung, und wieder zurück in KO-Lage.
3. Bei diesem gleichseitigem Durchfedern erhält man eine Hystereseschleife bei der die Vorspuränderung des Rades über dem Federweg aufgetragen ist.



Fahrzeugfeste
Arritierung

Abtastparallelogramm

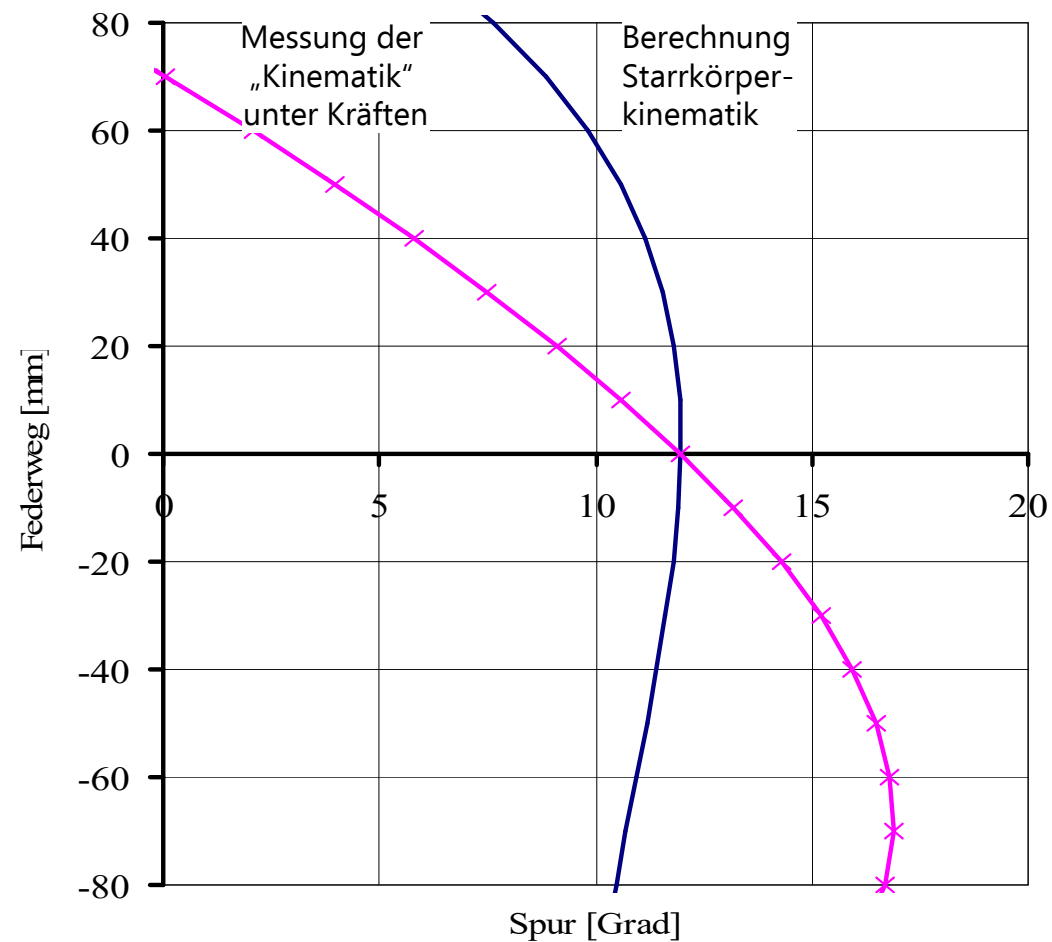
Spiegelplatte

Roll-/Schiebeplatte



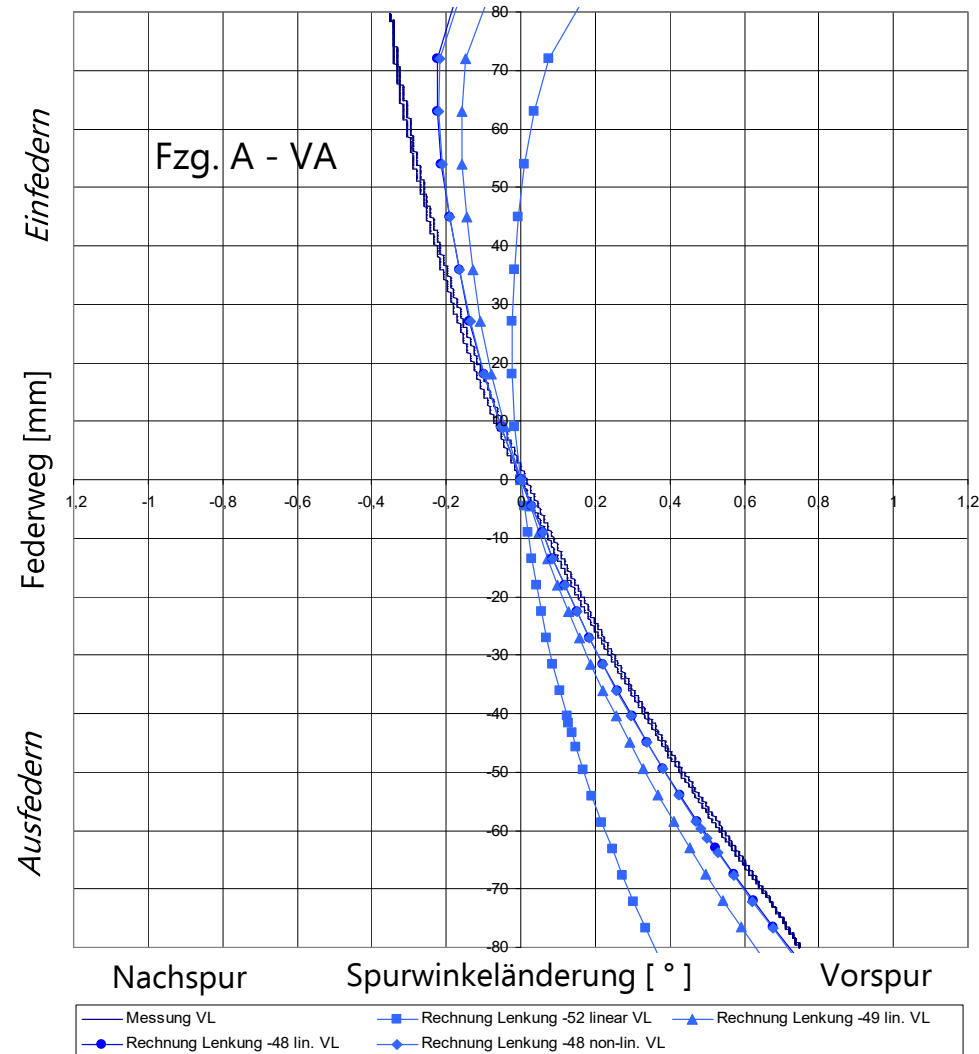
Achsen Kinematik: Messung und Berechnung

