

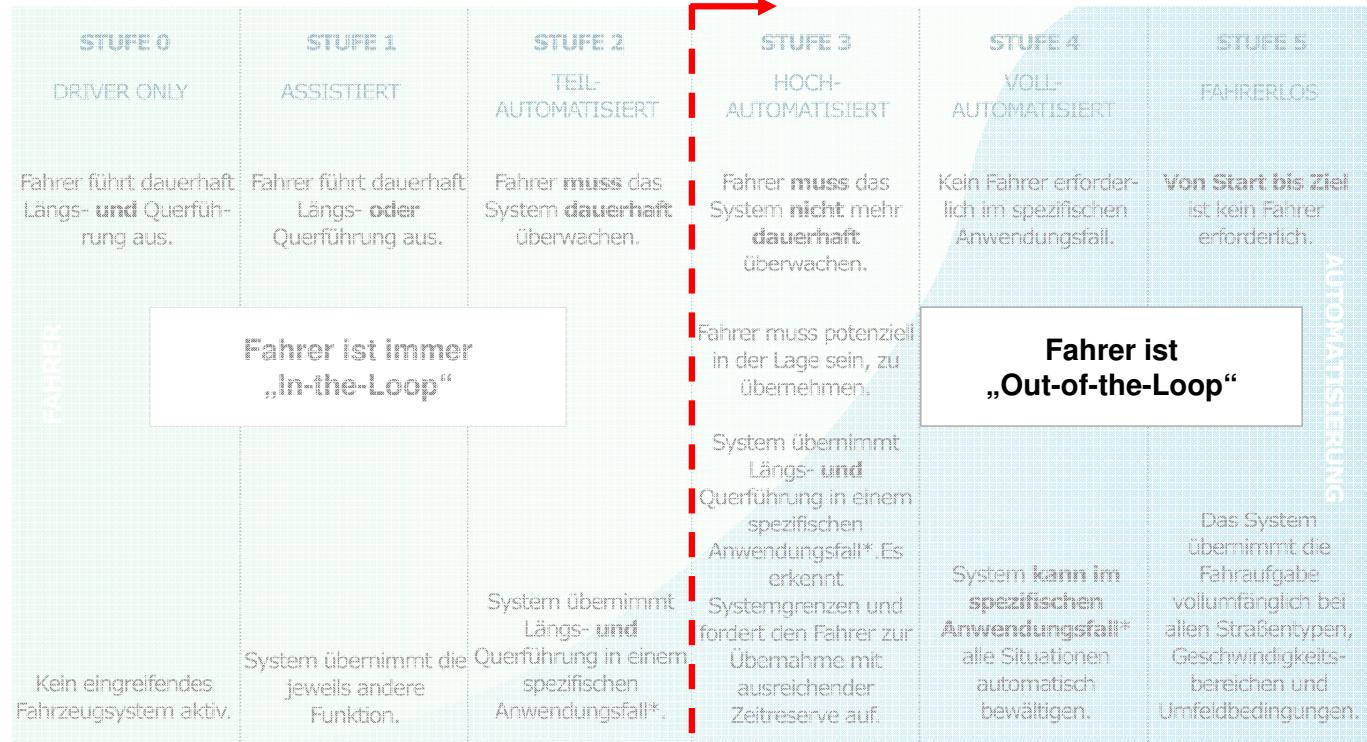
Fahrzeugregelung II

FAS und automatisiertes Fahren



**Prof. Dr.-Ing. Steffen Müller
M.Sc. Jochen Gallep
Fachgebiet Kraftfahrzeuge • Technische Universität Berlin**

Einführung Automatisierungsstufen



*Anwendungsfälle beinhalten Straßentypen, Geschwindigkeitsbereiche und Umfeldbedingungen

Quelle: VDA

Einführung - Motivation

Zeitgeist und veränderte Kundenwünsche

59%

2013:
32%

Nice to have: »Ein Auto zu besitzen ist gut, aber nicht notwendig.«

67%

2013:
75%

der Millennials sagen:
»Ein Auto ist praktisch und zweckmäßig.«

Stellenwert des Autos für junge Fahrer

41%

2013:
68%

der Millennials sagen:
»Ein Auto ist etwas,
was man haben muss.«



Ford Automotive Zeitgeist Studie 08/14

Einführung - Motivation

Zeitgeist und veränderte Kundenwünsche

66%

Fahrspaß durch Effizienz:
Sparsamer Verbrauch ist für
Millennials mit hohem Abstand der
wichtigste Spaßgarant.



46%

der Millennials empfinden eine
einfache Bedienung als
wichtiges Kriterium für
Fahrspaß.



Fahrspaß für junge Fahrer

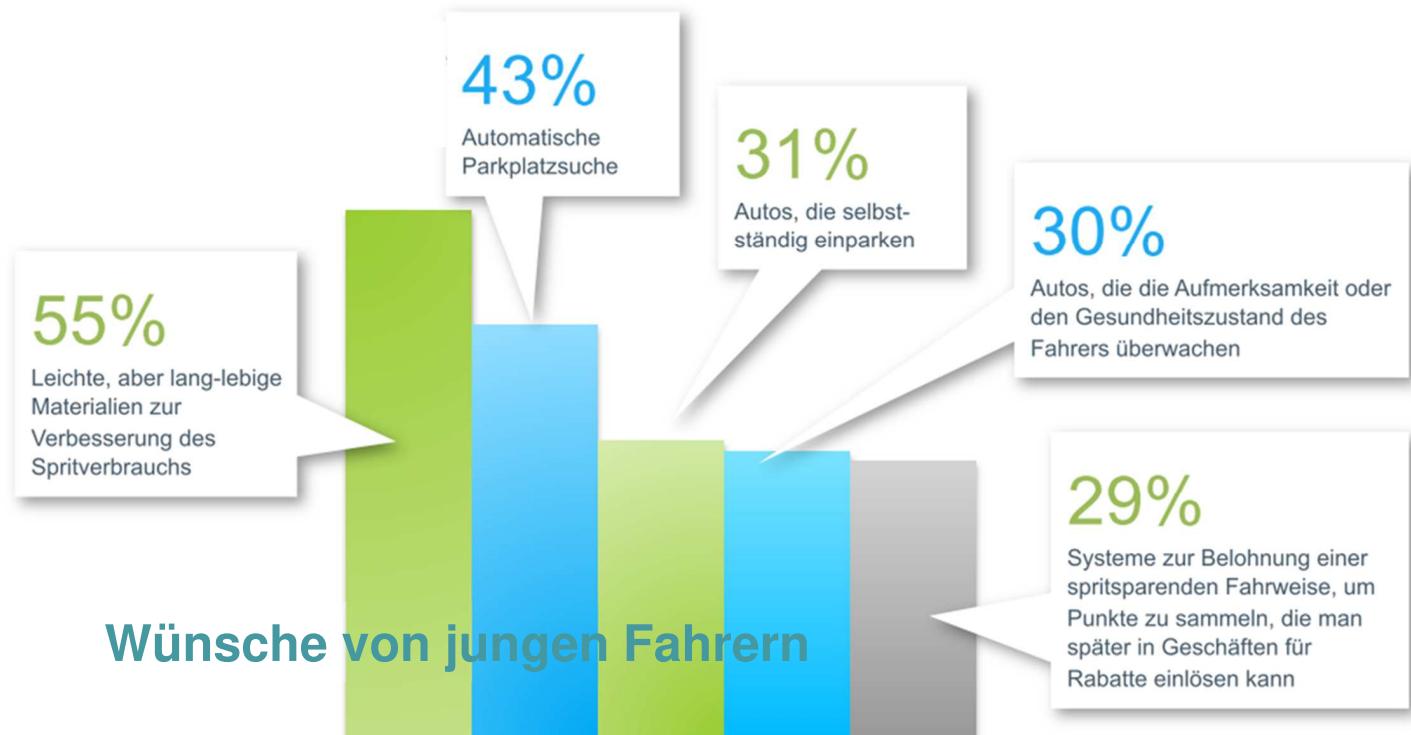
44%

empfinden Fahrspaß bei
hoher Flexibilität des
Fahrzeuginnenraums.

Ford Automotive Zeitgeist Studie 08/14

Einführung - Motivation

Zeitgeist und veränderte Kundenwünsche

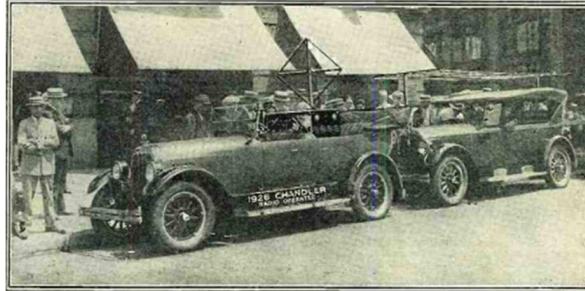


Ford Automotive Zeitgeist Studie 08/14

Einführung - Motivation

Technische Machbarkeit

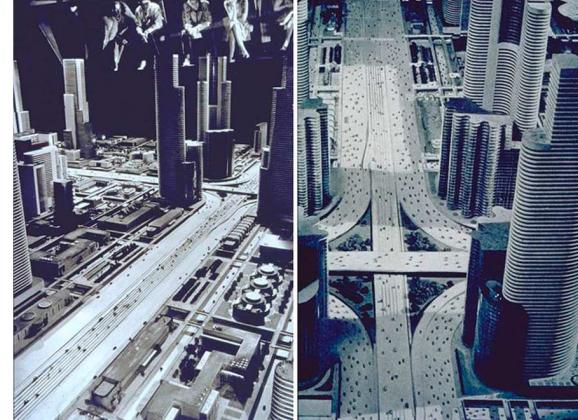
The American Wonder (1925)



Im August 1925 präsentierte der Elektroingenieur Francis P. Houdina ein funkgesteuertes Fahrzeug in New York.

- Lenkung, Kupplung, Bremse, Gangwahl von nachfolgendem Fahrzeug ferngesteuert.

Futurama (1939)



Auf der Weltausstellung präsentierte GM seine Visionen für 1960.

- Ferngesteuerte Elektrofahrzeuge auf automatisierten Autobahnen

Einführung - Motivation

Technische Machbarkeit

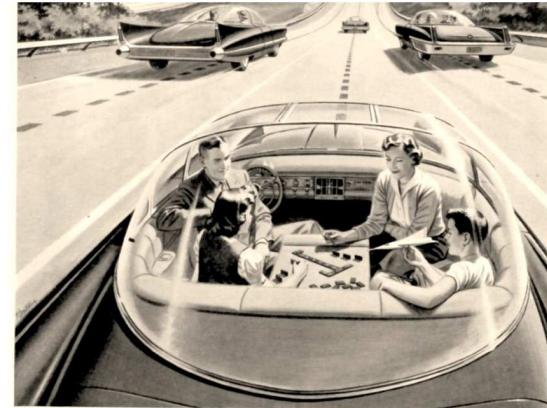
GM's Firebird III (1958)



Das Konzeptfahrzeug Firebird III wird auf der Motorama 1959 in New York vorgestellt.

- Gasturbinen-Triebwerk
- Drive-By-Wire über Joy-Stick
- Autopilot über Induktionsschleifen

Central Power and Light Company (1957)



ELECTRICITY MAY BE THE DRIVER. One day your car may speed along an electric super-highway, its speed and steering automatically controlled by electronic devices embedded in the road. Highways will be made safe -- by electricity! No traffic jams... no collisions... no driver fatigue.

"ELECTRICITY MAY BE THE DRIVER. One day your car may speed along an electric super-highway, its speed and steering automatically controlled by electronic devices embedded in the road. Highways will be made safe -- by electricity! No traffic jam.. no collisions... no driver fatigue"

Einführung - Motivation

Technische Machbarkeit

Shakey (1966)



Das Stanford Research Institute for AI entwickelt ein autonomes Fahrzeug

- Revolutionäre Sensor- und Software-entwicklungen

Erstes „autonomes“ Auto (1977)



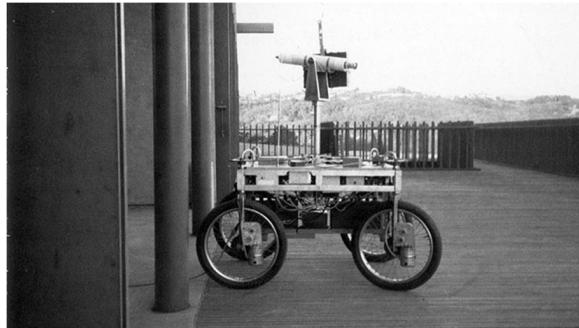
S. Tsugawa entwickelt in Japan ein wirklich selbstfahrendes Auto.

- 2 Kameras und Analogcomputer
- Fahrgeschwindigkeit 30 km/h
- Orientierung an Seitenplanke

Einführung - Motivation

Technische Machbarkeit

Stanford Cart (1979)



"The cart successfully crossed a chair-filled room without human intervention in about five hours."

- Fahrgeschwindigkeit 4 m/h

DARPA ALV-Programm (1983-1989)

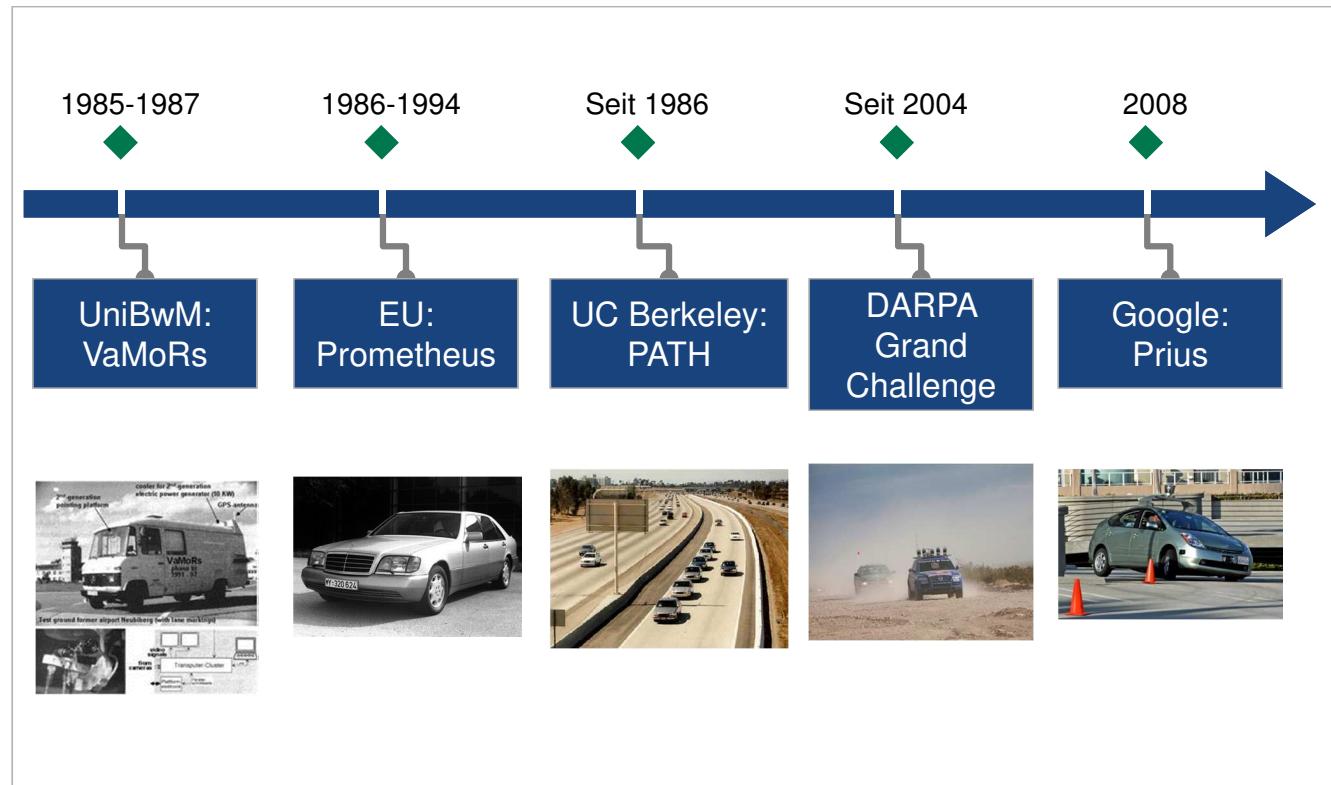


Defence Advanced Research Projects Agency

- Parallele Mikrorechner Architekturen
- Kameras und Laserscanner
- Fahrleistung nicht zufriedenstellend

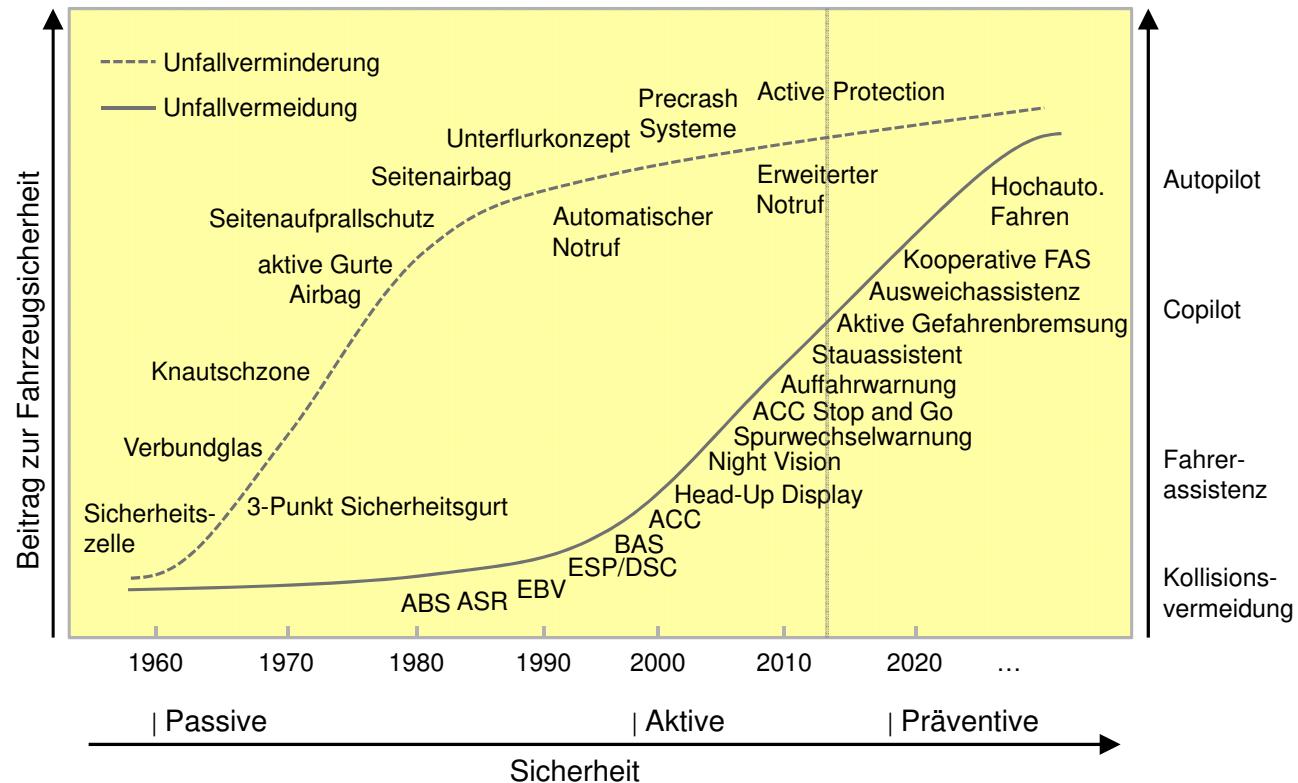
Einführung - Motivation

Technische Machbarkeit

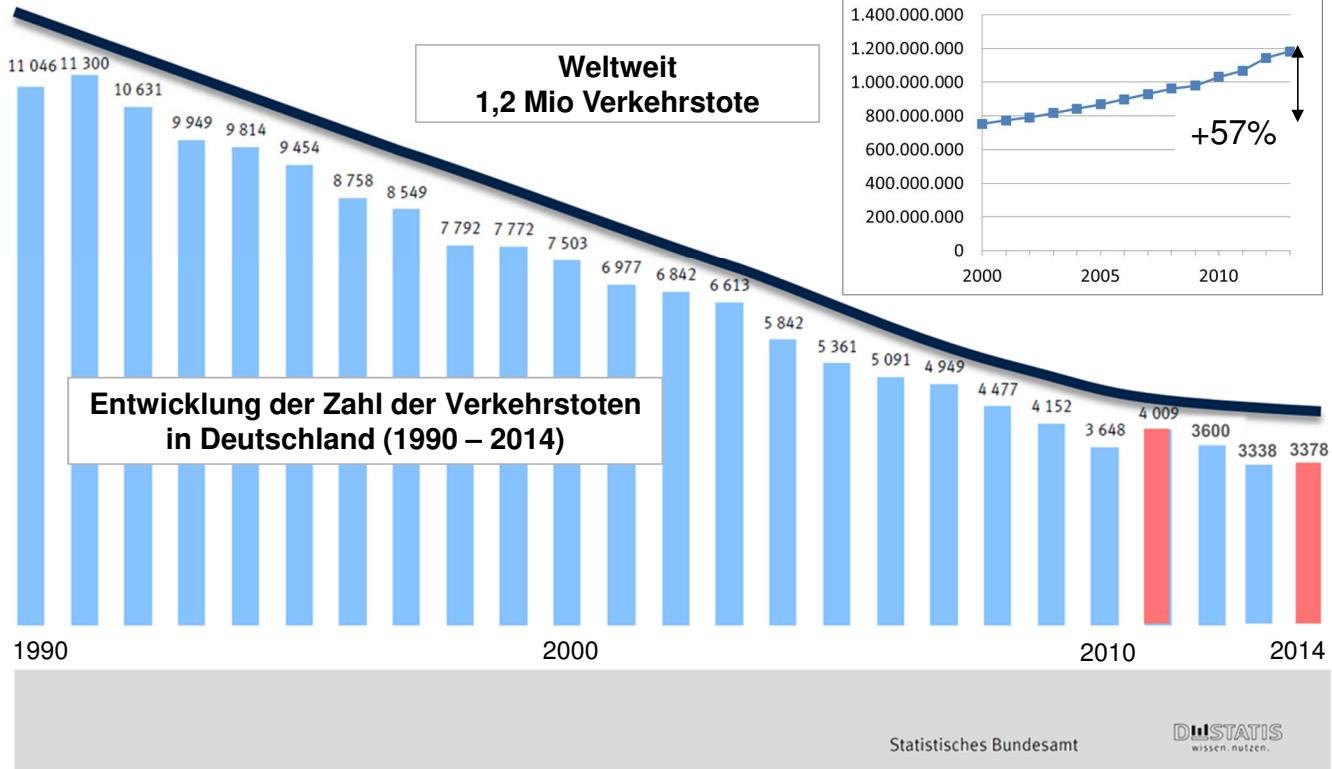


Einführung - Motivation

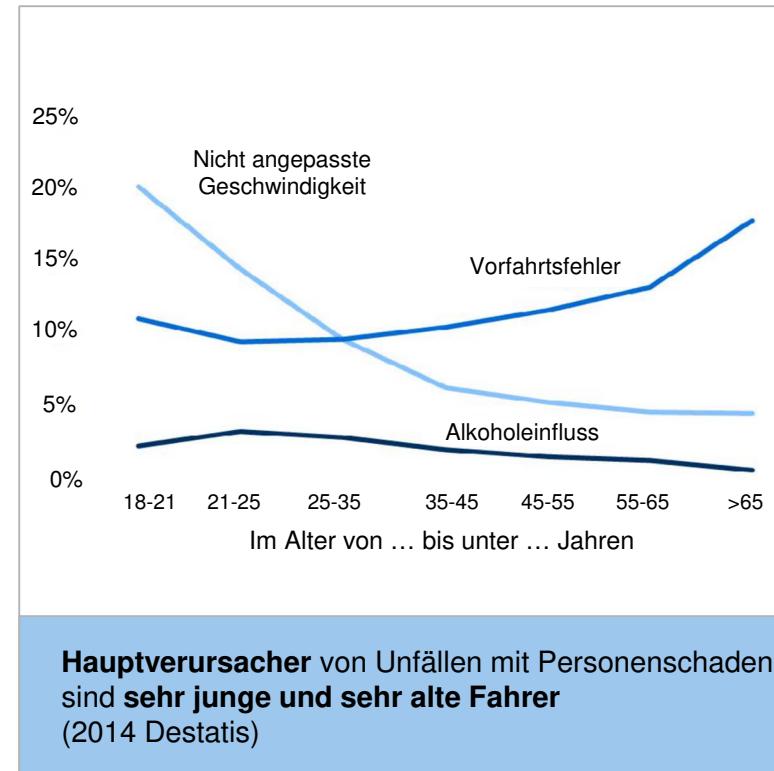
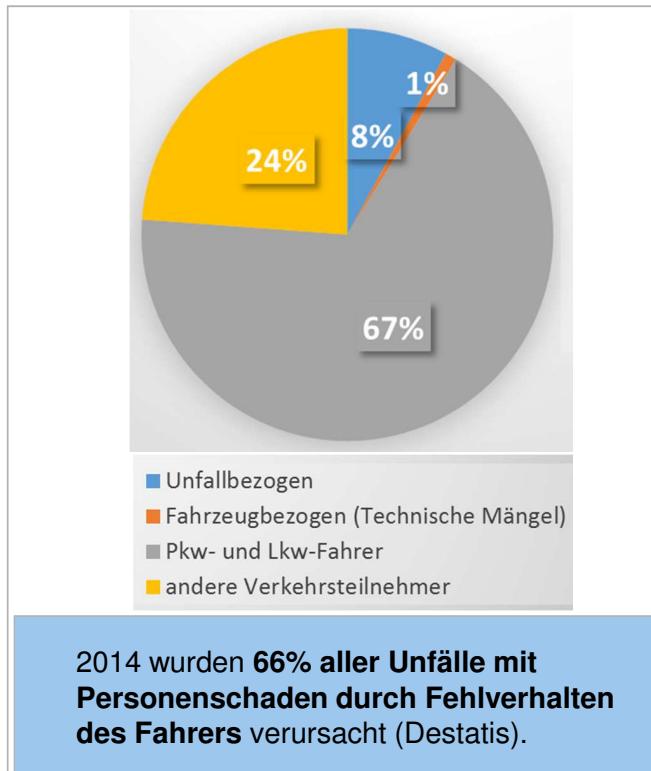
Technische Machbarkeit



Einführung - Motivation Fahrzeugsicherheit



Einführung - Motivation Fahrzeugsicherheit



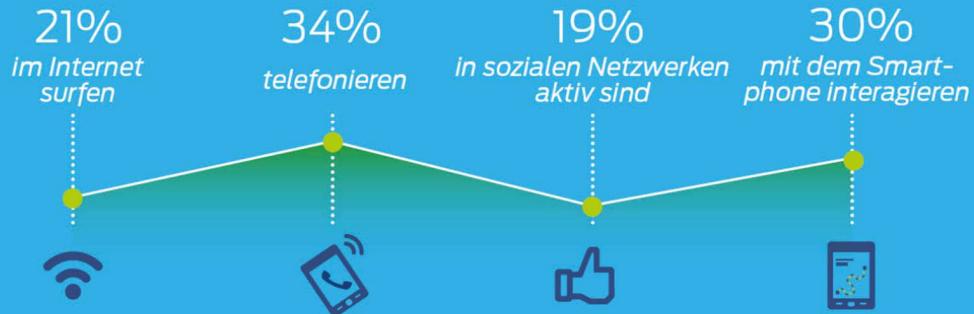
Einführung - Motivation Fahrerlebnis

Von durchschnittlich 80 Jahren Lebenszeit verbringen die Deutschen **2 Jahre und 6 Monate** im Auto
(Stern 01/14)

114 Stunden verbringen die Deutschen pro Jahr im Auto – hiervon sind **38 Stunden Wartezeit in Staus**.
(NOZ 02/15)

Das Auto als App

Fahrzeuge sind für Millennials ein Ort, an dem sie auch ...



