

# BREMSBASIERTE ASSISTENZFUNKTIONEN - FAHRDYNAMIKREGELSYSTEME



(ABS, ASR, ESP<sup>®</sup>)

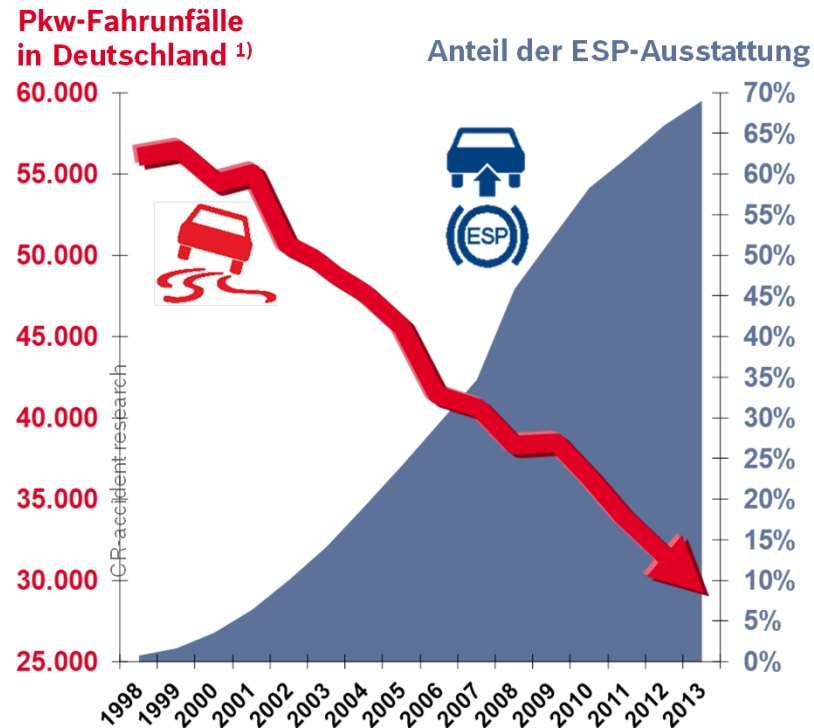
ROBERT BOSCH GMBH  
DIPL.-ING. ALBERT LUTZ

# Bremsbasierte Assistenzfunktionen Fahrndynamik: Warum ESP®?

## Entwicklung der Fahrnfälle in Deutschland



- Mehr als jedem **zweiten Fahrnfal** geht ein Schleudervorgang voraus
- **60% aller Unfälle** mit Todesfolge werden durch Seitenkollisionen (meist infolge Schleudern) verursacht



- **Das Gros** der PKW-Kollisionen ereignet sich im Bereich zw. 60 u. 100km/h
- **30%** der Unfälle mit Personenschaden erfolgt ohne Einfluss anderer Verkehrsteilnehmer
- **50%** davon erfolgen durch Seitencrashes
- **ESP® vermeidet 80%** der Schleudersituationen im realen Unfallgeschehen<sup>2)</sup>
- **ESP® leistet einen großen Beitrag zur Reduzierung der PKW-Fahrnfälle!**

Quellen: <sup>1)</sup> Statistisches Bundesamt Deutschland: Sonderstudie (Unfälle mit Personenschaden)  
<sup>2)</sup> Daten von CC/MKC, DAT-Bericht

# Bremsbasierte Assistenzfunktionen

## Fahrdynamik: Warum ESP®?

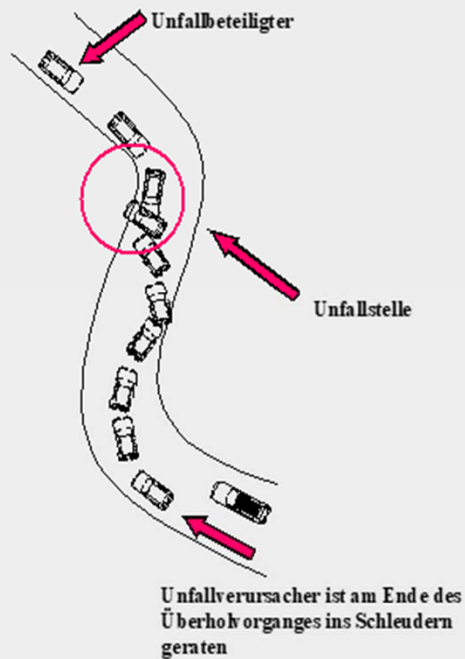
### Typischer Unfallablauf: Seitenkollision



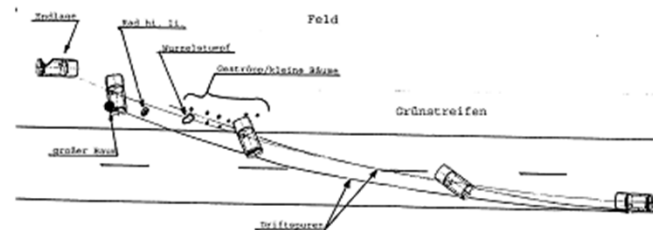
Unfallbeteiligter: geringe Verletzungen



Unfallverursacher: tödliche Verletzungen



### Unfall mit Verlust der Fahrzeugkontrolle



#### Ursachen

- nicht angepasste Geschwindigkeit
- Ablenkung
- falsche Reaktion (z.B. übersteuern)

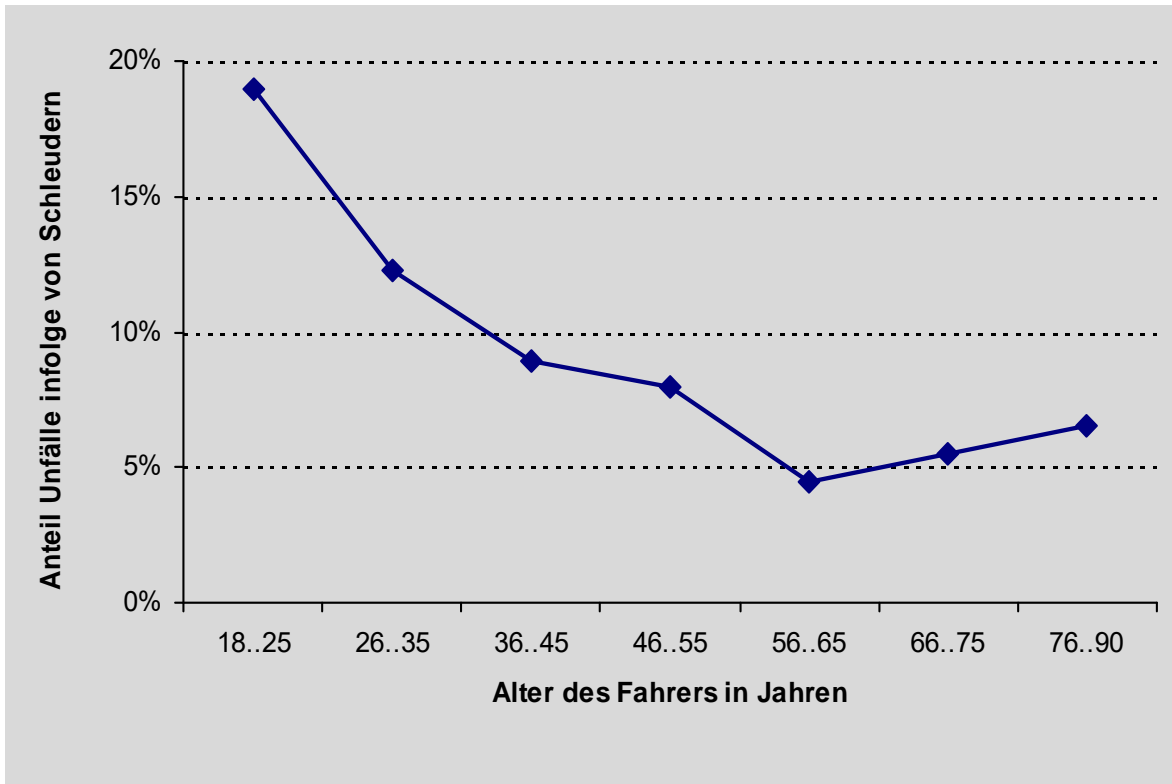
(Alleinunfall)

Pkw/Pkw Unfall  
vehicle



# Bremsbasierte Assistenzfunktionen

## Fahrdynamik: Warum ESP®?



**Schleudern** – Hauptursache für schwere und tödliche Unfälle

- Junge Fahrer (18-25 Jahre) mit höchsten Anteil Schleuderunfälle



# Bremsbasierte Assistenzfunktionen

## Fahrdynamik: Warum ESP®?

### Erfahrungshorizont von Normalfahrern

#### Normalfahrer ...

- ... bremsen mit Bremsdrücken die fast immer unterhalb von 40 bar liegen (ca. 0,4 g)
  - ... lenken so, dass die Querschleunigung kleiner als 0,2 g bleibt
  - ... fahren mit Schwimmwinkeln kleiner als 2°
  - ... haben keine Erfahrung im nichtlinearen Bereich der Schlupf- und Schräglauflkurven
  - ... haben weder eine Ahnung vom momentanen Reibwert der Fahrbahn noch von der momentanen Stabilitätsreserve
- Wenn das Fahrzeug sich außerhalb des Erfahrungsbereiches von Normalfahrern befindet, reagieren diese oft überrascht, geraten in Panik und handeln nicht angemessen (lenken zu viel etc.)

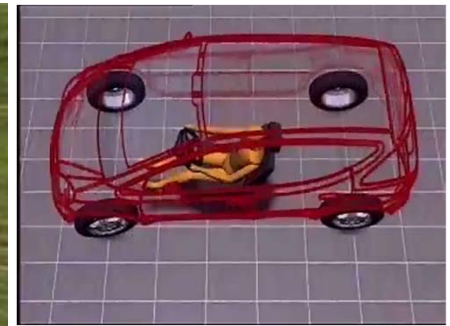
# Bremsbasierte Assistenzfunktionen

## Fahrdynamik: Warum ESP®?

### Kritische Fahrsituationen

#### ➤ Untersteuern:

- Fzg dreht sich weniger als der Fahrer lenkt
- Das Fzg folgt nicht der Fahrervorgabe
- Schwimmwinkel und Drehrate sind zu klein
- Fzg verläßt die Fahrbahn über die Vorderachse
- Regelungstechnisch: Mangel an Lenkfähigkeit



#### ➤ Übersteuern:

- Schleudern: Fzg dreht sich mehr als der Fahrer lenkt
- Heck bricht aus: Schwimmwinkel und Drehrate sind zu groß
- Regelungstechnisch: Mangel an Stabilität



# Bremsbasierte Assistenzfunktionen

## Fahrdynamik: Warum ESP®?

### Fahrzeug hat in der Ebene 3 Freiheitsgrade

- Längsfreiheitsgrad: durch Fahrer vorgegeben, Brems/Beschleunigungswunsch im Rahmen der Fahrdynamik umgesetzt
  - **ABS** und **ASR** halten die Räder am Rollen und sichern damit ein Standardniveau an Lenkfähigkeit und Stabilität des Fahrzeugs
- Querfreiheitsgrade: durch Fahrer vorgegeben, Lenkwunsch im Rahmen der Fahrdynamik umgesetzt
  - In kritischen Querdynamischen Fahrzuständen reichen die erzielbaren Seitenkräfte der Reifen nicht aus, das Fahrzeug lenkfähig und stabil zu halten
  - Optionen:
    - Giergeschwindigkeit: Durch Giermoment an den einzelnen Rädern steuerbar, wichtigste Regelgröße;  $\psi = f(F_B, F_S, \delta)$
    - Quergeschwindigkeit/Schwimmwinkel: Indirekt beeinflussbar durch Änderung der Seitenkraft
- Untersuchung zur Stabilisierung des Fahrzeugs in instabilen Bereichen aufbauend auf den ABS- und ASR-Komponenten führten zur Entwicklung des Elektronischen Stabilitäts Programms (ESP®)

7

Chassis Systems Control | CC-AS/EYB - Albert Lutz | 17.12.2020

HS-Kempten / WS20/21 / ADAS-Master

© Robert Bosch GmbH 2020. Alle Rechte vorbehalten, auch bzgl. jeder Verfügung, Verwertung, Reproduktion, Bearbeitung, Weitergabe sowie für den Fall von Schutzrechtsanmeldungen.



