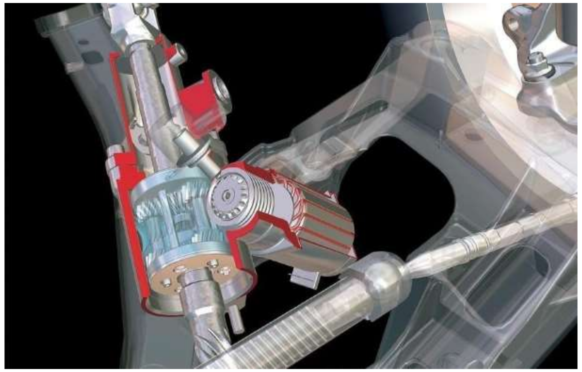
Fahrzeugregelung
Fahrverhalten und Stabilitätsregelung

Prof. Dr.-Ing. Steffen Müller
M.Sc. Osama Al-Saidi
Fachgebiet Kraftfahrzeuge • Technische Universität Berlin

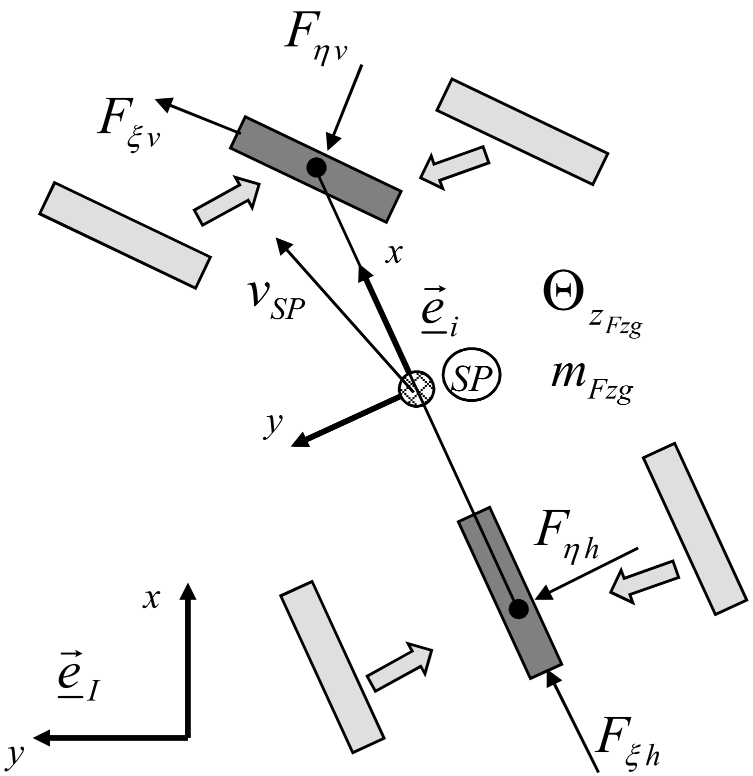
Einleitung
Anforderungen an das Fahrverhalten

Das **Fahrverhalten** ist die **Reaktion des Fahrzeuges** auf das **Lenken** des Fahrers, auf das **Beschleunigen und Verzögern** über Gas- und Bremspedal **während der Kurvenfahrt** und auf **äußere Störungen**.

Das Fahrzeug sollte hierbei

- **leicht kontrollierbar** sein (Fahrer nicht überfordern)
- den Fahrer **bei Störungen nicht überraschen**
- die **Fahrgrenzen deutlich erkennen** lassen
- das **Fahrverhalten** bei unterschiedlichen Randbedingungen, z.B. bei anderer Beladung, Bereifung, … **nicht verändern**

Analyse des Fahrverhaltens
Das Einspurmodell



Vereinfachungen:

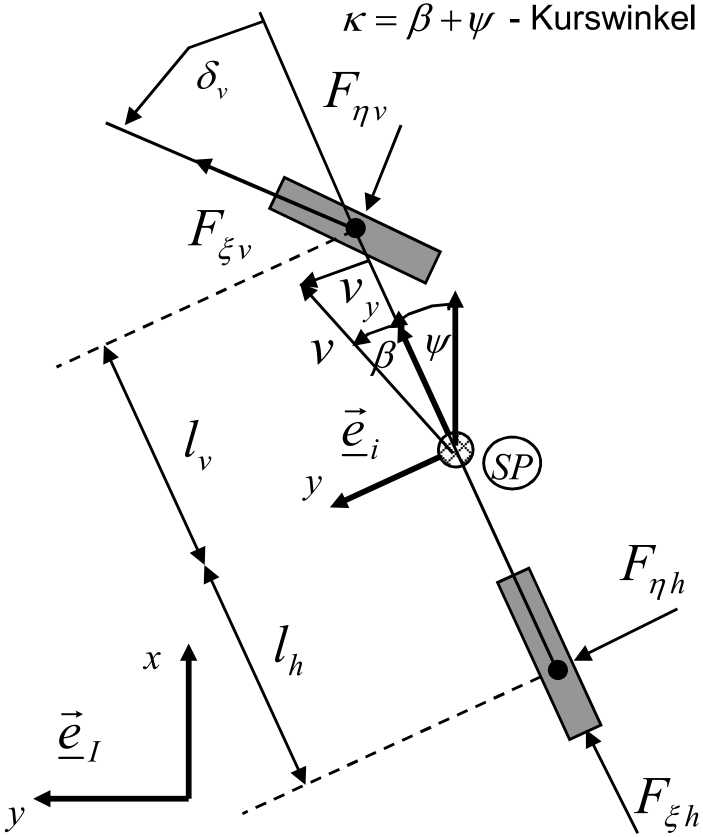
- Fahrzeugschwerpunkt liegt auf Fahrbahnhöhe
- Räder einer Achse werden zu einem masselosen Ersatzrad zusammengefasst
- Aufbaubeschleunigungen vernachlässigt
- Aerodynamik vernachlässigt
- Kreiseleffekte vernachlässigt
- Bohrmomente vernachlässigt
- Lenkungssteifigkeit vernachlässigt
- konstante Fahrzeuggeschwindigkeit

Analyse des Fahrverhaltens
Lineare BDGL des Einspurmodells

ψ - Gierwinkel

β - Schwimmwinkel

$\kappa = \beta + \psi$ - Kurswinkel



Die nichtlin. Bewegungsgleichung lautet zunächst

$$m\dot{v}_y + m v \dot{\psi} = F_{\eta v} \overset{1}{\cancel{\cos\delta_v}} + F_{\eta h} + F_{\xi v} \overset{0}{\cancel{\sin\delta_v}}$$

$$J_z \ddot{\psi} = F_{\xi v} l_v \underset{0}{\cancel{\sin\delta_v}} + F_{\eta v} l_v \underset{1}{\cancel{\cos\delta_v}} - F_{\eta h} l_h$$