Ford Automotive Zeitgeist Studie 08/14

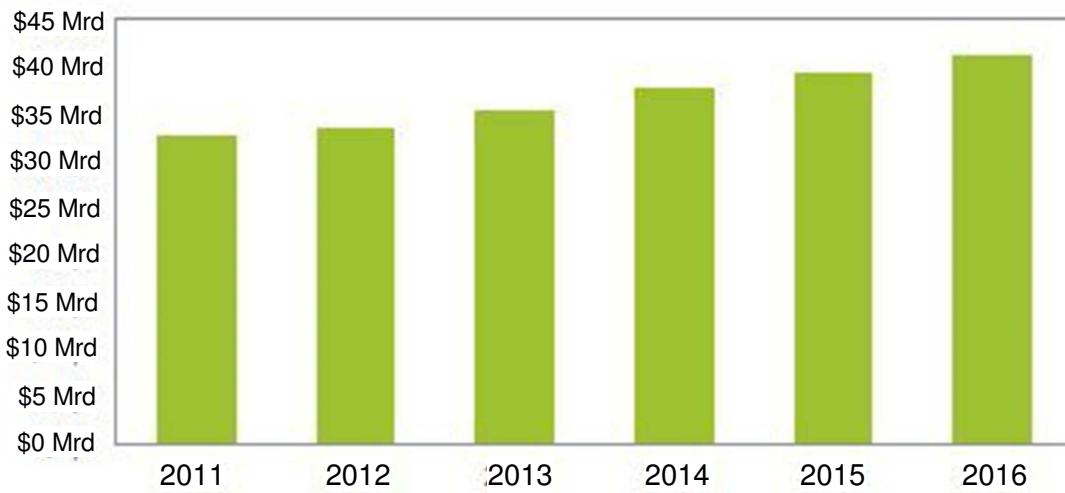


20% aller Fahrer nutzen das Handy während der Fahrt ohne Freisprechanlage

DEKRA 2010

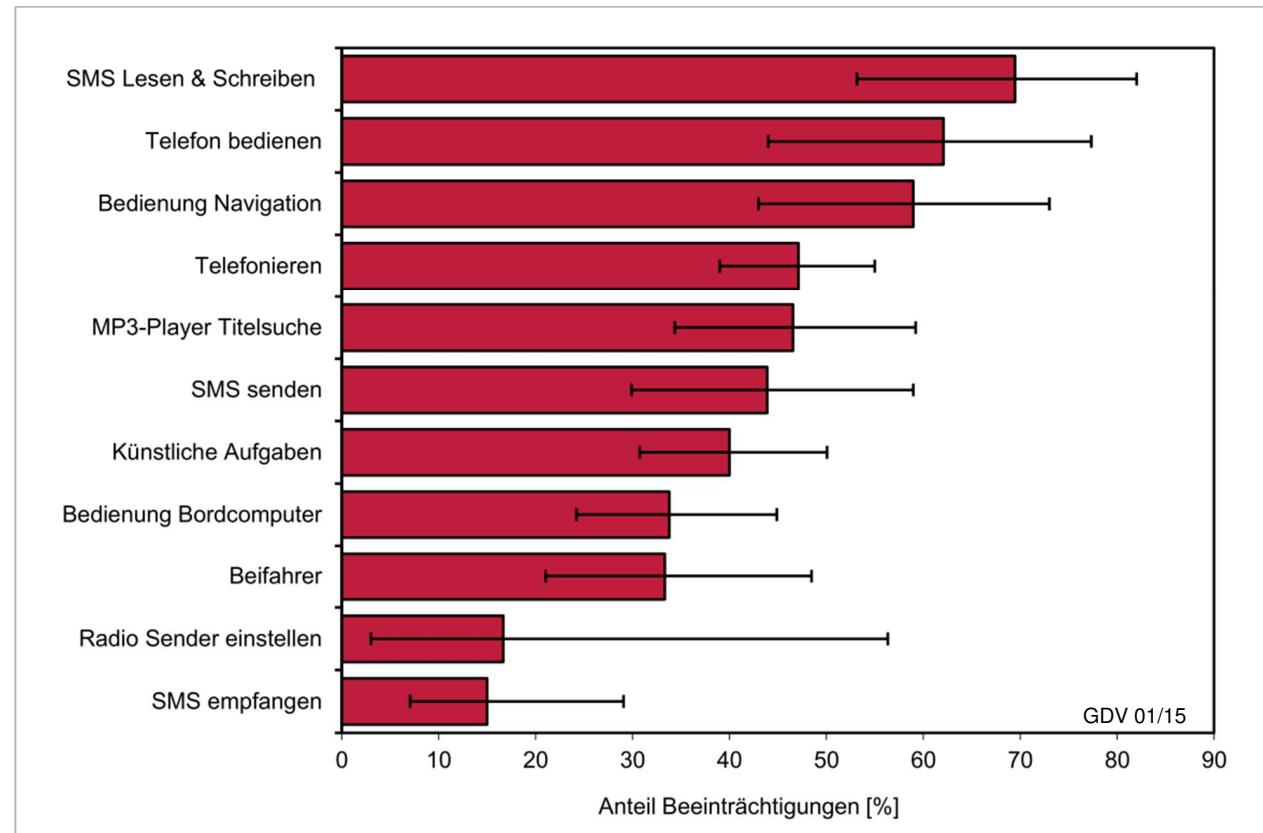
Einführung - Motivation Fahrerlebnis

Weltweite Umsatzprognose für Automotive-Infotainment-Systeme
(in Mrd. US\$)



IHS iSuppli, Archiv: Vogel Business Media 04/12

Einführung - Motivation Fahrerlebnis



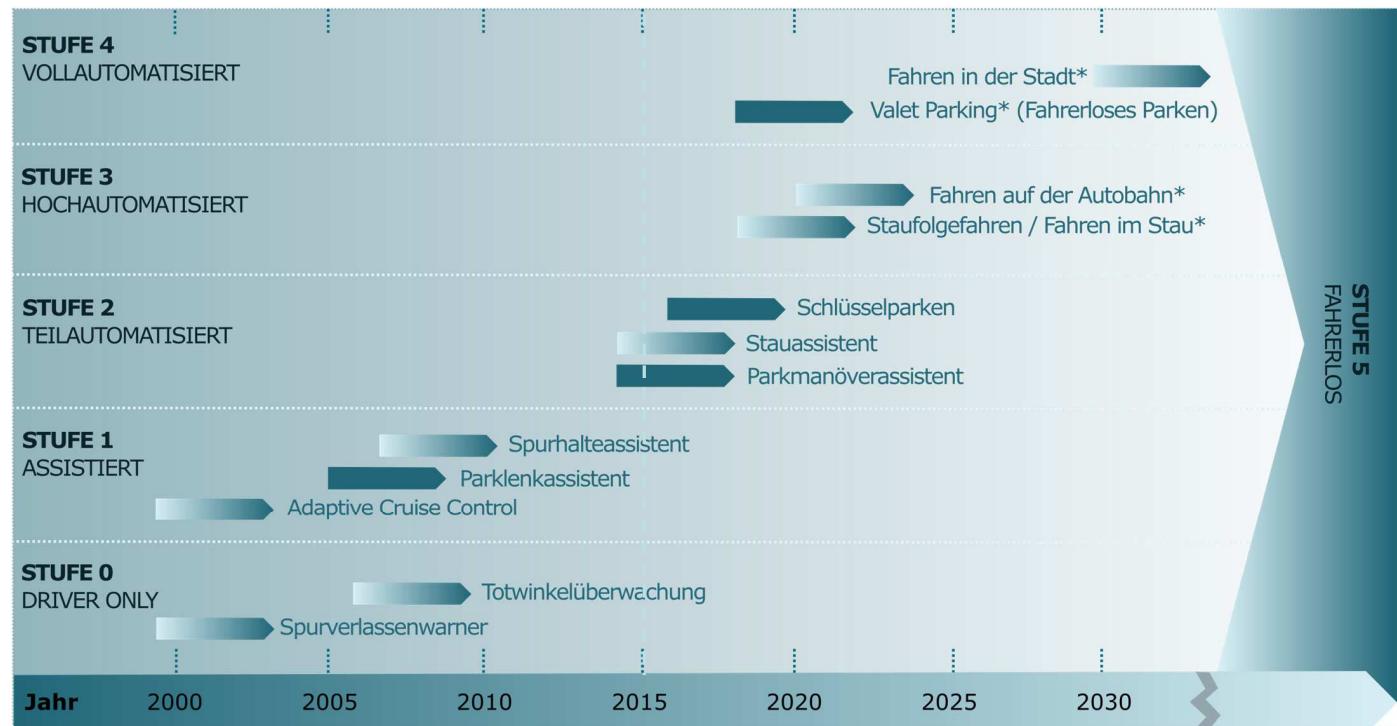
Einführung - Motivation Fahrzeugeffizienz und Stauvermeidung

Konvoi fahren



Einführung - Motivation

Einführungsszenario autom. Fahrfunktionen



Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Fahrzeugregelung II

FAS und automatisiertes Fahren



**Prof. Dr.-Ing. Steffen Müller
M.Sc. Jochen Gallep
Fachgebiet Kraftfahrzeuge • Technische Universität Berlin**

Grundlagen Fahrerverhaltensmodelle – Aufgaben des Fahrers

Primäre Aufgabe: Halten des Fahrzeugs auf Kurs

- Navigation
- Führung
- Stabilisierung



Sekundäre Aufgabe: Tätigkeiten in Abhängigkeit von Fahranforderungen

- Aktion (Blinken, Hupen)
- Reaktion (Auf- und Abblenden, Wischen)



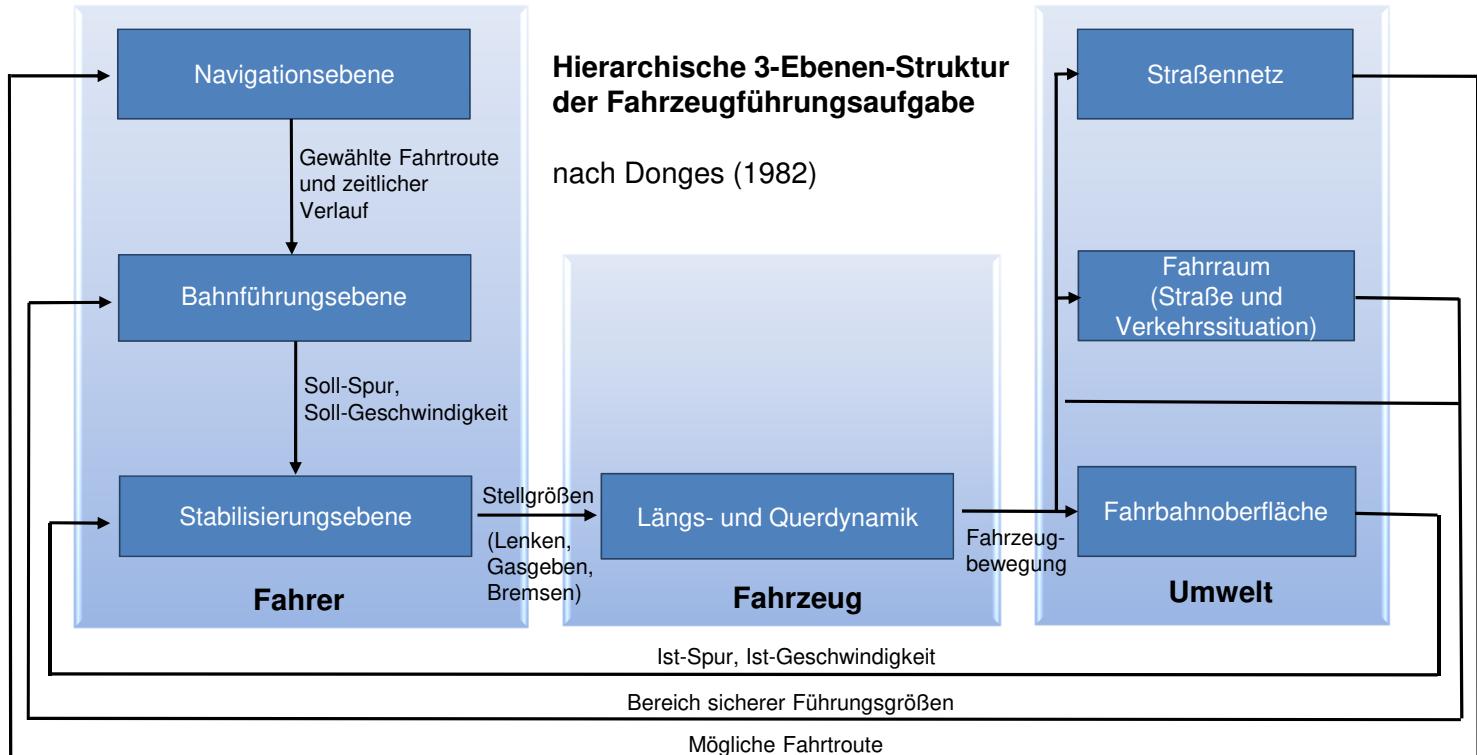
Tertiäre Aufgaben: Tätigkeiten, die nichts mit dem Fahren zu tun haben

- Komfortverbesserung (Klimaanlage, Sitzeinstellung, Radio ...)
- Kommunikation (Radio, Telefon, Internet ...) auch hier Aktion ↔ Reaktion

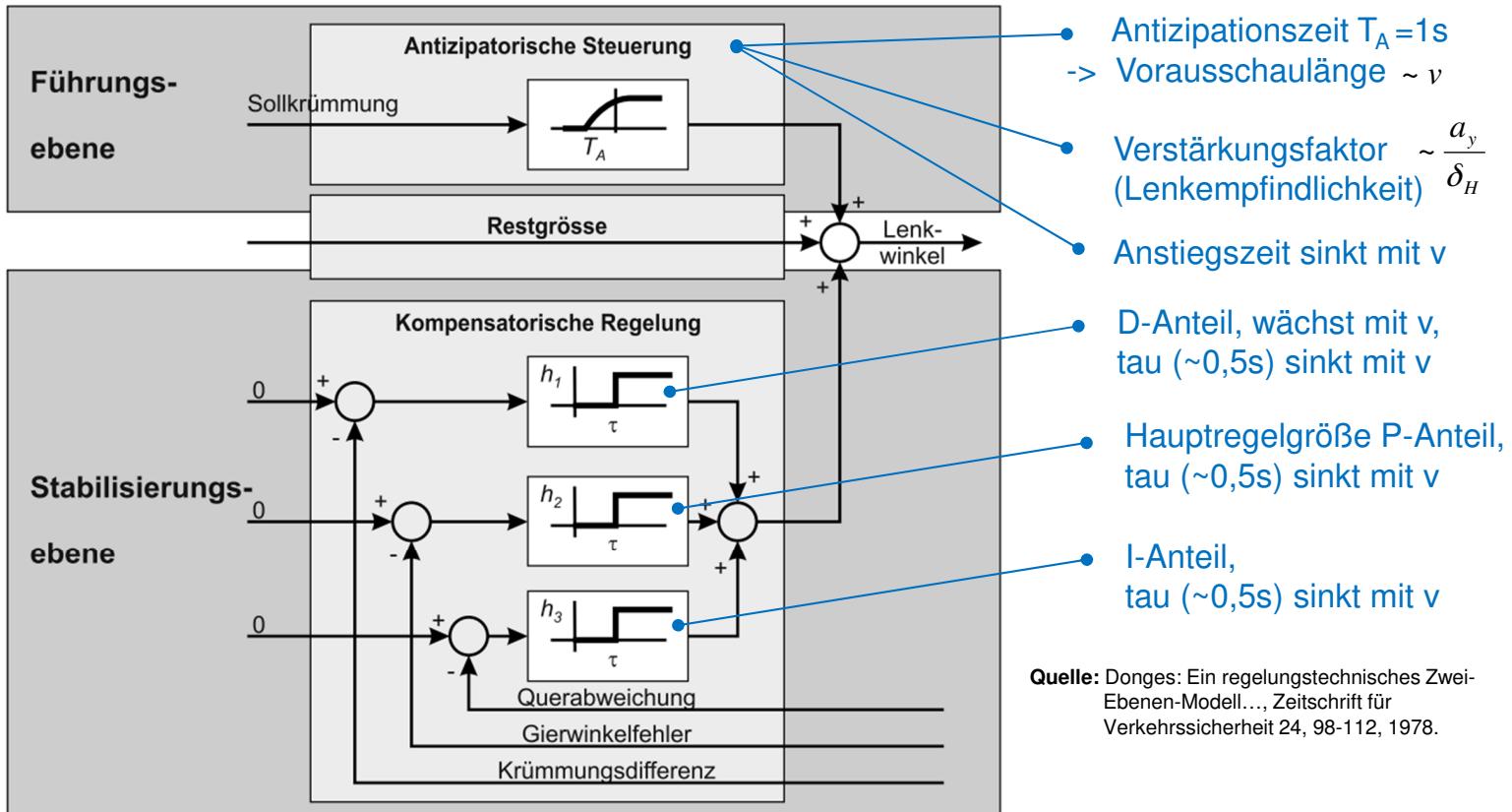
Quelle: Bubb, Bengler, Grünen, Vollrath: Automobilergonomie

Fachgebiet Kraftfahrzeuge • Fakultät Verkehrs- und Maschinensysteme • Technische Universität Berlin

Grundlagen Fahrerverhaltensmodelle – Fahrzeugführung



Grundlagen Fahrerverhaltensmodelle – 2-Ebenen-Modell



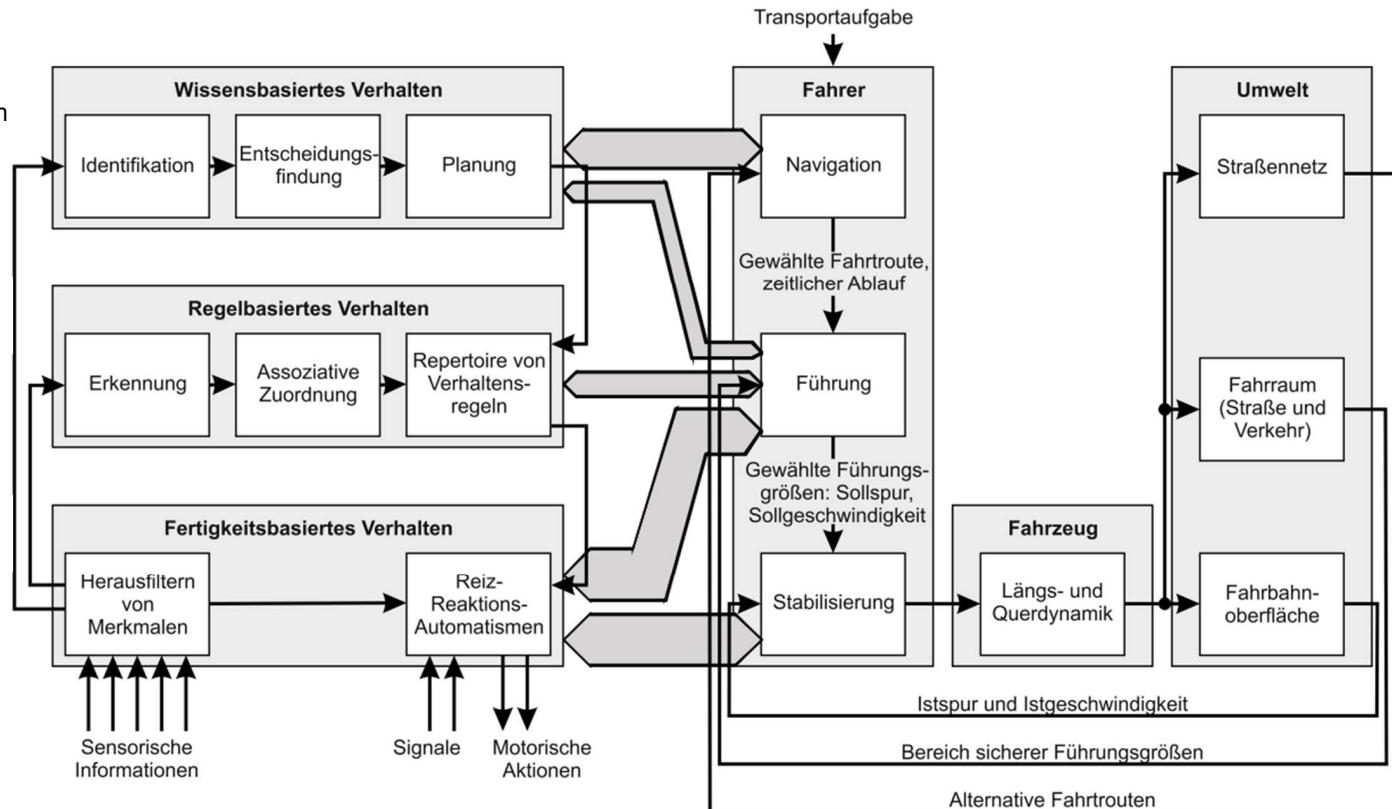
Quelle: Donges: Experimentelle Untersuchung und regelungstechnische Modellierung des Lenkverhaltens..., Diss, TH Darmstadt, 1977.

Grundlagen Fahrerverhaltensmodelle – Verhaltensebenen

Neue Anforderungen

Bekannte Anforderungen

Trainierte Anforderungen



Ref.: Rasmussen, 1983

Ref.: Donges, 1982

Grundlagen

Fahrerverhaltensmodelle – Verhaltensebenen

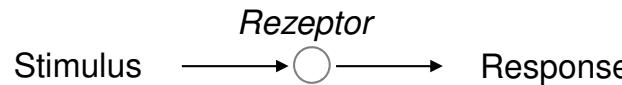
Aufgabe	Verarbeitungs-niveau	benötigte Zeit		
		Fertigkeitsbasiert < 200ms	Regelbasiert Sekunden bis Minuten	Wissensbasiert Minuten bis Stunden
zur Verfügung stehende Zeit	Navigation (mehrere Sekunden bis Stunden)	täglicher Arbeitsweg	Wahl zwischen vertrauten Wegen	Zurechtfinden in einer fremden Stadt
	Führung (ca. 2 Sekunden)	Abbiegen an einer vertrauten Kreuzung	Überholen anderer Fahrzeuge	Steuern auf einer glitschigen oder eisigen Fahrbahn
	Stabilisierung (zwischen 100 ms und max. 300 ms)	um eine Kurve fahren	ein unbekanntes Auto fahren	Fahrschüler in der ersten Fahrstunde

Quelle: Nach Hale e al., 1990.

Verhalten des Fahrers

Menschlicher Informationsverarbeitungsprozess

Prinzipieller Ansatz

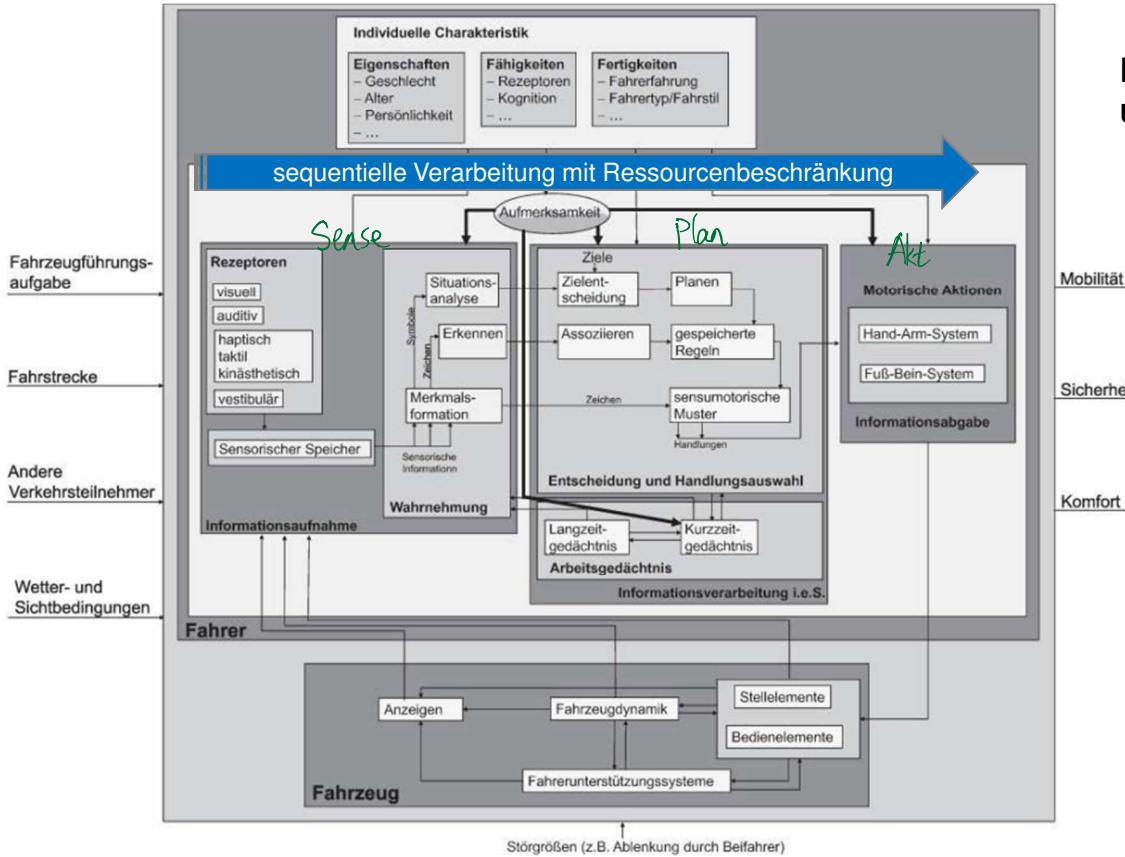


Spezielle Modellansätze aus der Ingenieurpsychologie

- *Sequentielles Modell*
Nächste Stufe kann erst durchlaufen werden, wenn die vorherige abgeschlossen ist
- *Ressourcenmodell*
Die für Aktivitäten zur Verfügung stehenden Ressourcen sind beschränkt. Die Ressourcen verteilen sich auf parallel laufende Aktivitäten
- *Theorie der multiplen Ressourcen*
Ressourcenbeschränkung bezieht sich (allerdings nicht unbeschränkt) auf unterschiedliche Sinneskanäle

Verhalten des Fahrers

Menschlicher Informationsverarbeitungsprozess



Kombiniertes sequentielles
und Ressourcenmodell

Quelle: Abendroth, B.:
Gestaltungspotenziale für ein Pkw-
Abstandsregelsystem...,
Ergonomia, Stuttgart, 2001.