# Bremsbasierte Assistenzfunktionen

## ESP® – Die Anfänge

### Entwicklungsumgebung / Versuchsträger 1985

- W123 T-Modell mit 220V-Stromaggregat (4,5kW !)
- Rapid Prototyping mit Prozessrechner HP1000 A900, Digitales Datenerfassungssystem von Kayser-Threde
- Programmiersprache FORTRAN
- **Rotierendes RadDynamometer**
- Korrelationsoptik von FIB
- Peissler-Rad
- Kreiselplattform





# Bremsbasierte Assistenzfunktionen

## ESP<sup>®</sup>-Meilensteine

- **Grundsatzentwicklung ABS** **1984 – 1987**  
ABS in Serie seit 1978 -> Auftrag: Kostengünstigeres ABS
- **Erste Ansätze für Fahrzeugregelung** **1985**  
(1- und 2-Kanal-ABS, Schlupfregler)
- **Entwicklungsumgebung / Versuchsträger** **1985**
- **Grundsatzuntersuchungen PKW-ABS/ASR** **ab 1988**  
Potentialuntersuchung zur Fahrdynamikregelung:
  - Schwimmwinkelregelung mit gemessenem Schwimmwinkel (Korrektiv)
    - Weitere Untersuchung von Sensorkonzepten für Fahrzeugregelung
    - Festlegung Basis-Konzept
    - ❖ 4-Kanal-ABS mit überlagertem Fahrzeugregler
    - ❖ Sensierung Querdynamik mittels DRS, AY, LWS
    - Größte Herausforderung: Entwicklung robuster DRS für Großserieneinsatz

# Bremsbasierte Assistenzfunktionen

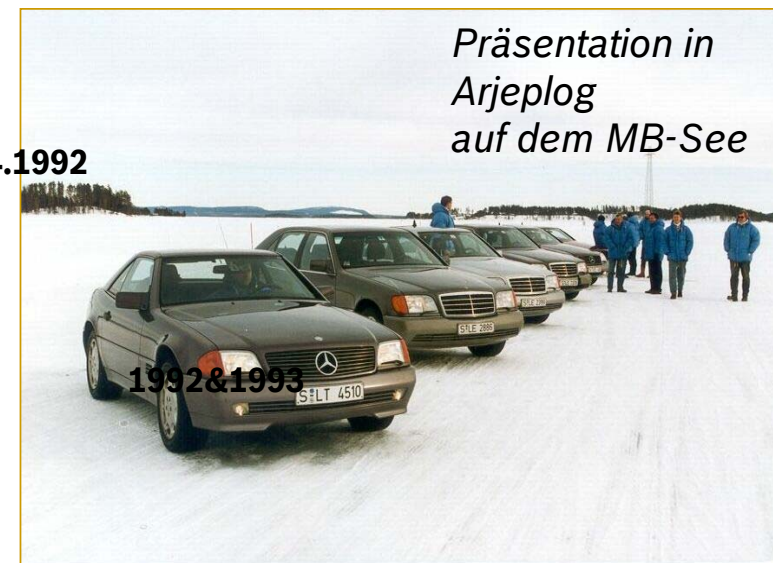
## ESP®-Meilensteine

- **Erster Prototyp des FDR** **1989**
  - Zunächst nur im (Voll-)Bremsbereich
- **Weiterentwicklung FDR für alle Betriebszustände** **1989 – 1992**
  - Robustheit & Einfluss Sensorik
  - FDR bei Teilbremsung & ASR-Fkt.
- **1. Konzeptgespräch MB/RB u. Aufbau Konzept-Fzg mit RB-FDR** **09/1991**
- **FDR/FSI-Konzeptvergleich im Fahrzeug u. Entscheid für RB-FDR** **23.3.–9.4.1992**
- **Aufsetzen der Projektteams bei MB / RB** **06/1992**
  - Kernteam in Projekthaus in Si13 bzw. Arjeplog
- **SW Umsetzungen Fortran->C-Float->C-Integer**
- **Serienabsicherung** **1994**
- **Serieneinführung S-Klasse (W140) & SL (R129)** **1995**

*Serieneinführung des ESP®*

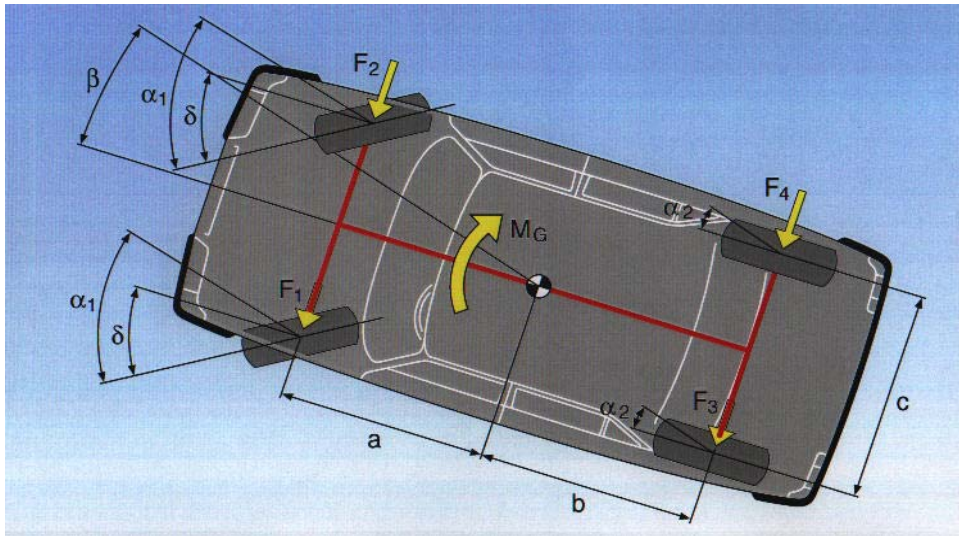
**1995**

*im MB W140 und R129*



# Fahrdynamikregelsysteme

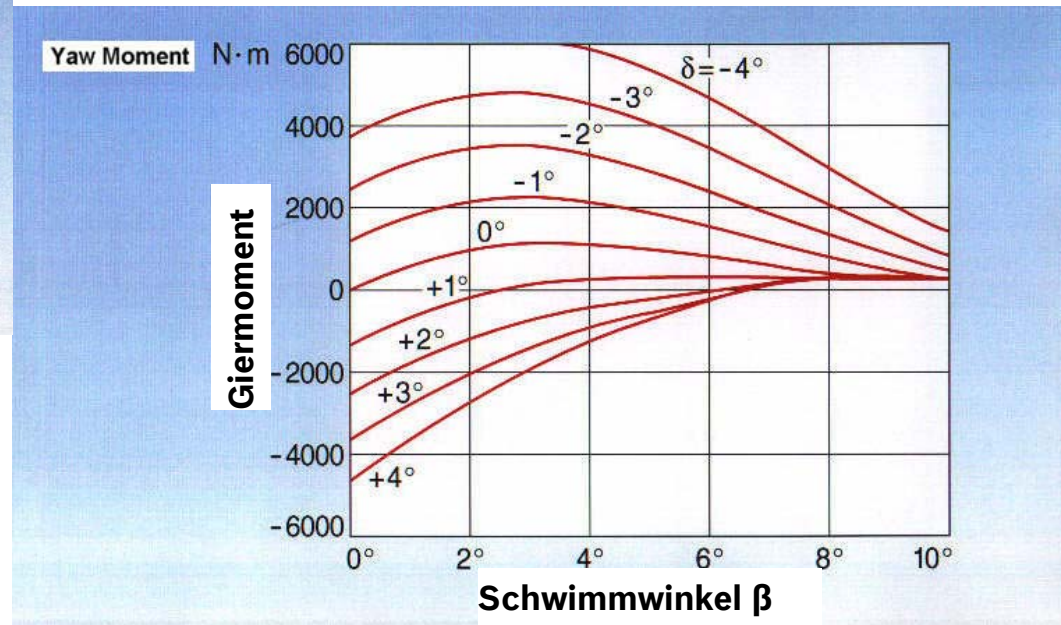
## Fahrdynamik: Die Beta Methode (Honda)



Untersuchung der Lenkfähigkeit als Funktion des Schwimmwinkels

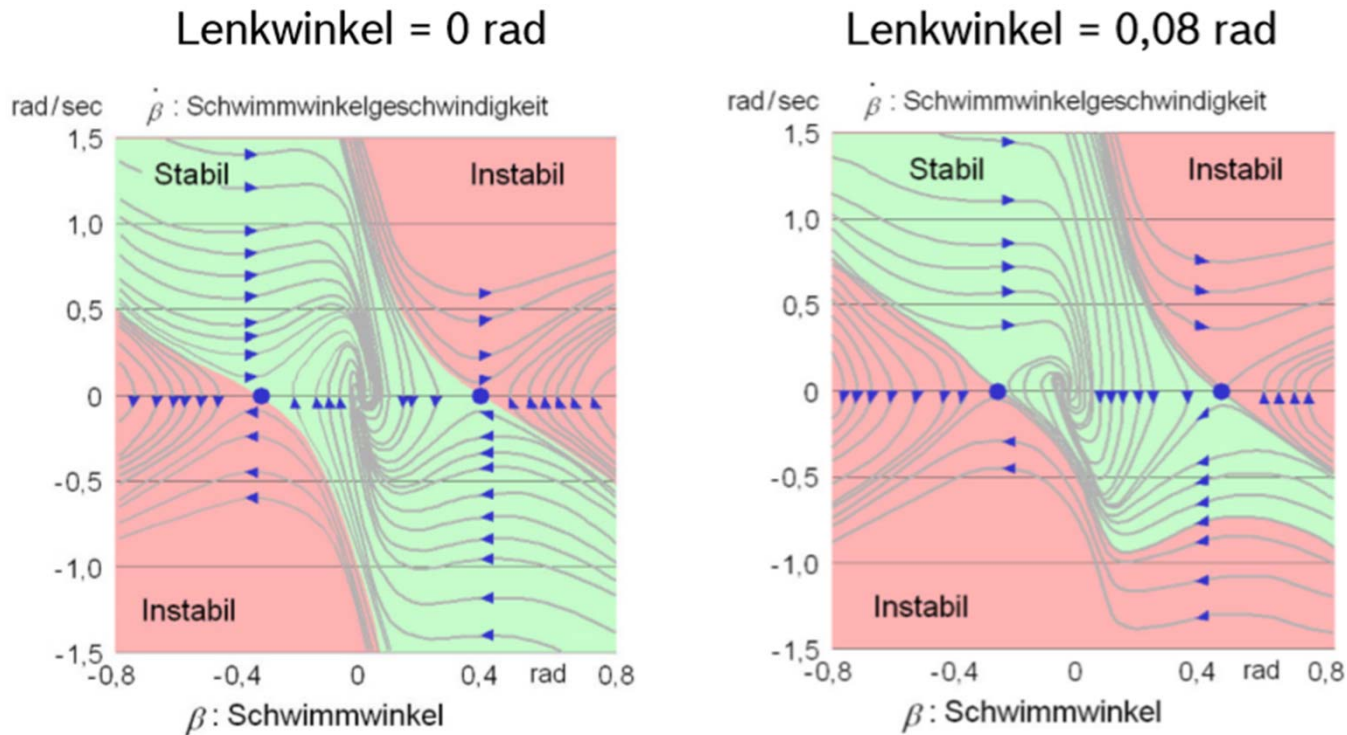
### Lenkfähigkeitskennfeld:

Bei großen Schwimmwinkeln ist der Einfluss des Lenkwinkels auf das Giermoment gering



# Fahrdynamikregelsysteme

## Fahrdynamik: Fahrzeugstabilität im Phasenbereich (Toyota)



Der Stabilitätsbereich wird mit zunehmendem Lenkwinkel kleiner  
 $V=100\text{km/h}$ ;  $\mu=1,0$

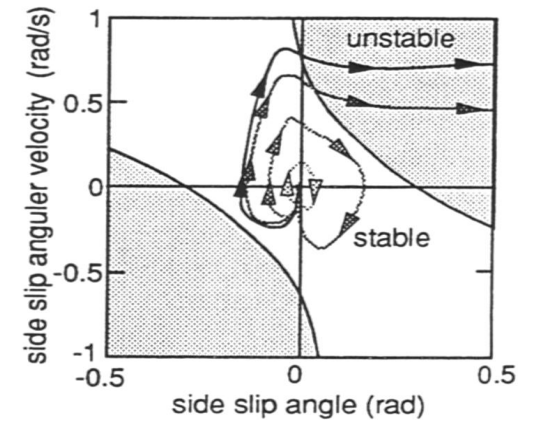


Fig.2 Response in Sine Steering Input

# Fahrdynamikregelsysteme

## ESP<sup>®</sup>-Anforderungen

- ESP<sup>®</sup> muss den Fahrer in allen Fahrsituationen unterstützen (Bremsen, Beschleunigen, Konstantfahrt, ...)
- ESP<sup>®</sup> muss den Lenkaufwand des Fahrers reduzieren
- Der Fahrer muss sich bzgl. des Fahrzeugverhaltens immer sicher fühlen
- Die Fahrervorgaben dürfen nicht zur Instabilität des ESP<sup>®</sup>-Systems führen
- In überhöhten Kurven öffentlicher Straßen (<20°) dürfen keine Eingriffe erfolgen
- ESP<sup>®</sup> darf die Fahrsituation unter keinen Umständen verschlechtern (defekte Stoßdämpfer, Anhänger, Reifenverschleiß, -platzer, ...)
- Das Fahrzeug muss prompt auf Fahrerlenkvorgaben reagieren
- Rückkehr in eine stabile Fahrsituation muss sofort erkannt werden

# Fahrdynamikregelsysteme

## ESP<sup>®</sup>-Anforderungen

- Prioritäten für den Antrieb (ASR) bei hohen Fahrgeschwindigkeiten
  - Fahrstabilität
  - der Schwimmwinkel darf 6° nicht überschreiten
  - Komfort (Geräusch, Fzg-Schaukeln)
  - Traktion
- Der Elch-Test (VDA-Test) muss erfolgreich abgeschlossen werden
- Die Anforderungen an Fahrdynamikregelsysteme, ECE-Nr. 13-H, Anhang 9 (Sine-with-Dwell), müssen erfüllt sein

# Fahrdynamikregelsysteme

## Definition und Begriffe

### ➤ Anfänge:

- FDR: Fahrdynamikregelung (BOSCH)
- VDC: Vehicle Dynamics Control (BOSCH)
- ESP®: Electronic Stability Program (DAIMLER)