Mit

$$v_y = v \sin\beta \approx v\beta \quad \Rightarrow m\dot{v}_y = m v \dot{\beta}$$

folgt für kleine δv

$$m v \left(\dot{\beta} + \dot{\psi}\right) = F_{\eta v} + F_{\eta h}$$

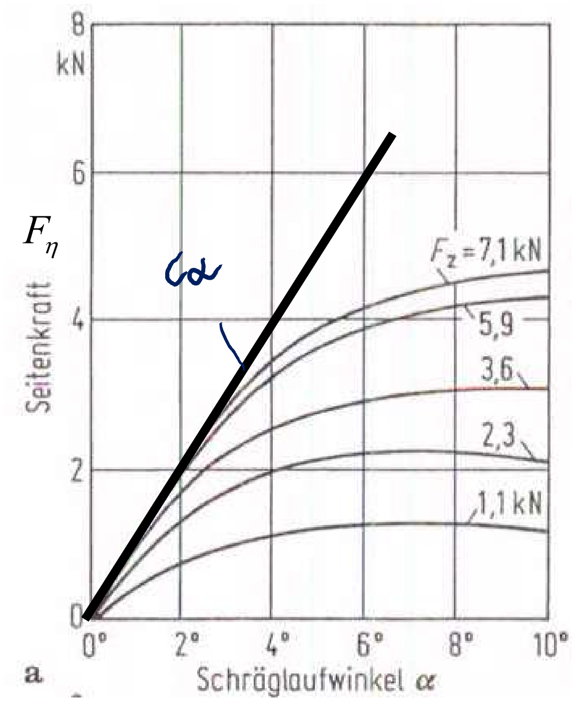
$$J_z \ddot{\psi} = F_{\eta v} l_v - F_{\eta h} l_h$$

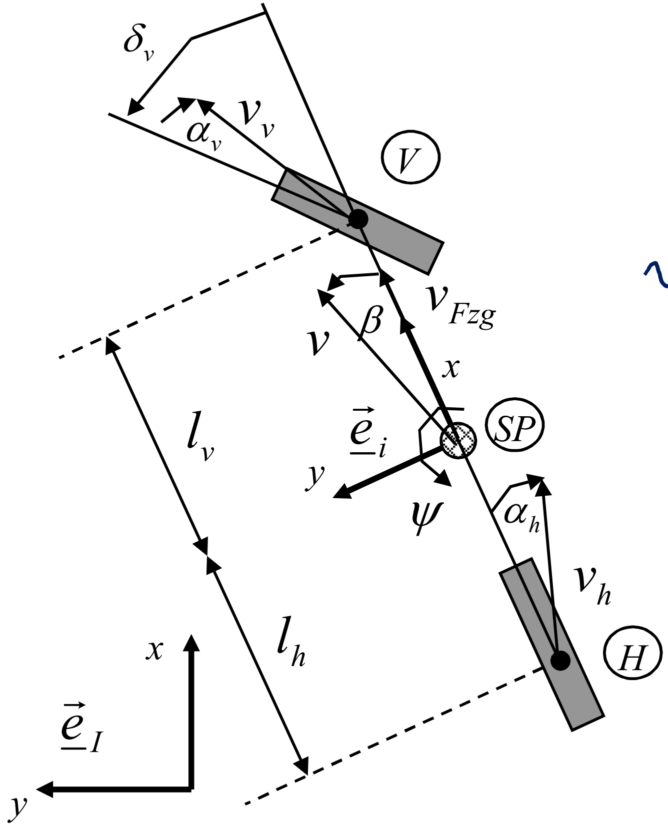
Analyse des Fahrverhaltens
Lineare BDGL des Einspurmodells

Linearisierung der Seitenkräfte und kinematischen Beziehungen

$$F_{\eta v} = c_{\alpha v}\alpha_v$$

$$F_{\eta h} = c_{\alpha h}\alpha_h$$





v-Komponenten in x_i-Richtung

$$v\cos\beta = v_h\cos\alpha_h$$

$$v\cos\beta = v_v\cos(\delta_v - \alpha_v)$$

v-Komponenten in y_i-Richtung

$$v_h\sin\alpha_h = l_h\dot{\psi} - v\sin\beta$$

$$v_v\sin(\delta_v - \alpha_v) = l_v\dot{\psi} + v\sin\beta$$

Für kleine Winkel ergibt sich dann

$$\alpha_h = -\beta + l_h\frac{\dot{\psi}}{v}$$

$$\alpha_v = -\beta + \delta_v - l_v\frac{\dot{\psi}}{v}$$

Analyse des Fahrverhaltens
Lineare BDGL des Einspurmodells

Die lineare BDGL des Einspurmodells lautet dann

$$m v \dot{\beta} + \left(c_{\alpha v} + c_{\alpha h}\right)\beta + \left(m v^2 + \left(c_{\alpha h} l_h - c_{\alpha v} l_v\right)\right)\frac{\dot{\psi}}{v} = c_{\alpha v}\frac{\delta_L}{i_L} \qquad (1)$$

$$J_z \ddot{\psi} - \left(c_{\alpha h} l_h - c_{\alpha v} l_v\right)\beta + \left(c_{\alpha v} l_v^2 + c_{\alpha h} l_h^2\right)\frac{\dot{\psi}}{v} = c_{\alpha v} l_v \frac{\delta_L}{i_L} \qquad (2)$$

mit

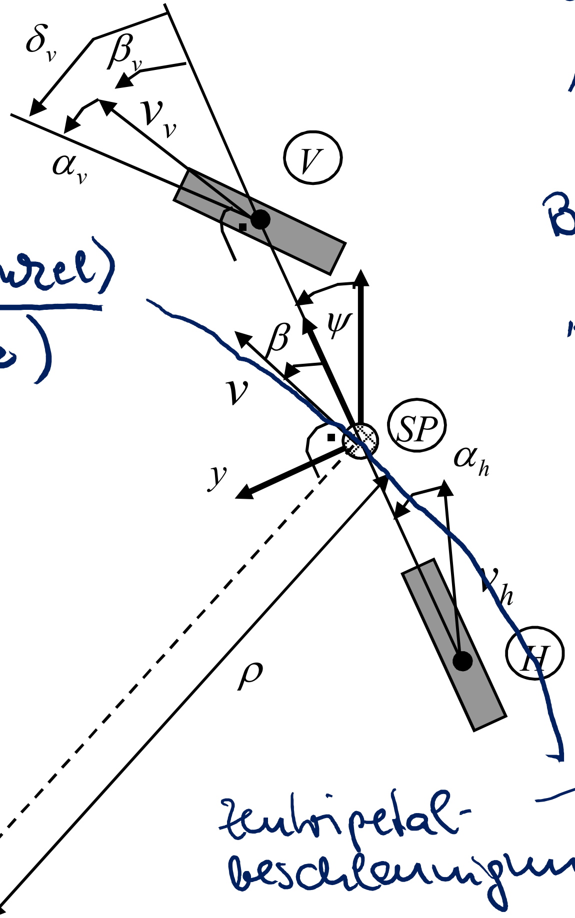
$$\delta_L = i_L \delta_v$$

Stationäre Kreisfahrt
Maximale Zentripetalbeschleunigung

Def. Krümmung

$$\frac{1}{\rho} = \frac{d(\text{Neigungswinkel})}{d(\text{Wegstück})} = \frac{d(\psi+\beta)}{ds}$$

$$\frac{ds}{dt} = v$$



Zentripetal-
beschleunigung

Es gilt somit

$$v = \rho \frac{d(\psi+\beta)}{dt} = \rho(\dot\psi+\dot\beta)$$

Bei stationärer Kreisfahrt ist $\dot\beta = \ddot\psi = 0$

$$\Rightarrow v = \rho\dot\psi \quad \text{bzw.} \quad \dot\psi = \frac{v}{\rho}$$

Somit folgt aus der DGL des ESM

$$\frac{\cancel{m} v^2}{\rho} = F_{\eta v} + F_{\eta h} = \mu_{\eta v} N_{\zeta v} + \mu_{\eta h} N_{\zeta h}$$