Verhalten des Fahrers

Informationsaufnahme

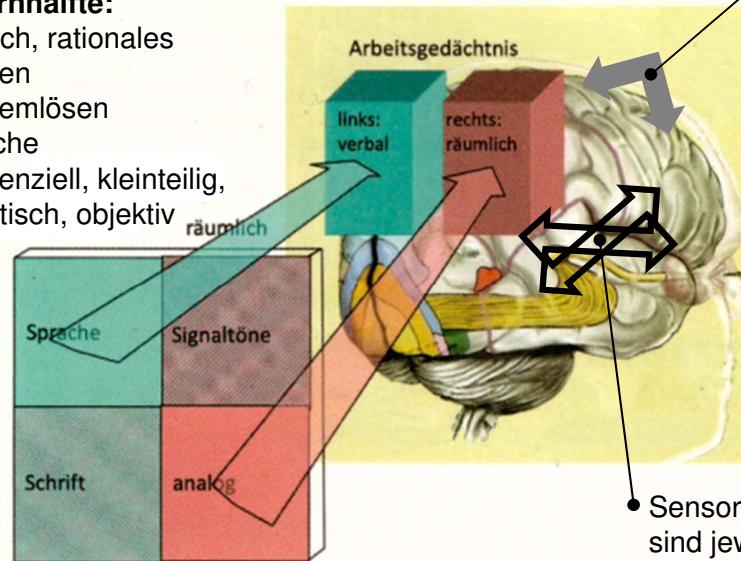
- Informationen können **gleichzeitig durch unterschiedliche Sinnesorgane** aufgenommen werden. Gleichzeitige Aufnahme kann die Aufnahmeleistung verschlechtern. Für die Fahrzeugführung wesentlich sind **visuelle, akustische, haptische und vestibuläre Wahrnehmungen**



触觉 (Tactil)

Linke Hirnhälfte:

- Logisch, rationales Denken
- Problemlösen
- Sprache
- Sequenziell, kleinteilig, analytisch, objektiv



links
rechts
Kommunikation zwischen linker und rechter Gehirnhälfte dauert ca. 5-40ms

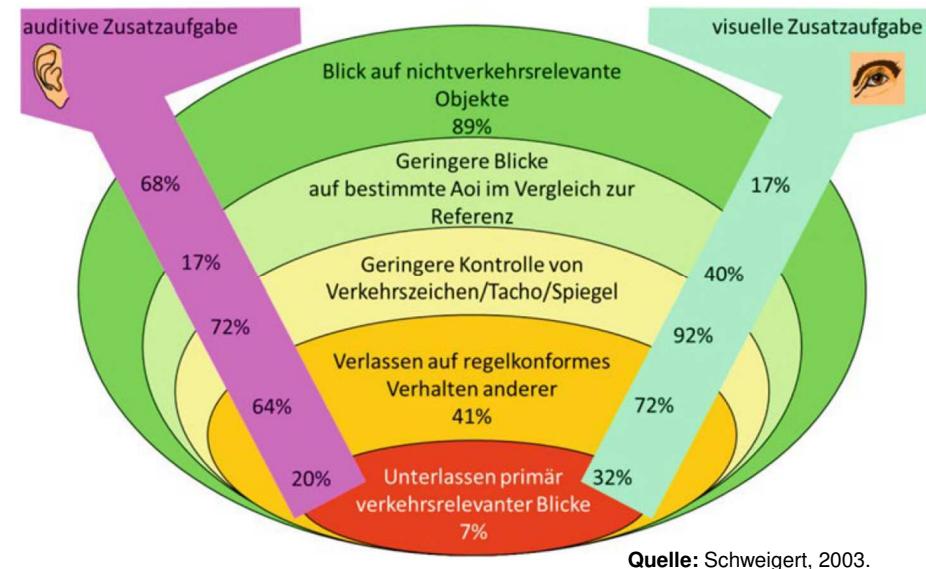
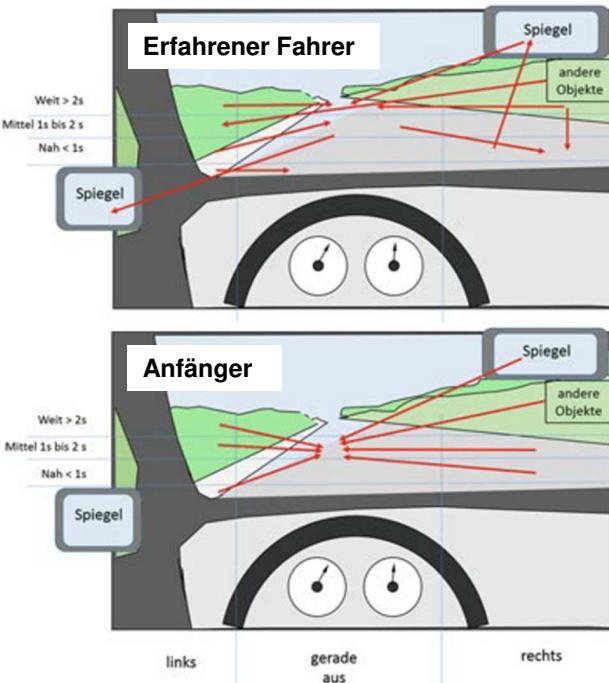
Rechte Hirnhälfte:

- Räumlich, mathematisches Denken
- Musikalische Fähigkeiten
- Intuitiv, ganzheitlich, synthetisierend
- Subjektiv, emotional

Quelle: Nach Wickens, 1992.

Verhalten des Fahrers Informationsaufnahme

- **Mehr als 90% der für das Fahren wichtigen Informationen** nimmt das Auge auf. Es wird bis 2° - 3° scharf gesehen. Max. Vorausschauzeit beträgt 1-2 sec.



Quelle: Underwood et al., 2003.

Verhalten des Fahrers

Informationsaufnahme

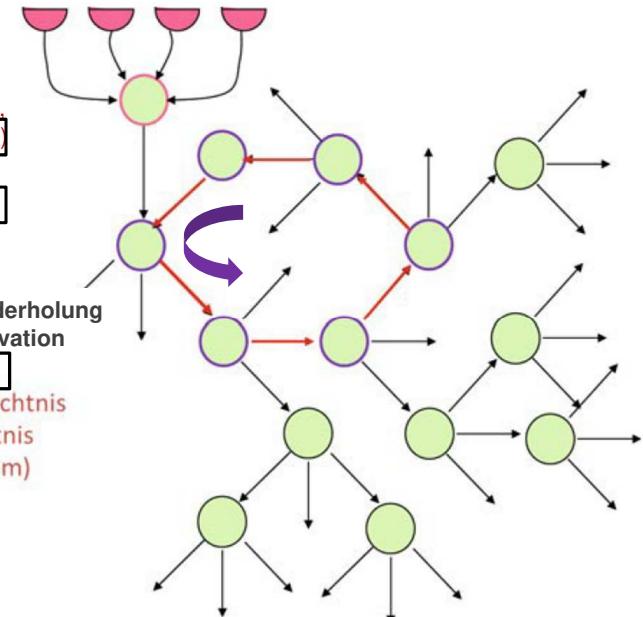
- Ohne Gedächtnis ist keine Informationsaufnahme und -verarbeitung möglich.

„Nachklingen“ der Sinneszellen
(Behaltenszeit <0,2s)

Stimulanz eines geschlossenen Kreises hält Information 3-15s aktiv

Wiederholte Stimulanz führt zu dauerhaften strukturellen Änderungen (Engramm) und damit zum Erinnern. Für 30s-mehrere Jahre (sekundäres Gedächtnis). Engramme lösen sich mit der Zeit wieder auf.

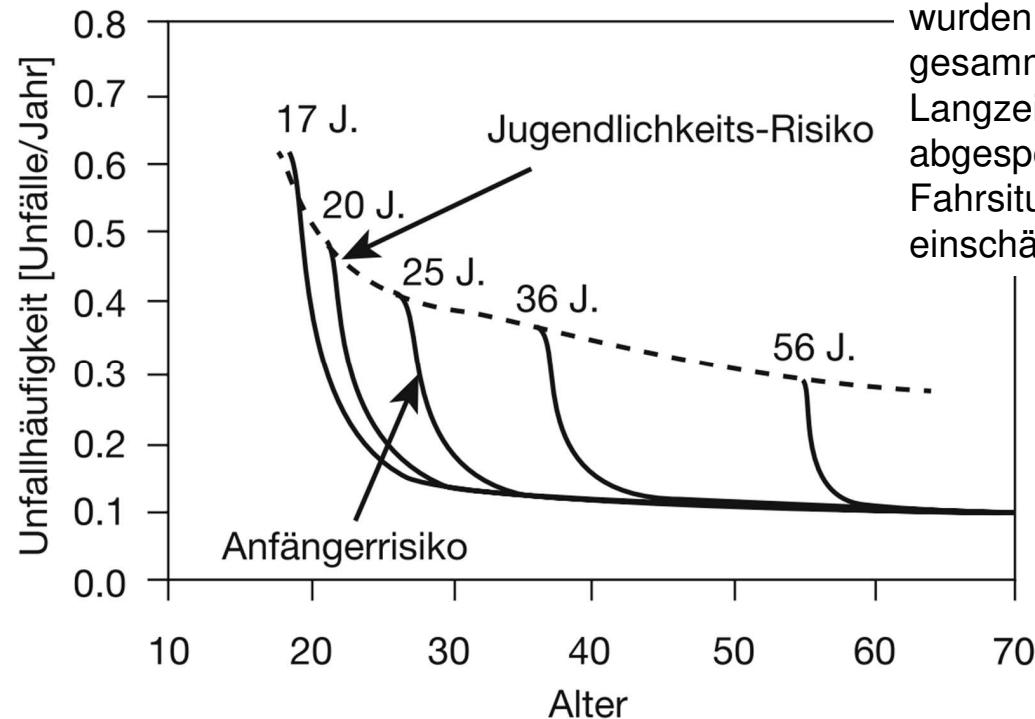
Inhalte, die nie vergessen werden, gehören zum tertiären Gedächtnis (z.B. Schwimmen, Fahrrad fahren,...)



Quelle: Nach Bubb, Bengler, Grünen, Vollrath: Automobilergonomie

Verhalten des Fahrers

Informationsaufnahme



Erst nach ca. 7 Jahren wurden genug Erfahrungen gesammelt (und im Langzeitgedächtnis abgespeichert), um kritische Fahrsituationen besser einschätzen zu können.

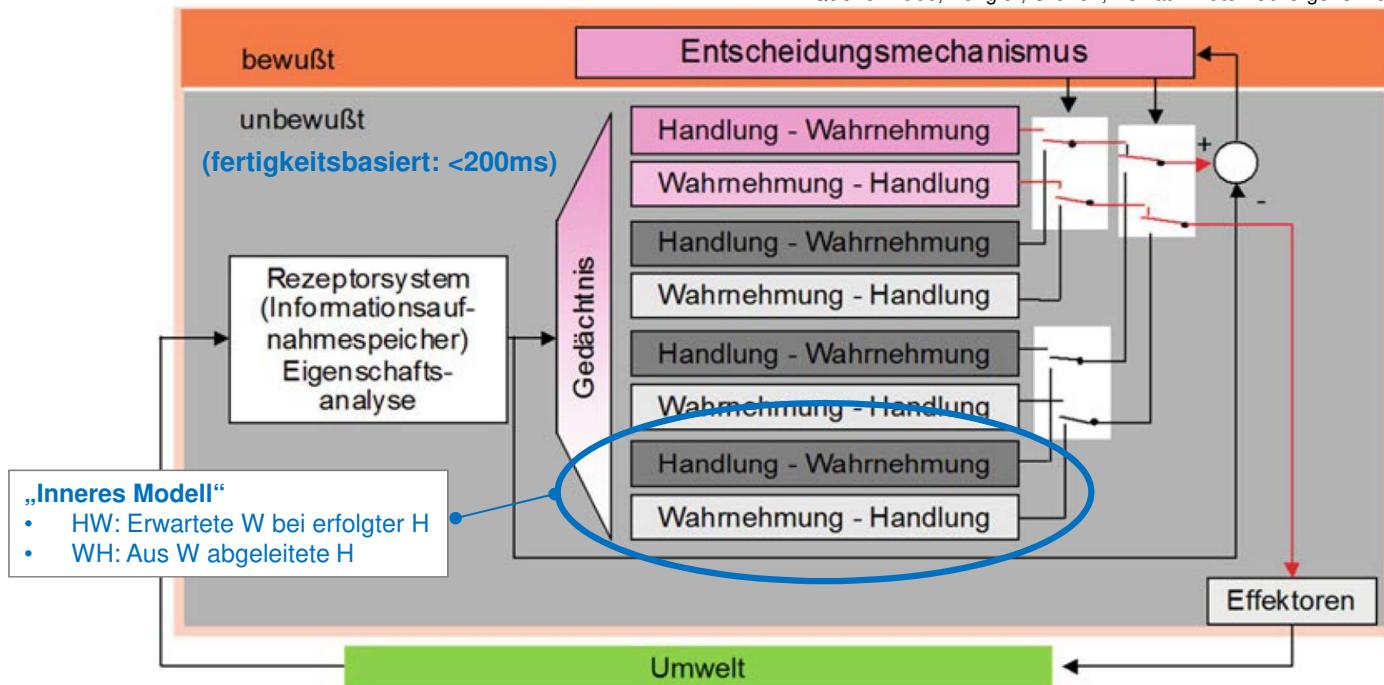
Quelle: Nach Maycock et al., 1991.

Verhalten des Fahrers

Informationsverarbeitung - Kognition

- In einem mit Lebensbeginn einsetzenden **Lernprozess** werden immer komplexere und für bestimmte Lebenssituationen adäquate „**Innere Modelle**“ gebildet.

Quelle: Bubb, Bengler, Grünen, Vollrath: Automobilergonomie



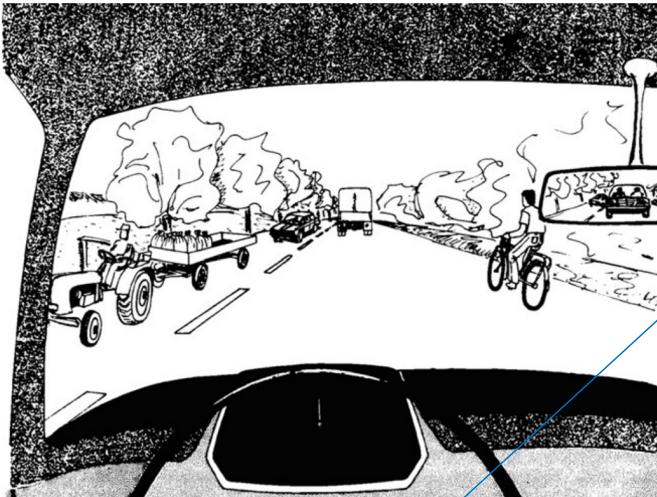
Verhalten des Fahrers

Informationsverarbeitung - Kognition

- Häufig wird eine **Entscheidung zwischen mehreren möglichen Handlungen** notwendig, da **verschiedene Ereignisse zu erwarten** sind.

angenommene Wahrscheinlichkeit

Bewertung des eigenen Nutzens



Bei ungünstigem Ausgang negativer,
gewichteter Nutzen

Handlung ohne Eile	Radfahrer schert aus	Radfahrer bleibt rechts	entgegkomm. Kfz. überholt	entgegk. Kfz. bleibt i. Spur	Lkw bremst	Lkw hält Geschw.	Σ
gerade bremsen 0,4	0,12	0,28	0,12	0,28	0,04	0,36	1,20
nach links br. 0,3	0,09	0,21	0,09	0,21	0,03	0,27	0,72
gerade beschl. 0,1	- 0,03	0,07	- 0,03	0,07	- 0,01	0,09	0,16
nach li. beschl. 0,2	0,06	0,14	0,06	0,14	- 0,02	0,18	0,44

Denkbarer Entscheidungsmechanismus

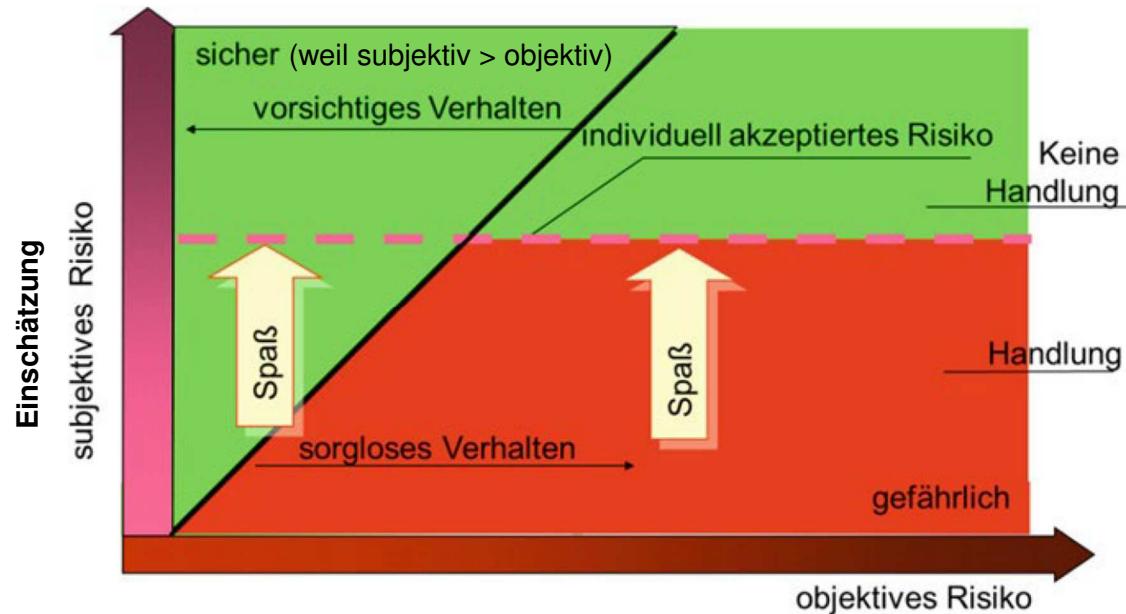
Handlung mit Eile	Radfahrer schert aus	Radfahrer bleibt rechts	entgegkomm. Kfz. überholt	Entgegk. Kfz. bleibt i. Spur	Lkw bremst	Lkw hält Geschw.	Σ
gerade bremsen 0,1	0,03	0,07	0,03	0,07	0,01	0,09	0,30
nach links br. 0,2	0,06	0,14	- 0,06	0,14	0,02	0,18	0,48
gerade beschl. 0,4	- 0,12	0,28	- 0,12	0,28	- 0,04	0,36	0,64
nach li. beschl. 0,3	0,09	0,21	- 0,09	0,21	- 0,03	0,27	0,66

Quelle: Bubb, Bengler, Grünen, Vollrath: Automobilergonomie

Verhalten des Fahrers

Informationsverarbeitung - Kognition

- Der Mensch entscheidet sich nur für **Handlungen**, wenn deren **Risiko niedriger** liegt, als sein **persönlich akzeptiertes Risiko**.
Bsp. für **Definition „Risiko“**: *Konsequenz / Eintrittswahrscheinlichkeit*



Quelle: Bubb, Bengler, Grünen, Vollrath: Automobilergonomie

Fachgebiet Kraftfahrzeuge • Fakultät Verkehrs- und Maschinensysteme • Technische Universität Berlin

Verhalten des Fahrers

Informationsverarbeitung - Kognition

Aus dem **Risikoverhalten** eines Fahrers ergeben sich folgende **Problemfelder**

- Mangels Erlebnismöglichkeit kann **keine situationsadäquate Einschätzung des subjektiven Risikos** erfolgen
Beispiel: *Drängeln auf der Autobahn*
- Bei Reduzierung des objektiven Risikos (z.B. durch ESP) verändert der Mensch sein Verhalten Richtung „gefährlicher“, so dass **Abstand zwischen subjektivem und individuell akzeptiertem Risiko wieder gleich groß** wie vorher.
Beispiel: *ESP, bessere Straßen, bessere Fahrwerke*
- Ein wesentlicher Aspekt des **Fahrspaßes** ist das **Austesten der eigenen Leistungsfähigkeit**.
Beispiel: „*Mit ausgeschaltetem ESP kann man den Porsche Turbo lustvoll diagonal driften lassen*“ (Auto-Motor-und-Sport)

Verhalten des Fahrers

Einige Schlussfolgerungen für FAS

- FAS sollten helfen, eine **Sicherheitsreserve zum Erfahrungshorizont des Fahrers** aufzubauen (z.B. durch Übernahme von zeitkritischen, nicht fertigkeitsbasierten Aktionen)
- **Erweiterung** der häufig **einkanaligen Verhaltensmuster** (z.B. kombinierter Brems- und Lenkeingriff)
- **Fahrerinformationen** bei unerwarteten Ereignissen müssen **mind. 2s Anticipationszeit** vorhalten
- **Reaktionsanforderungen**, die **schneller als 0,5s** beantwortet werden müssen, können **nur durch automatische Systeme** erfüllt werden.

Verhalten des Fahrers

Bewertung – Qualität und Leistung

Qualität (allg.)

$$Q = \frac{\text{Ergebnis}}{\text{Aufgabe}} = \frac{|R|}{|T|}$$

Rel. Differenz zwischen Aufgabe und Ergebnis

$$D = \left| \frac{T - R}{T} \right|$$

Qualität in Abhängigkeit von D

$$Q = 1 - |D|$$

Arbeitsleistung L

$$L = \frac{\text{Arbeitsqualität}}{\text{Zeit}} = \frac{Q}{t}$$

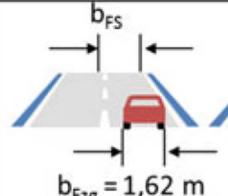
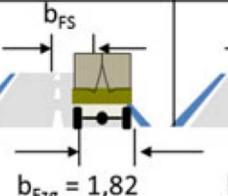
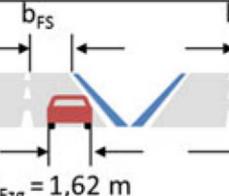
Verhalten des Fahrers

Bewertung – querdynamisches Verhalten

Spurhaltequalität

Unfallstatistik:

Auf engen Landstraßen ca. 4x mehr Lkw Unfälle als auf breiten

Situation	Fahrbahnbreite $b_{FS} = 3,0 \text{ m}$	Fahrbahnbreite $b_{FS} = 3,75 \text{ m}$		
				
Quelle: Reichart, 2001.				
Ausnutzungsgrad κ bei 0,5 m Versatz zur Fahrstreifenmitte	72,5%	85%	47%	52%
Spurhaltequalität Q_s	27,5%	15%	53%	48%

$$Q_s = 1 - \kappa \quad \text{mit dem Ausnutzungsgrad} \quad \kappa = \left| \frac{2y_q}{b_{FS} - b_{Fzg}} \right|$$

3,2 mal
schwieriger

Verhalten des Fahrers

Bewertung – querdynamisches Verhalten

Querbeschleunigungsqualität bei freier Kurvenfahrt



$$Q_{ay} = 1 - \left| \frac{a_{y,soll} - a_y}{a_{y,soll}} \right|$$

mit

$$a_{y,soll} = k \mu_{\max} g$$

$k=1$: max. Dynamik

$k=0,7$ Fahrsicherheit

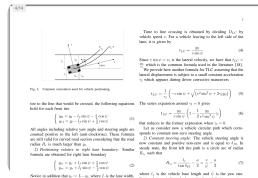
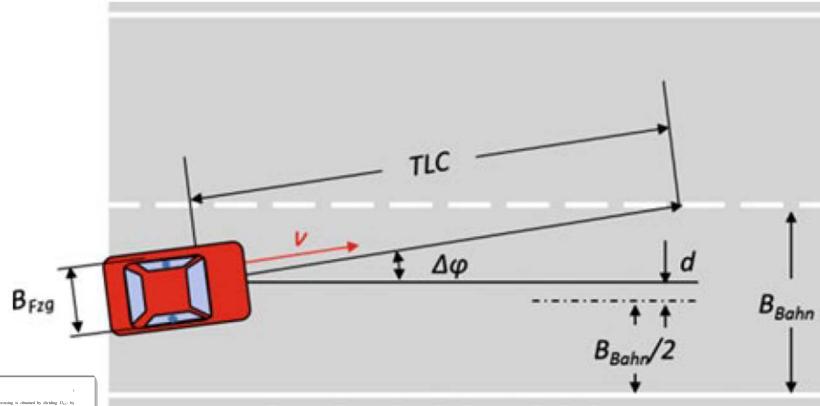
$$a_{y,soll} < 0,3 \frac{m}{s^2} \quad \text{Komfort}$$

Weitere mögliche Bewertungsgrößen sind Querbeschleunigungsspanne, Gierrate und Gierratenspanne, Schwimmwinkel und –spanne, max. Lenkwinkel und maximale Lenkwinkelgeschwindigkeit

Verhalten des Fahrers

Bewertung – querdynamisches Verhalten

„Time-to-Line-Crossing“ (TLC)



Quelle

$$t_{TLC} = \frac{y_u}{v \sin(\Delta\varphi)} \text{ bzw. } v \sin(\Delta\varphi)$$

$$D_{TLC} = \frac{y_u}{\sin(\Delta\varphi) \cdot \text{bem. sin}(\Delta\varphi)} \text{ (Distance to...)}$$

Probandenversuche
 $mean(TLC) = 3,7 \text{ sec}$

Trotzdem hoher Anteil an
Unfällen durch
Abkommen von der
Fahrbahn wegen

- Überhöhtes v
- Ablenkung
- Sekundenschlaf
- Glätte

Verhalten des Fahrers

Bewertung – längsdynamisches Verhalten

Fahrgeschwindigkeitsqualität ohne weitere Verkehrsteilnehmer



$$Q_v = 1 - \left| \frac{v_{soll} - v}{v_{soll}} \right|$$

mit

$$v_{soll} = tbd$$

Verhalten des Fahrers

Bewertung – längsdynamisches Verhalten

Abstandsqualität mit vorausfahrendem Fahrzeug



$$Q_A = 1 - \left| \frac{x_{soll} - x}{x_{soll}} \right|$$

mit

$$x_{soll} = v \Delta t_{soll}$$

Für

$$x > x_{soll}$$

liegt bzgl. Qualitäts-
bewertung freie Fahrt vor

Verhalten des Fahrers

Bewertung – längsdynamisches Verhalten

Minimaler Bremsweg und Sicherheitsabstand

Minimaler Bremsweg

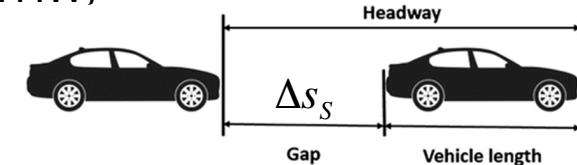
$$s_{A,\min} = v t_R + \frac{v^2}{2g\mu_{\max}} = v t_V \quad \text{mit} \quad t_V = t_R + \frac{v}{2g\mu_{\max}}$$

Beispiel: $\mu_{\max} = 1$, $t_R = 1 \text{ sec}$, $t_V = 2 \text{ sec}$ $\Rightarrow v \approx 70 \frac{\text{m}}{\text{sec}}$ (unrealistisch)

Sicherheitsabstand und „Time-Headway“ (THW)

$$\Delta s_S = v t_R$$

$$THW = \frac{\text{Headway}}{v}$$



„Faustformel“: $\Delta s_S = \text{„halber Tachostand“}$

Beispiel: $\Delta s_S = 30 \text{ m}$ $v = 60 \frac{\text{m}}{\text{sec}}$ $\Rightarrow t_R = 1.8 \text{ sec}$ (v -wähn.)