### ➤ Generisch:

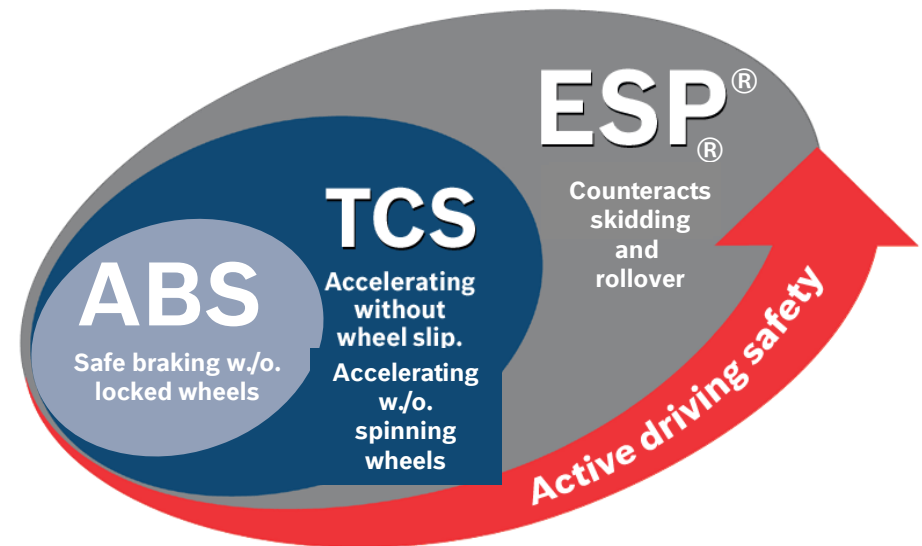
- ESC: Electronic Stability Control

### ➤ OEM-spezifisch:

BMW:	DSC
Porsche:	PSM
Volvo:	DSTC
Toyota:	VSC
Honda:	VSA

### ➤ ESP®-System

- ABS & TCS(ASR) & VDC-Vehicle Dynamics Controller (FZR-Fahrzeugregler)

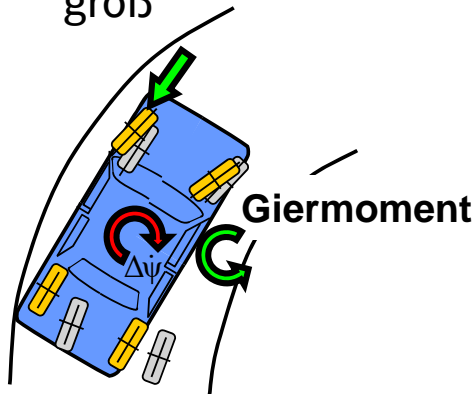


# Fahrdynamikregelsysteme

## Grundlagen Fahrdynamik: ESP®-Funktion

### ➤ Übersteuern:

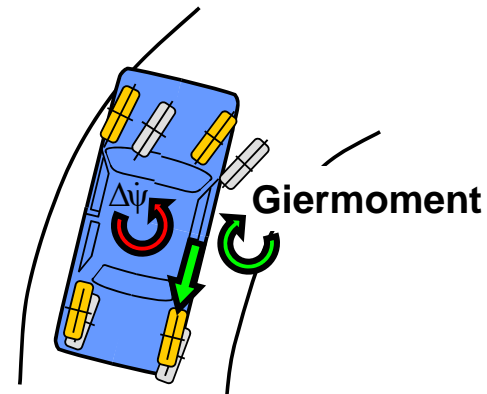
- Das Fahrzeug bricht aus, d.h. die Hinterachse des Fahrzeugs „rutscht“ nach kurvenaußen
- Die Giergeschwindigkeit ist zu groß



Stabilisierung durch Bremseneingriff am kurvenäußeren Vorderrad

### ➤ Untersteuern:

- Das Fahrzeug „schiebt“ über die Vorderachse nach kurvenaußen
- Die Giergeschwindigkeit ist zu klein



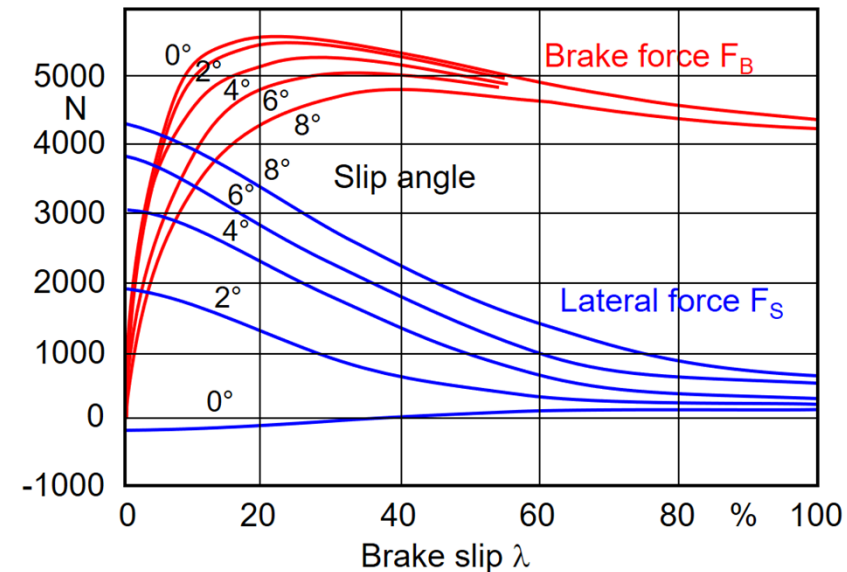
Stabilisierung durch Bremseneingriff am kurveninneren Hinterrad



# Fahrdynamikregelsysteme

## Grundlagen Fahrdynamik: ESP<sup>®</sup>-Funktion

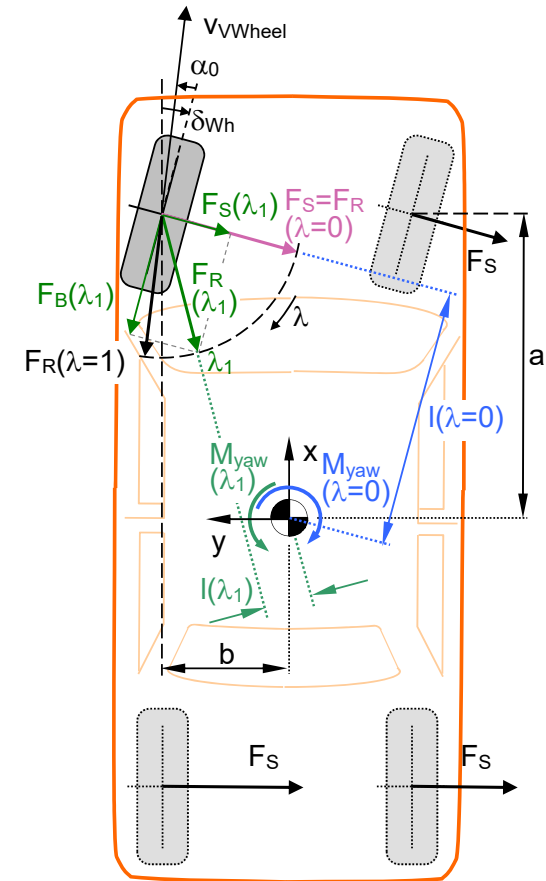
- ESP<sup>®</sup> wurde auf der Basis von ABS und ASR entwickelt, mit denen die Radbremsdrücke und das Motormoment individuell moduliert werden können.
- Das Konzept des ESP<sup>®</sup> baut auf die Eigenschaft des Reifens, den Seitenreibwert über den Schlupf  $\lambda$  verändern zu können
- Damit ist die Querdynamik des Fahrzeugs über die Reifenschlupfwerte beeinflussbar.



# Fahrdynamikregelsysteme

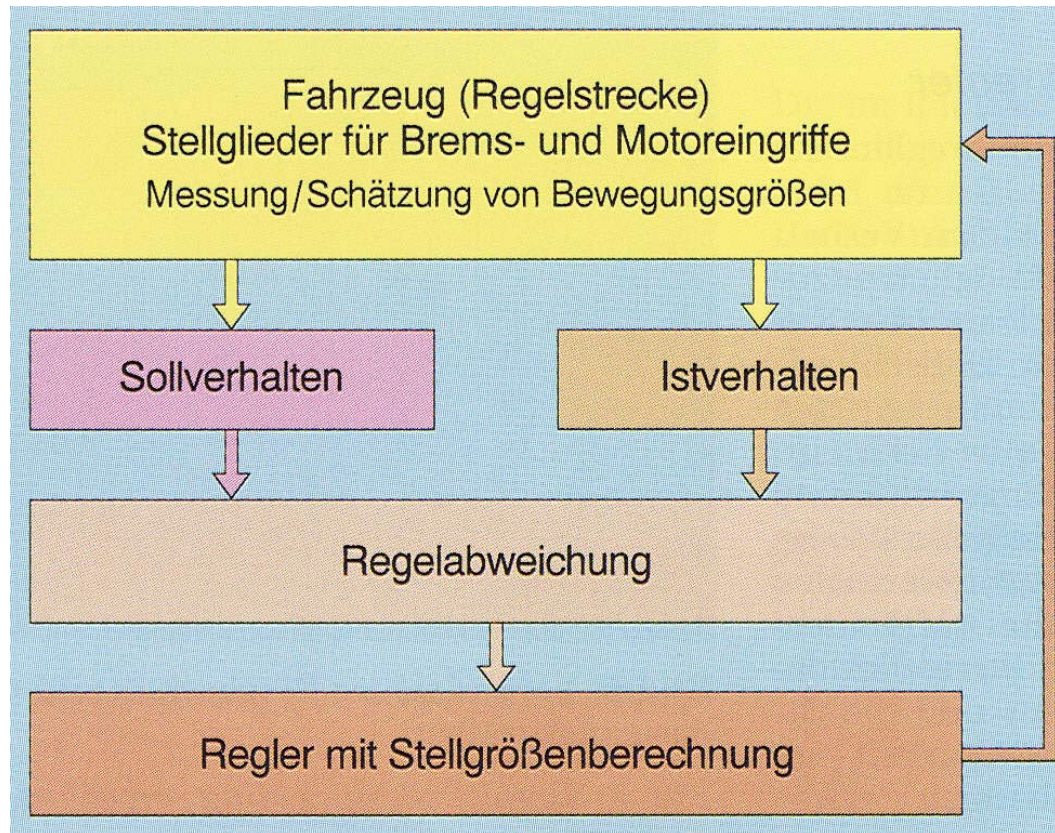
## ESP®-Regelkonzept: radindividuelle Schlupfeingriffe

- ESP® stellt ein Giermoment ein durch die Änderung der Richtung der resultierenden Reifenkraft
- Die Richtung der resultierenden Reifenkraft wird eingestellt durch die Vorgabe des Brems- / Antriebsschlupfes
- Der vorgegebene Radschlupf wird durch die unterlagerten ABS- bzw. ASR-Regler eingeregelt
- Der Ist-Radschlupf wird bestimmt aus Fahrzeuglängsgeschwindigkeit, Raddrehzahl und Giergeschwindigkeit