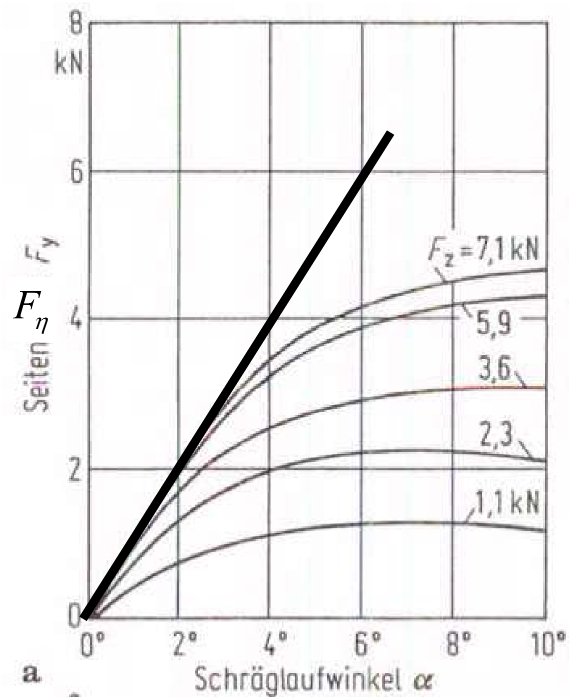
$$\leq \mu_{max} \underbrace{(N_{\zeta v} + N_{\zeta h})}_{\cancel{m} g}$$

$$\frac{v^2}{\rho}\frac{1}{g} \leq \mu_{max} \begin{cases} \sim 1{,}1 & \text{trocken} \\ \sim 0{,}15 & \text{vereist} \end{cases}$$

Stationäre Kreisfahrt
Zentripetalbeschleunigung von Durchschnittsfahrern

Hinweise aus der Fachliteratur

- „85% der Fahrer bleiben bei trockener Bundesstraße unter 0.45g, bei nasser unter 0.34g“
- „Durchschnittsfahrer erreichen nur in 0.2% der Strecke 0.3g“
- „Bei ρ=100m war μ_η<0.35, für ρ>300m war μ_η<0.2“



Lineares Einspurmodell gilt bis etwa

$$F_{\eta max} = \mu_{\eta max} N_\xi \le \frac{1}{2} \mu_{max} N_\xi$$

Bei trockener Fahrbahn i

Stationäre Kreisfahrt
Lenkradeinschlag - Eigenlenkverhalten

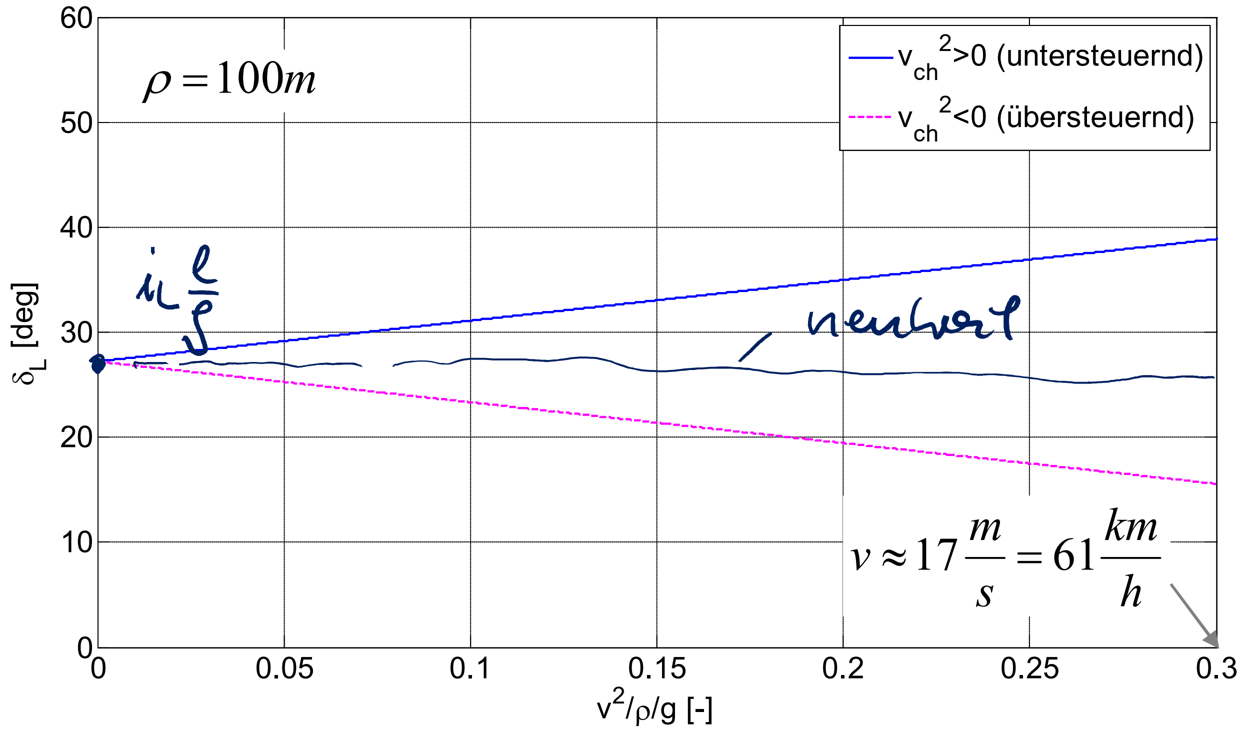
Werden Gl. (1) und (2) addiert, so dass β eliminiert wird, ergibt sich ($\dot{\beta} = \ddot{\psi} = 0$)

$$\delta_L = i_L \frac{l}{\rho} + i_L \frac{l}{v_{ch}^2} \frac{v^2}{\rho}$$

$$= \delta_{L0} + i_L \frac{l}{v_{ch}^2} \frac{v^2}{\rho}$$

mit

$$v_{ch}^2 = \frac{c_{\alpha v} c_{\alpha h} l^2}{m(c_{\alpha h} l_h - c_{\alpha v} l_v)}$$



Allgemein	untersteuernd	$\frac{d(\delta_L - \delta_{L0})}{d(v^2/\rho)} > 0$
	übersteuernd	$\frac{d(\delta_L - \delta_{L0})}{d(v^2/\rho)} < 0$