Verhalten des Fahrers

Bewertung – längsdynamisches Verhalten

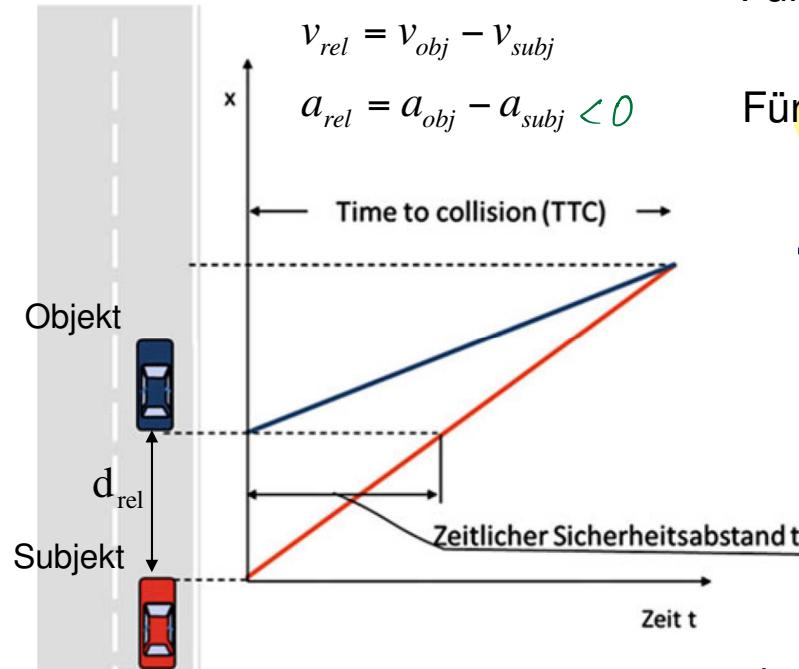
„Time-to-Collision“ (TTC)

$$\text{Für } a_{rel} = 0 \text{ gilt} \quad TTC = \frac{d_{rel}}{v_{subj} - v_{obj}} = \frac{d_{rel}}{-v_{rel}}$$

$$v_{rel} = v_{obj} - v_{subj}$$

$$a_{rel} = a_{obj} - a_{subj} < 0$$

Für $a_{rel} = const. < 0$ gilt



$$d_{rel} = \int_T (a_{rel} t + v_{rel,0}) dt$$

$$= \frac{a_{rel}}{2} T^2 + v_{rel,0} T + d_{rel,0}$$

Bei $d_{rel} = 0$ ist $T = TTC$. Also

$$TTC = \frac{-v_{rel,0} \pm \sqrt{v_{rel,0}^2 - 2d_{rel,0} a_{rel}}}{a_{rel}}$$

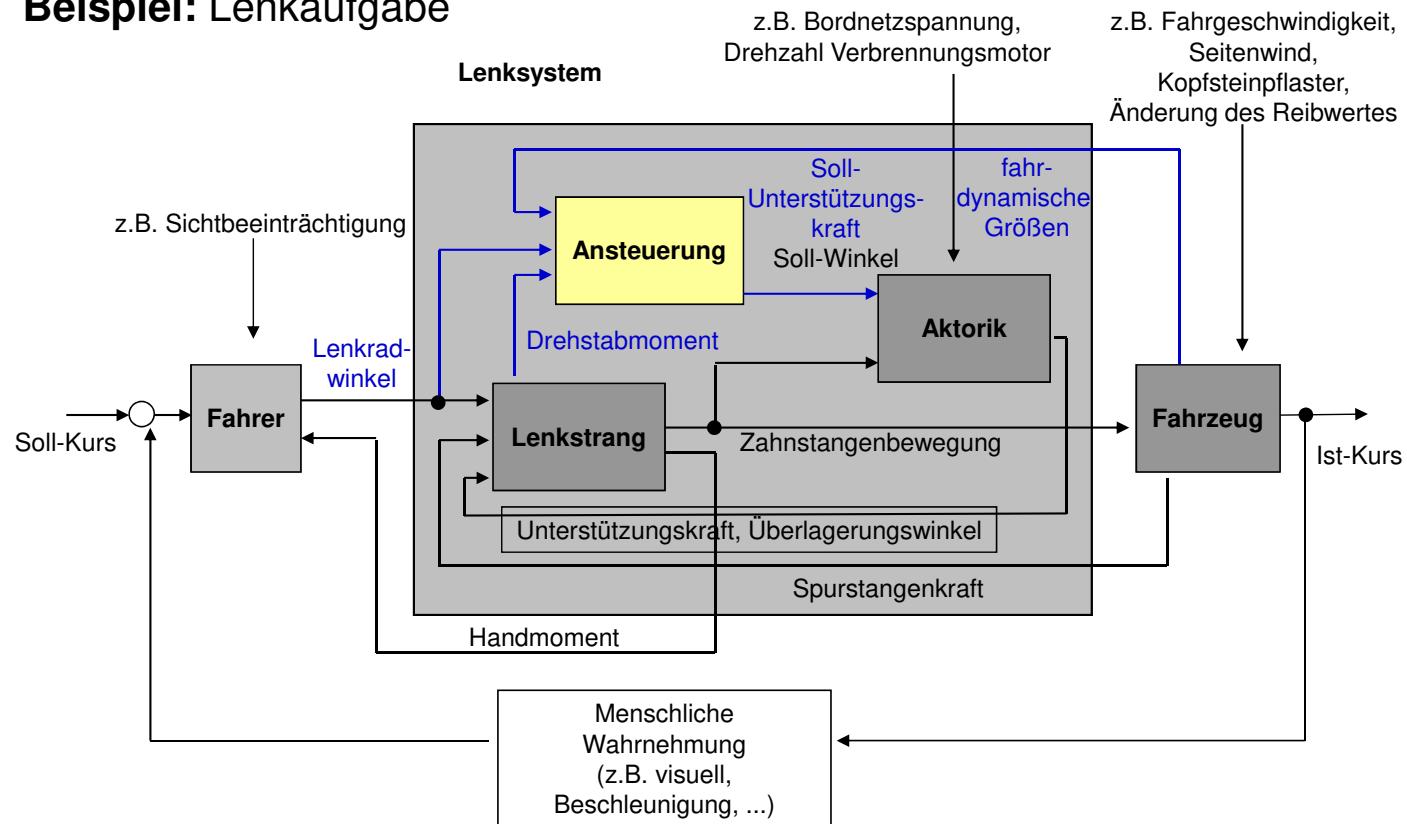
$$0 < TTC = \frac{-v_{rel,0} - \sqrt{v_{rel,0}^2 - 2d_{rel,0} a_{rel}}}{a_{rel}}$$

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Verhalten des Fahrers

Systemmodell Fahrer-Fahrzeug-Umgebung

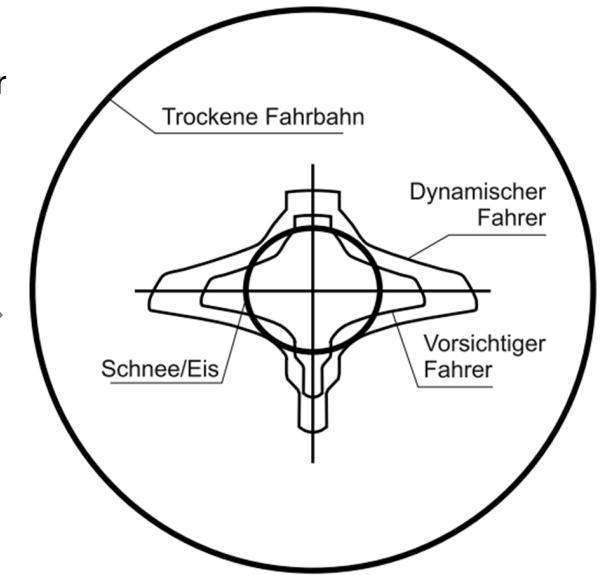
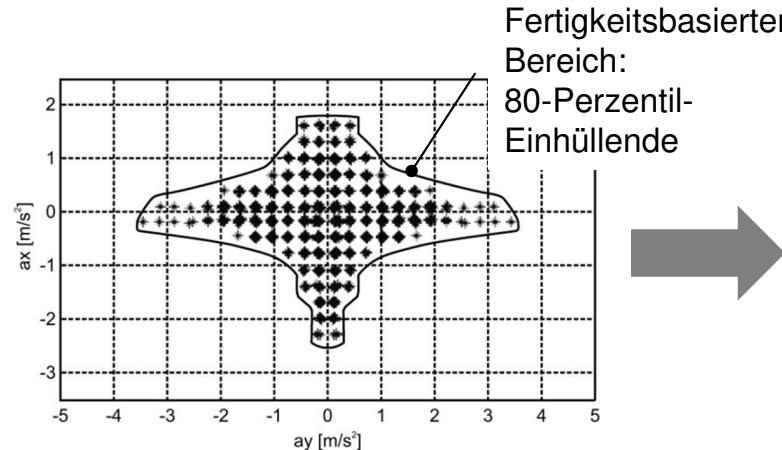
Beispiel: Lenkaufgabe



Verhalten des Fahrers

Modellierung durch Fahrerverhaltenskollektive

Beispiel „Kraftschlussausnutzung“



Feldstudie zur
Kraftschlussausnutzung

Unterschiedliche Fahrertypen
bei unterschiedlichen
Reibwertbedingungen

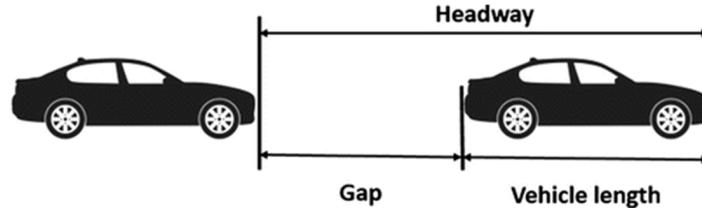
Verhalten des Fahrers

Bewertung – längsdynamisches Verhalten

„Time-Headway“ (THW)

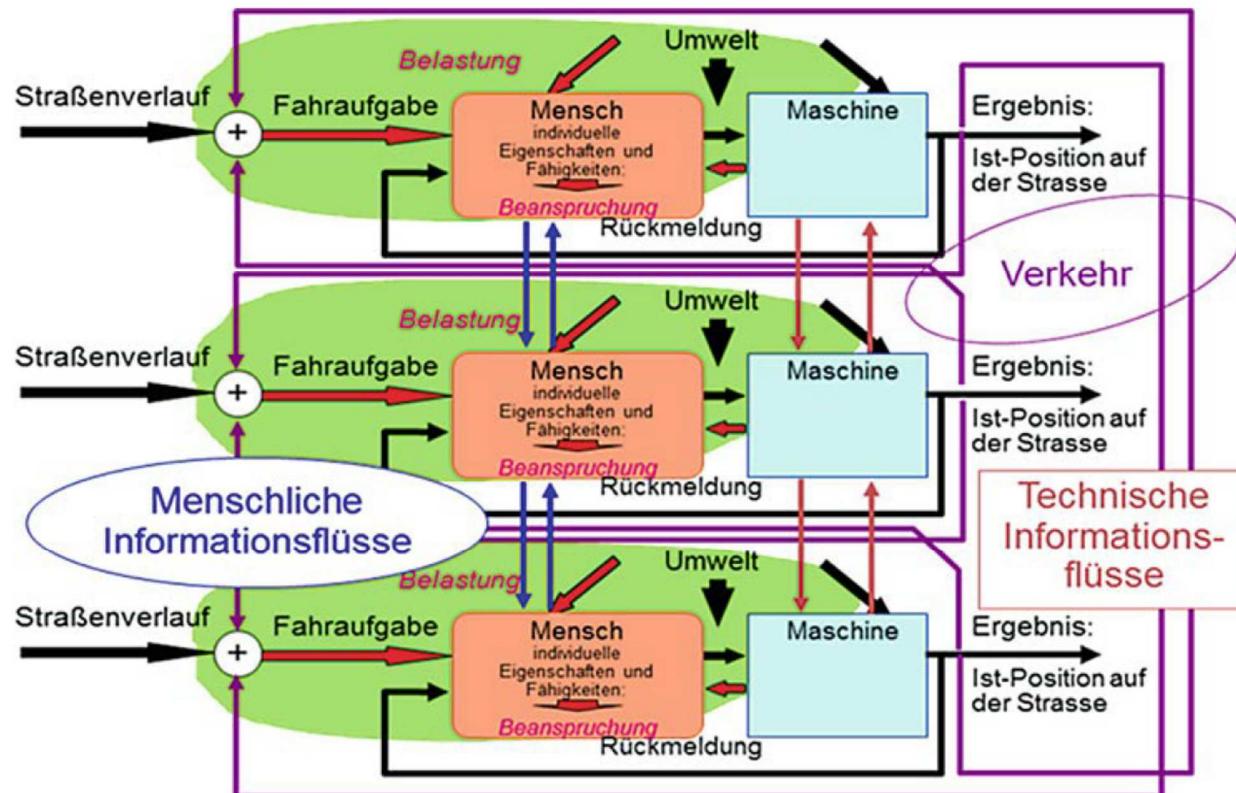
Minimaler Bremsweg

$$s_{A,\min} = v t_R + \frac{v^2}{2g\mu_{\max}} = v t_V \quad \text{mit} \quad t_V = t_R + \frac{v}{2g\mu_{\max}}$$



$$THW = \frac{\text{Headway}}{v}$$

Verhalten des Fahrers Informationsflüsse im Verkehr



Quelle: Bubb, Bengler, Grünen, Vollrath: Automobilergonomie

Fachgebiet Kraftfahrzeuge • Fakultät Verkehrs- und Maschinensysteme • Technische Universität Berlin

Verhalten des Fahrers

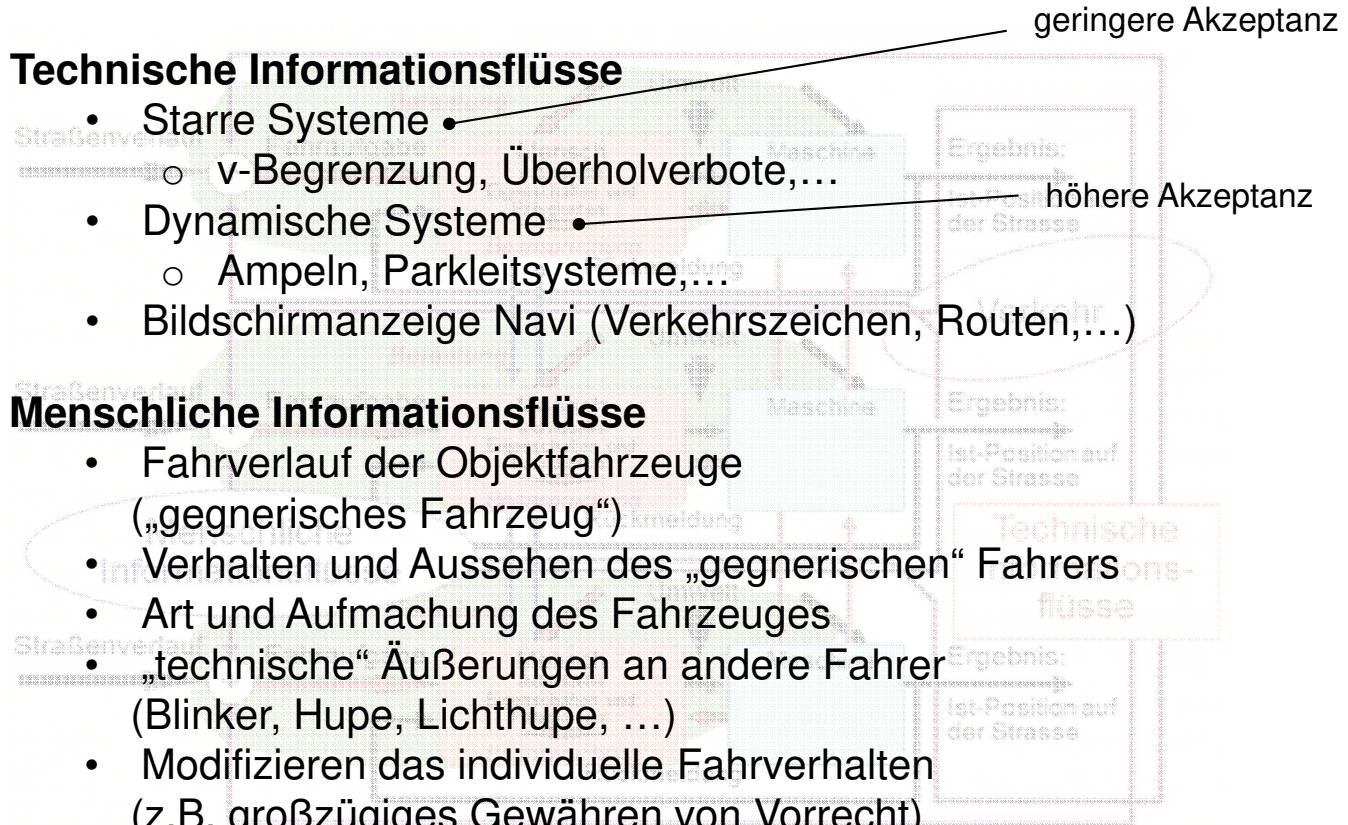
Informationsflüsse im Verkehr

Technische Informationsflüsse

- Starre Systeme
 - v-Begrenzung, Überholverbote, ...
- Dynamische Systeme
 - Ampeln, Parkleitsysteme, ...
- Bildschirmanzeige Navi (Verkehrszeichen, Routen, ...)

Menschliche Informationsflüsse

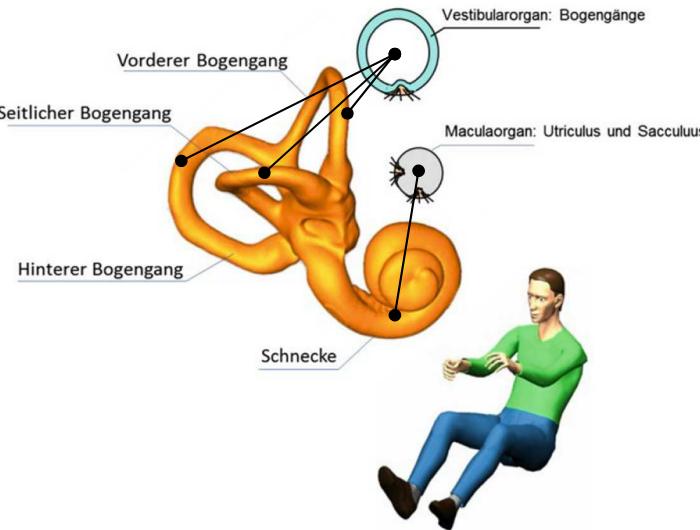
- Fahrverlauf der Objektfahrzeuge
("gegnerisches Fahrzeug")
- Verhalten und Aussehen des „gegnerischen“ Fahrers
- Art und Aufmachung des Fahrzeuges
- „technische“ Äußerungen an andere Fahrer
(Blinker, Hupe, Lichthupe, ...)
- Modifizieren das individuelle Fahrverhalten
(z.B. großzügiges Gewähren von Vorrecht)



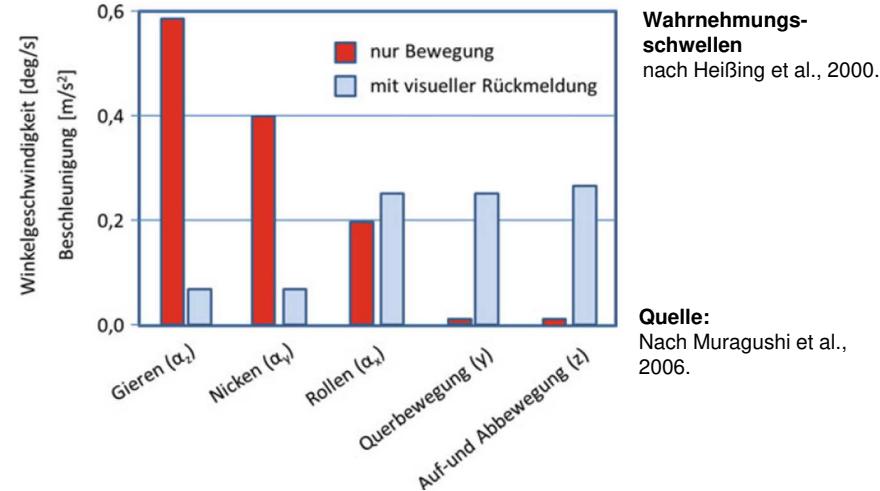
Verhalten des Fahrers

Informationsaufnahme

- Das **Vestibularorgan** liefert **Informationen für den kinästhetischen Sinn**
(Kinästhetik = Lehre von der Bewegungsempfindung)



Bewegungsform	Schwellenwert
Gieren α_z	0,05 bis 5 [$^{\circ}/s^2$]
Rollen (Wanken) α_x	0,1 bis 0,2 [$^{\circ}/s^2$]
Nicken α_y	0,1 bis 0,2 [$^{\circ}/s^2$]
Logitudinal X	0,02 bis 0,8 [m/s^2]
Transversal Y	0,05 bis 0,1 [m/s^2]
Vertikal Z	0,02 bis 0,05 [m/s^2]



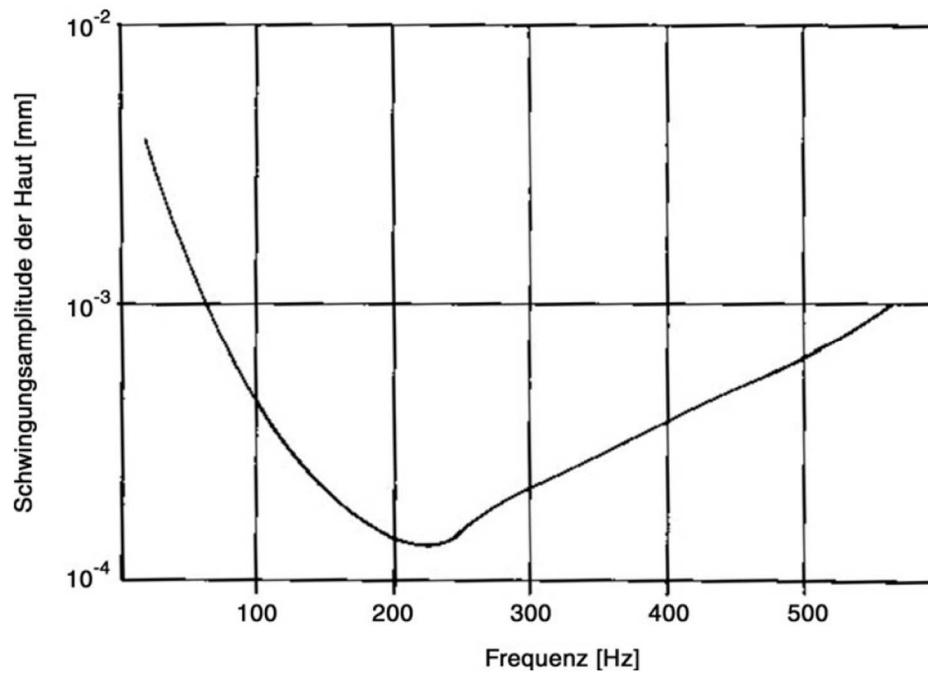
Quelle: <http://www.scientifica.ch>

Quelle:
Nach Muragushi et al., 2006.

Verhalten des Fahrers

Informationsaufnahme

- Bei **haptischer Wahrnehmung** wird das Subjekt **aktiv untersucht**, bei der **taktile Wahrnehmung** wird das Subjekt **passiv berührt** (Vermittlung nur über Berührrezeptoren der Haut).



Frequenzabhängigkeit
der Vibrations-
wahrnehmungsschwelle
nach Müller-Limmroth,
1981.

Fahrzeugregelung II

FAS und automatisiertes Fahren



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

Fahrerassistenzsysteme – Stufe 1 und 2 Übersicht

STUFE 0 DRIVER ONLY	STUFE 1 ASSISTIERT	STUFE 2 TEIL-AUTOMATISIERT	STUFE 3 HOCH-AUTOMATISIERT	STUFE 4 VOLL-AUTOMATISIERT	STUFE 5 FAHRERLOS
<p>Fahrer führt dauerhaft Längs- und Querführung aus.</p> <p>ACC</p> <p>System übernimmt die jeweils andere Funktion.</p>	<p>Fahrer führt dauerhaft Längs- oder Querführung aus.</p> <p>Front-kollisions-schutz</p> <p>System übernimmt Längs- und Querführung in einem spezifischen Anwendungsfall*. Es erkennt Systemgrenzen und fordert den Fahrer zur Übernahme mit ausreichender Zeitreserve auf.</p>	<p>Fahrer muss das System dauerhaft überwachen.</p>	<p>Fahrer muss das System nicht mehr dauerhaft überwachen.</p>	<p>Kein Fahrer erforderlich im spezifischen Anwendungsfall.</p>	<p>Von Start bis Ziel ist kein Fahrer erforderlich.</p>

*Anwendungsfälle beinhalten Straßentypen, Geschwindigkeitsbereiche und Umfeldbedingungen

Quelle: VDA

Adaptive Cruise Control - ACC

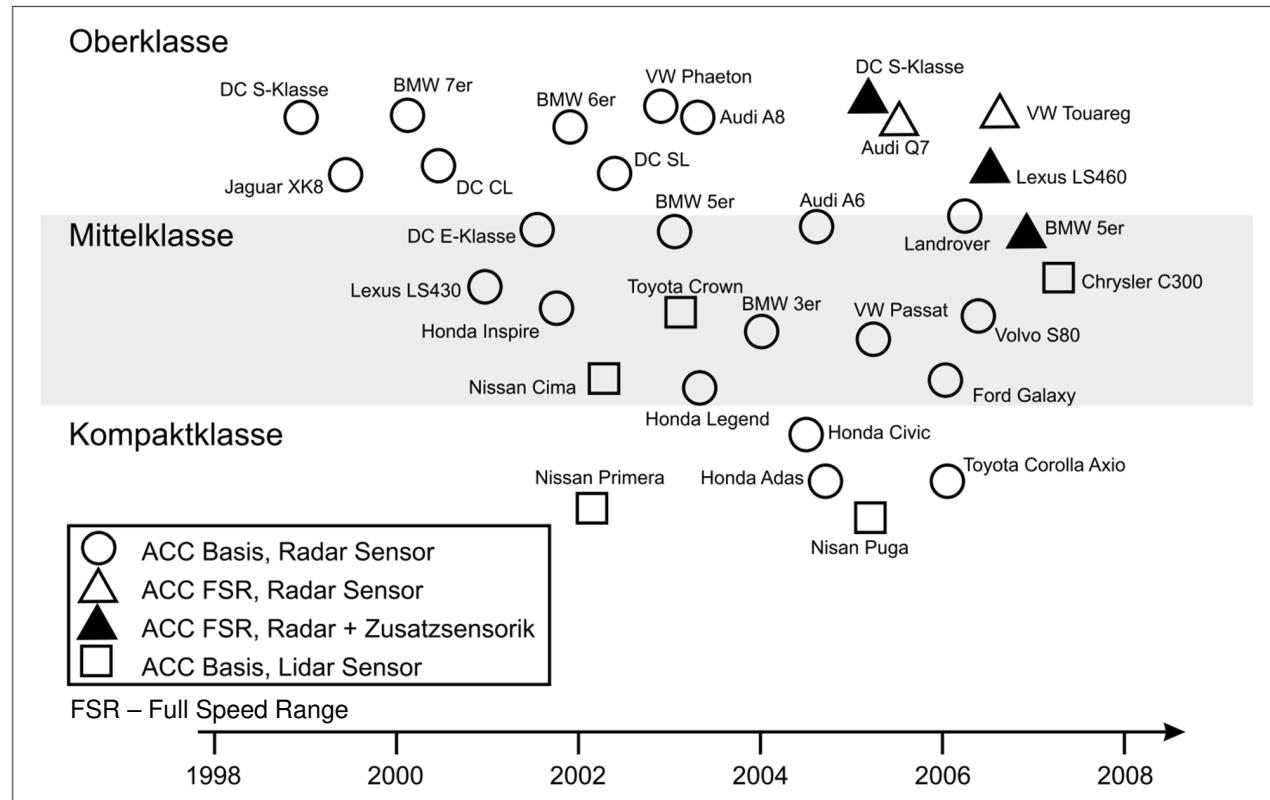
Wichtige Regelungsziele

- Konstantgeschwindigkeitsregelung
- Geschwindigkeitsregelung mit Bremseingriff
- Schwingungsgedämpfte Folgeregelung (keine v-Kopie)
- Einhaltung der Soll-Zeitlücke
- Sicherstellung von Kolonnenstabilität
- Priorität des Fahrereingriffs
- ...