Kinematik Fzg. A -VA



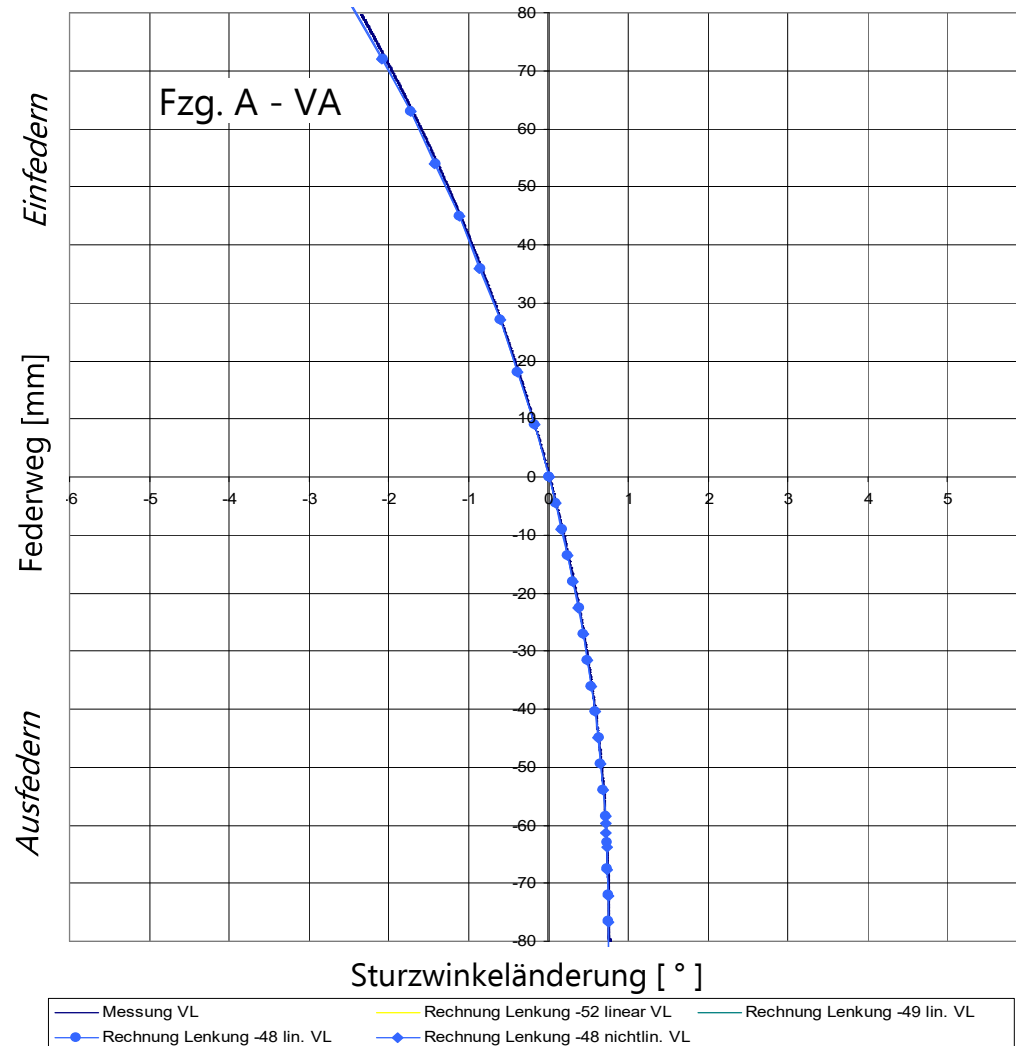


Gleichseitige Kinematik - Spurwinkeländerung



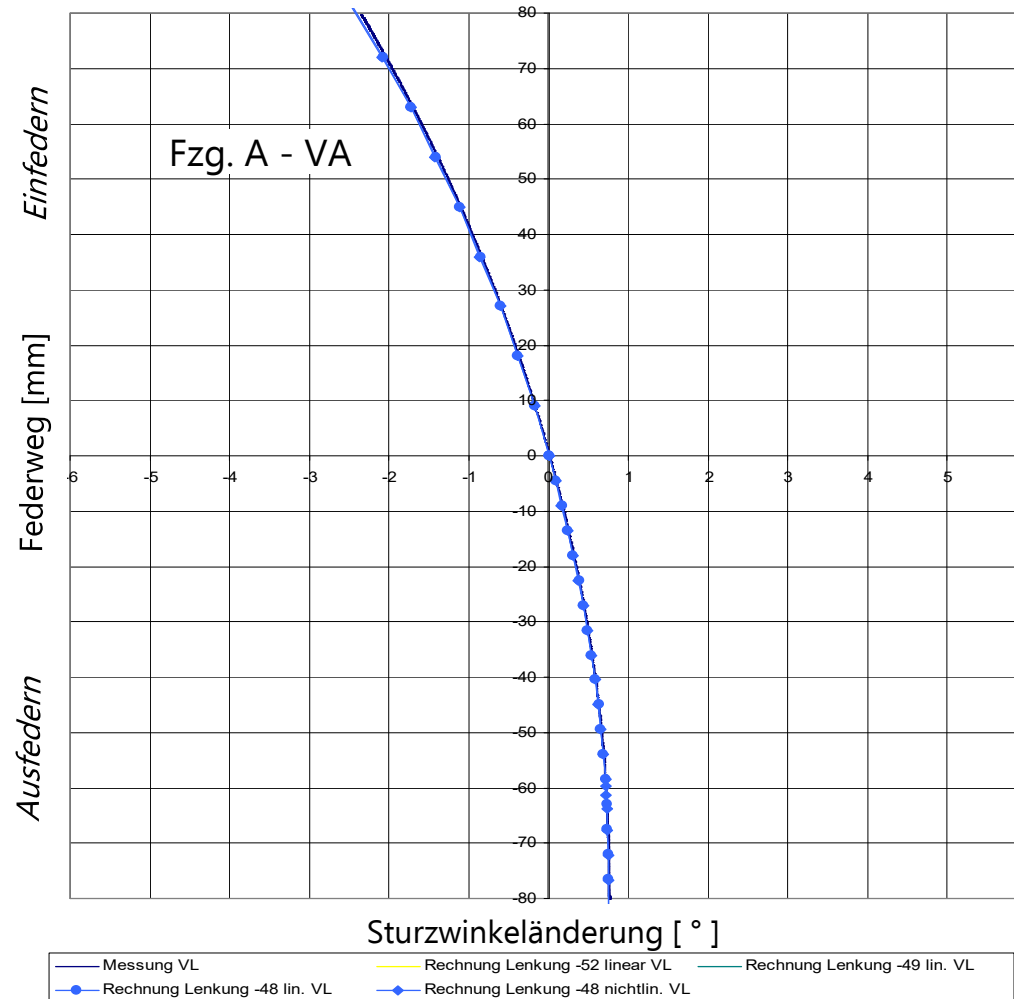


Gleichseitige Kinematik - Sturzänderung





Wechselseitige Kinematik – Spurwinkeländerung





Achsen

Elastokinetik: Allgemein

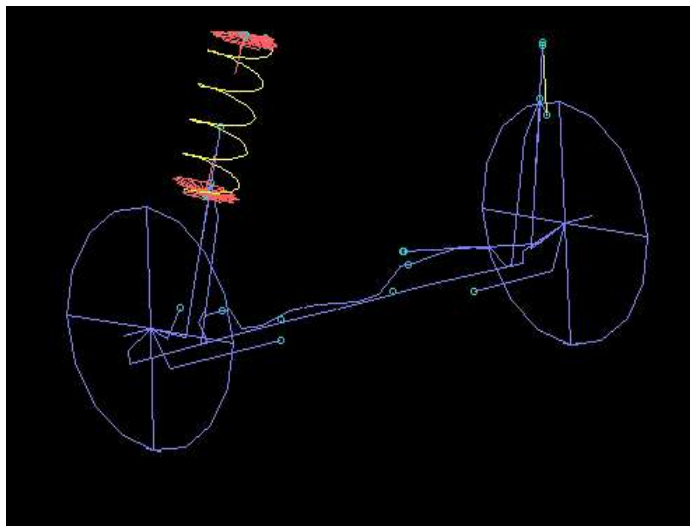
Werden Kräfte und Momente von der Fahrbahn, über den Reifen, in die Radaufhängung eingeleitet, so ändert sich die Stellung des Rades gegenüber der Straße. Dieser, durch Elastizitäten in der Radaufhängung hervorgerufener Effekt bezeichnet man als Elastokinetik.

Für die Fahrdynamik ist hierbei insbesondere die Vorspuränderung aufgrund von Seitenkräften und aufgrund von Momenten um die Hochachse interessant.