Stationäre Kreisfahrt
Subjektive Bewertung des Eigenlenkverhaltens

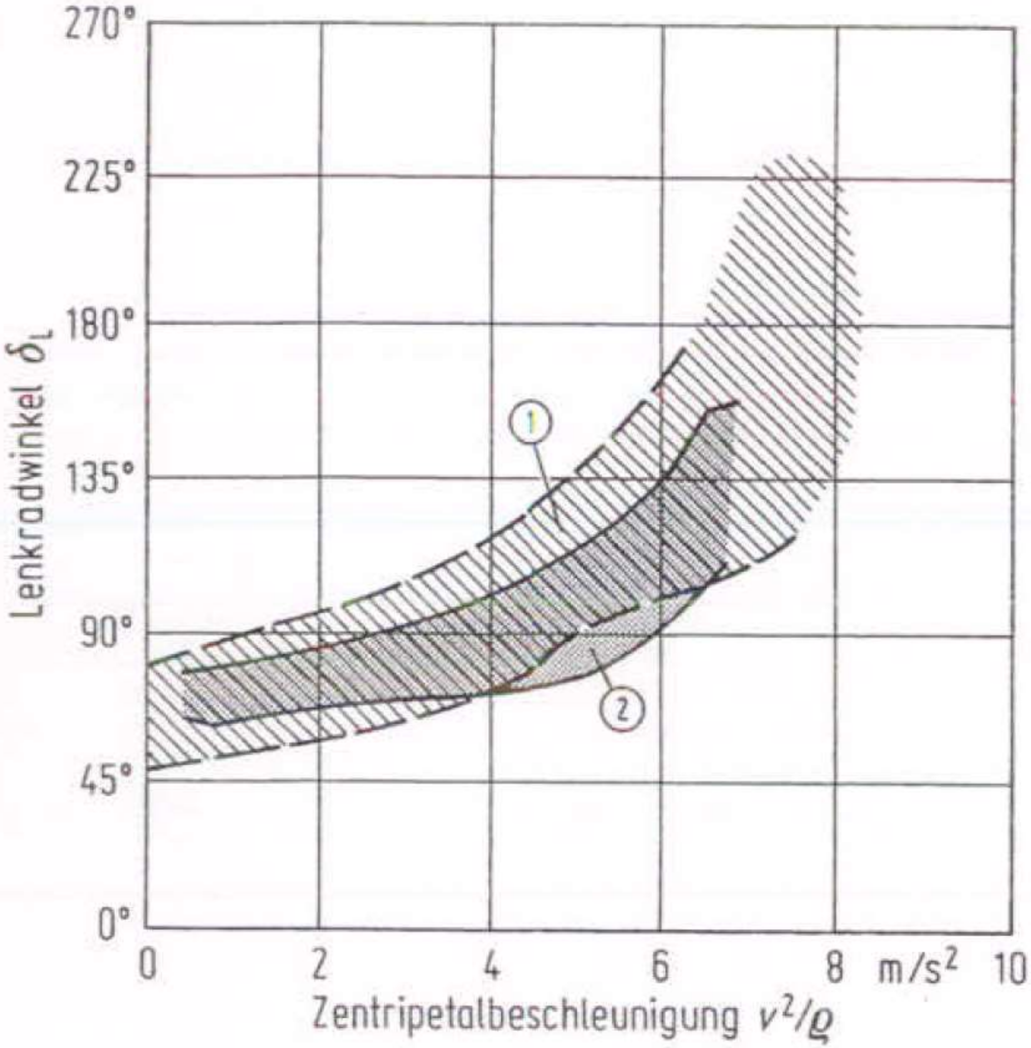


Bild 110.2. Ergebnisse aus Kreisfahrtversuchen auf einem Radius von $\rho = 40$ m und auf trockener Fahrbahn. ① 15 Fahrzeuge aus: Rompe/Heißing[23]; ② 10 Pkw nach IfF-Messungen

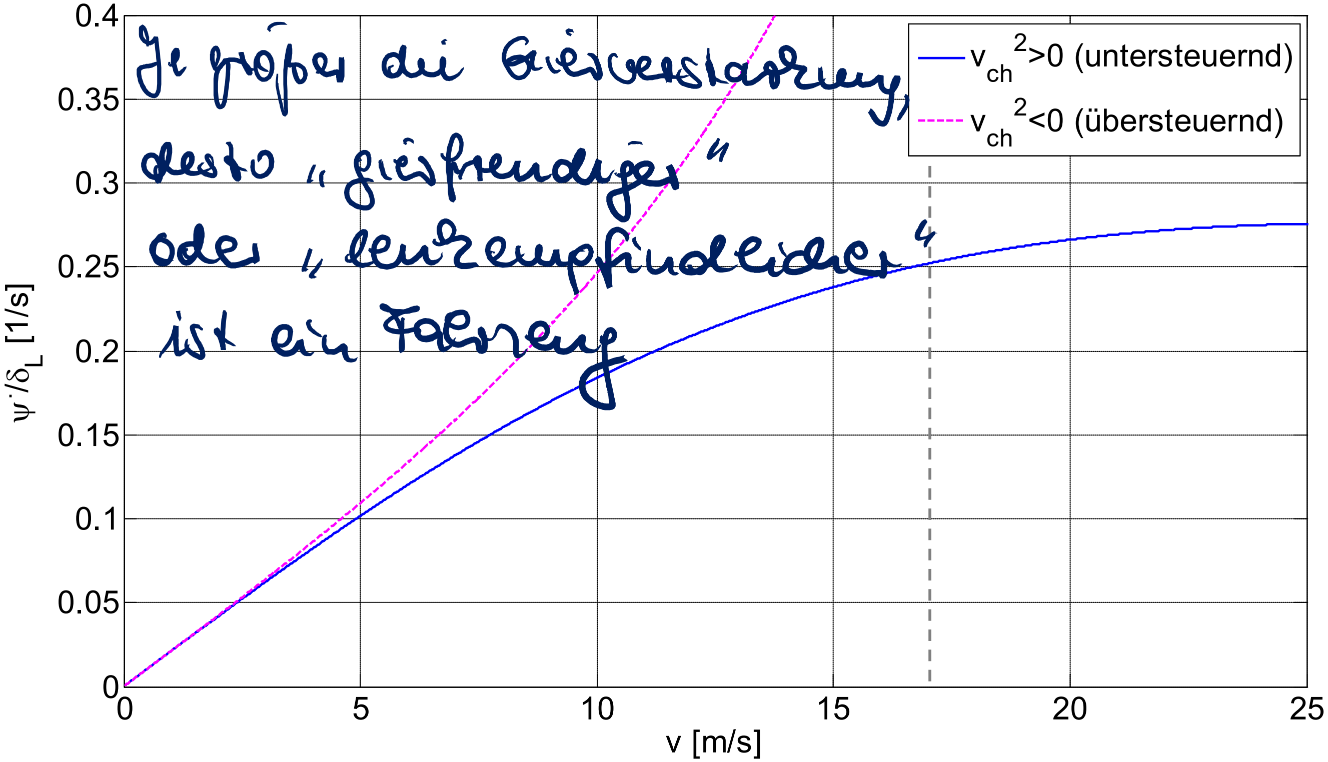
Stationäre Kreisfahrt
Gierverstärkung und Gierrate

Mit den Gleichungen des Lenkradeinschlages und mit $\dot{\psi} = \frac{v}{\rho}$ folgt für die Gierverstärkung

$$\frac{\dot{\psi}}{\delta_L} = \frac{1}{i_L l} \frac{v}{1 + \left(\frac{v}{v_{ch}}\right)^2}$$

bzw. für die Gierrate

$$\dot{\psi} = \frac{1}{i_L l} \frac{v}{1 + \left(\frac{v}{v_{ch}}\right)^2} \delta_L$$