Adaptive Cruise Control - ACC Historie

- 1958 Erstes Cruise-Control System in Serie
(reine Geschwindigkeitsregelung), Chrysler Imperial
- 1995 Erster Abstandsregeltempomat (ACC) in Serie,
Mitsubishi Diamante (ohne Bremseingriff, Lidar)
- 1999 Erste ACC-Systeme in Europa, Mercedes Benz
S-Klasse, Jaguar XK8 (mit Bremseingriff und höherer
Maximalgeschwindigkeit, witterungsbeständiger Radar)

Adaptive Cruise Control - ACC Historie

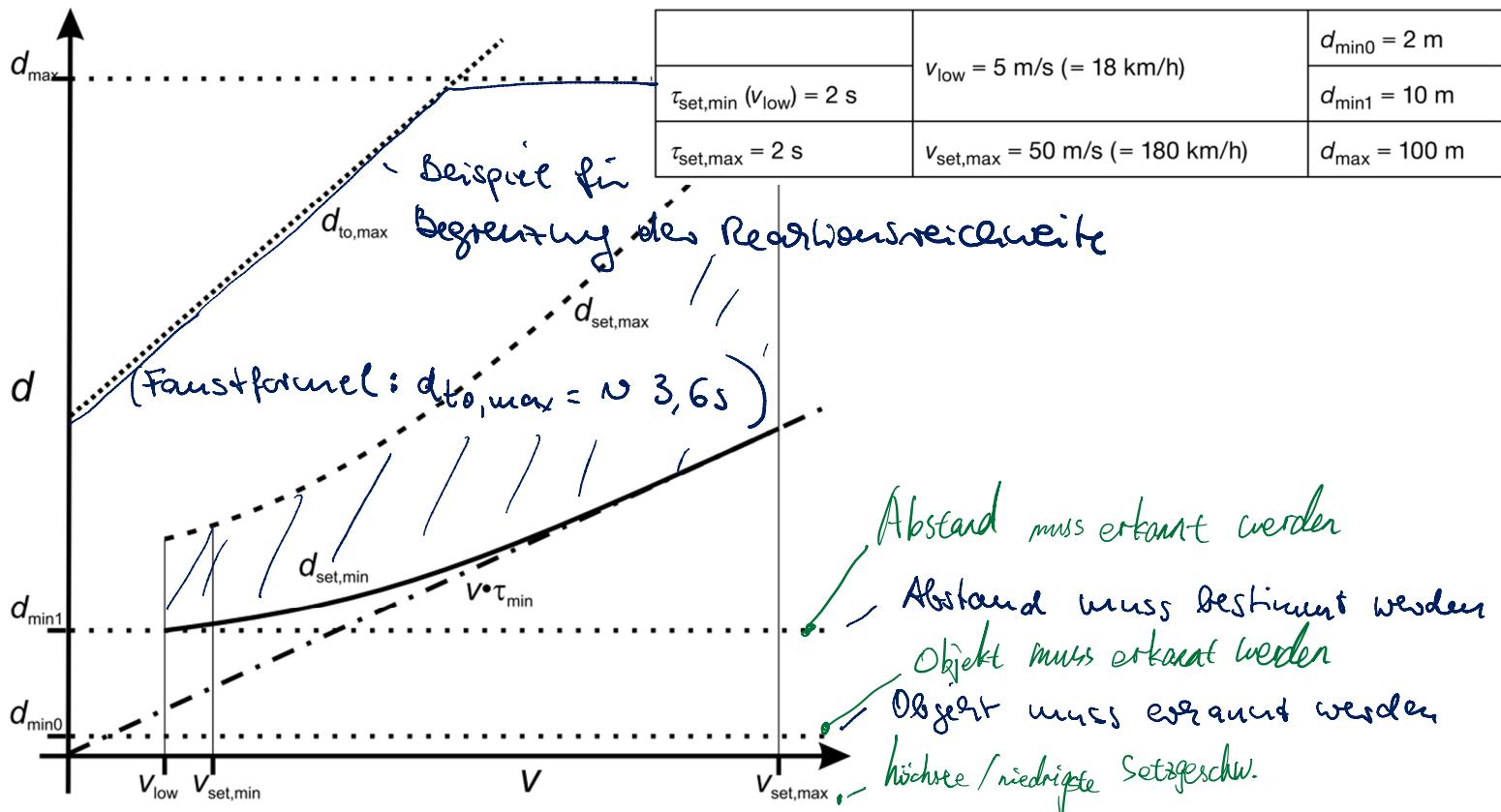


Quelle: Winner, et al.: Handbuch Fahrerassistenzsysteme

Fachgebiet Kraftfahrzeuge • Fakultät Verkehrs- und Maschinensysteme • Technische Universität Berlin

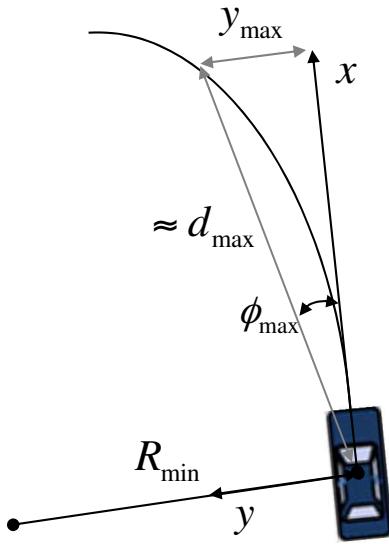
Adaptive Cruise Control - ACC

Zielobjekterkennung – Anf. min. und max. Abstände



Adaptive Cruise Control - ACC

Zielobjekterkennung – Anf. lat. Erfassungsbereich



Die bei einer Kurvenfahrt notwendige Reichweite
folgt aus

$$d_{\max} = v_{\max} T_{\max}$$

mit

$$a_{y,\max} = \frac{v_{\max}^2}{R_{\min}}$$

max. einstellbare
Reichweite

$$v_{\max} = \sqrt{a_{y,\max} R_{\min}}$$

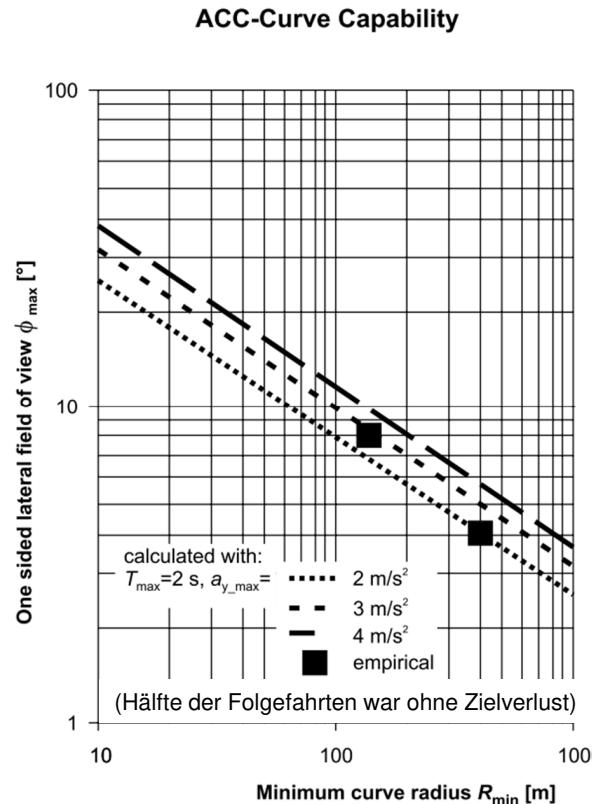
Für den im T_{\max} maximal möglichen Versatz
gilt

$$y_{\max} = a_{y,\max} T_{\max}^2 \frac{1}{2}$$

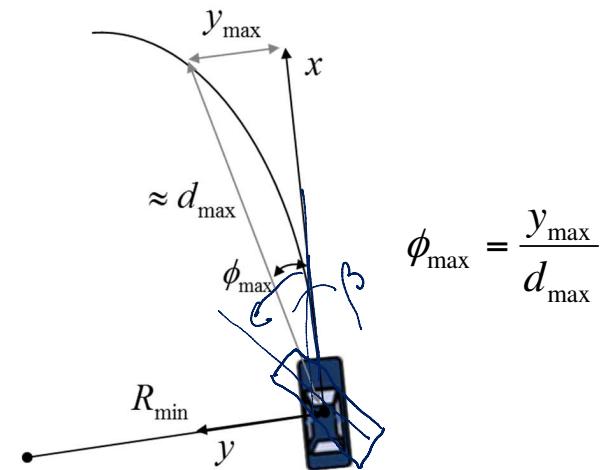
Für den maximal notwendigen Erfassungsbereich folgt $\Phi_{\max} = \arcsin \left(\frac{y_{\max}}{d_{\max}} \right) \approx \frac{y_{\max}}{d_{\max}}$

Adaptive Cruise Control - ACC

Zielobjekterkennung – Anf. lat. Erfassungsbereich



$$y_{\max} = \frac{1}{2} a_{y,\max} T_{\max}^2$$
$$d_{\max} = T_{\max} \sqrt{a_{y,\max} R_{\min}}$$

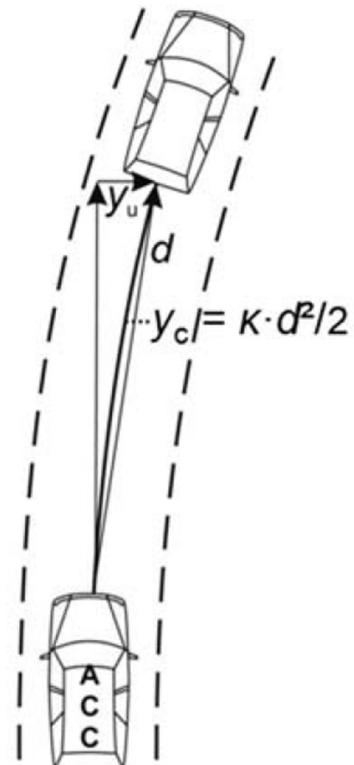
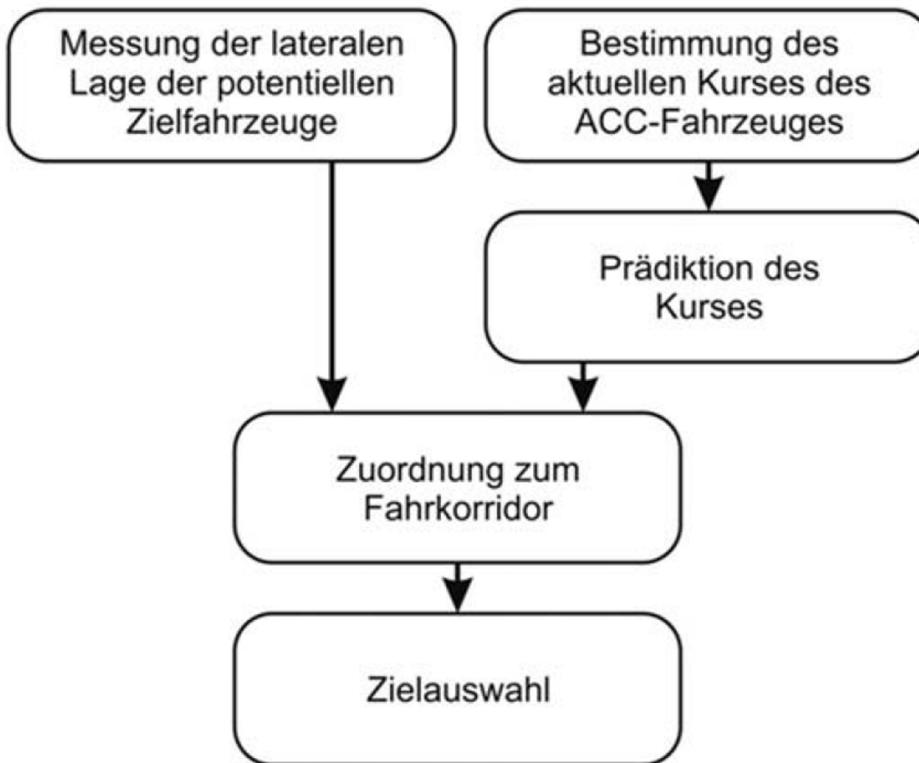


$$\phi_{\max} = \frac{y_{\max}}{d_{\max}}$$

Quelle: Winner, et al.: Handbuch Fahrerassistenzsysteme

Adaptive Cruise Control - ACC

Zielauswahl – Überblick



Quelle: Winner, et al.: Handbuch Fahrerassistenzsysteme

Fachgebiet Kraftfahrzeuge • Fakultät Verkehrs- und Maschinensysteme • Technische Universität Berlin

Adaptive Cruise Control - ACC

Zielauswahl – Bestimmung der Kurskrümmung

Ermittlung der Kurskrümmung aus...

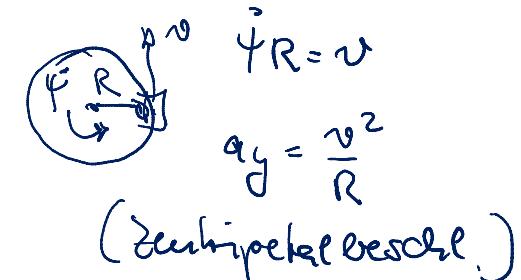
Lenkradwinkel

$$\frac{1}{R} = \kappa = \frac{\delta_L}{l_i L \left(1 + \frac{v^2}{v_{ch}^2} \right)} \quad \text{mit} \quad v_{ch}^2 = \frac{c_{av} c_{ah} l^2}{m(c_{ah} l_h - c_{av} l_v)}$$

aus ESM

Gierrate

$$\kappa = \frac{\dot{\psi}}{v}$$



Querbeschleunigung

$$\kappa = \frac{a_y}{v^2}$$

$$\Delta v = v_r - v_l$$
$$v = \frac{v_l + v_r}{2}$$
$$\omega_1 = \dot{\psi} \frac{l_s}{r}$$
$$-\omega_e = \dot{\psi} \frac{l_s}{r}$$

Radgeschwindigkeit

$$\kappa = \frac{\Delta v}{v l_s} \quad \text{mit}$$

Adaptive Cruise Control - ACC

Zielauswahl – laterale Lage des Zielfahrzeugs

Bei Annahme, dass aktuelle Krümmung beibehalten wird

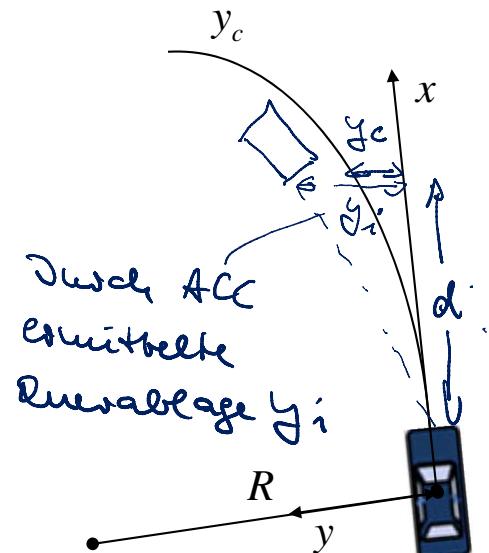
$$\delta_{pred} = \delta_c$$

und näherungsweise parabolische Bahn folgt für eigene bauliche Krümmung y_c

$$y_c = \frac{1}{R_{pred}} = \delta_{pred}$$

Abstand zum
abberheben Fig

$$\Rightarrow y_c = \frac{\delta_{pred} x^2}{2} \text{ bzw. } \frac{\delta_{pred} d^2}{2}$$

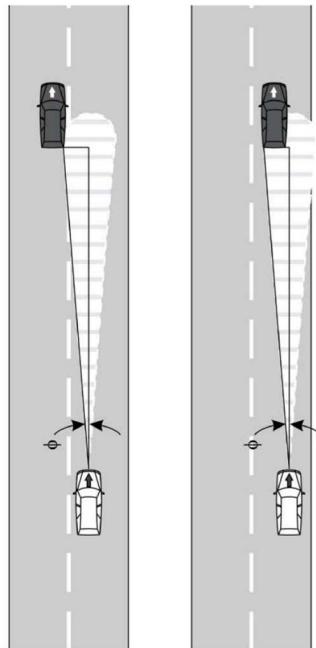


Relativer Versatz des Objektes: $\Delta y_c = y_i - y_c$

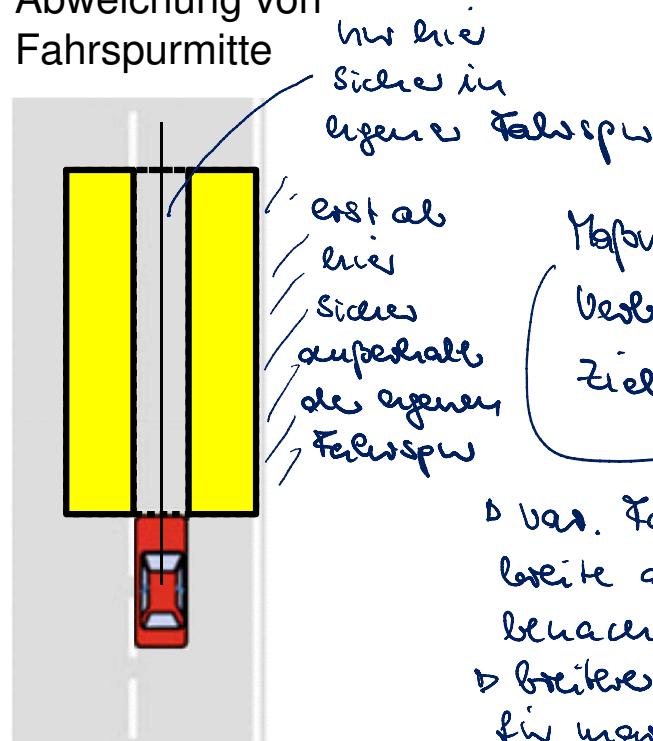
Adaptive Cruise Control - ACC

Zielauswahl – Fahrschlauch

Unsicherheit durch
fehlende
Kanteninformation



Unsicherheit bei
Abweichung von
Fahrspurmitte



Quelle: Winner, et al.: Handbuch Fahrerassistenzsysteme

Adaptive Cruise Control - ACC

Regelstrategie – kaskadierte Regelung

(1) Tempolimit eingestellte Soll-Geschw.

$$a_{i+1}^{\text{soll}} = k_{p,T} (v^{\text{soll}} - v_{i+1})$$

(2) Abstandregelung folgt aus

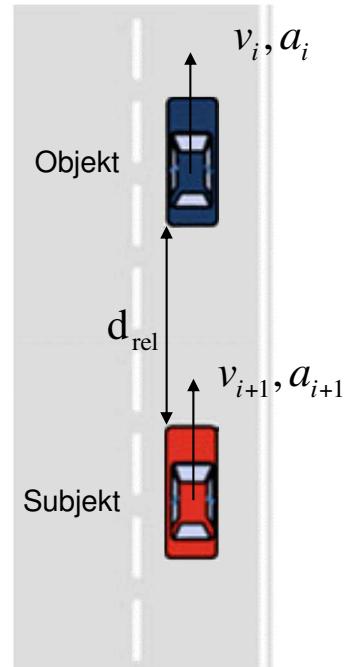
(a) Äußere Kaskade $d_{\text{rel}}^{\text{soll}} = v_{i+1} t + v_{i+1}^{\text{soll}}$

$$v_{\text{rel}}^{\text{soll}} = k_{p,d} (d_{\text{rel}}^{\text{soll}} - d_{\text{rel}})$$

eingestellte
Soll-Zeitkonst.

(b) Innere Kaskade

$$a_{i+1}^{\text{soll}} = -k_{p,iv} (v_{\text{rel}}^{\text{soll}} - v_{\text{rel}})$$



$$v_{\text{rel}} = v_i - v_{i+1}$$

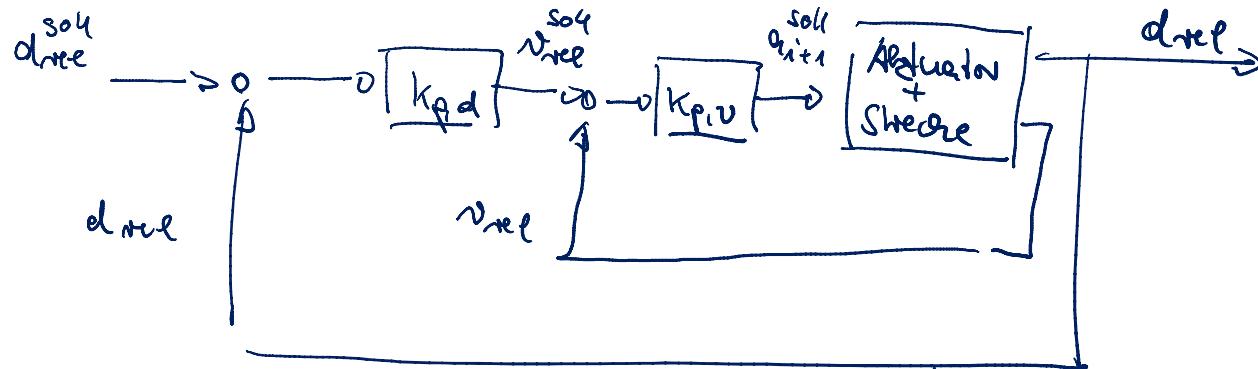
Adaptive Cruise Control - ACC

Regelstrategie – kaskadierte Regelung

Für die Abstandsregelung folgt

$$a_{i+1}^{soll} = -K_{P,v} K_{P,d} (d_{rel}^{soll} - d_{rel}) + K_{P,v} v_{rel}$$

und das Blockschaltbild ist



Adaptive Cruise Control - ACC

Regelstrategie – kaskadierte Regelung

Für **Low Speed** und **Stop-And-Go** gilt

- Höhere Kp für Low-Speed-Bereich, um realistisches Fahrerfahrverhalten nachzubilden
- Bei Stau Kp wieder etwas kleiner. Stauerkennung über Erkennung von z.B. wiederholtes Losfahren des Vordermannes mit geringem v_max, Stillstand wieder kurz nach Anfahren,...
- $|a_{i+1}^{soll}|$ bis 5 m/s² erlaubt

Adaptive Cruise Control - ACC

Kolonnenstabilität – notwendige Bedingung

Angenommen, mehrere Fahrzeuge hintereinander werden per ACC geregelt und bilden eine Kolonne. Dann ist es wichtig sicherzustellen, dass die Kolonne stabil bleibt.

Eine notwendige Bedingung hierfür ist im Frequenzbereich

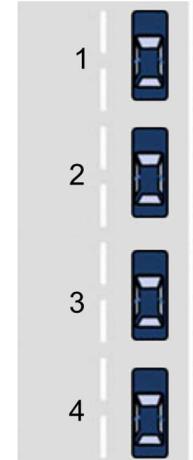
$$|G_{i,i+1}(j\omega)| = \frac{|a_{i+1}^{soll}|}{|a_i|} \leq 1$$

Diagramm zur Frequenzgangdarstellung:

Die obige Gleichung zeigt den Betrag des Übertragungsganges $G_{i,i+1}$ in Abhängigkeit von der Kreisfrequenz $j\omega$. Der Nenner $|a_i|$ ist als vertikale Linie dargestellt, der Zähler $|a_{i+1}^{soll}|$ als horizontaler Balken. Die gesuchte Bedingung ist $|G| \leq 1$.