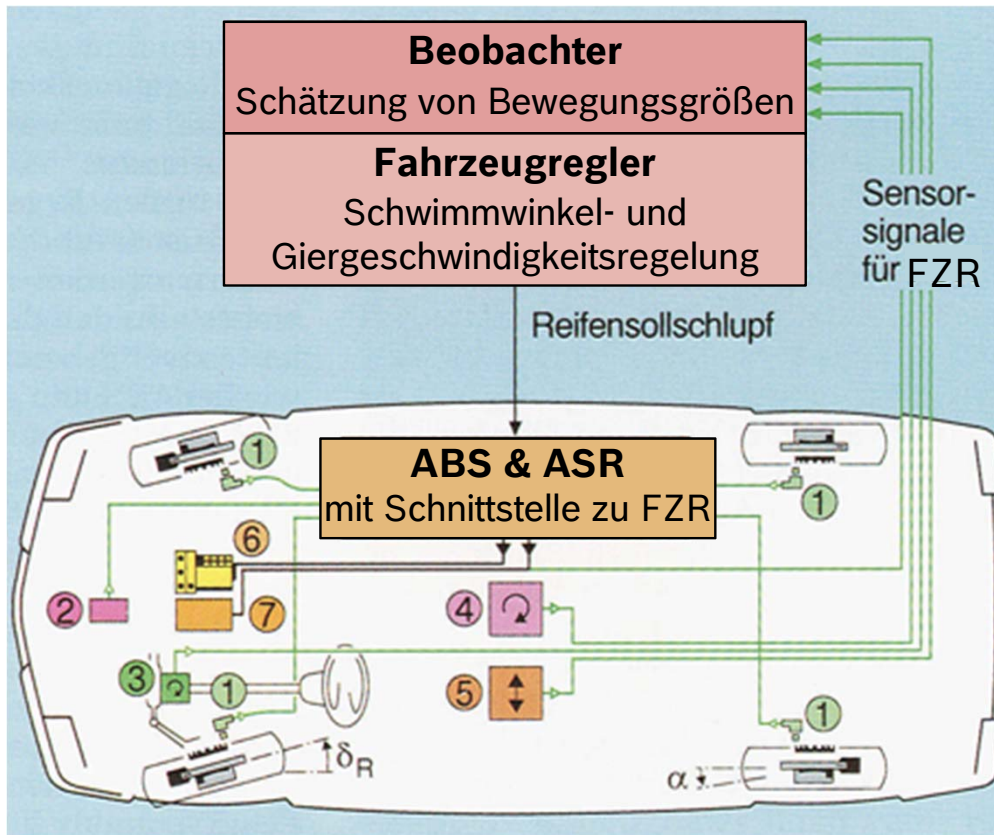
# Fahrdynamikregelsysteme

## ESP<sup>®</sup>-Regelkonzept: Prinzipielles Blockschaltbild

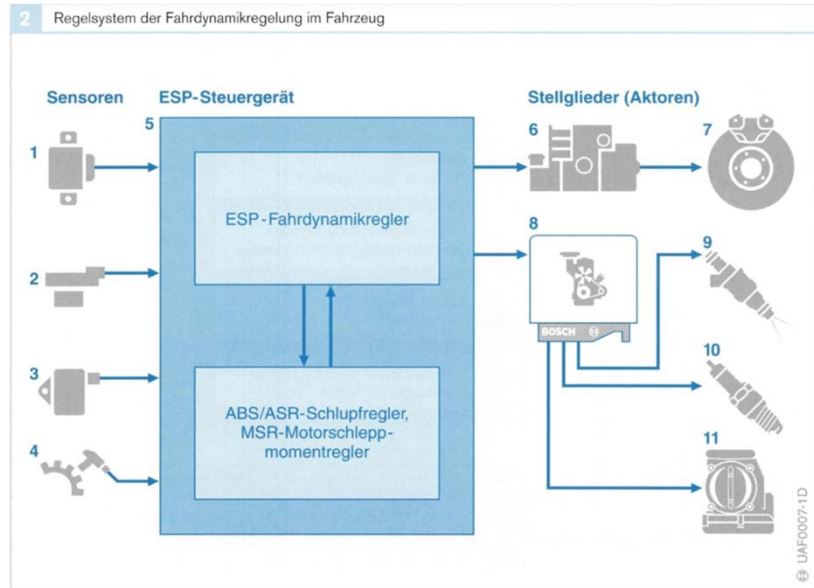


# Fahrdynamikregelsysteme

## ESP®-Regelkonzept: Hierarchischer Aufbau

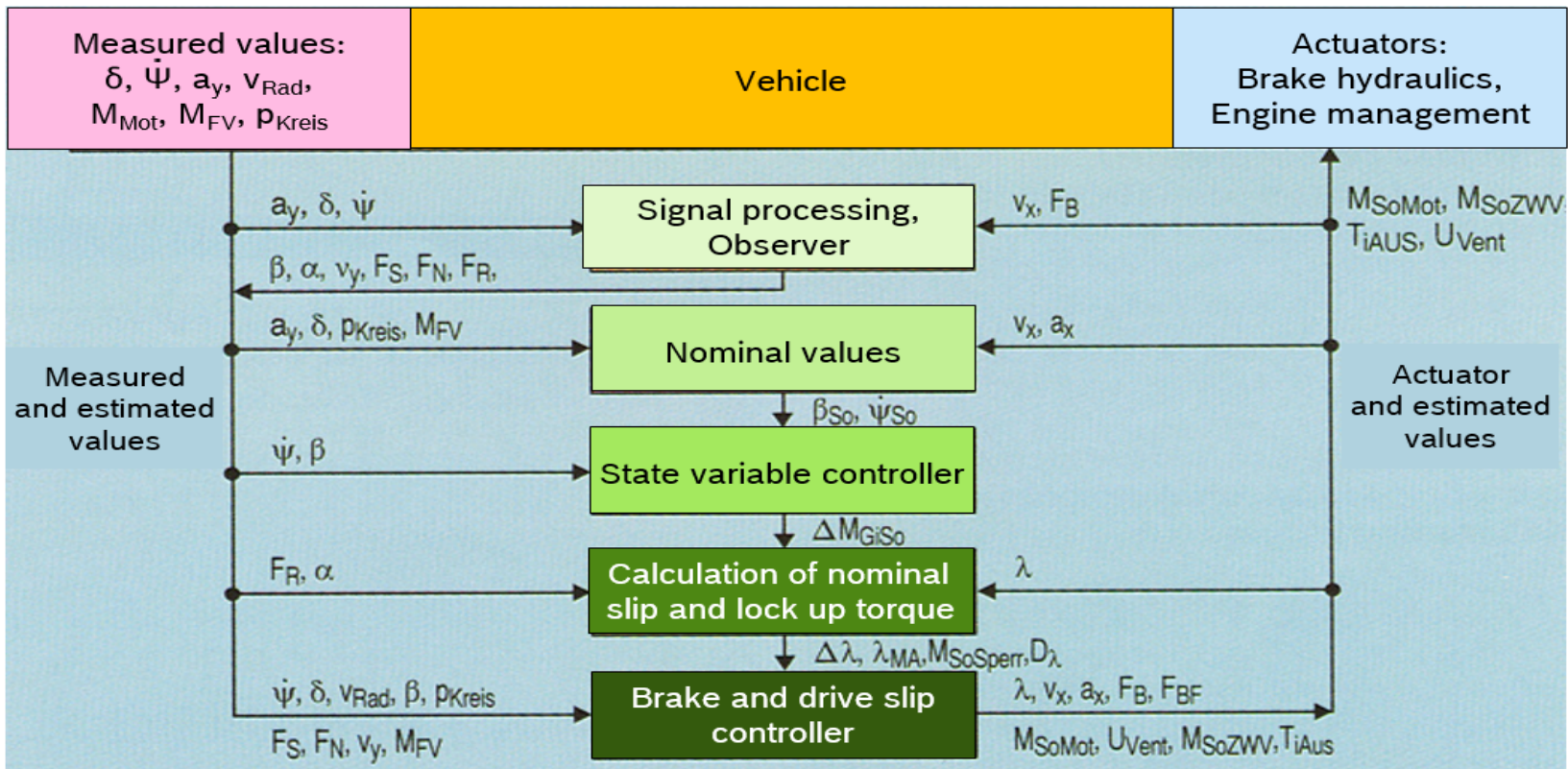


- |                              |                                      |
|------------------------------|--------------------------------------|
| ① Raddrehzahlsensoren        | ⑤ Querbewegungsbeschleunigungssensor |
| ② Vordrucksensor             | ⑥ Druckmodulation                    |
| ③ Lenkradwinkelsensor        | ⑦ Motormanagement                    |
| ④ Giergeschwindigkeitssensor |                                      |

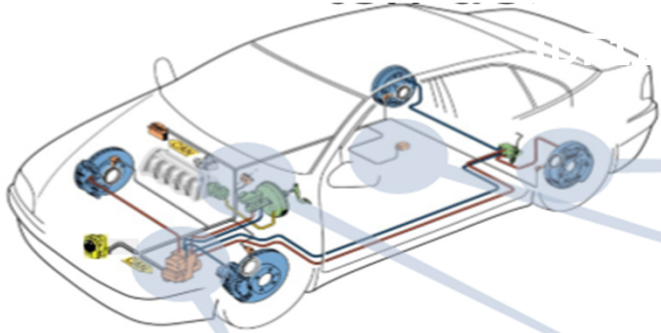


# Fahrdynamikregelsysteme

## ESP®-Regelkonzept: Blockschaltbild ESP-Regler



# Fahrdynamikregelsysteme ESP®-Komponenten Gen 9



**Hydraulikeinheit und Steuergerät ESP® 9 plus**



**Lenkwinkelsensor**



**Drehzahlsensor (DF11)**

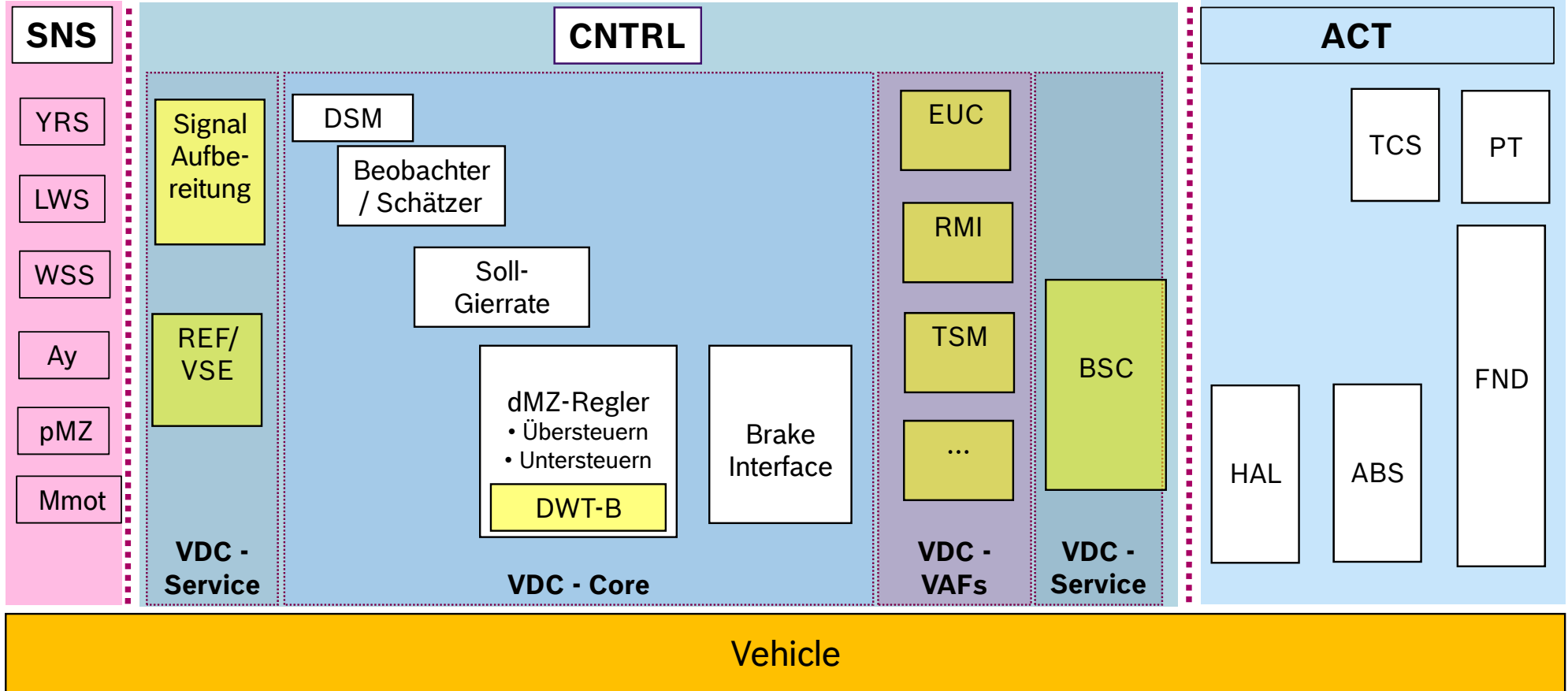


**Sensor Cluster DRS MM5.8**



# Fahrdynamikregelsysteme

## ESP® Reglerstruktur



# Fahrdynamikregelsysteme

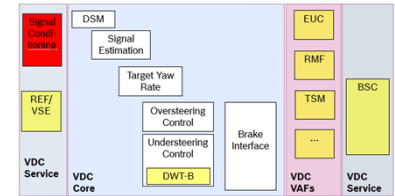
## Signalaufbereitung

### Signalaufbereitung

- Filterung
- Offset Korrektur
- Transformation  
(Sensor-Einbauort -> CoG-Position)
- Ableitungen
- Zähler

### für die Signale

- Lenkradwinkel
- Giergeschwindigkeit
- Vordruck
- Querbearschleunigung
- Bremslichtschalter



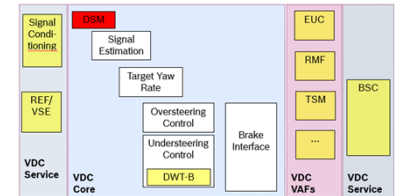


# Fahrdynamikregelsysteme

## Freischaltung

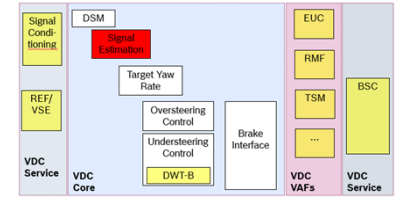
### DSM – Dynamic State Management

- Freigabe des Reglers
  - Keine Fehlermeldungen liegen vor
  - Unterlagerte Regler sind initialisiert
- Freigabe von Eingriffen
  - Bspw. Erkennung Vorwärtsfahrt
  - Keine Freigabe bei Sensorunplausibilitäten
  - Keine Freigabe bei Sondermanöver
  - ...
- Auswahl des VDC-Modes
  - Notabschalter gedrückt
  - Anpassung des Modus (Standard, Sport, Drift, ...)
- Kontinuierliches Monitoring
  - Keine andauernden Reglereingriffe
  - ...