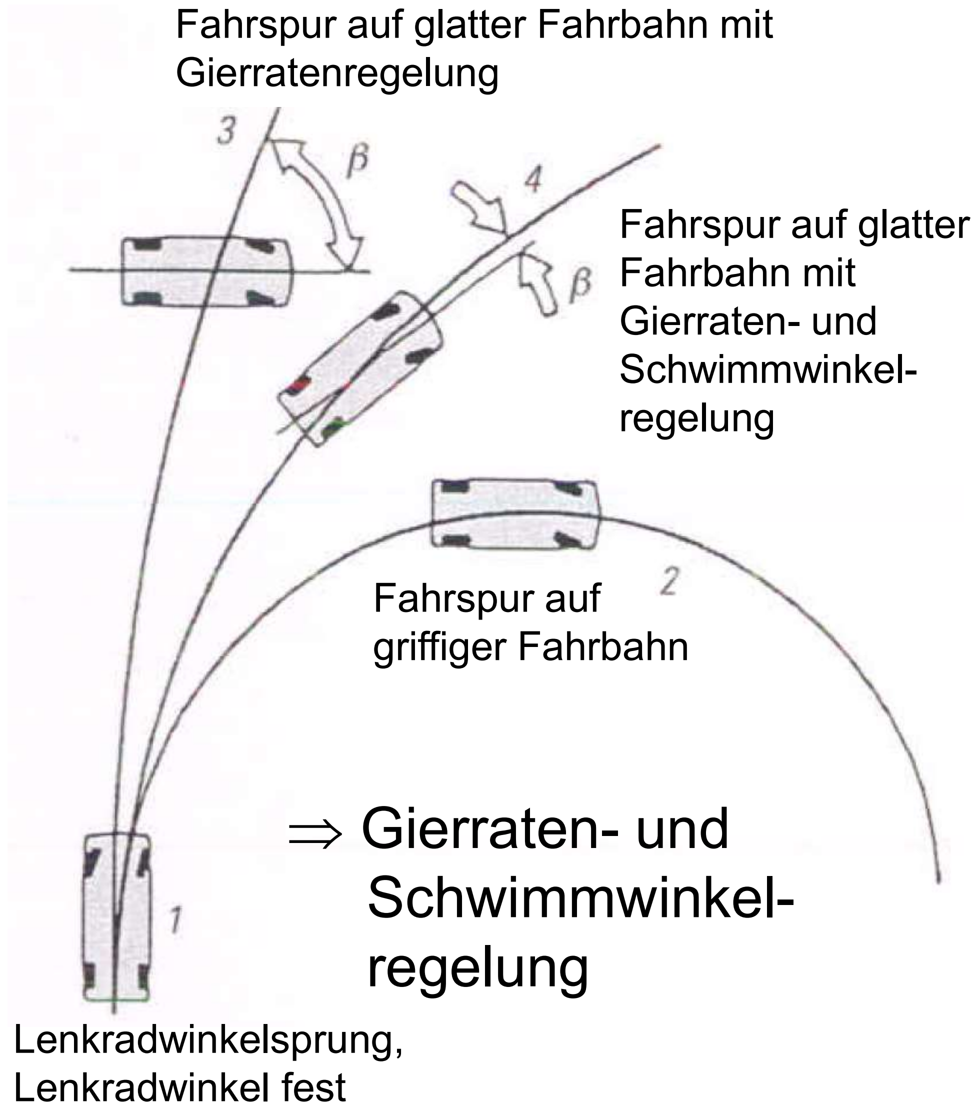
Je größer die Gierverstärkung, desto „gierfreudiger" oder „lenkempfindlicher" ist ein Fahrzeug

Stabilitätsregelung
Ermittlung der Sollwertvorgabe

Querdynamisch kritischer Fahrzustand:
Gierverstärkung unterscheidet sich von dem Erfahrungsbereich des Normalfahrers deutlich. Der Erfahrungsbereich bezieht sich im allgemeinen auf das lineare Systemverhalten.

Sicherstellung eines linearen Fahrverhaltens durch Vorgabe einer **Soll-Gierrate** im physikalisch möglichen Bereich

$$\left| \dot{\psi}_{soll} = \frac{1}{i_L l} \frac{v}{1+\left(\frac{v}{v_{ch}}\right)^2} \delta_L \right| \leq \frac{\mu_{\max} g}{v}$$



$\Rightarrow$ Gierraten- und Schwimmwinkel-regelung

Stabilitätsregelung
Ermittlung der Sollwertvorgabe

Aus Gl. (1) ($\dot{\beta} = \ddot{\psi} = 0$) folgt mit der Gierverstärkung für den **Schwimmwinkel**

$$\beta = \frac{l_h}{i_L l} \frac{1 - \frac{m l_v}{c_{\alpha h} l_h l} v^2}{1 + \left(\frac{v}{v_{ch}} \right)^2} \delta_L$$

Sicherstellung eines linearen Fahrverhaltens durch Vorgabe eines **Soll-Schwimmwinkels** im subjektiv angenehmen Bereich

$$\left| \beta_{soll} = \frac{l_h}{i_L l} \frac{1 - \frac{m l_v}{c_{\alpha h} l_h l} v^2}{1 + \left(\frac{v}{v_{ch}} \right)^2} \delta_L \right| \leq \tan^{-1}\left(0.02 \mu_H g\right)$$

z.B.

10° bei μ=0.9

4° bei μ=0.35

Stabilitätsregelung
Wichtige Regelungsziele

- Es sollen die Sollwerte für Gierrate und Schwimmwinkel erreicht werden
- Die Stabilitätsregelung muss in allen Fahrsituationen unterstützen
- Die Regelungseingriffe müssen nachvollziehbar sein
- Fahrervorgaben dürfen nicht zur Instabilität des Regelungssystems führen
- …

Stabilitätsregelung
Mögliche Regelsysteme

- **Bremsregelung**
  Nutzung der Bremsanlage für gezieltes Bremsen einzelner Räder → ESP (DSC)

- **Steer-By-Wire / Aktivlenkung / Hinterradlenkung**
  Nutzung aktiver Lenkwinkelsteller zur Überlagerung eines zusätzlichen Lenkwinkels

- **Aktive Antriebskraftverteilung**
  Nutzung aktives Differential oder Einzelradantrieb für gezieltes Antreiben einzelner Räder

Stabilitätsregelung – ESP
Historie

1995 Mercedes S-Klasse

1997 Elchtestfiasko, serienmäßiges ESP in der A-Klasse

2004 Ausrüstungsquote mit ESP für Neuwagen in Deutschland 64 %

2011 Ab 01. November ist ESP Pflicht für Neuwagen in der EU

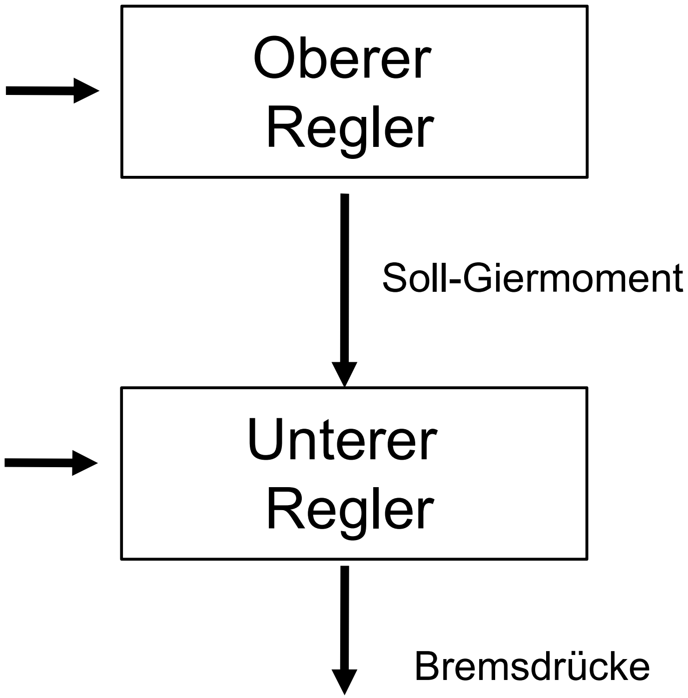
Stabilitätsregelung – ESP
Prinzipieller Regelalgorithmus