Dabei wird idealisiert angenommen, dass

$$a_{i+1}^{soll} = a_{i+1}$$



Adaptive Cruise Control - ACC

Kolonnenstabilität – einfaches Regelgesetz

Einfaches Regelgesetz

$$\dot{q}_{i+1}^{\text{soz}}(t) = \dot{q}_i(t - \tau_{\text{set}})$$

$$\dot{q}_i(t - \tau_{\text{set}}) \neq 0$$

Augenblicken $\dot{q}_i(t)$ schwint ~~harmonisch~~

Dann $\dot{q}_i(t) = \hat{q}_i e^{j\omega t}$

$$\dot{q}_{i+1}^{\text{soz}}(t) = \hat{q}_{i+1}^{\text{soz}} e^{j\omega t} = \hat{q}_i e^{j\omega(t - \tau_{\text{set}})}$$

Überprüfung der Kolonnenstabilität

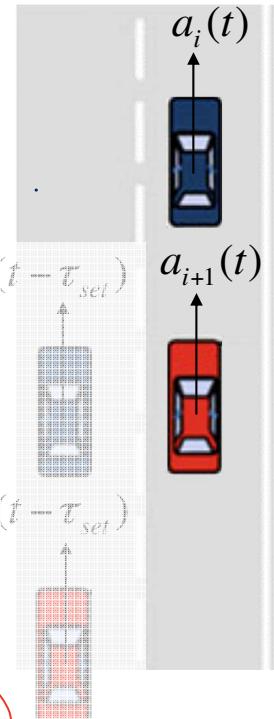
$$|G_{i,i+1}(j\omega)| = |e^{-j\omega\tau_{\text{set}}}| = 1$$

Nachteil: $\dot{q}_i = \dot{q}_{i+1}(t - \tau_{\text{set}})$

(a) nur grenzstabil (keine Dämpfung)

(b) Besch. des Objekts muss gemessen werden

(c) keine Korrektur von Winkel und Dreh



Adaptive Cruise Control - ACC

Kolonnenstabilität – kaskadierte Regelung

Ausgangspunkt ist

$$a_{i+1}^{soll} = \underbrace{-K_{P,v} K_{P,d}}_{-K_1} (d_{rel}^{soll} - d_{rel}) + \underbrace{K_{P,v} v_{rel}}_{K_2}$$

Mit $d_{rel}^{soll} = v_{i+1} \hat{t}_{set}$ folgt nach 2x ableiten

$$(\ddot{a}_{i+1}^{soll}) = k_1 (\dot{a}_i - \dot{a}_{i+1}^{soll} - \hat{t}_{set} \ddot{a}_{i+1}^{soll}) + k_2 (\ddot{a}_i - \ddot{a}_{i+1}^{soll})$$

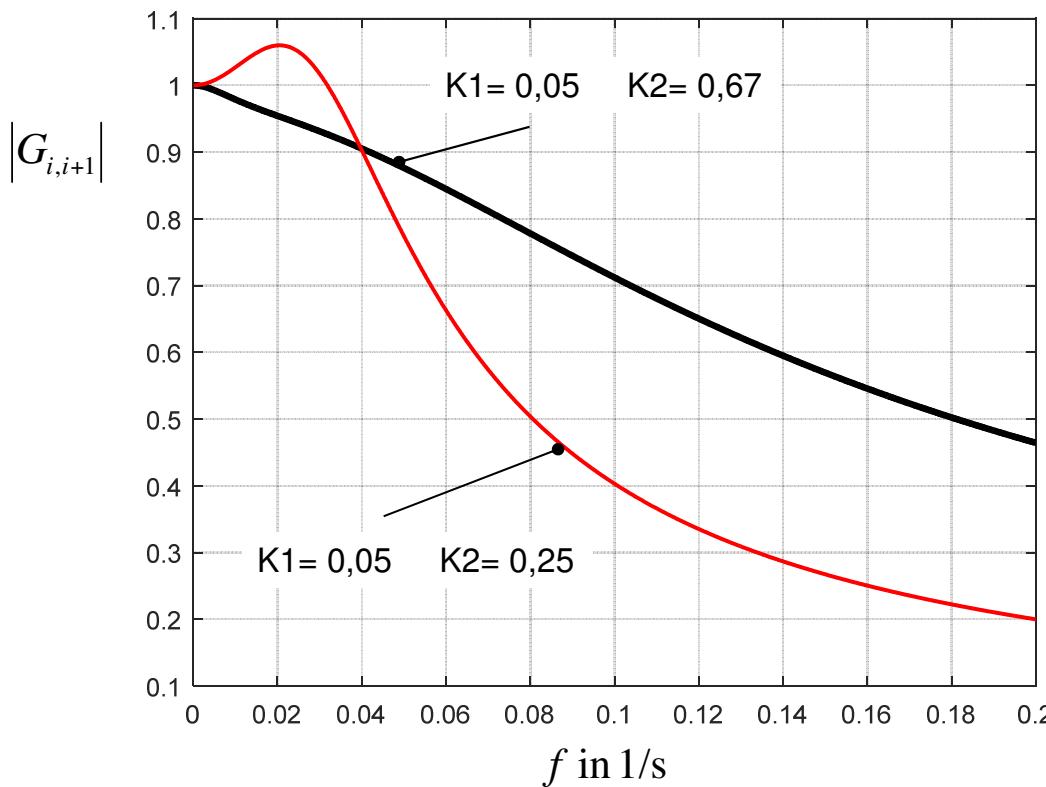
l.h.s.

$$s^2 \dot{a}_{i+1}^{soll} + s(k_2 + k_1 \hat{t}_{set}) \dot{a}_{i+1}^{soll} + k_1 \ddot{a}_{i+1}^{soll} = k_1 \hat{a}_i + s k_2 \hat{a}_i$$

l.h.s. im Frequenzraum mit $s = j\omega$

$$G_{i,i+1}(j\omega) = \frac{k_1 + j\omega k_2}{k_1 + j\omega(k_2 + k_1 \hat{t}_{set}) - \omega^2}$$

Adaptive Cruise Control - ACC Regelstrategie



K_1 kann ausgetauscht werden aus Szenario's
„Einschließendes Faz.“:

$$\vartheta_{\text{ref}} = 0$$

$$d_{\text{ref}}^{\text{soh}} - d_{\text{ref}} \approx 20 \text{ m}$$

Wunsch: Verzögerung
um $1 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ („Groß wegnehmen“)

$$\Leftrightarrow \frac{1 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}{20 \text{ m}} = k_1 = 0.05$$

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Fahrzeugregelung II

FAS und automatisiertes Fahren



IMU :
inertial
measure
unit

Prof. Dr.-Ing. Steffen Müller
M.Sc. Jochen Gallep
Fachgebiet Kraftfahrzeuge • Technische Universität Berlin

Fahrerassistenzsysteme – Stufe 1 und 2 Übersicht

STUFE 0 DRIVER ONLY	STUFE 1 ASSISTIERT	STUFE 2 TEIL-AUTOMATISIERT	STUFE 3 HOCH-AUTOMATISIERT	STUFE 4 VOLL-AUTOMATISIERT	STUFE 5 FAHRERLOS
<p>Fahrer führt dauerhaft Längs- und Querführung aus.</p> <p>ACC</p> <p>System übernimmt die jeweils andere Funktion.</p>	<p>Fahrer führt dauerhaft Längs- oder Querführung aus.</p> <p>Front-kollisions-schutz</p> <p>System übernimmt Längs- und Querführung in einem spezifischen Anwendungsfall*. Es erkennt Systemgrenzen und fordert den Fahrer zur Übernahme mit ausreichender Zeitreserve auf.</p>	<p>Fahrer muss das System dauerhaft überwachen.</p>	<p>Fahrer muss das System nicht mehr dauerhaft überwachen.</p>	<p>Kein Fahrer erforderlich im spezifischen Anwendungsfall.</p>	<p>Von Start bis Ziel ist kein Fahrer erforderlich.</p>

*Anwendungsfälle beinhalten Straßentypen, Geschwindigkeitsbereiche und Umfeldbedingungen

Quelle: VDA

Frontkollisionsschutzsysteme

Wichtige Regelungsziele

- Vermeidung von Kollisionen im Längsverkehr

Quelle: Destatis: Verkehrsunfälle 2015

Gegenstand der Nachweisung	Unfälle mit Personenschäden	Verunglückte	Getötete	Schwer-verletzte	Leicht-verletzte	Schwerwiegende Unfälle mit Sachschaden 1)	Sonstige Unfälle unter dem Einfluss berausgender Mittel
Unfalltyp							
Fahrerfall	53 686	66 012	1 171	19 061	45 780	19 045	3 940
Abbiege-Unfall	42 517	55 557	259	7 904	47 394	7 541	523
Einbiegen/Kreuzen-Unfall	67 392	87 186	413	12 668	74 105	20 960	755
Überschreiten-Unfall	15 668	17 554	340	4 850	12 364	59	33
Unfall durch ruhenden Verkehr	9 541	10 655	19	1 299	9 337	3 084	2 076
Unfall im Längsverkehr	78 924	115 869	892	13 461	101 516	9 834	2 641
Sonstiger Unfall	37 931	44 058	365	8 463	35 230	8 253	4 764
Insgesamt	305 659	396 891	3 459	67 706	325 726	68 776	14 732

Frontkollisionsschutzsysteme

Historie

1997 Erster Bremsassistent in Serie

2003 Erster Auffahrwarner in Serie in Deutschland, Lexus LS

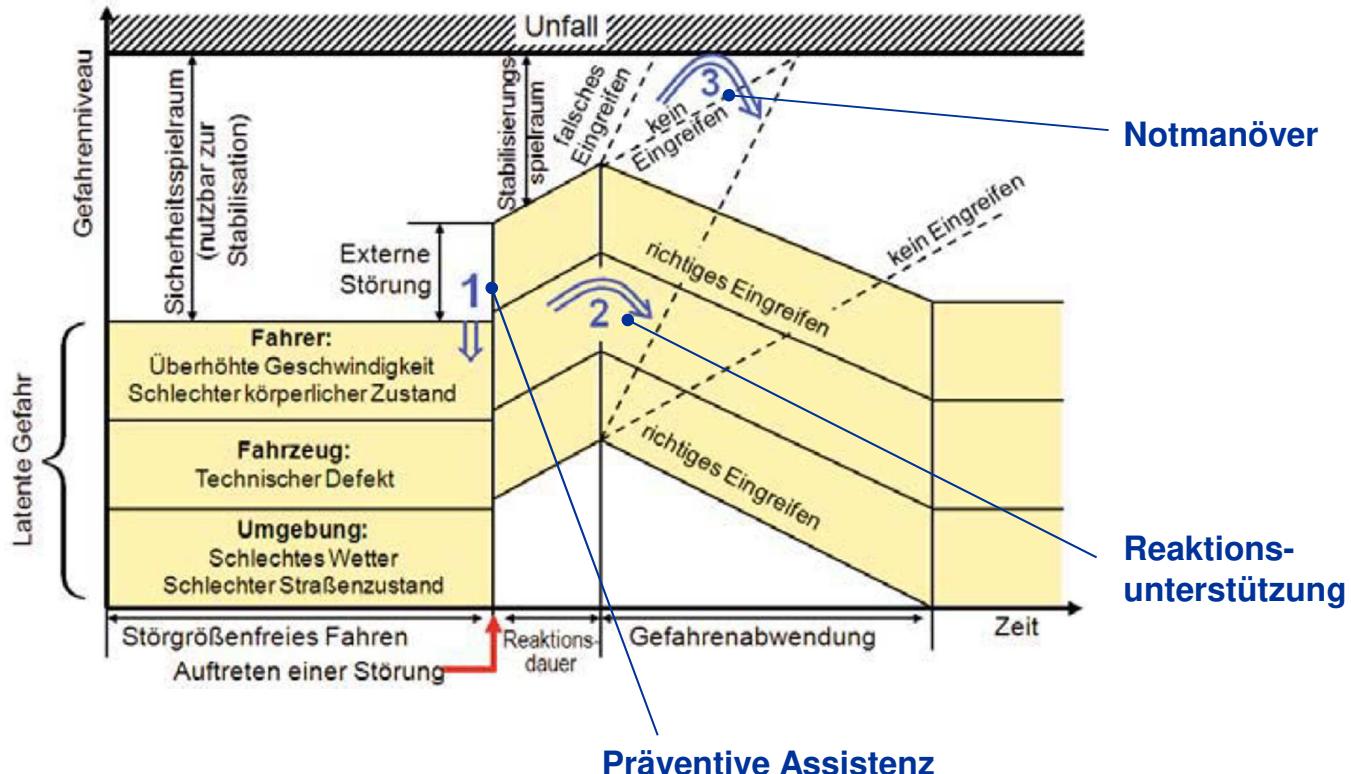
2006 Erstes Autonomes Notbremssystem,
Pre-Safe-Bremse mit Teilbremsung im Mercedes C 216,
mit Vollbremsung 2009 im Mercedes 212

2006 Ausweichassistenz, Lexus LS

2009 alle in der EU neuen Pkw- und leichten
Nutzfahrzeugtypen serienmäßig mit Brems-
assistenzsystemen

Frontkollisionsschutzsysteme

Prinzipielle Assistenzfunktionen

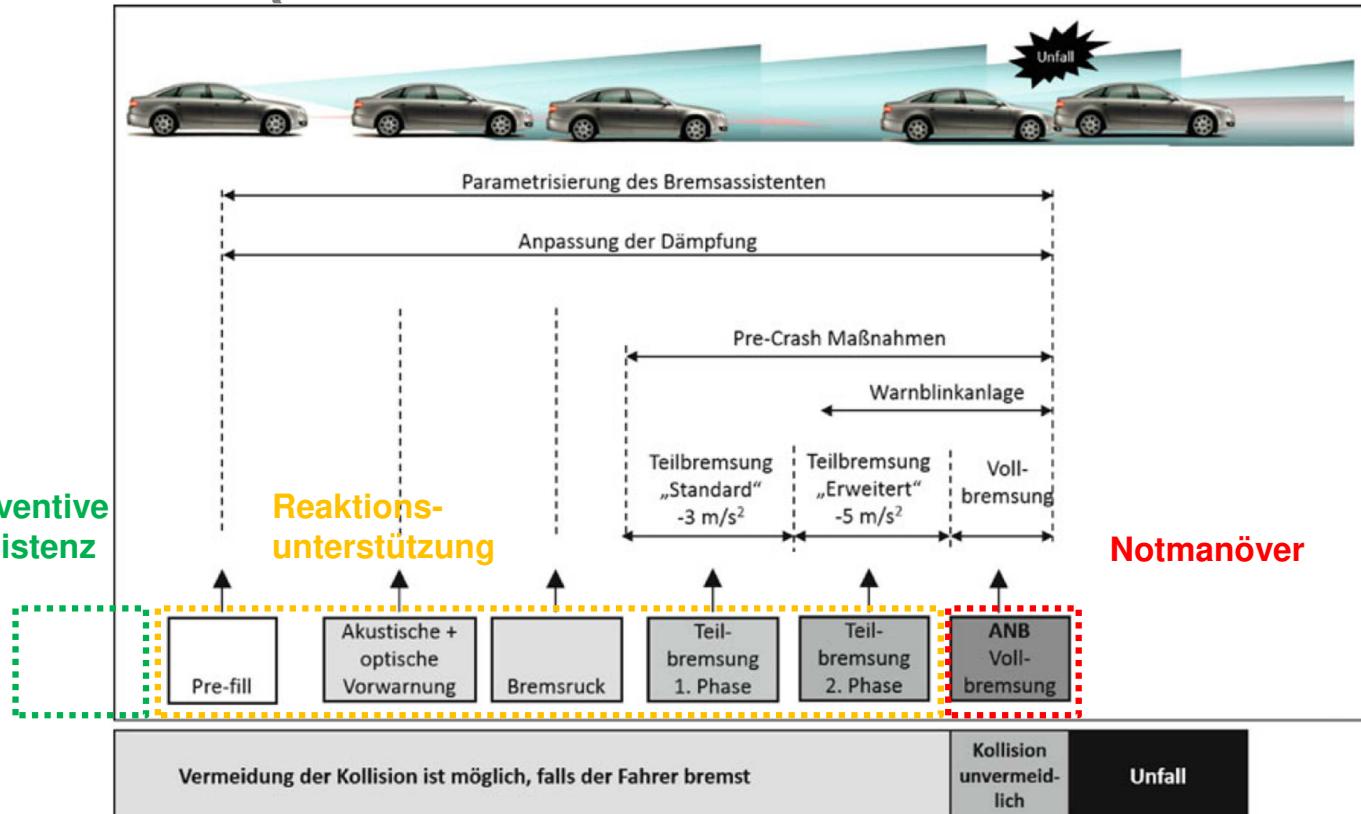


Quelle: Winner, et al.: Handbuch Fahrerassistenzsysteme

Fachgebiet Kraftfahrzeuge • Fakultät Verkehrs- und Maschinensysteme • Technische Universität Berlin

Frontkollisionsschutzsysteme

Prinzipielle Assistenzfunktionen



Sequenzieller Einsatz von Frontkollisionsvermeidungssystemen im Audi A8
(Quelle: Audi AG)

Frontkollisionsschutzsysteme

Präventive Assistenz

Erhöhung des fahrdynamisch verfügbaren Handlungsspielraumes

- Größere Abstände durch ACC
- Force-Feedback-Pedal

Erhöhung der Fahrerfähigkeit eine Störungssituation zu bewältigen

Verbesserung der
Fahrerkonstitution

- Entlastung, z.B.
durch ACC

Verbesserung der
Fahrfertigkeiten

- Training

Frontkollisionsschutzsysteme

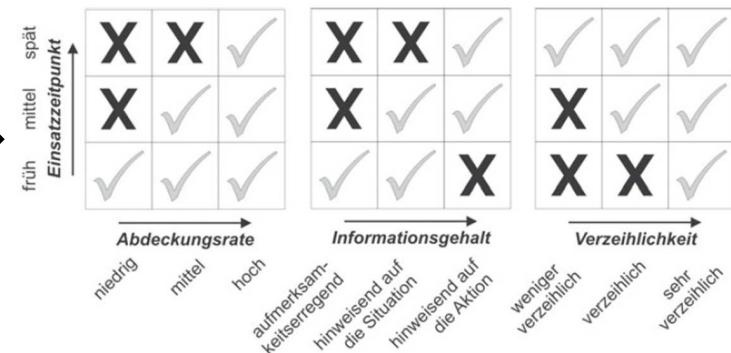
Einteilung von Warnelementen

Zusammenhang verschiedener Einteilungskriterien von Warnelementen:

Informationsgehalt	Verzeihlichkeit	Abdeckungsrate
aufmerksamkeitsregend	sehr verzeihlich	hoch
hinweisend auf die Situation	verzeihlich	mittel
hinweisend auf die Aktion	weniger verzeihlich	niedrig



Geeignete Einsatzzeitpunkte:

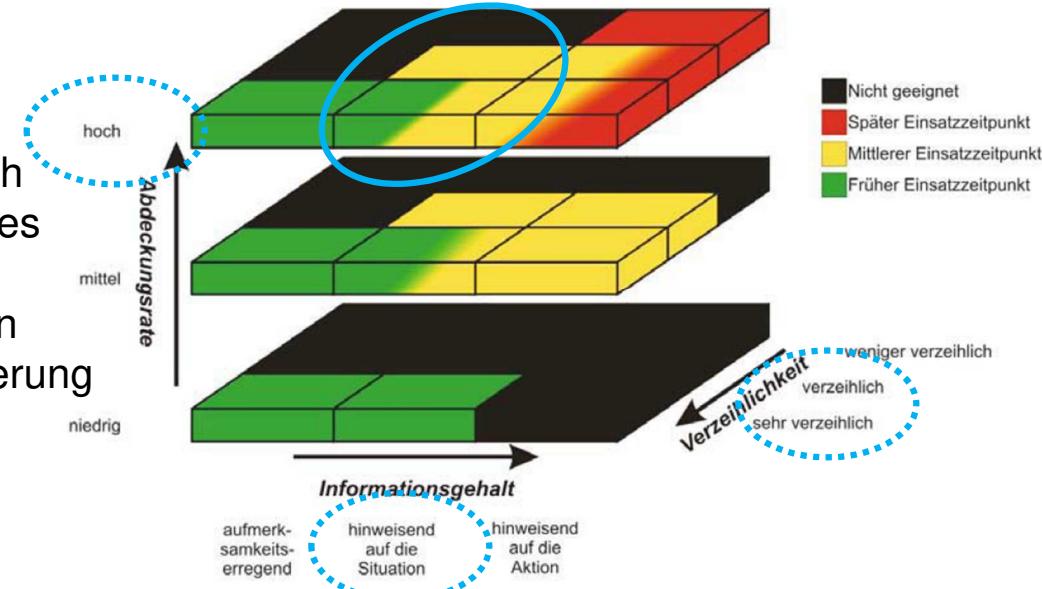


Frontkollisionsschutzsysteme

Reaktionsunterstützung

Aufmerksamkeitserregung und/oder Situationserklärung

- Explizit durch Warnelemente, z.B. visuell oder akustisch
- Implizit durch unerwartetes Funktionsverhalten von Fahrerassistenzsystemen (z.B. Übernahmeaufforderung durch ACC)



Verträglichkeitsmatrix zur Beurteilung des Einsatzzeitpunktes von Warnelementen
(Quelle: Winner, et al.: Handbuch Fahrerassistenzsysteme)

Frontkollisionsschutzsysteme Reaktionsunterstützung

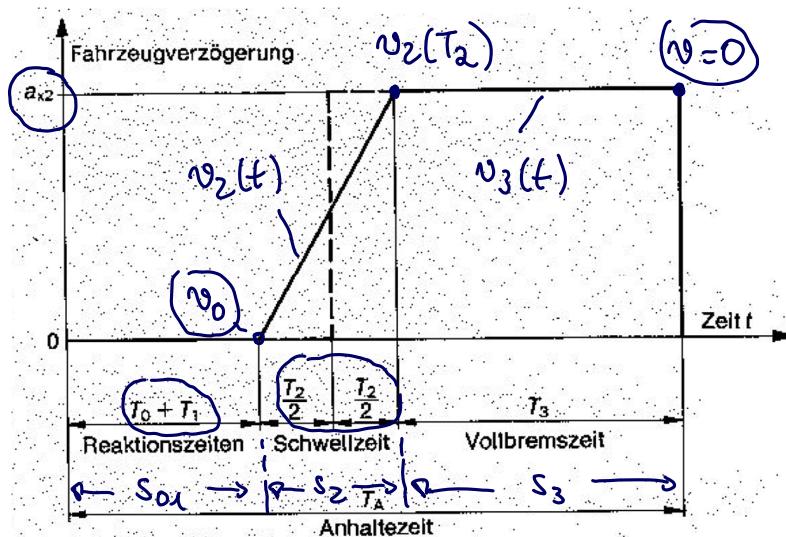
Eingriffsunterstützung

- Pro-Fill
- Bremsassistenz
- Bremsruck *Bremsdruck?*
- Teilbremsungen

Voraussetzung für wirksame Reaktionsunterstützungen und Notmanöver ist die Kenntnis des angemessenen Warn- und Eingriffszeitpunktes.

Frontkollisionsschutzsysteme

Warn- und Eingriffszeitpunkte - Bremsweg



$$s_{01} = v_0(T_0 + T_1)$$

Für $v_2(t)$ gilt

$$v_2(t) = v_0 - \int_0^t a_x(t) dt = v_0 - \frac{a_{x2}}{T_2} t$$

Die zurückgelegte Strecke s_2 folgt aus

$$\begin{aligned} s_2(T_2) &= \int_0^{T_2} v_2(t) dt = \int_0^{T_2} \left(v_0 - \frac{a_{x2}}{T_2} t^2 \right) dt \\ &= \left[v_0 t - \frac{a_{x2}}{T_2} \frac{t^3}{6} \right]_0^{T_2} = v_0 T_2 - \frac{a_{x2}}{T_2} \frac{T_2^3}{6} \end{aligned}$$

Die Verzögerungszeit T_3 folgt aus

$$T_3 = \frac{v_2(T_2)}{a_{x2}} = \frac{1}{a_{x2}} \left(v_0 - \frac{a_{x2}}{T_2} \frac{T_2^2}{2} \right) = \frac{v_0}{a_{x2}} - \frac{T_2}{2}$$

Somit gilt für s_3

$$s_3(T_3) = \int_0^{T_3} a_{x2} t dt = \frac{a_{x2}}{2} \left(\frac{v_0^2}{a_{x2}} - \frac{v_0 T_2}{a_{x2}} + \frac{T_2^2}{4} \right)$$

Der Aufhalteweg ist somit

$$s_A = s_{01} + s_2 + s_3 = v_0 \left(T_0 + T_1 + \frac{T_2}{2} \right) + \frac{v_0^2}{2 a_{x2}}$$

Frontkollisionsschutzsysteme

Warn- und Eingriffszeitpunkte

Unbeschleunigtes Hindernis

Bremsabstand und TTC

$$d_B = v_{rel}\tau_B + \frac{v_{rel}^2}{2a_{x,max}} = v_{rel} \underbrace{\left(\tau_B + \frac{v_{rel}}{2a_{x,max}} \right)}_{TTC}$$

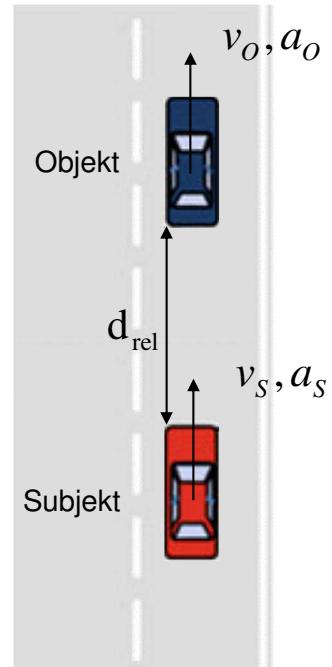
Time to Collision

Notwendige Verzögerung

$$a_{x,rel} = \frac{v_{rel}^2}{2d_{rel}} \quad \tau_R \hat{=} T_0 + T_1, \tau_B \hat{=} \frac{T_2}{2}$$

Warnabstand und Warnzeit

$$d_{warn} = v_{rel}(\tau_R + \tau_B) + \frac{v_{rel}^2}{2a_{x,max}} = v_{rel} \underbrace{\left(\tau_R + \tau_B + \frac{v_{rel}}{2a_{x,max}} \right)}_{\tau_{warn}} = d_{reak} + d_{rel}$$



$$v_{rel} = v_o - v_s$$

Frontkollisionsschutzsysteme

Warn- und Eingriffszeitpunkte

Unbeschleunigtes Hindernis

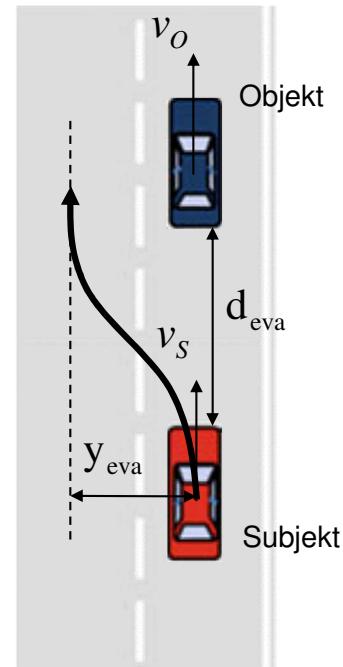
Ausweichabstand d_{eva}

$$d_{eva} = v_{rel} t_{eva}$$

t_{eva} folgt aus:

$$\begin{aligned} v_{eva} &= a_{y,max} t_{eva} \Rightarrow y_{eva} = a_{y,max} t_{eva}^2 \\ \Rightarrow t_{eva} &= \sqrt{\frac{2 y_{eva}}{a_{y,max}}} + t_0 \end{aligned}$$

mit t_0 - Reaktionszeit ($\approx 0,1s$)



$$v_{rel} = v_O - v_S$$

Frontkollisionsschutzsysteme

Warn- und Eingriffszeitpunkte

Beschleunigtes Hindernis $a_{rel} = a_0 - a_s$

$$a_{max,rel} = a_{max} - a_0$$

Bremsabstand

$$d_B = (v_{rel} + a_{rel} \frac{\tau_B}{2})\tau_B + \frac{(v_{rel} + a_{rel}\tau_B)^2}{2a_{max,rel}}$$