# Fahrdynamikregelsysteme

## Fahrzustands-Beobachter: Schwimmwinkel



### Beobachter

- **Modellgestützte Schätzung von**
    - Schräglaufwinkel der Räder,
    - Schwimmwinkel,
    - Fahrzeugquergeschwindigkeit
  - sowie von
    - Seiten-, Normal- und
    - resultierende Kräfte am Rad
    - Reibwert
  - unter Verwendung des Zweispurmodells
- **auf Basis der Messgrößen:**
    - Giergeschwindigkeit
    - Lenkradwinkel,
    - Querbeschleunigung
  - **und den Schätzgrößen:**
    - Fahrgeschwindigkeit,
    - Brems- u. Antriebskräfte
  - **Sondersituationen:**
    - geneigte Fahrbahn,
    - $\mu$ -Split

# Fahrdynamikregelsysteme

## Fahrzustands-Beobachter: Schwimmwinkel

➤ Für kleine Verzögerungswert auf horizontaler, homogener Fahrbahn

– DGL für den Schwimmwinkel

$$\dot{\beta} = -\dot{\psi} + \frac{1}{v_F} (a_y \cdot \cos \beta - a_x \cdot \sin \beta)$$

– Für kleine Querbeschleunigungen u. Schwimmwinkel gilt:

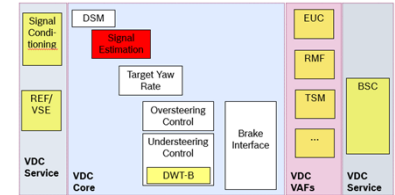
$$\dot{\beta} = \frac{a_Y}{v} - \dot{\psi}$$

$$\beta(t) = \beta_0 + \int_{t=0}^t \left( \frac{a_Y}{v} - \dot{\psi} \right) dt$$

– Schräglaufwinkel an den Rädern:

$$\alpha_v = \beta + \frac{l_v}{v_F} v_G i - Lw \quad \alpha_H = \beta + \frac{l_H}{v_F} v_G i$$

➤ **Integration fehlerbehafteter Messgrößen kann zu großen Fehlern führen**



# Fahrdynamikregelsysteme

## Fahrzustands-Beobachter: Schwimmwinkel

### ➤ Für große Verzögerungswerte auf horizontaler, homogener Fahrbahn

#### – Kalman-Filter mit

- 2 DGLs für Quer- u. Giergeschwindigkeit
- Messgröße: Giergeschwindigkeit

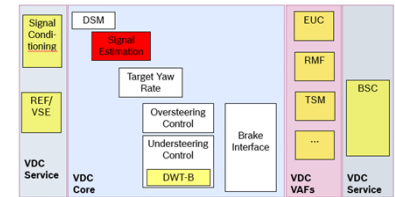
$$m_F \cdot (\dot{v}_y + v_x \cdot \dot{\psi}) = -(F_{S1} + F_{S2}) \cdot \cos \delta_R - (F_{B1} + F_{B2}) \cdot \sin \delta_R - F_{S3} - F_{S4}$$

$$\Theta_F \cdot \ddot{\psi} = -[(F_{S1} + F_{S2}) \cdot a \cdot \cos \delta_R + (F_{S1} - F_{S2}) \cdot b \cdot \sin \delta_R] + (F_{S3} + F_{S4}) \cdot c - (F_{B1} + F_{B2}) \cdot a \cdot \sin \delta_R + (F_{B1} - F_{B2}) \cdot b \cdot \cos \delta_R + (F_{B3} - F_{B4}) \cdot b$$

- Da Kalman-Filter robust gegen Störungen u. Sensorfehler ergibt sich ein größeres Vertrauen in den gewonnenen Schwimmwinkel

### ➤ **Fazit: Eine reine Schwimmwinkelregelung ist nicht möglich, aber**

- eine Regelung der Schwimmwinkelgeschwindigkeit auf  $\dot{\beta}=0$
- und eine Begrenzung des Schwimmwinkels i.d.R. auf kleine Werte



# Fahrdynamikregelsysteme

## Sollwert: Giergeschwindigkeit

### ➤ Sollgiergeschwindigkeit

- Ackermann-Beziehung

### ➤ Filterung der Sollgiergeschwindigkeit

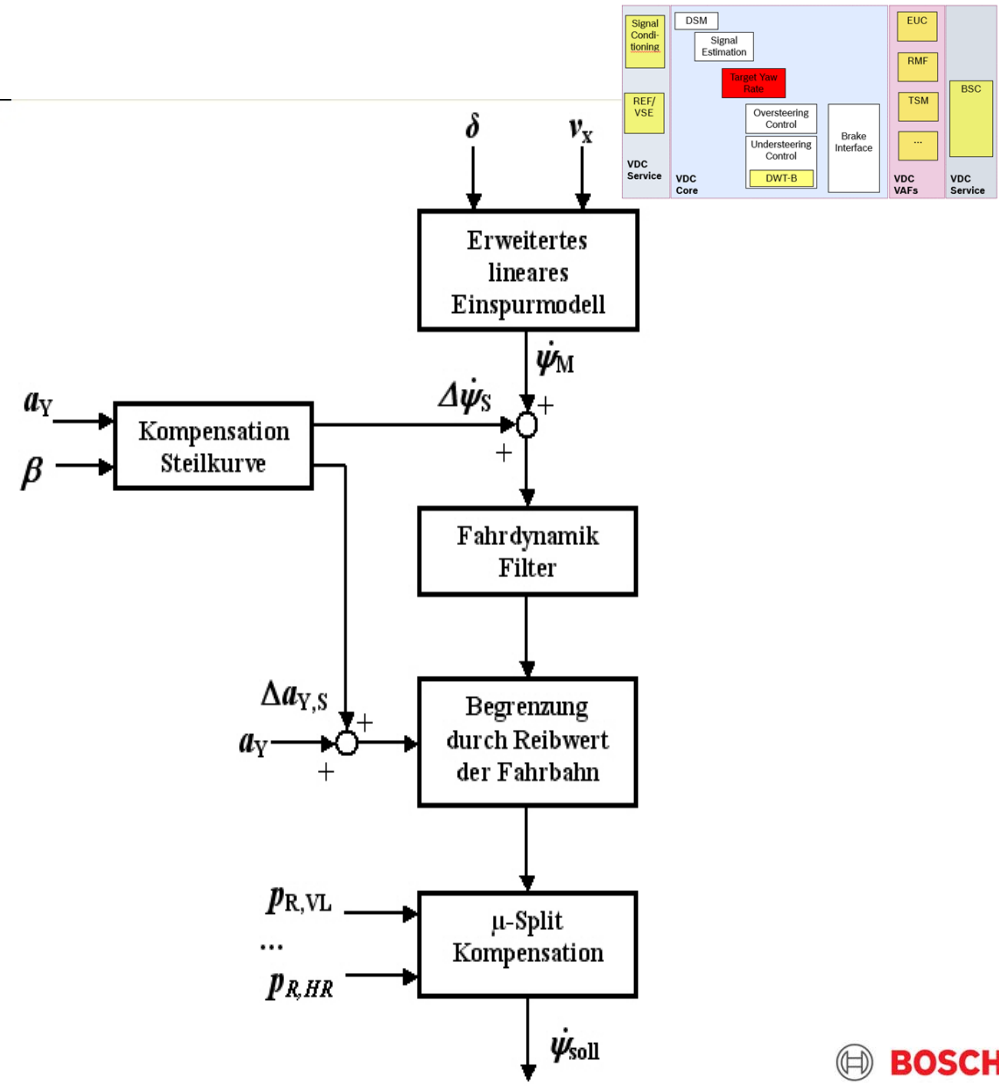
- Phasenverschiebung zwischen Lenkradwinkel u. Giergeschwindigkeit

### ➤ Begrenzung der Sollgiergeschwindigkeit

- Reibwert basiert
- u. damit auch Schwimm-/Schräglaufwinkel limitiert

### ➤ Kompensationen

- Steilwandkurve ( $v_{Gi}$ ,  $a_y$ )
- $\mu$ -Split-Bremssungen ( $v_{GiSo\_lim}$ )



# Fahrdynamikregelsysteme

## Sollwert: Giergeschwindigkeit

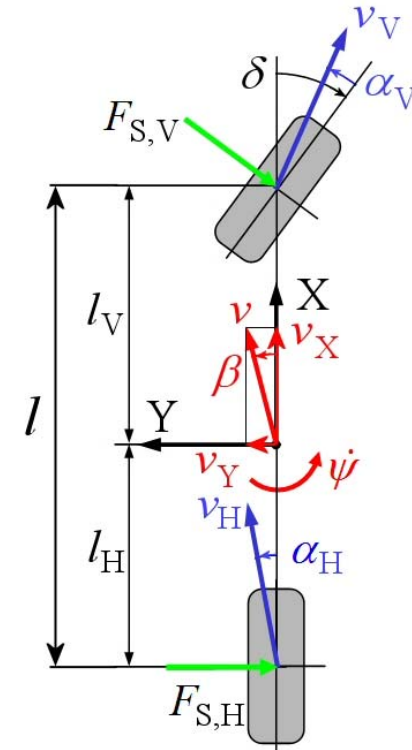
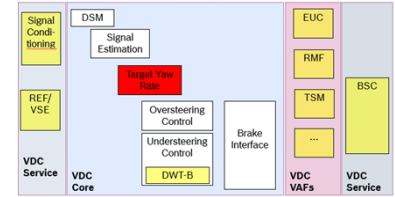
### ➤ Sollwert der Giergeschwindigkeit bestimmt auf Basis

- Linearem, erweitertem Einspurmodell
- Reifenkräften proportional zum Schräglaufwinkel

$$\dot{\psi}_{\text{soll}} = \frac{v_X \cdot \delta}{(l_V + l_H) \cdot \left(1 + \frac{v_X^2}{v_{\text{ch}}^2}\right)}$$

- Mit der charakteristischen Geschwindigkeit

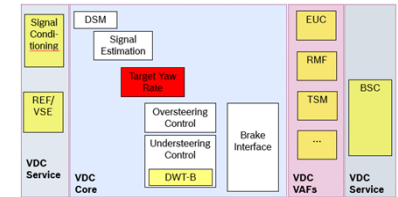
$$v_{\text{ch}} = l \cdot \sqrt{\frac{1}{m} \cdot \left( \frac{c'_{\alpha V} \cdot c'_{\alpha H}}{l_H \cdot c'_{\alpha H} - l_V \cdot c'_{\alpha V}} \right)}$$



# Fahrdynamikregelsysteme

## Sollwert: Giergeschwindigkeit

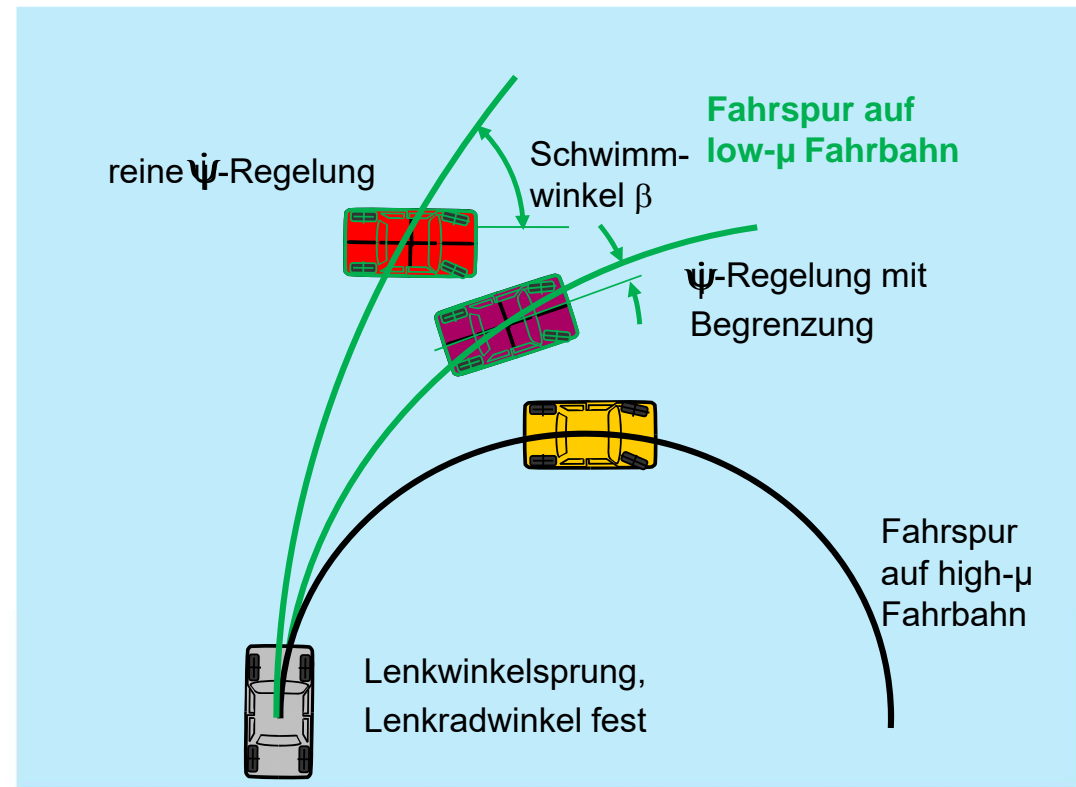
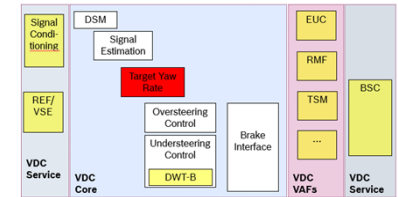
- Veränderungen im Fahrzeug von Beladung, Reifen, ...  
erfordern zur Vermeidung unplausibler Regeleingriffe eine Berücksichtigung in der charakteristischen Geschwindigkeit  $V_{Ch}$
- Untere charakteristische Geschwindigkeit -  $V_{Chu}$ 
  - Gemäß OEM-Daten
  - Untersteuerungsregelung
- Obere charakteristische Geschwindigkeit -  $V_{Ch0}$ 
  - $V_{Chu}$  mit zu applizierendem Zuschlag
  - Übersteuerungsregelung



# Fahrdynamikregelsysteme

## Sollwert: Giergeschwindigkeit

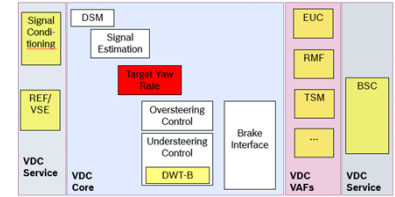
- Ackermann nur gültig im linearen Bereich
- Fahrbahnreibwert wird nicht berücksichtigt; d.h. auch keine großen Schwimmwinkel
- vGiSo kann größer sein als für ein physikalisch mögliches stabiles Fahren -> große Schwimmwinkel
- Der Sollgierrate ist auf Werte zu begrenzen für die der Schwimmwinkel nicht zunimmt.