Messwerte

Raddrehzahl
Querbeschleunigung
Gierrate
Lenkwinkel

Bremsdrücke an
jedem Rad

Regler



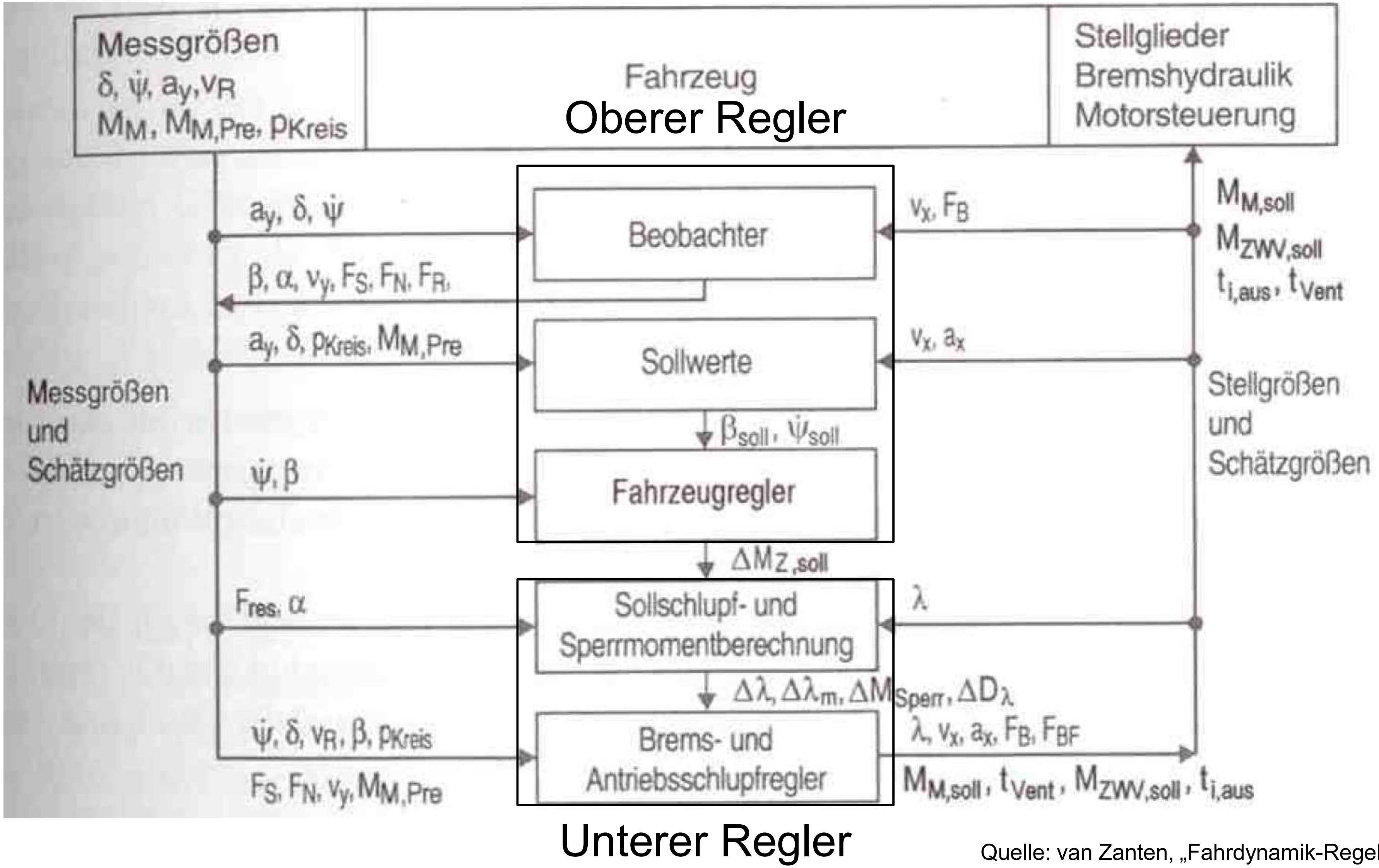
Funktion

- modellbasierte Berechnung des Sollwertes für Gierrate und Schwimmwinkel
- Schätzung des Schwimmwinkels
- Ermittlung des Soll-Giermomentes

- modellbasierte Berechnung des Sollwertes für die Bremsdrücke an jedem Rad
- Regelung der Bremsdrücke

Alternativ:
- Berechnung des Sollwertes für die Schlüpfe an jedem Rad
- Regelung der Radschlüpfe

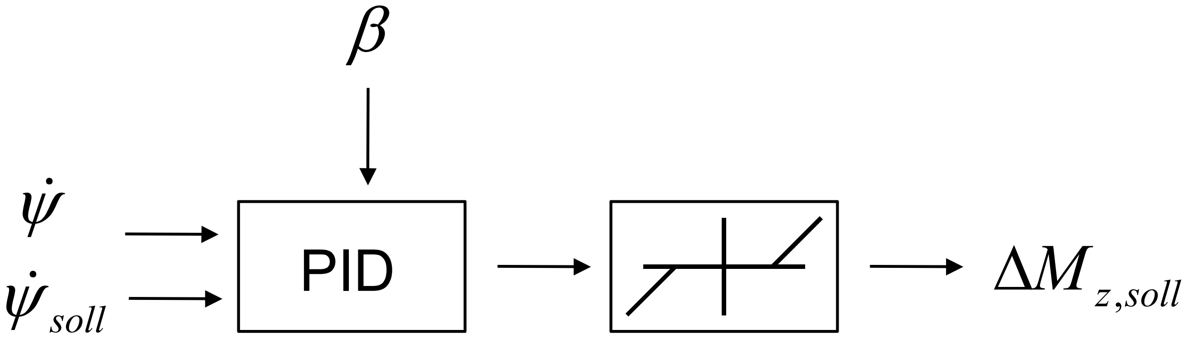
Stabilitätsregelung – ESP
Prinzipieller Regelalgorithmus



Quelle: van Zanten, „Fahrdynamik-Regelung“, Vieweg.