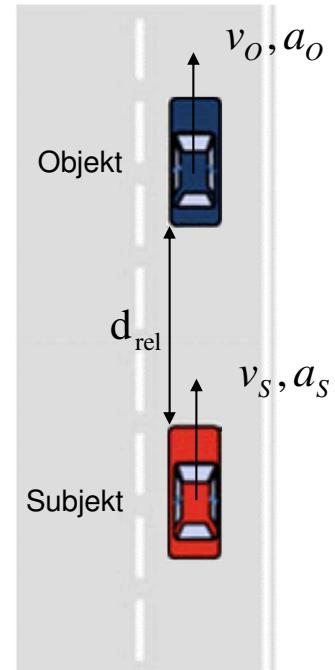
Notwendige Verzögerung

$$a_{x,rel} = a_0 + \frac{v_{rel}^2}{2d_{rel}}$$

Warnabstand und Warnzeit

$$d_{warn} = (v_{rel} + a_{rel} \frac{\tau_B + \tau_R}{2})(\tau_B + \tau_R) + \frac{(v_{rel} + a_{rel}(\tau_B + \tau_R))^2}{2a_{max,rel}}$$

$$t_{warn} = \tau_R + \tau_B + \frac{v_{rel} + a_{rel}\tau_B}{2a_{max,rel}}$$



$$v_{rel} = v_o - v_s$$

Frontkollisionsschutzsysteme

Warn- und Eingriffszeitpunkte

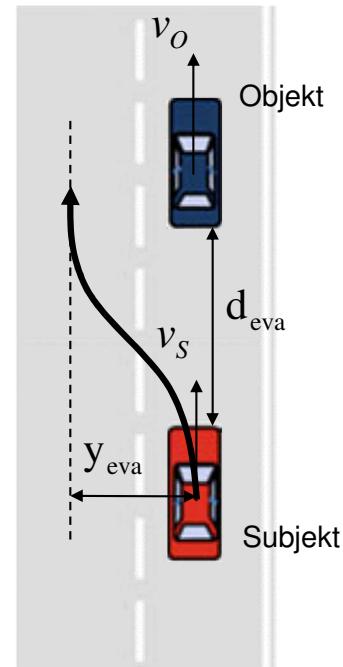
Beschleunigtes Hindernis

Ausweichabstand d_{eva}

$t_{eva} \rightarrow$ Wie bei unbeschleunigtem Hindernis

Ausweichabstand vergrößert sich durch auftretende Verzögerung des Hindernisses

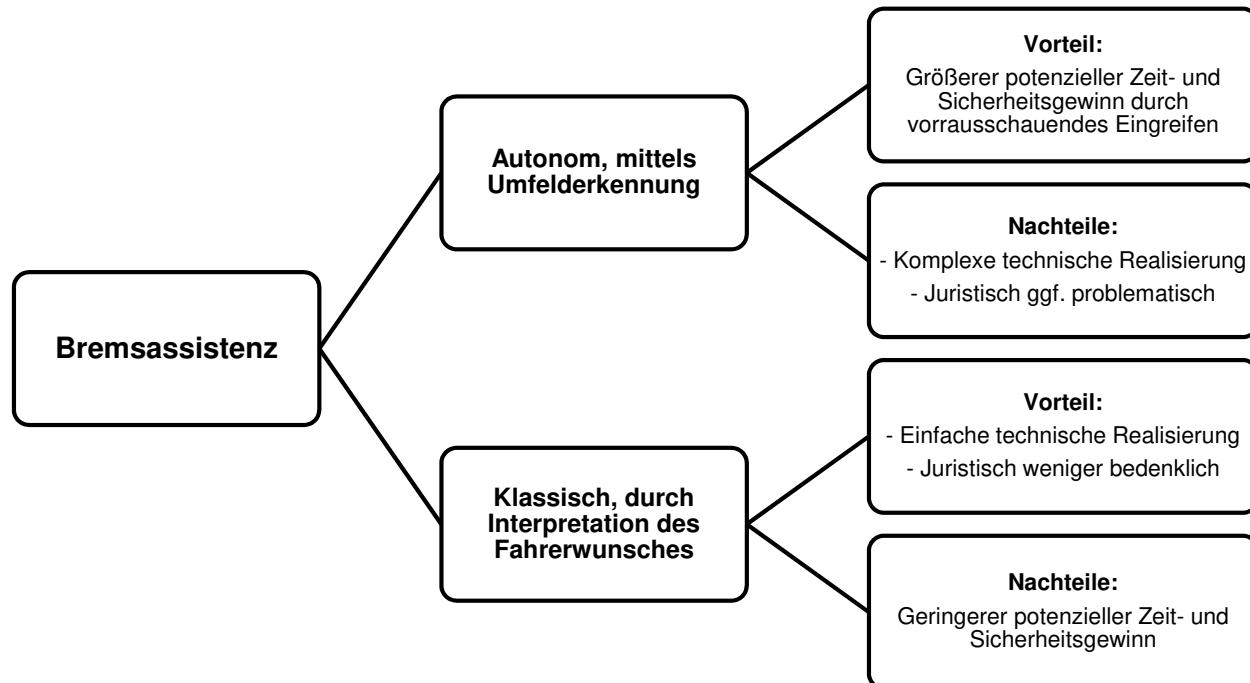
$$d_{eva} = v_{rel} t_{eva} + a_{rel} \frac{t_{eva}^2}{2}$$



$$v_{rel} = v_O - v_S$$

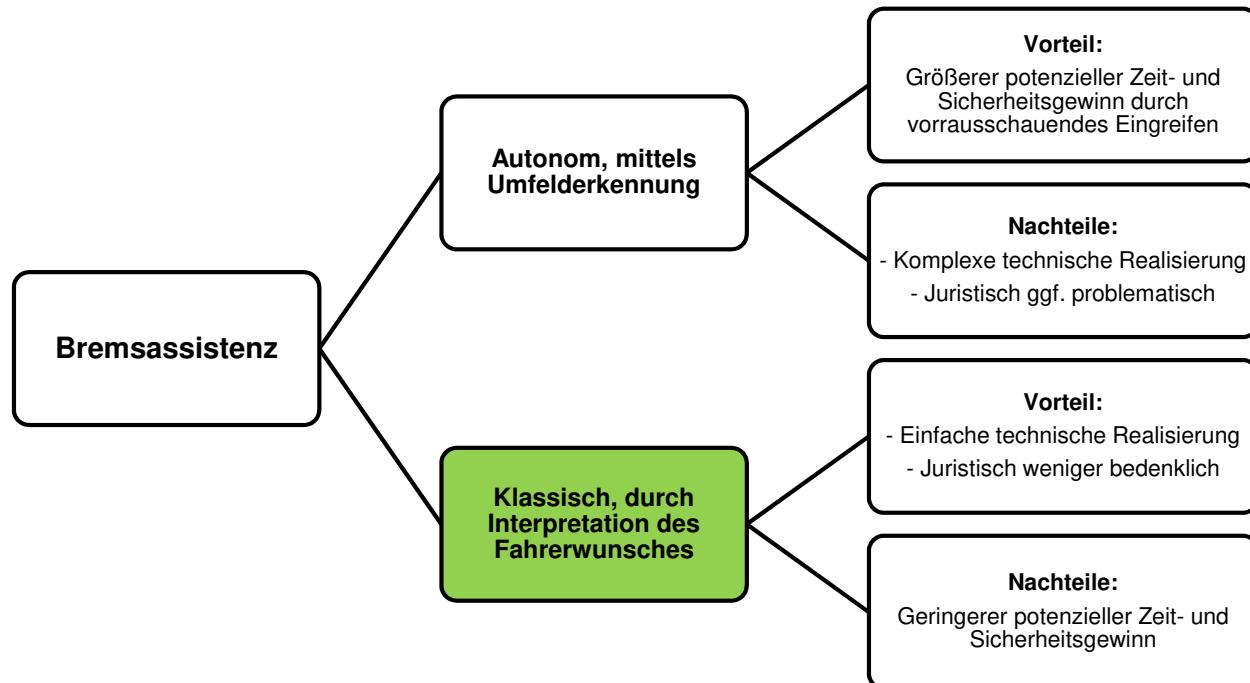
Frontkollisionsschutzsysteme

Bremsassistenz - Einteilung



Frontkollisionsschutzsysteme

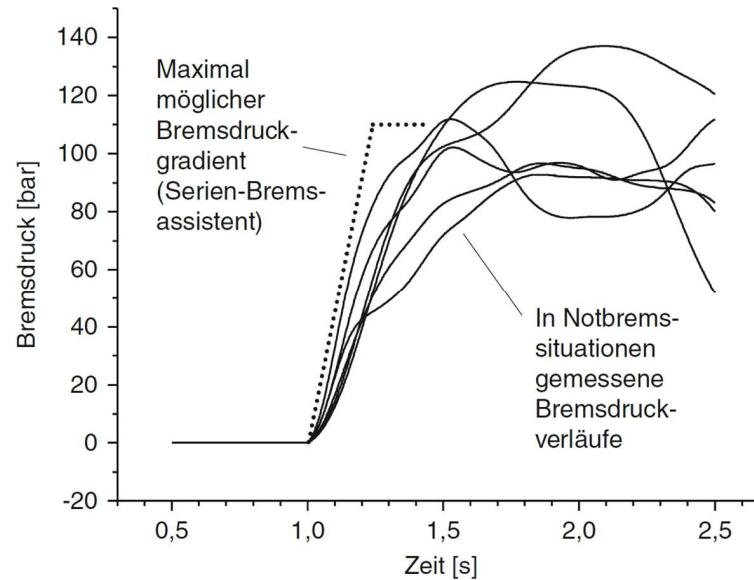
Bremsassistenz - Einteilung



Frontkollisionsschutzsysteme

Bremsassistenz - Motivation

Bremsdruckverläufe gemessener Notremssituationen:

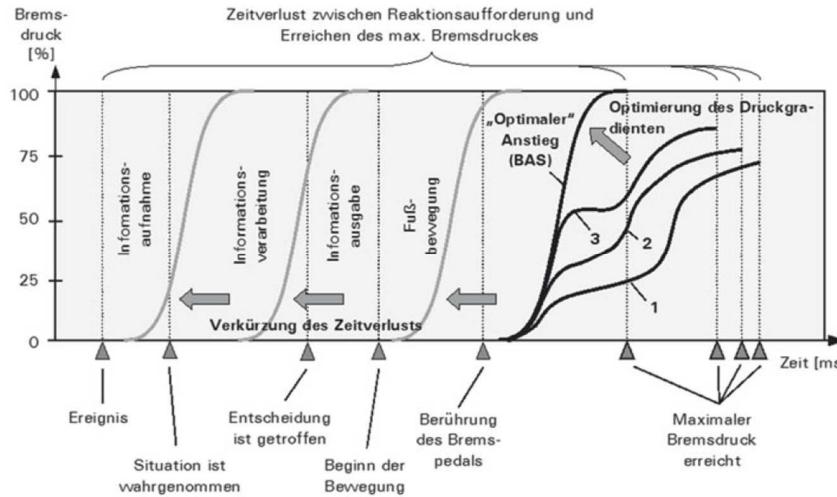


→ Optimierung des Druckgradienten zur Verkürzung des Bremsweges

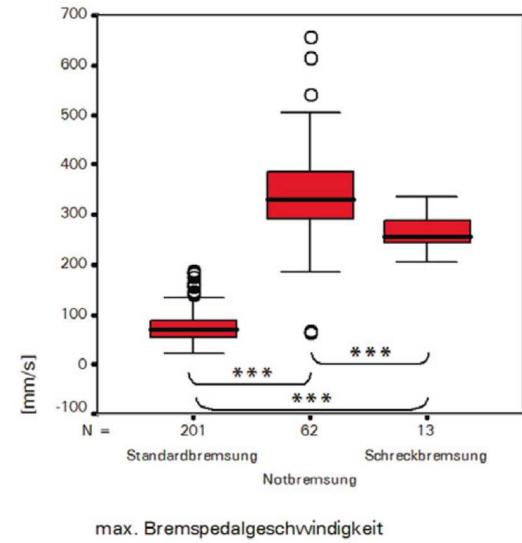
Frontkollisionsschutzsysteme

Bremsassistenz - Bremsvorgang

Phasen des Notbremsvorgangs:



Bremspedalgeschw.:



→ Erkennung des Notbremswunsches anhand der Bremspedalgeschwindigkeit und Erhöhung des Bremsdruckes

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Mechanik-Kinematik-Beschleunigte Bewegung mit Anfangsgeschwindigkeit

$$v = v_0 + a \cdot t$$

Anfangsgeschwindigkeit	v_0	$\frac{m}{s}$	Meter/Sekunde
Zeit	t	s	Sekunden
Beschleunigung	a	$\frac{m}{s^2}$	Meter/Sekunde ²
Geschwindigkeit	v	$\frac{m}{s}$	Meter/Sekunde
$v_0 = v - a \cdot t$		$t = \frac{v - v_0}{a}$	$a = \frac{v - v_0}{t}$

$$s = s_0 + v_0 \cdot t + \frac{1}{2} \cdot a \cdot t^2$$

Anfangsweg	s_0	m	Meter
Anfangsgeschwindigkeit	v_0	$\frac{m}{s}$	Meter/Sekunde
Zeit	t	s	Sekunden
Beschleunigung	a	$\frac{m}{s^2}$	Meter/Sekunde ²
Weg,Auslenkung	s	m	Meter
$a = \frac{2 \cdot (s - s_0 - v_0 \cdot t)}{t^2}$	$t = \frac{-v_0 \pm \sqrt{v_0^2 - 4 \cdot 0,5 \cdot a \cdot (s_0 - s)}}{a}$		$s_0 = s - v_0 \cdot t - \frac{1}{2} \cdot a \cdot t^2$
$v_0 = \frac{s - s_0 - 0,5 \cdot a \cdot t^2}{t}$			

$$v^2 - v_0^2 = 2 \cdot a \cdot s$$

Geschwindigkeit	v	$\frac{m}{s}$	Meter/Sekunde
Anfangsgeschwindigkeit	v_0	$\frac{m}{s}$	Meter/Sekunde
Beschleunigung	a	$\frac{m}{s^2}$	Meter/Sekunde ²
Weg,Auslenkung	s	m	Meter
$v = \sqrt{2 \cdot a \cdot s + v_0^2}$	$v_0 = \sqrt{v^2 - 2 \cdot a \cdot s}$		

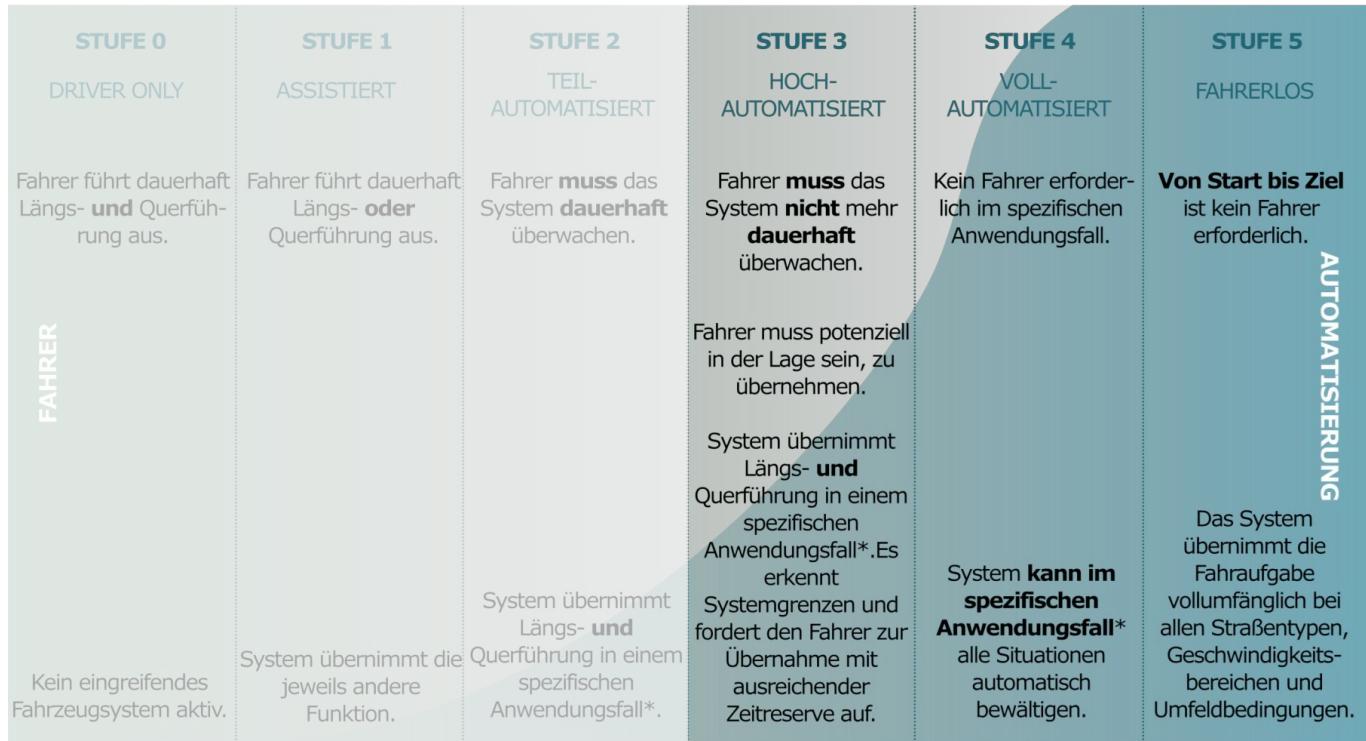
Fahrzeugregelung II

FAS und automatisiertes Fahren



Prof. Dr.-Ing. Steffen Müller
M. Sc. Andreas Hartmann
Fachgebiet Kraftfahrzeuge • Technische Universität Berlin

Automatisiertes Fahren Übersicht



Quelle: VDA

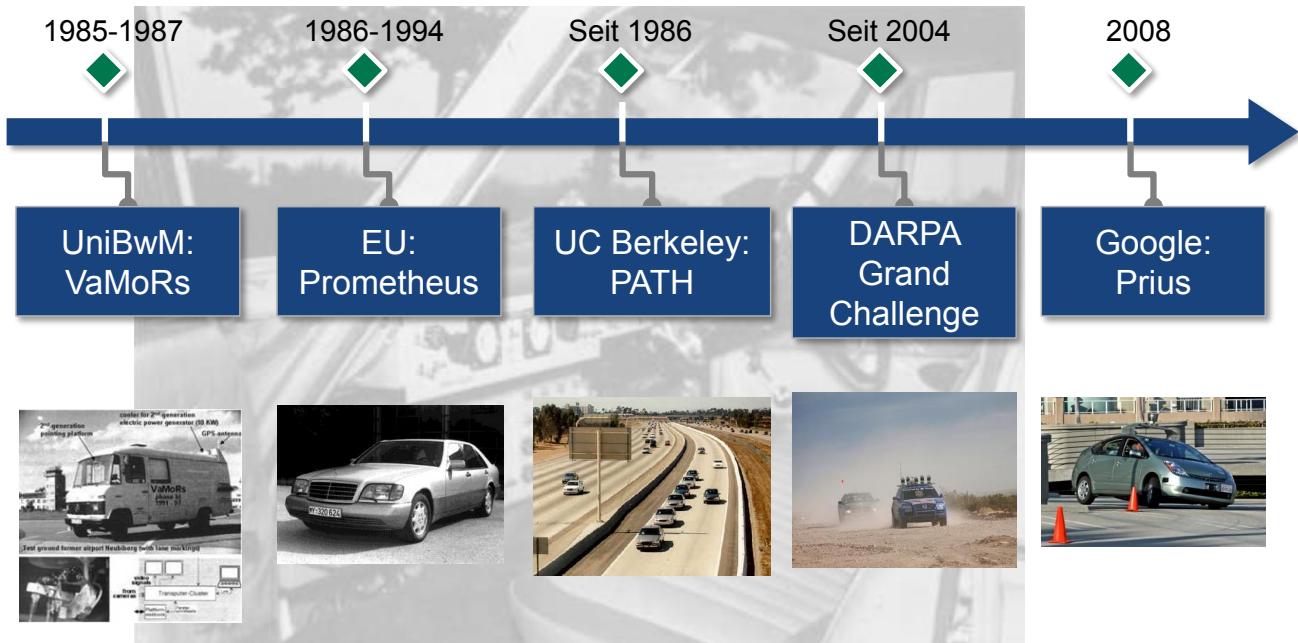
Fahrzeugführungsregelung

Wichtige Regelungsziele

- Geschwindigkeitsregelung
- Abstandsregelung
- Spurhalteregelung
- Automatisches Überholmanöver
- Automatisches Einparken
- ...

Fahrzeugführungsregelung Historie

1977 Erstes „autonomes“ Auto.
Japan, Orientierung an Leitplanken, max. 30 km/h



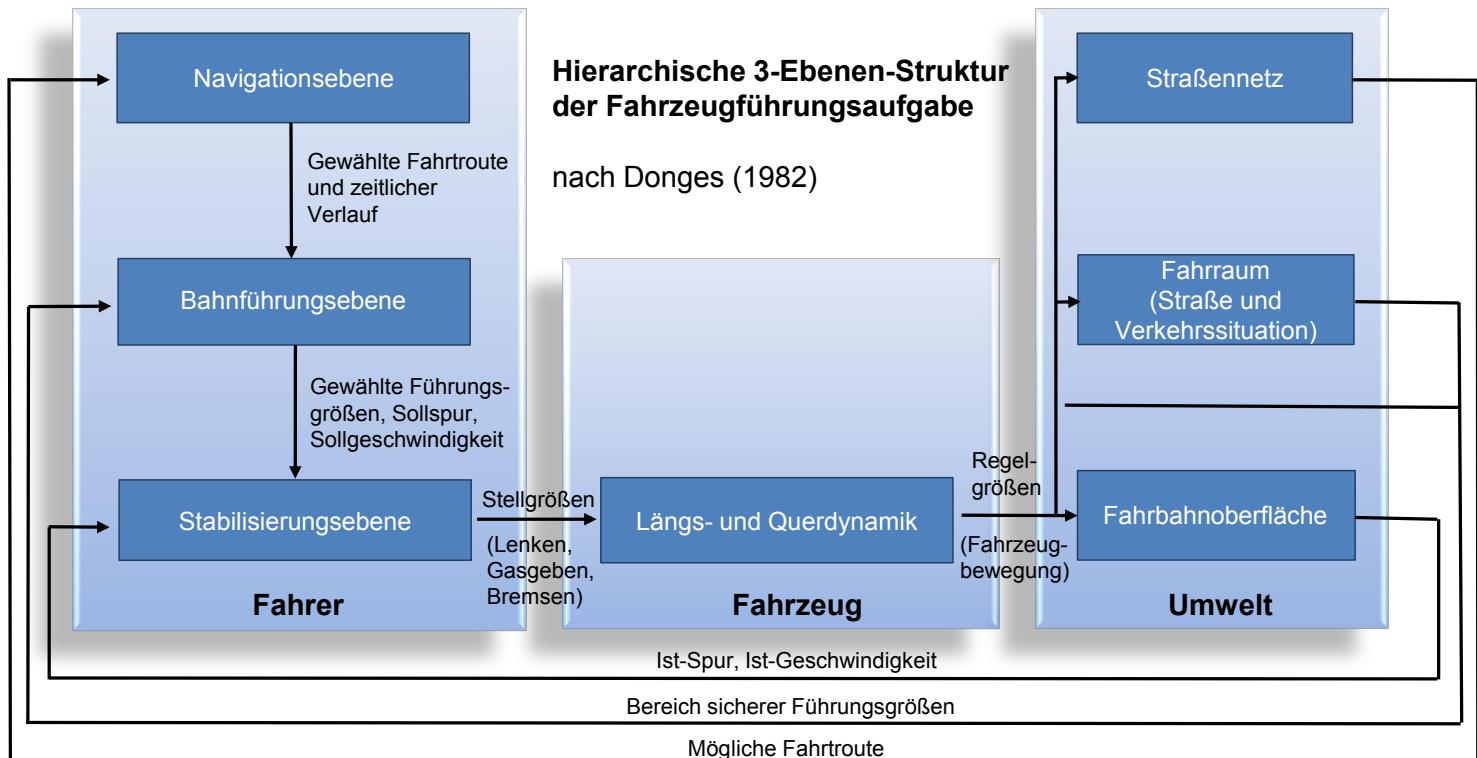
Fahrzeugführungsregelung

Regelungsaufgabe



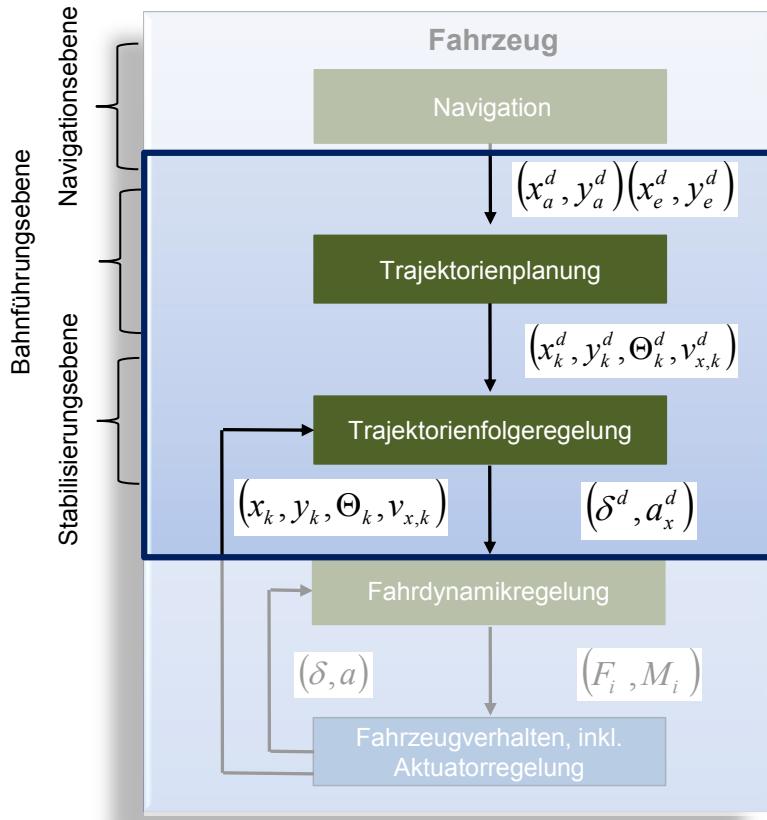
Fahrzeugführungsregelung

Regelungsaufgabe

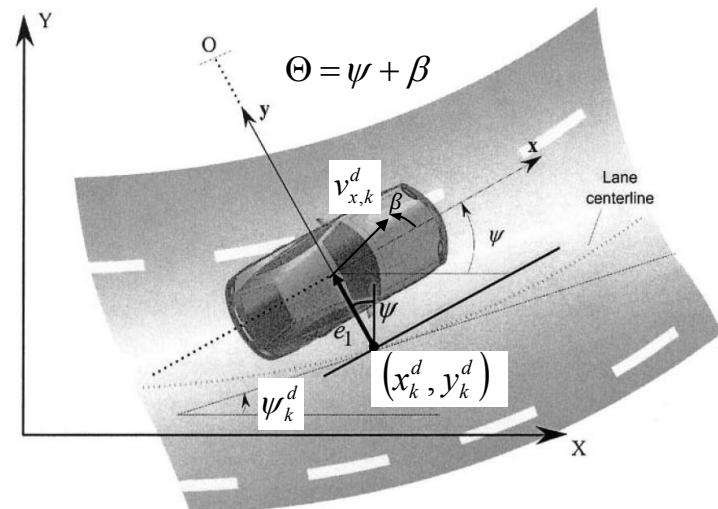


Fahrzeugführungsregelung

Regelungsaufgabe



Fahrzeugführungsregelung



Quelle: Nach Rajamani: Vehicle Dynamics and Control.

Fahrzeugführungsregelung

Trajektorienplanung

Im Gegensatz zu FAS (z.B. ACC oder LKA, Orientierung an Objektfahrzeugen oder Fahrspur) **benötigt** eine **automatisierte Fahrzeugführung** im Allgemeinen eine **Trajektorie**.
Prinzipielle Ansätze zur Generierung von Trajektorien (Trajektorienplanung / Bahnplanung) sind z.B.

- **Gitterstrukturen** + Gitterverbindungen + Glättung
(Ursprung „Robotik“)
- Abschnittsweise Vorgabe von **Krümmungsverläufen**
- **Optimierungsrechnung** verschiedener möglicher Pfade,
z.B. durch Positionsvorgaben und Splines

Fahrzeugführungsregelung

Trajektorienplanung

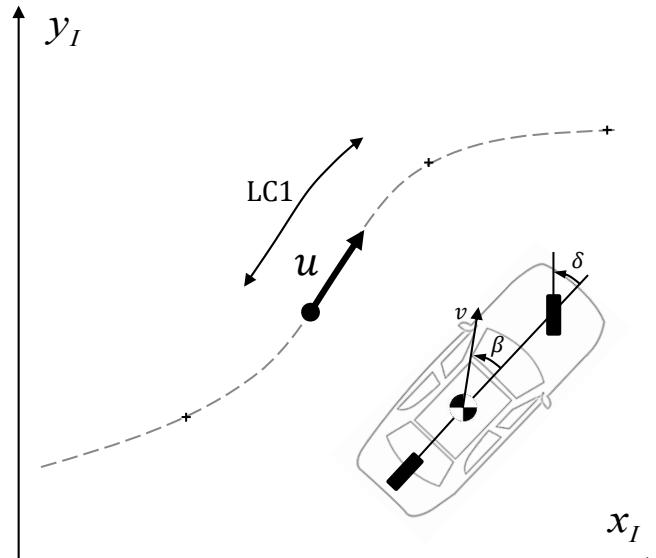
Im Gegensatz zu FAS (z.B. ACC oder LKA, Orientierung an Objektfahrzeugen oder Fahrspur) **benötigt** eine **automatisierte Fahrzeugführung** im Allgemeinen eine **Trajektorie**.
Prinzipielle Ansätze zur Generierung von Trajektorien (Trajektorienplanung / Bahnplanung) sind z.B.