# Fahrdynamikregelsysteme

## Sollwert: Giergeschwindigkeit



- Neben der Ackermann-basierten Sollgiergeschwindigkeit ist eine kraftbegrenzte Sollgierrate zur Berücksichtigung der Fahrbahnreibverhältnisse erforderlich um den Schwimmwinkelanstieg zu begrenzen

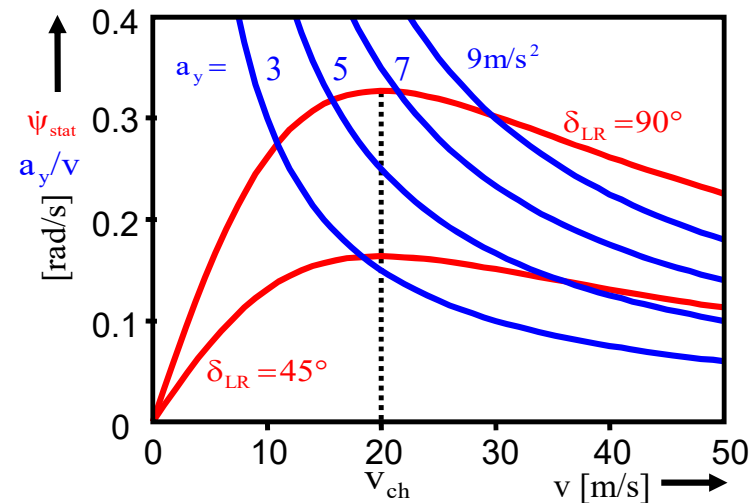
- Für die Schwimmwinkelgeschwindigkeit für große Giergeschwindigkeiten gilt:

$$\dot{\beta} = \frac{ayToF}{vFzRef} - vGi$$

- mit der Begrenzung der Giergeschwindigkeit auf

$$\dot{\beta} = 0 \quad \Rightarrow \quad vGi = \frac{ayToF}{vFzRef} = vGiSoBegay$$

erfolgt kein weiterer Anstieg des Schwimmwinkels

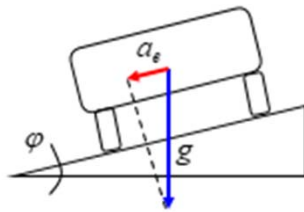


# Fahrdynamikregelsysteme

## Sollwert: Giergeschwindigkeit

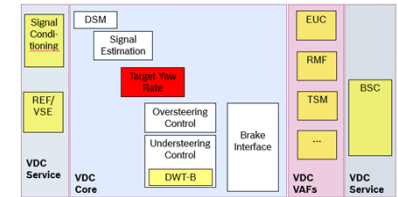
### ➤ Kompensationen der Sollgiergeschwindigkeit sind erforderlich für

- Überhöhte Kurven -> hier ist die gemessene Querbeschleunigung nicht proportional zum Reibwert



$$a_e = g \cdot \sin(\varphi)$$
$$a_e |_{(3^\circ)} \approx 0.14 g$$

- Bei  $\mu$ -Split-Bremisungen
  - Gegenlenken des Fahrers zur Fzg-Stabilisierung führt nicht zur gewünschten Sollgierrate
- Sondersituationen
  - Bspw. Lenkverhalten des Fahrers



# Fahrdynamikregelsysteme

## Giergeschwindigkeitsregelung

### Ziel der Regelung:

#### ➤ Anforderung

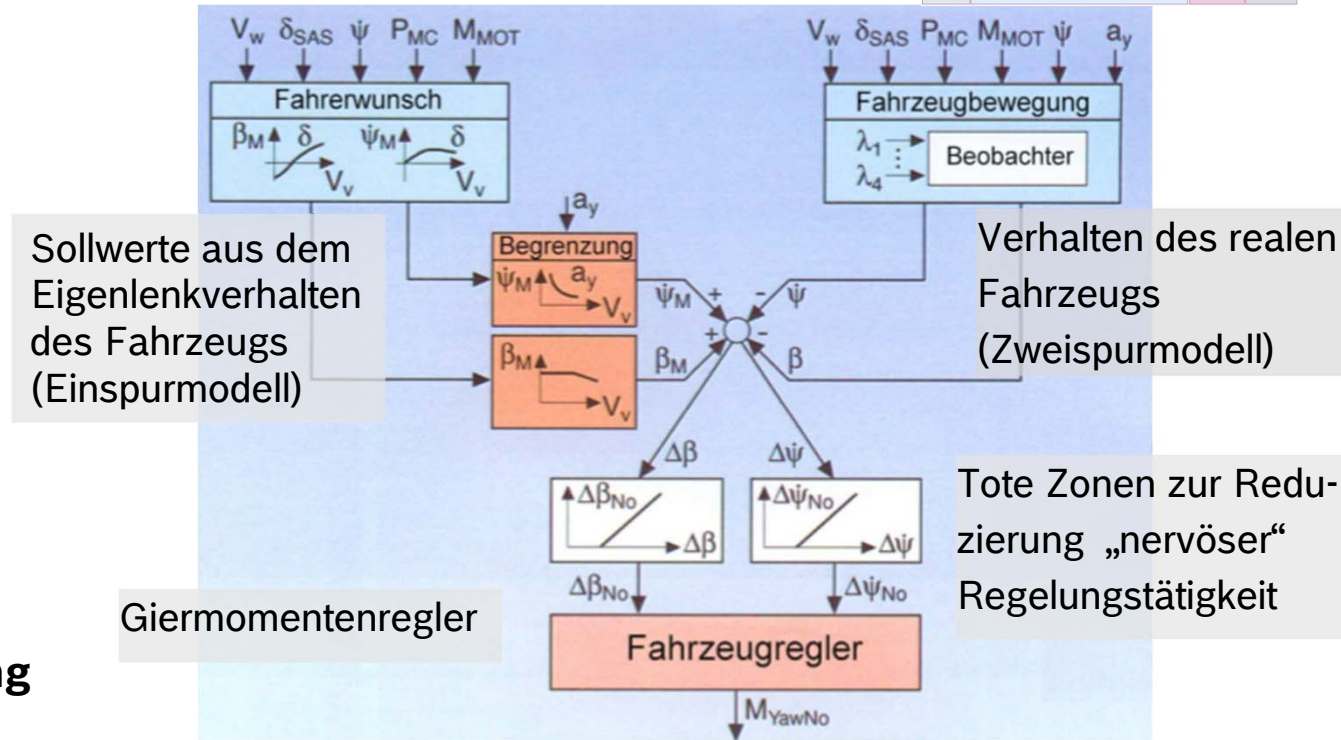
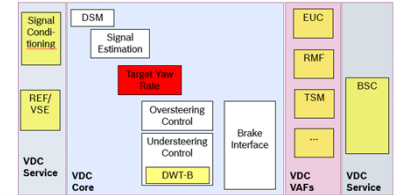
- Fzg soll dem Fahrerwunsch folgen – ausgehend vom Lenkradwinkel
- Fzg soll nicht übersteuern, d.h. der Schwimmwinkel muss begrenzt sein

#### ➤ Messbare Größen

- Giergeschwindigkeit
- Querbefleunigung
- Fzg-Geschwindigkeit
- Schwimmwinkel nicht – geschätzt!

#### ➤ D.h. Giergeschwindigkeitsregelung mit Schwimmwinkelbegrenzung

Es gelten die folgenden engl. Bezeichnungen: Index No = Sollwert, W bzw. Whl = Rad, Index i = Radnummer, SAS = Lenkradwinkel, MC = Hauptbremszylinder, Yaw = Gierwinkel, M = Modell, Index V = Fahrzeug)



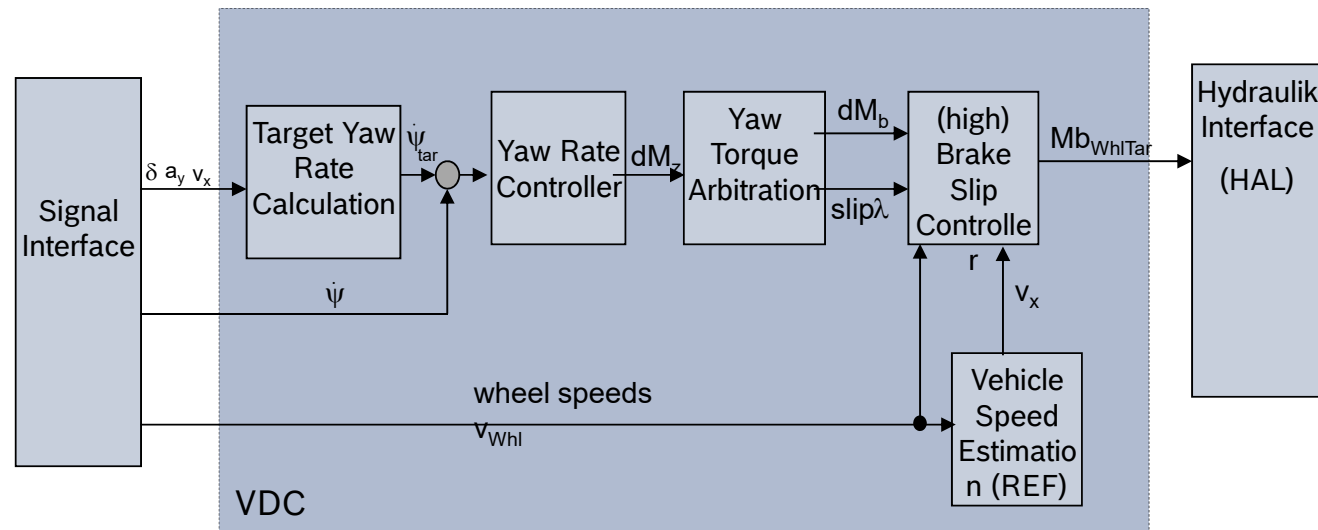
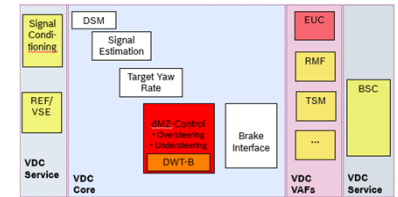
# Fahrdynamikregelsysteme

## dMZ-Regler

### Regelstrategie

➤ Die Drehratenregelung erfüllt das Ziel eines stabileren als auch lenkfähigeren Fahrzeugs

- Dies erfordert
  - die Kenntnis sowohl der aktuellen Drehrate
  - als auch der Soll-drehrate
  
- Das Giermoment **dMZ** als Reglerausgang wird wirksam in Form von:
  - Radbremsmomenten (via Radbremsschlupf) an einzelnen Rädern
  - Antriebsschlupf-reduktion (via TCS)

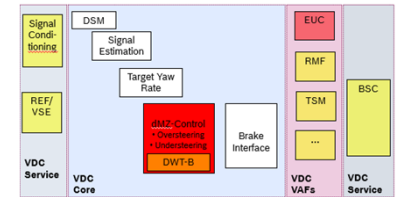
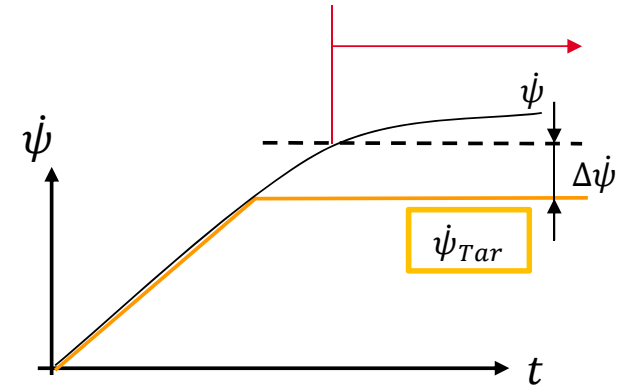


# Fahrdynamikregelsysteme

## dMZ-Regler

### ➤ Reglerfreigabe

- Eingriffe werden erforderlich, wenn die Giergeschwindigkeit den Sollwert überschreitet
- Eine tote Zone (Aktivierungs-Threshold) verhindert unnötige Eingriffe
- Wenn die der Threshold-Wert überschritten wird, erfolgt die Reglerfreigabe

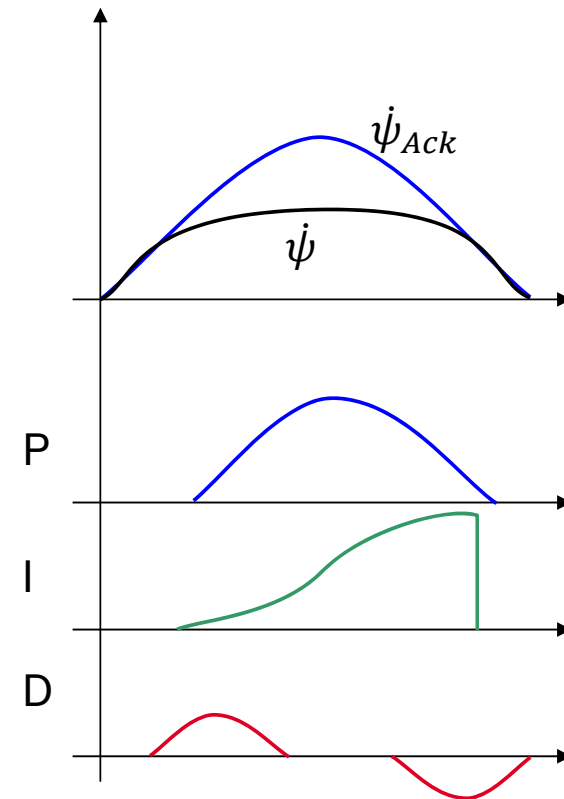
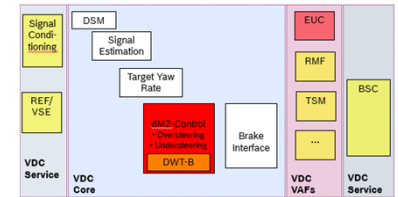
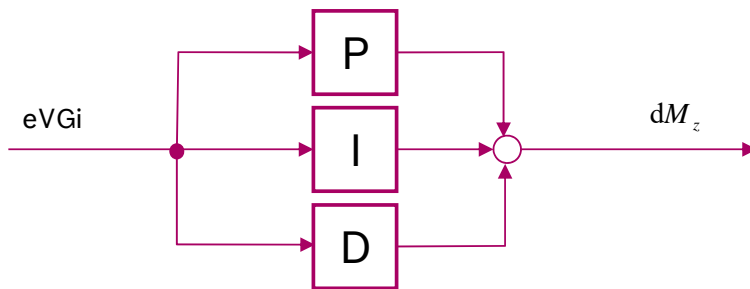