Stabilitätsregelung – ESP

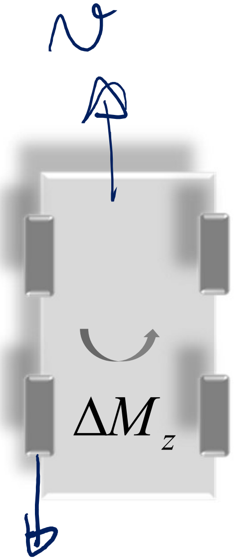
Oberer Regler – ein möglicher Ansatz

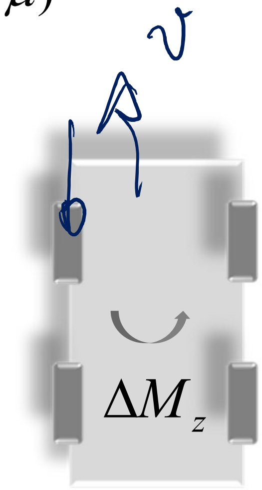


$K_P(v,\mu,\beta)$

$K_I(v,\mu)$

$K_D(v,\mu)$



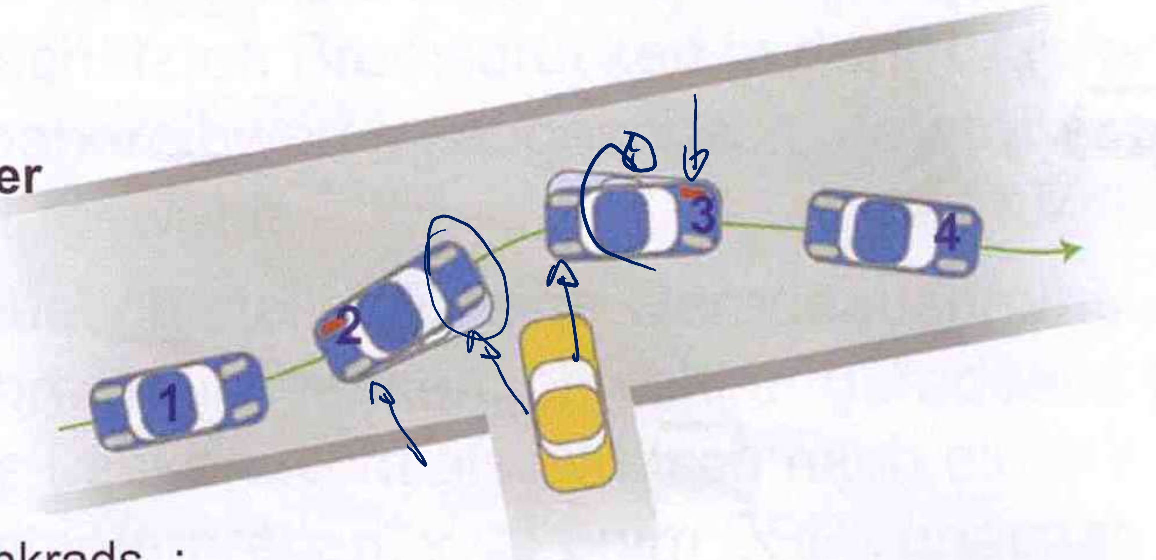


Die optimale Einstellung von $\Delta M_{z,soll}$ ist von der aktuellen Fahrsituation abhängig.

Stabilitätsregelung – ESP
Einstellung des erforderlichen Giermomentes

Beispiel:

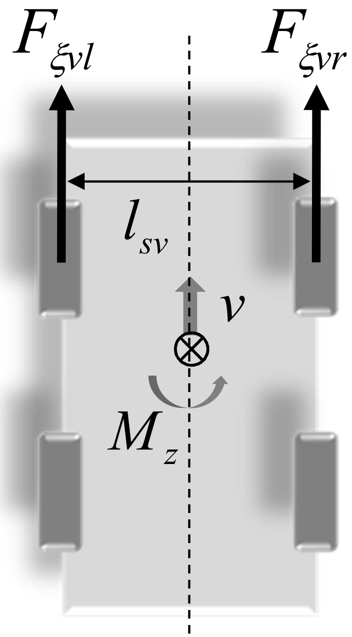
Ausweichmanöver



1) Drehen des Lenkrads :
   Fahrzeug untersteuert
2) ESP bremst das kurveninnere Hinterrad, Fahrzeug folgt der Lenkvorgabe
3) Lenkung in anderer Richtung:
   Fahrzeug übersteuert, ESP bremst das kurvenäußere Vorderrad
4) Fahrzeug wird stabilisiert

Stabilitätsregelung – ESP

Unterer Regler – ein möglicher Ansatz



Für das Soll-Giermoment gilt (nur VA)

$$\Delta M_{z,soll} = \frac{l_{sv}}{2}\left(F_{\xi vr,soll} - F_{\xi vl,soll}\right) = \frac{l_{sv}}{2}\,\Delta F_{\xi v,soll}$$

$$\Rightarrow \boxed{\Delta F_{\xi v,soll} = \frac{2\,\Delta M_{z,soll}}{l_{sv}}}$$

Für die Dynamik des linken und rechten vorderen Rades gilt

$$\underbrace{\cancel{J_{Rvl}\ddot{\varphi}_{Rvl}}}_{\sim 0} = \underbrace{\cancel{M_{Avl}}}_{\sim 0} - M_{Bvl} - rF_{\xi vl} - \underbrace{\cancel{e_{vl}N_{\xi vl}}}_{\sim 0}$$

$$\underbrace{\cancel{J_{Rvr}\ddot{\varphi}_{Rvr}}}_{\sim 0} = \underbrace{\cancel{M_{Avr}}}_{\sim 0} - M_{Bvr} - rF_{\xi vr} - \underbrace{\cancel{e_{vr}N_{\xi vr}}}_{\sim 0}$$

$$\Rightarrow \boxed{\Delta F_{\xi v,soll} = \frac{M_{Bvl,soll} - M_{Bvr,soll}}{r}}$$

Stabilitätsregelung – ESP

Unterer Regler – ein möglicher Ansatz

Wahl $M_{Bvl,soll} = (1-a)\, r\, \Delta F_{\xi v,soll}$

$M_{Bvr,soll} = -a\, r\, \Delta F_{\xi v,soll}$

Darüber hinaus gilt

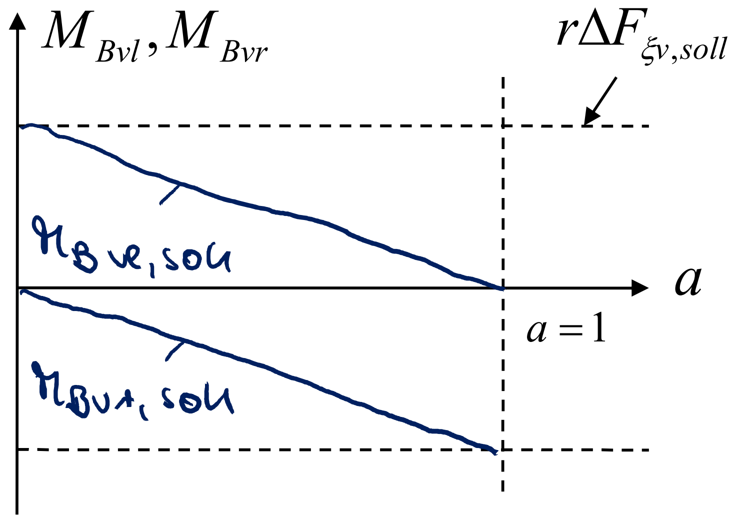
$$M_{B,soll} = (p_{B,soll} - p_{B,0})\, A_B \mu_B r_B$$

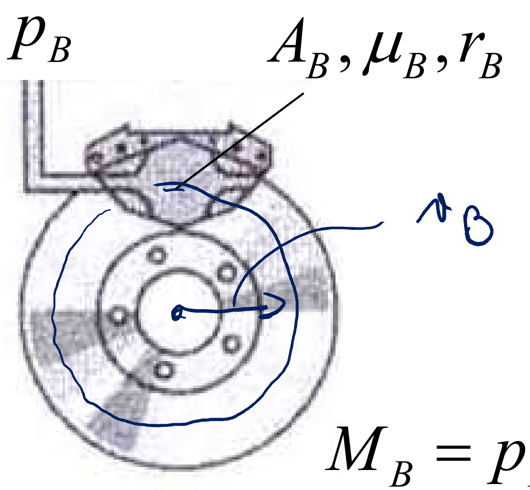
bzw.