Weiterführend wird auch die Auswirkung einer Umfangskraft auf die Vorspur der Elastokinetik zugeordnet.

Anwendungsgebiete des Elastokinetikkennfelds:

- Abstimmung des Fahrverhaltens am Gesamtfahrzeug
- Optimierung von Elastomerlagern im Gesamtfahrzeug



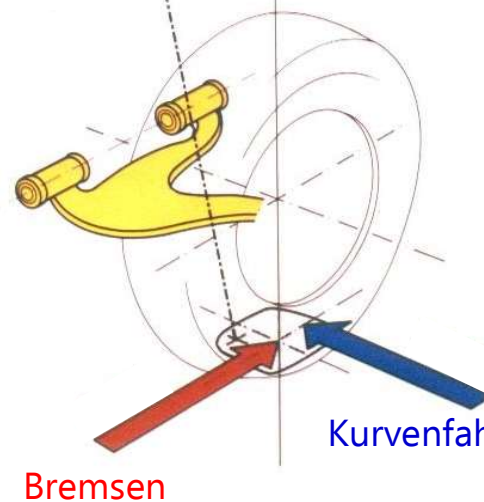


Achsen Elastokinematik: Allgemein

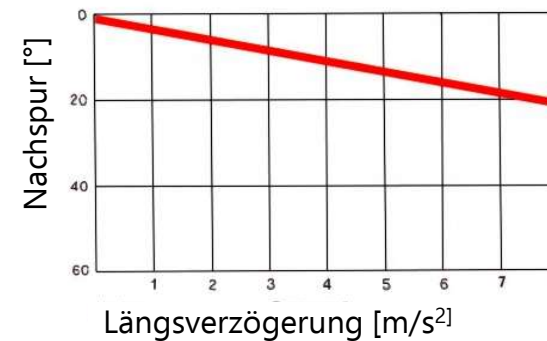
Ermittlung der Änderung von:

- Spurwinkeländerung
- Sturzwinkeländerung

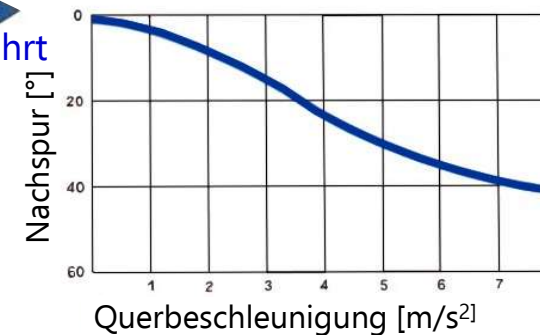
Elastokinematische
Lenkachse



Bremsen: Spurwinkeländerung



Kurvenfahrt: Spurwinkeländerung





Achsen

Elastokinetik: Berechnung