# Fahrdynamikregelsysteme

## dMZ-Regler

### ➤ PID-Regelung

- P-Glied:
  - Sanfte Eingriffe
- I-Glied:
  - Einfluß nimmt mit der Zeit zu, robust gegen Schätzfehler (bspw. Drücke)
- D-Glied:
  - Hilfreich als initialer Impuls auf das Fahrzeug

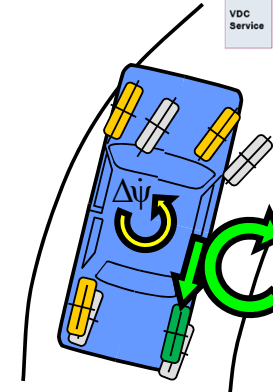
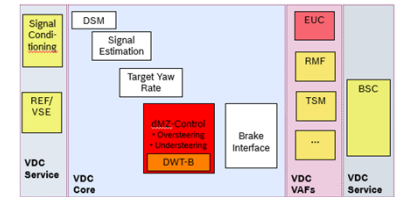


# Fahrdynamikregelsysteme

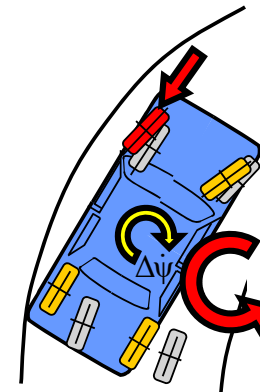
## dMZ-Regler

### ➤ dMZ-Eingriffe

- Der Regler strebt an, die Fzg-Gierbewegung –als wichtigste Regelgröße - entweder zu
  - verstärken (**Untersteuern**)
    - Anstellend = in die Kurve eindrehend = Giergeschwindigkeit erhöhend
  - abschwächen (**Übersteuern**)
    - Stabilisierend = aus der Kurve herausdrehend = Giergeschwindigkeit absenkendwas eine Giermomentenänderung (dMZ) erfordert.
- Von daher ist der Reglerausgang die Änderung des **Giermoments** dMz
- In der aktuellen Systemauslegung sind Bremsmoment / -schlupf die Maßnahmen zur Einspeisung des des gewünschten Giermoments (andere Steller sind auch möglich; z.B. eine Aktivlenkung).



**Giermoment dMZ  
Untersteuern**



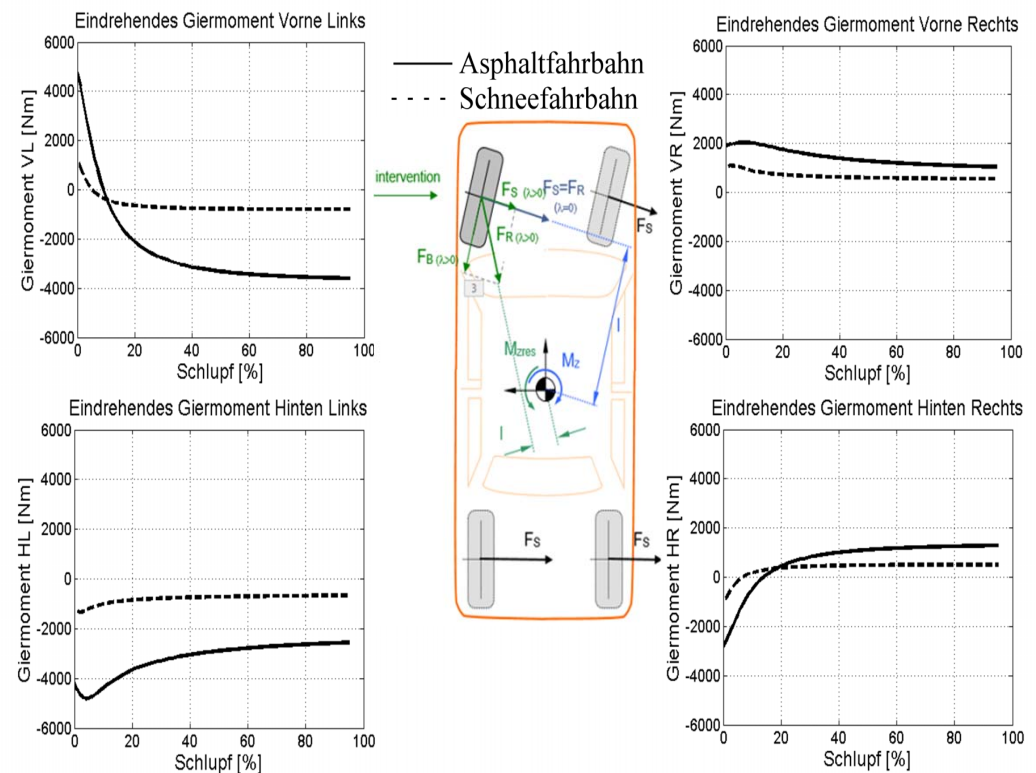
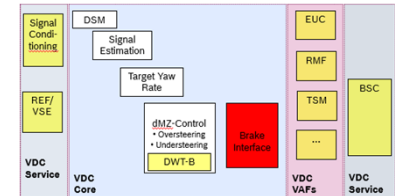
**Giermoment dMZ  
Übersteuern**

# Fahrdynamikregelsysteme

## Bremseninterface

### ➤ MZ Arbitrierung

- Eingriffstrategie:
  - welches Rad soll genommen werden?
  - Wie hoch muss der Eingriff sein?
- Auswahl auf Basis  $M_{zGes} = f(\lambda)$ -Diagrammen
- Übersetzt Eingriffe von der Fzg-Ebene auf die Radebene
  - Innen/außen – vorne/hinten
  - dMZ nach dMZ i, o, FA, RA
- Auswahl des Rades für den Eingriff erfolgt
  - fahrzustandsabhängig
  - wissensbasiert
  - theoretischen Analysen (MZ-Verläufen)



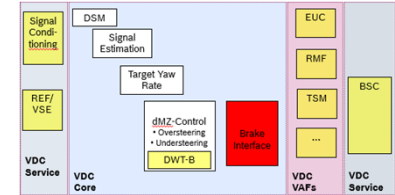
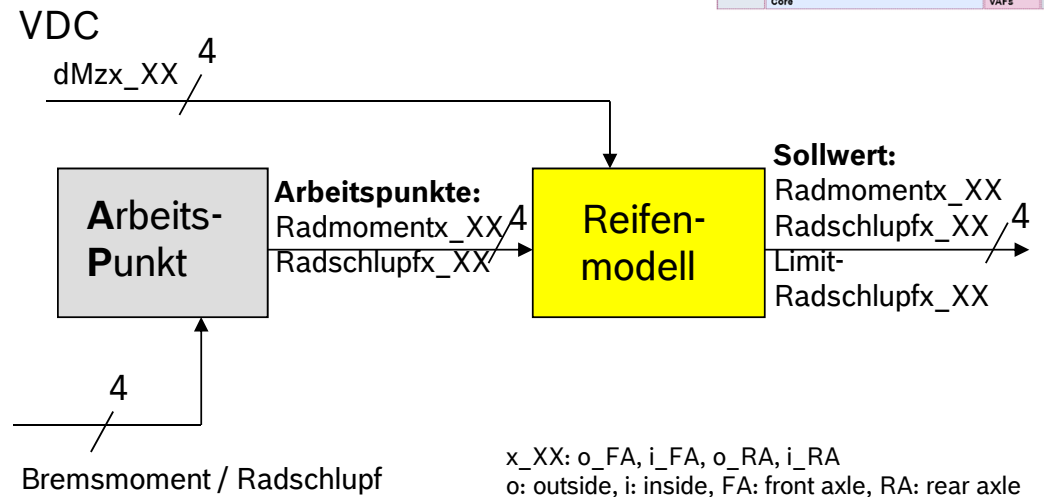


# Fahrdynamikregelsysteme

## Bremseninterface

### ➤ Wheel Mapping - Reifenmodell

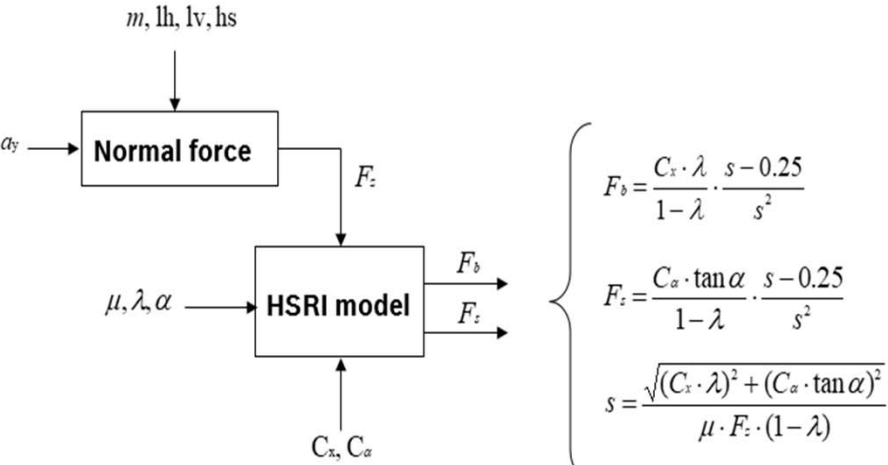
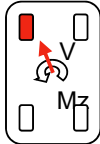
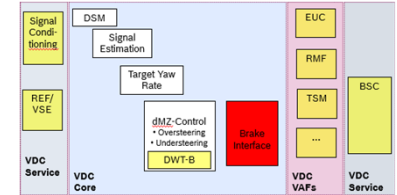
- Berechnet den Arbeitspunkt radindividuell
- Übersetzt für jedes Rad dMZ i, o, FA, RA in
  - Momentenanforderung
  - Schlupflimit
  - Schlupfanforderung
- Legt die Eingriffsstrategie fahrzustandsbedingt fest
  - Schlupf- / Momentenerhöhung
  - Momentenreduktion im ABS-Fall



# Fahrdynamikregelsysteme

## Bremseninterface

### ➤ Reifenmodell

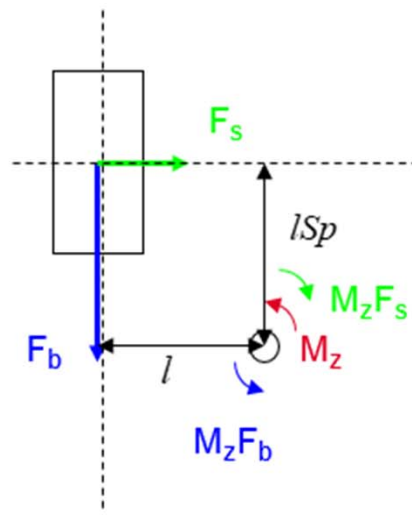


**HSRI-Reifenmodell**

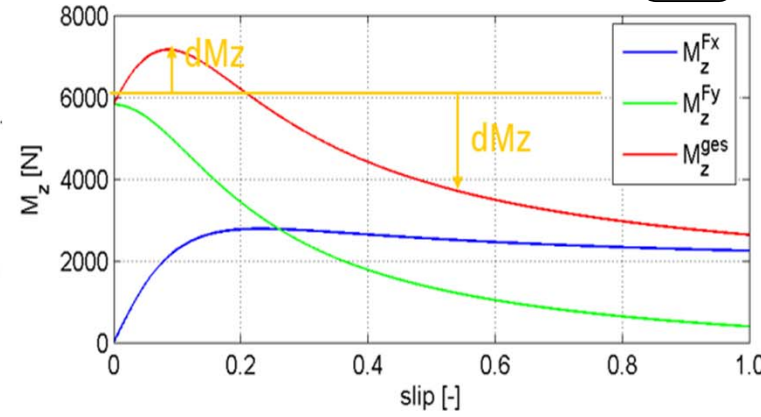
$$F_b = \frac{C_x \cdot \lambda}{1 - \lambda} \cdot \frac{s - 0.25}{s^2}$$

$$F_z = \frac{C_\alpha \cdot \tan \alpha}{1 - \lambda} \cdot \frac{s - 0.25}{s^2}$$

$$s = \frac{\sqrt{(C_x \cdot \lambda)^2 + (C_\alpha \cdot \tan \alpha)^2}}{\mu \cdot F_z \cdot (1 - \lambda)}$$



$dMz = MzFb + MzFs$



**dMz am kurveninneren Vorderrad**

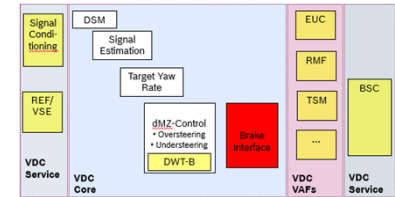
# Fahrdynamikregelsysteme

## Bremseninterface

### ➤ Mz Arbitrierung - Übersicht

situation	wheel	US intervention	OS intervention
unbraked	FAi	x	
	FAo		x
	RAo		x
	RAi	x	
partially braked	FAi		
	FAo	x	x
	RAo		x
	RAi	x	x
ABS	FAi		
	FAo		x
	RAo		
	RAi	x	