$$p_{B,soll} = p_{B0} + \frac{M_{B,soll}}{A_B \mu_B r_B}$$

Einsetzen liefert

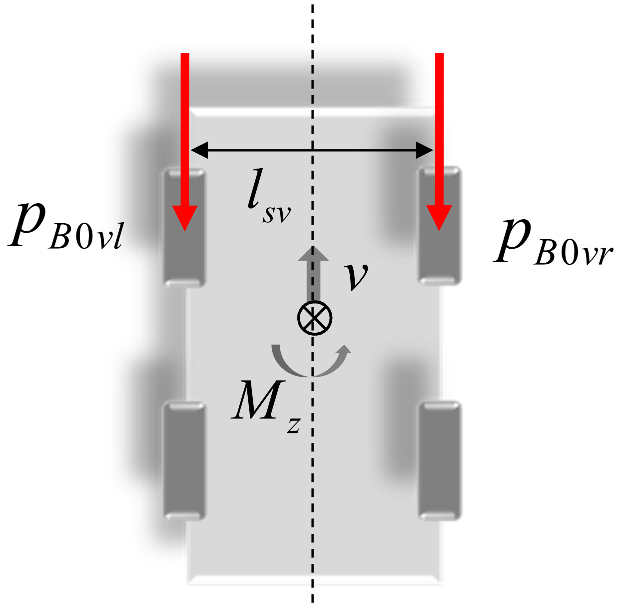
$$\boxed{\begin{aligned} p_{Bvl,soll} &= p_{B0vl} + (1-a)\,\frac{r\,\Delta F_{\xi v,soll}}{A_B \mu_B r_B} \\ p_{Bvr,soll} &= p_{B0vr} - a\,\frac{r\,\Delta F_{\xi v,soll}}{A_B \mu_B r_B} \end{aligned}}$$





$$M_B = p_B A_B \mu_B r_B$$

Stabilitätsregelung – ESP
Diskussion des unteren Reglers



$$p_{Bvl,soll} = p_{B0vl} + (1-a)\frac{r\Delta F_{\xi v,soll}}{A_B \mu_B r_B}$$

$$p_{Bvr,soll} = p_{B0vr} - a\frac{r\Delta F_{\xi v,soll}}{A_B \mu_B r_B}$$

Es gilt

$p_{B,soll} \geq 0$

Somit muss a situationsabh. gewählt werden

Bsp 1 Fahrer bremst nicht ($p_{B0}=0$)

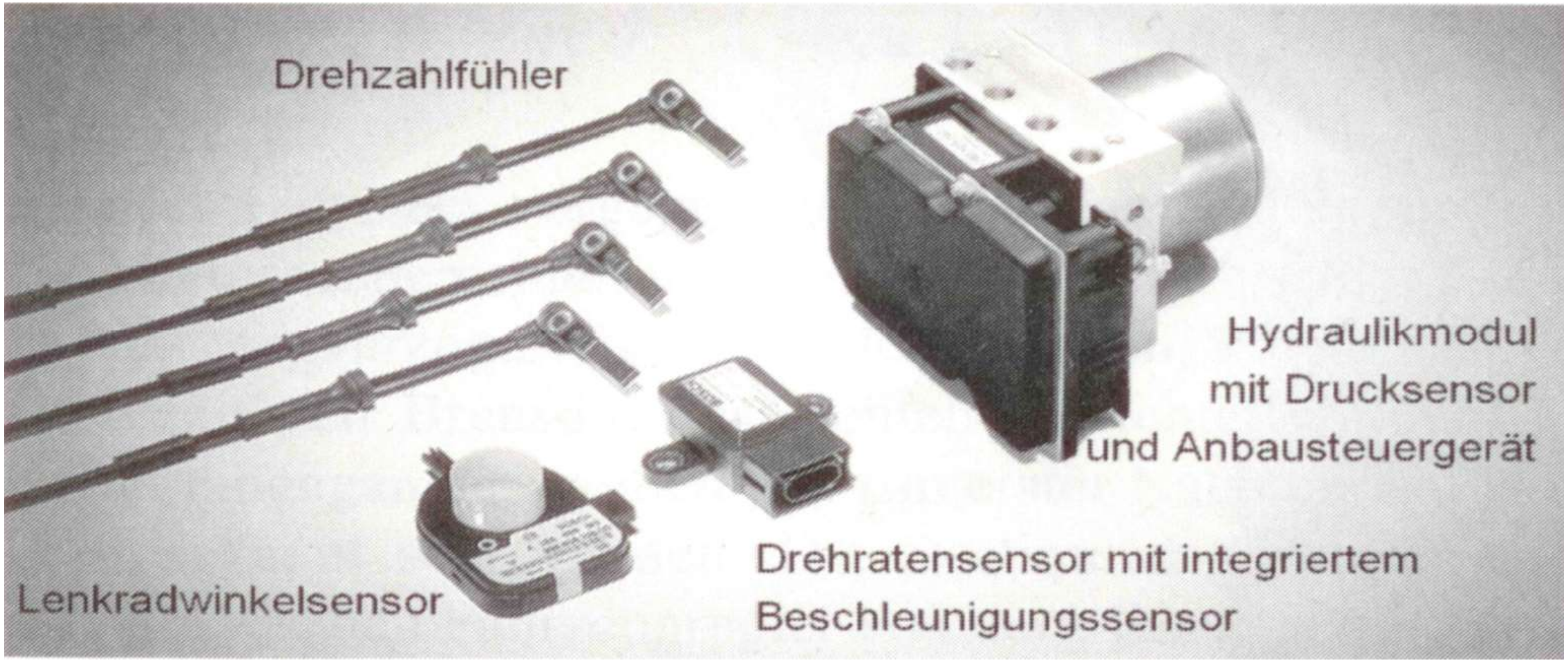
und $\Delta F_{\xi v,soll} > 0$

$\Rightarrow a = 0$

Bsp 2 Fahrer bremst ($p_{B0} \gg 0$)

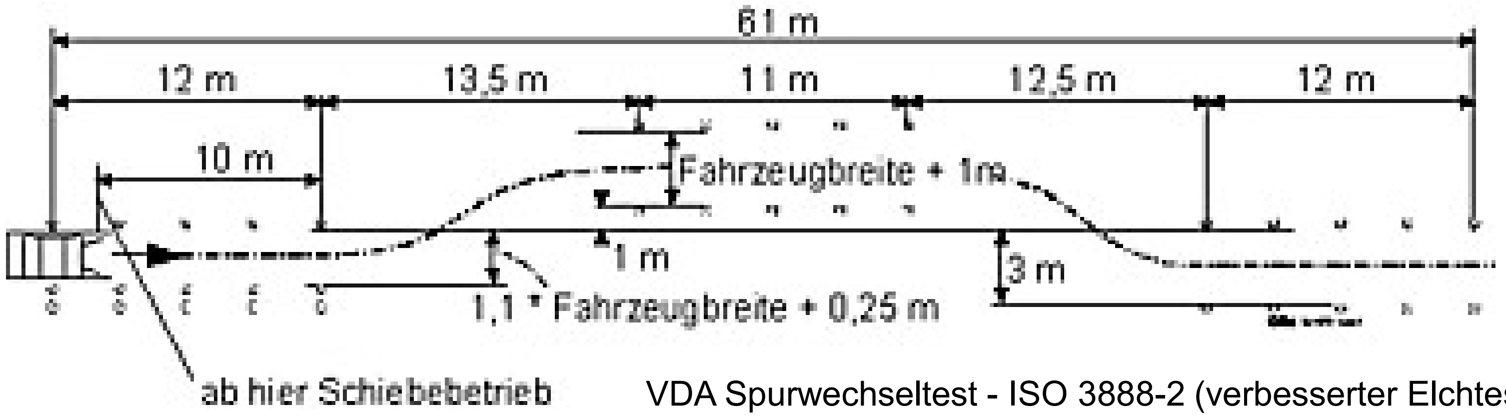
$\Rightarrow a = 0,5$

Stabilitätsregelung – ESP
Aktorik und Sensorik



Stabilitätsregelung – ESP
Wichtige objektive Bewertungskritierien

- Wie groß ist der maximale Schwimmwinkel und die maximale Schwimmwinkelgeschwindigkeit?
- Wie groß ist der Lenkaufwand (Maximalwert, Gradient)
- Mit welcher maximalen Geschwindigkeit kann ein Ausweichmanöver fehlerfrei ausgeführt werden?
- Kann der Elchtest erfolgreich abgeschlossen werden?



VDA Spurwechseltest - ISO 3888-2 (verbesserter Elchtest, z.B. kleinere Einfahrbreite)

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!