FA	front axle	o	outside
RA	rear axle	i	inside
US	understeering		
OS	oversteering		



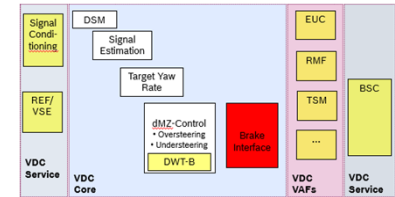
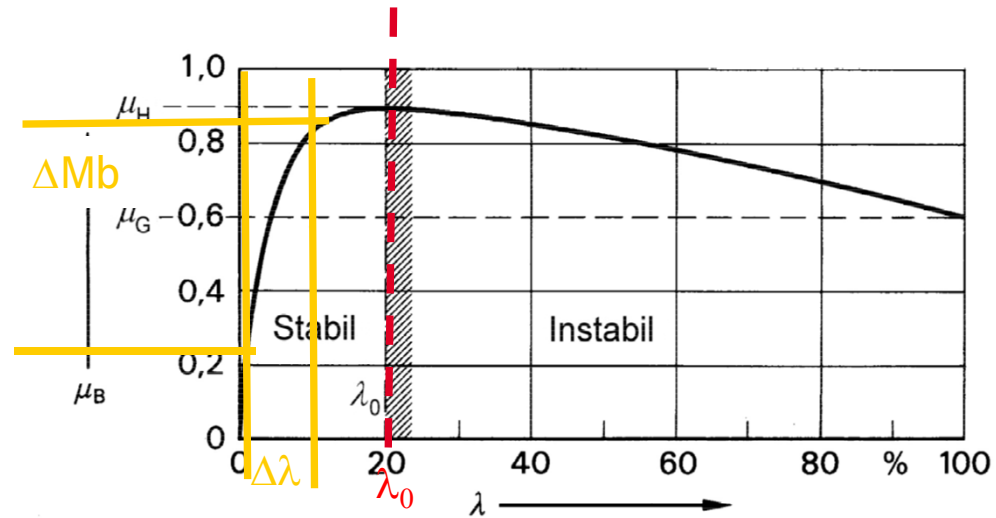
- vorne außen / hinten innen
  - das kurvenäußere Vorderrad ist am effektivsten für Stabilisierungseingriffe -> aus der Kurve herausdrehend, Giergeschw. absenkend
  - im Gegenzug ist das kurveninnere Hinterrad am effektivsten für Anstelleingriffe -> in die Kurve eindrehend, Giergeschw. erhöhend
  - für o.g. Räder bedeutet eine Erhöhung des Bremsschlupfs eine Änderung des Giermomentes in die ohnehin schon anstehende Richtung, unabhängig vom Arbeitspunkt
  
- hinten außen / vorne innen
  - für kleinen Bremsschlupf (bswp. im Freirollfall) kann das äußere Hinter- und das innere Vorderrad für Stabilisierungs- als auch Untersteuereingriffe genutzt
  - hingegen kann zuviel Bremsschlupf zu einem kontroproduktiven Einfluß auf das Giermoment führen.

# Fahrdynamikregelsysteme

## Bremseninterface

### ➤ Arbitrierung von:

- Bremsmoment
- Bremsschlupf



### Bremsmomentenanforderung:

- Im stabilen Bereich der  $\mu$ -Schlupf
- Im Über- u. Untersteuerfall
- An jedem Rad

### Schlupfanforderung:

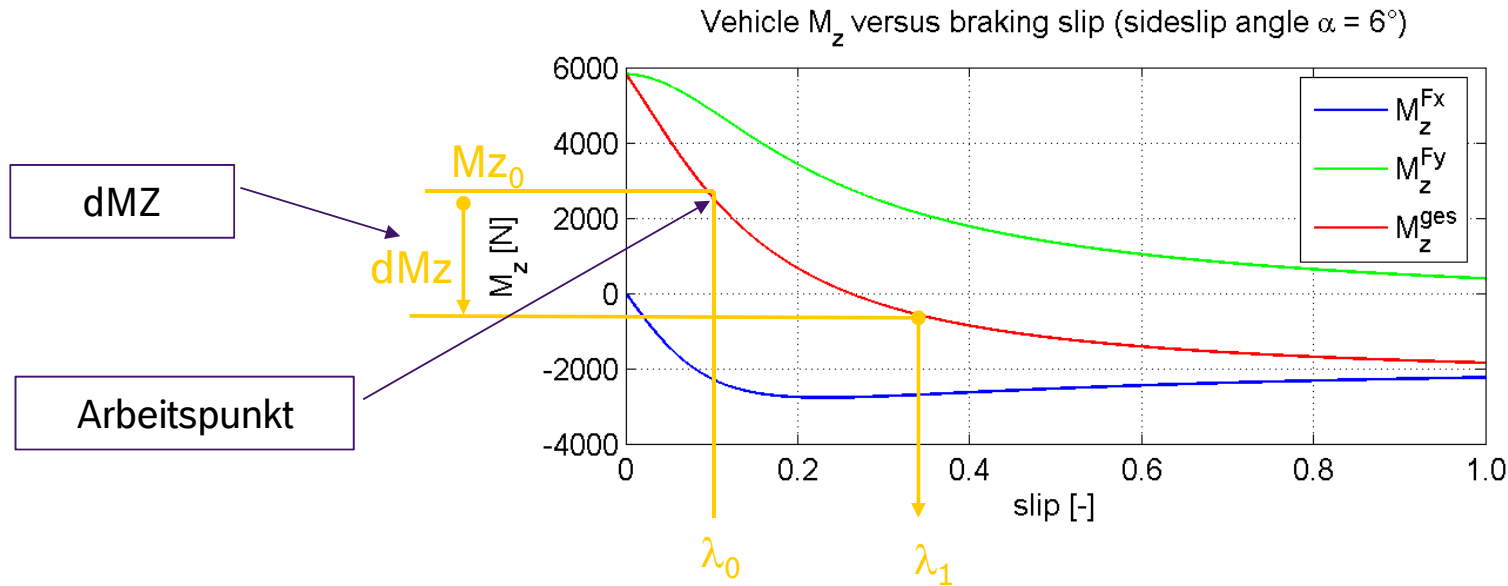
- Im instabilen Bereich der  $\mu$ -Schlupf-Kurve
- Im Übersteuerfall
- Nur an kurvenäußeren Vorderrädern
- Umgesetzt durch BrakeSlipControl BSC

# Fahrdynamikregelsysteme

## Bremseninterface

### ➤ Bestimmung des Bremsschlupfs

- Übersetzung von  $dM_z$  auf zugehörigen Bremsschlupf  $\lambda_1$  - gebremst

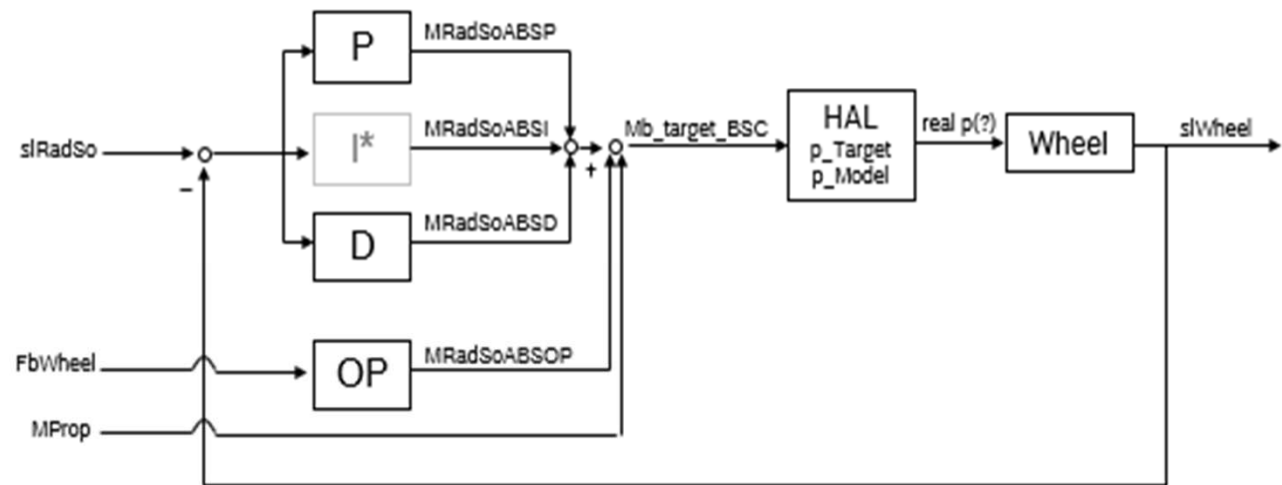
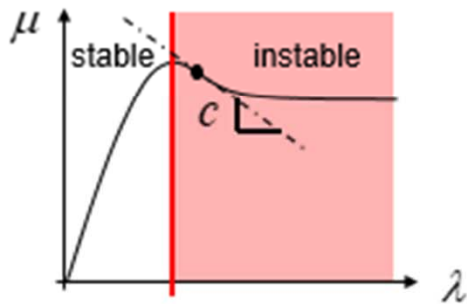


# Fahrdynamikregelsysteme

## Bremseninterface

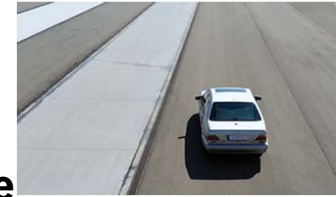
### ➤ Brake Slip Controller – BSC

- Regelung des Radschlupfes sowohl
  - im stabilen
  - als auch instabilen
  - Bereich der  $\mu$ -Schlupf-Kurve

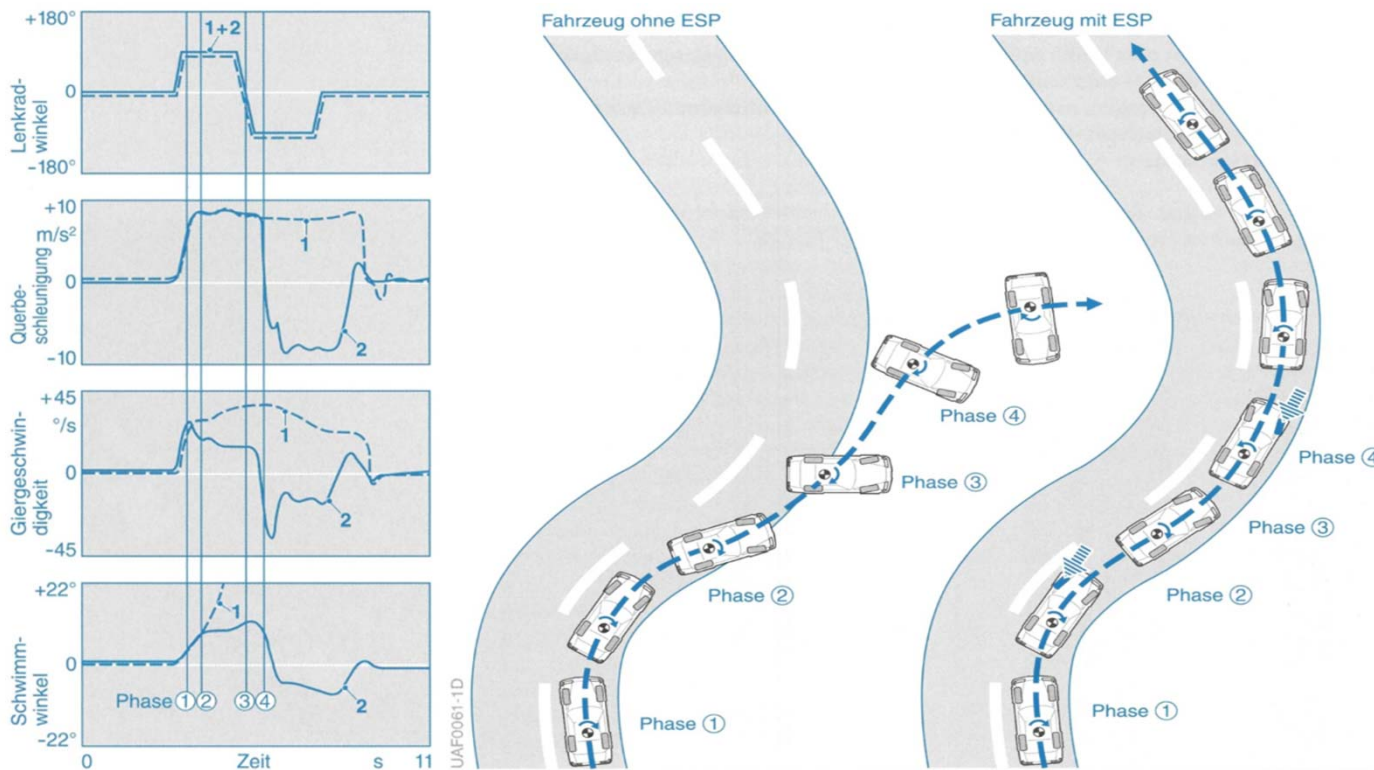


# Fahrdynamikregelsysteme

## ESP®-Regelkonzept: Eingriffstrategie



### Zeitverläufe fahrdynamischer Größen beim Durchfahren einer Rechts-Links-Kurve



- (1) Fahrer lenkt, Seitenkraftaufbau, stark eindrehendes Giermoment
- (2) Drohende Instabilität:  
links: Fzg. wird instabil, reagiert auf Gegenlenken nicht  
rechts: ESP®-Eingriff links vorne
- (3) Gegenlenken  
links: Fzg gerät außer Kontrolle  
rechts: Fzg bleibt unter Kontrolle
- (4) Links: Fzg nicht beherrschbar  
rechts: ESP®-Eingriff vorne rechts, vollständige Stabilisierung