- Gitterstrukturen + Gitterverbindungen + Glättung
(Ursprung „Robotik“)
- Abschnittsweise Vorgabe von **Krümmungsverläufen**
- Optimierungsrechnung verschiedener möglicher Pfade,
z.B. durch Positions vorgaben und Splines

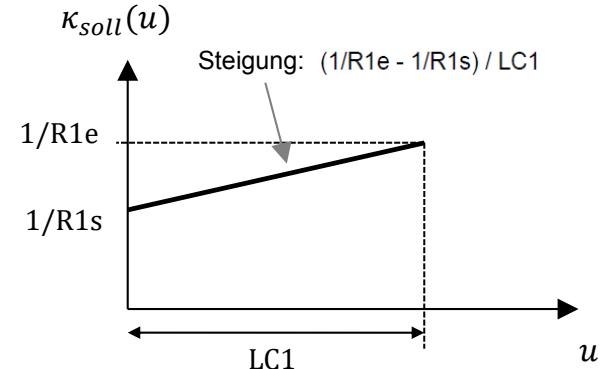
Fahrzeugführungsregelung

Trajektorienplanung – Krümmungsvorgabe

1. Abschnittweise Vorgabe von $\kappa_{soll} = f(u)$



Beispiel: Geradengleichung (Klothoide)



$$\kappa_{soll}(u) = \frac{1}{R_{1s}} + \frac{\frac{1}{R_{1e}} - \frac{1}{R_{1s}}}{LC_1} u$$

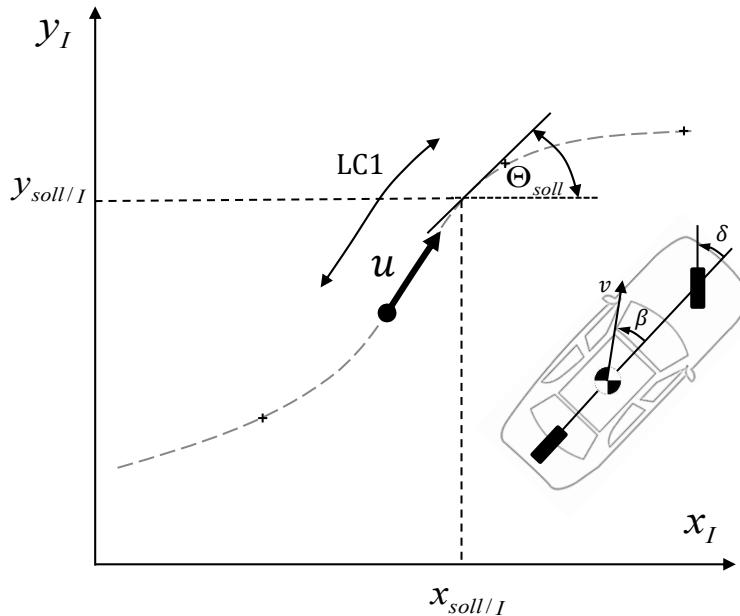
Fahrzeugführungsregelung

Trajektorienplanung – Krümmungsvorgabe

2. Ermittlung des Soll-Kurswinkels

$$\kappa_{soll}(u) = \frac{d\theta_{soll}}{du} \quad (\text{Def. Krümmung})$$

$$\rightarrow \theta_{soll}(u) = \int \kappa_{soll}(u) du + \theta_{soll,0}$$

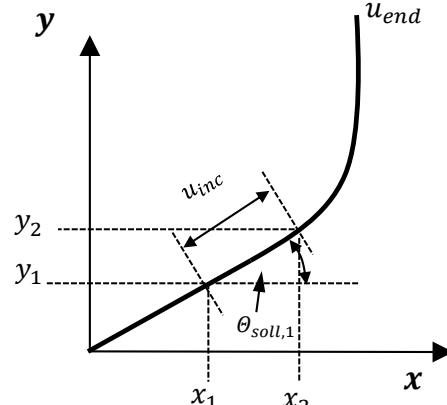


3. Ermittlung der Soll-Position

Iterative Berechnung von x und y innerhalb eines Abschnittes

$$x_{i+1} = x_i + u_{inc} \cos(\theta_{soll,i})$$

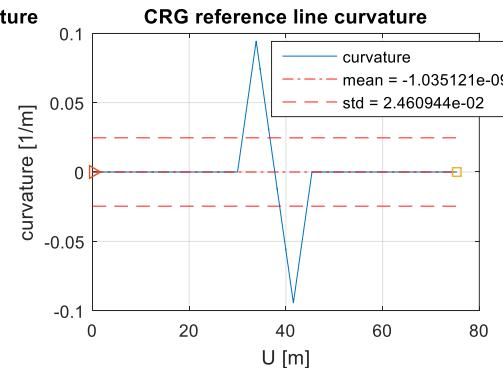
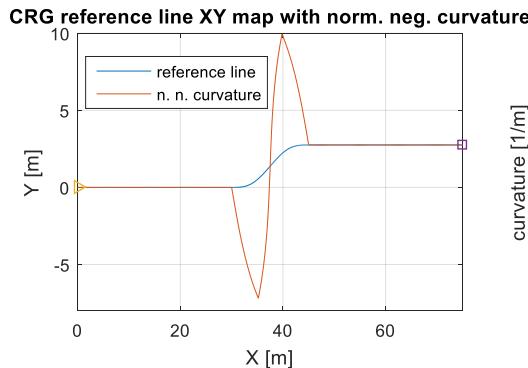
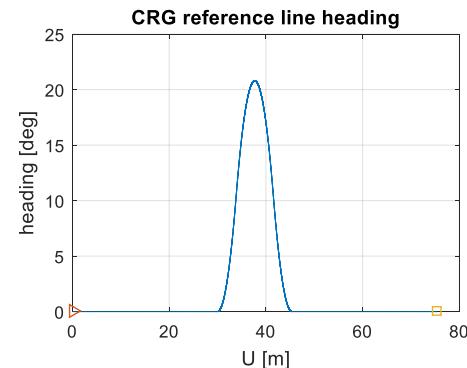
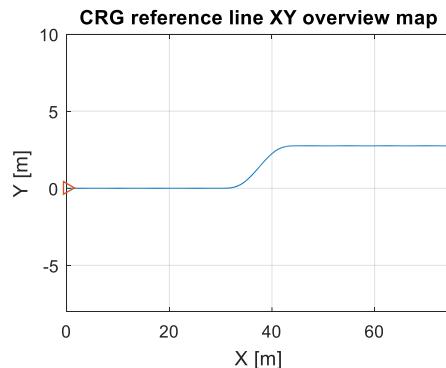
$$y_{i+1} = y_i + u_{inc} \sin(\theta_{soll,i}) \quad \text{von } i = 0 \text{ bis } i = \frac{u_{end}}{u_{inc}}$$



Fahrzeugführungsregelung

Trajektorienplanung – Krümmungsvorgabe

Beispiel Spurwechsel



Vorgaben:

```
LC1=30;  
LC2=4;  
LC3=8;  
LC4=4;  
LC5=30;  
  
R1s=inf;  
R1e=inf;  
R2s=inf;  
R2e=11;  
R3s=11;  
R3e=-11;  
R4s=-11;  
R4e=inf;  
R5s=inf;  
R5e=inf;
```

Fahrzeugführungsregelung

Trajektorienplanung

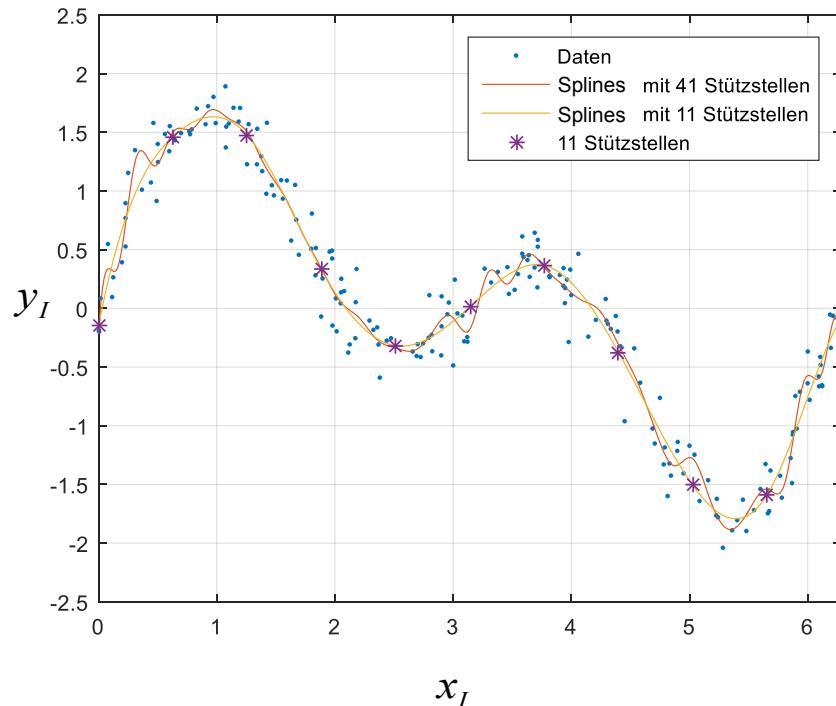
Im Gegensatz zu FAS (z.B. ACC oder LKA, Orientierung an Objektfahrzeugen oder Fahrspur) **benötigt** eine **automatisierte Fahrzeugführung** im Allgemeinen eine **Trajektorie**.
Prinzipielle Ansätze zur Generierung von Trajektorien (Trajektorienplanung / Bahnplanung) sind z.B.

- **Gitterstrukturen** + Gitterverbindungen + Glättung
(Ursprung „Robotik“)
- Abschnittsweise Vorgabe von **Krümmungsverläufen**
- **Optimierungsrechnung** verschiedener möglicher Pfade,
z.B. durch Positionsvorgaben und Splines

Fahrzeugführungsregelung

Trajektorienplanung – Positions vorgabe

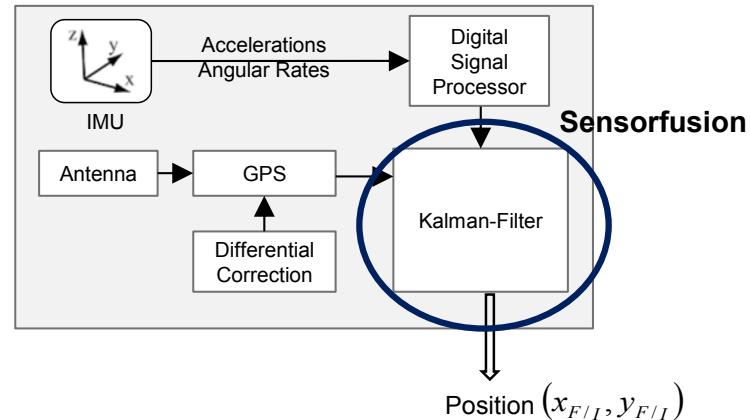
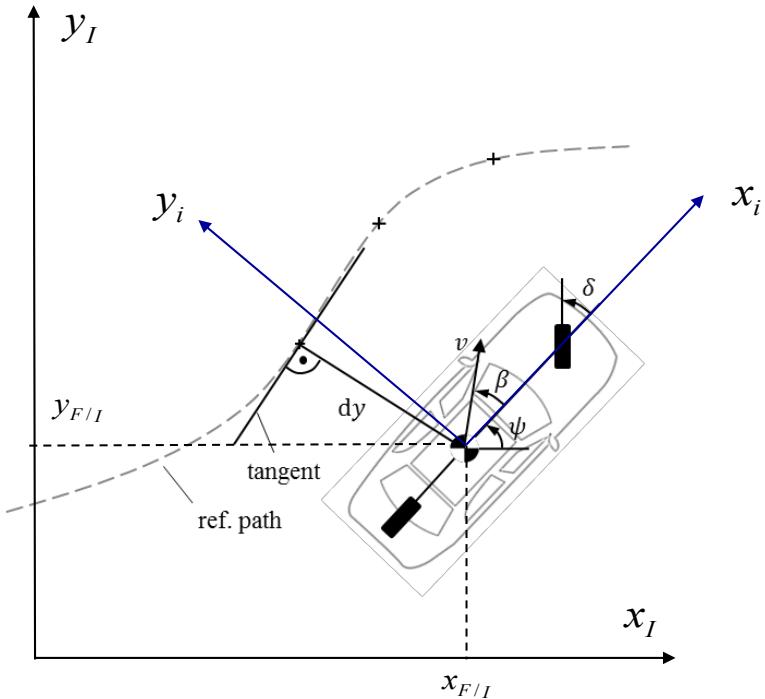
Beispiel



- Vorgabe von Datenpunkten** zur Beschreibung der Soll-Positionen (z.B. durch GPS-Messungen eines Fahrzeuges)
- Festlegung von Stützstellen** zur Spline-Bildung
- Spline-Bildung** für Kurvenverlauf zwischen den Stützstellen (Polynome 3. Grades)
- Kurswinkelberechnung** über erste Ableitung des Polynoms und $\frac{dp(x)}{dx} = \tan(\theta_{soll})$

Fahrzeugführungsregelung

Positionsbestimmung – DGPS + IMU



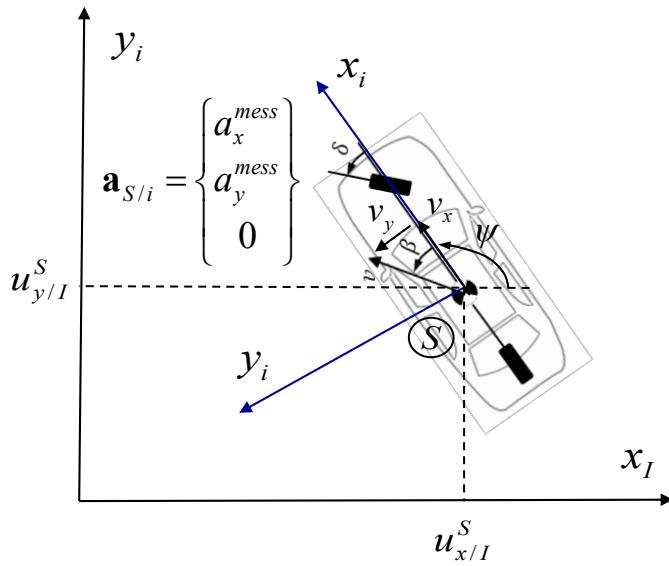
Differential Correction
Zusätzliches Signal durch
ortsnahe Referenzstation



Kalman-Filter (Sensorfusion)
„Ergänzt“ DGPS Signal (Taktrate,
Unterbrechung)

Fahrzeugführungsregelung

Positionsbestimmung – Position über IMU



$$v_{x/I}^s = - \int a_y^{\text{mess}} \sin(\psi(t)) dt = a_y^{\text{mess}} \cos(\psi(t)) / \dot{\psi} + v_{x0/I}$$

$$v_{y/I}^s = \int a_y^{\text{mess}} \cos(\psi(t)) dt = a_y^{\text{mess}} \sin(\psi(t)) / \dot{\psi} + v_{y0/I}$$

Von der IMU gemessen wird die translatorische Beschleunigung $\mathbf{a}_{S/i}$.

Für die Integration zur Positionsbestimmung muss die gemessene Beschleunigung zuerst ins Inertialsystem transformiert werden.

$$\underline{a}_{S/I} = \underline{A}_{II} \underline{a}_{S/i} \text{ mit}$$

$$\underline{A}_{II} = \begin{bmatrix} \cos\psi & \sin\psi & 0 \\ \sin\psi & \cos\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

für $a_x^{\text{mess}} = 0$ folgt

Fahrzeugführungsregelung

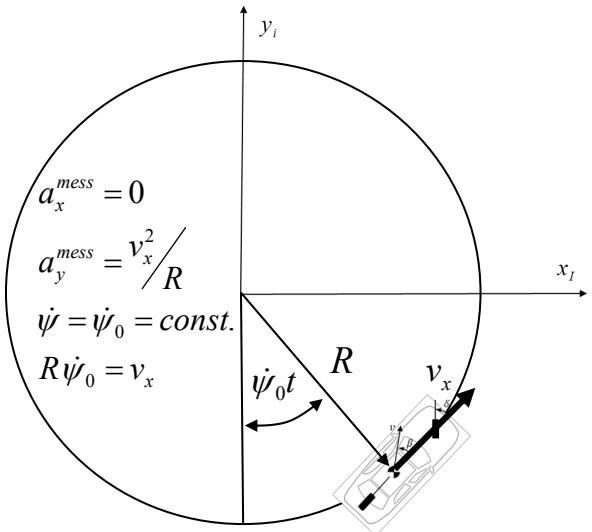
Positionsbestimmung – Position über IMU

Somit

$$u_{x/I}^s = \frac{a_y^{mess}}{\dot{\psi}^2} \sin(\dot{\psi}t) + v_{x0/I} t + u_{x0/I}$$

$$u_{y/I}^s = -\frac{a_y^{mess}}{\dot{\psi}^2} \cos(\dot{\psi}t) + v_{y0/I} t + u_{y0/I}$$

Beispiel: Konstante Kreisfahrt



Für die x- und y-Position im Intertialsystem folgt mit

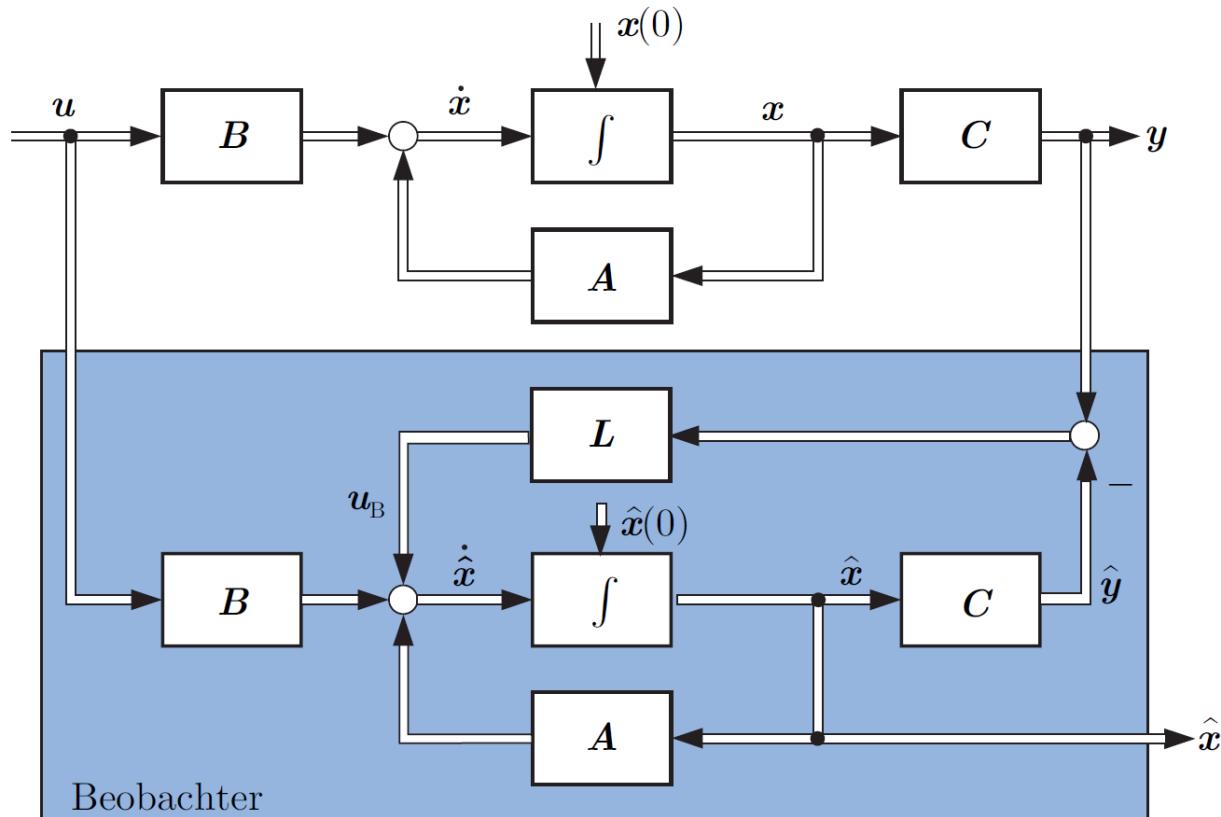
$$v_{x0/I} = v_{y0/I} = u_{x0/I} = u_{y0/I} = 0$$

$$u_{x/I} = \frac{v_x^2 R^2}{R v_x^2} \sin(\dot{\psi}_0 t) = R \sin(\dot{\psi}_0 t)$$

$$u_{y/I} = -R \cos(\dot{\psi}_0 t)$$

Fahrzeugführungsregelung

Positionsbestimmung – Sensorfusion



Fahrzeugführungsregelung

Positionsbestimmung – Sensorfusion

Es wird z.B. gesetzt $\hat{u} = \hat{u}_{yimu} = \hat{u}_{ymu}$ und $\hat{x} = \hat{u}_{yGPS}$. Dann

$$\hat{u}_{yGPS} = 0 \cdot u_{yGPS} + 1 \cdot \hat{u}_{yimu} \quad (\dot{\hat{x}} = Ax + Bu)$$

exakt, aber „verzweigt“

$$u_{yGPS} = 1 \cdot \hat{u}_{yGPS} \quad (y = Cx)$$

– driftet, unberichtigte ABs

Für den Beobachtungsfehler $e(t) = u_{yGPS} - \hat{u}_{yGPS}$ gilt

$$\dot{e}(t) = \overset{0}{\cancel{Ax + Bu}} - \underbrace{(Ax + Bu + L \overset{1}{\cancel{C(x - \hat{x})}})}_{\hat{u}_{yGPS}} = -L e(t)$$

Für den fusionierten Wert \hat{u}_{yGPS} gilt dann

$$e(t) = u_{yGPS} - \hat{u}_{yGPS} = \hat{u}_{yimu} - \hat{u}_{yGPS}$$
$$\hat{u}_{yGPS} = \overset{0}{\cancel{\hat{u}_{yimu}}} + L(\overset{1}{\cancel{u_{yGPS}}} - \hat{u}_{yGPS})$$

mit Drift,
falsche AB

korrekt Drift und falsche AB

Fahrzeugführungsregelung

Positionsbestimmung – Sensorfusion

Ermittlung der Beobachtermatrix L z.B. nach Luenberg

Die Lösung des homogenen DGL

$$\dot{e}(t) = -L e(t)$$

lautet

$$e(t) = \tilde{e}^{-Lt} e(t_0)^{-AB}$$

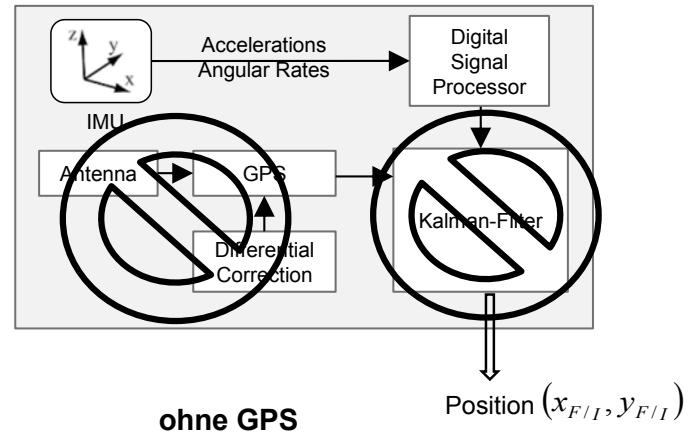
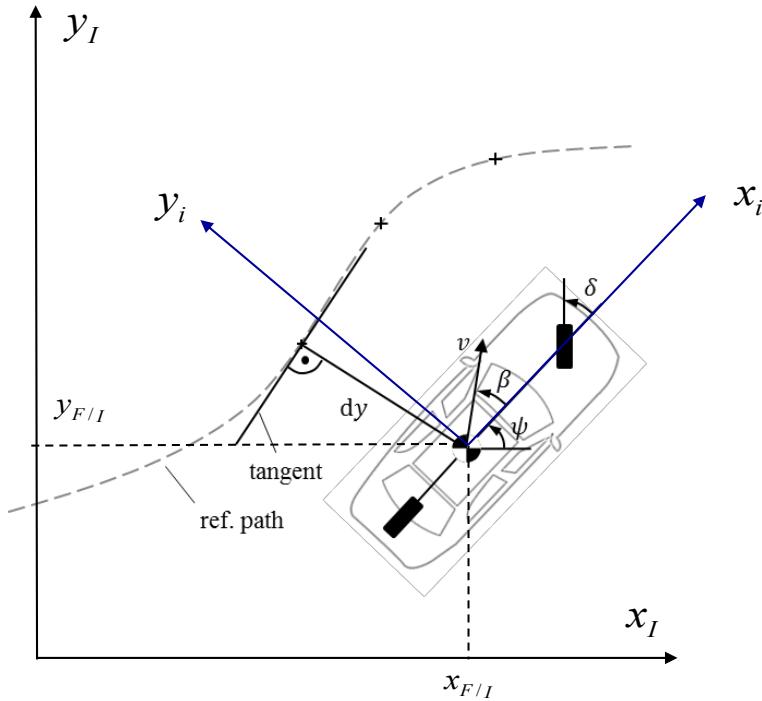
Der Betrag des Faktors $\|\tilde{e}^{-Lt}\|$ geht für beliebige Aben
 $e(t_0)$ gegen Null, wenn

$$\operatorname{Re}\{-L\} \leq 0$$

Eine mögliche Lösung wäre z.B. $L = 2$.

Fahrzeugführungsregelung

Positionsbestimmung – nur IMU



- Positionierung des Fahrzeuges an inertiale Referenzposition
- IMU misst Beschleunigungen und Gierraten.
- Integration der IMU Messwerte liefert Position bzgl. Referenzposition.
- Messrauschen der IMU führt zu Ungenauigkeiten bei der Positionsbestimmung (-> Drift).
- Ausgleich der Messfehler durch Zurücksetzen der Integratoren und Positionierung des Fahrzeuges an inertiale Referenzposition.

Fahrzeugführungsregelung

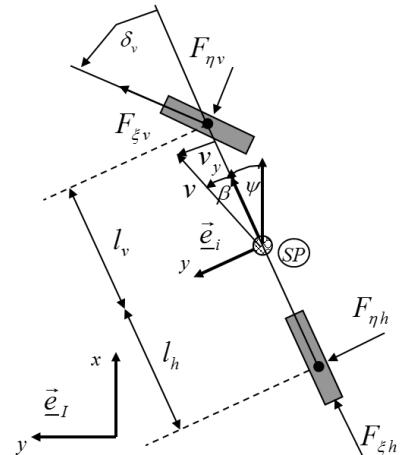
Schwimmwinkelschätzung – Fahrzeugmodell

Die lineare BDGL des Einspurmodells lautet (vgl. Fahrzeugregelung I)

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

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

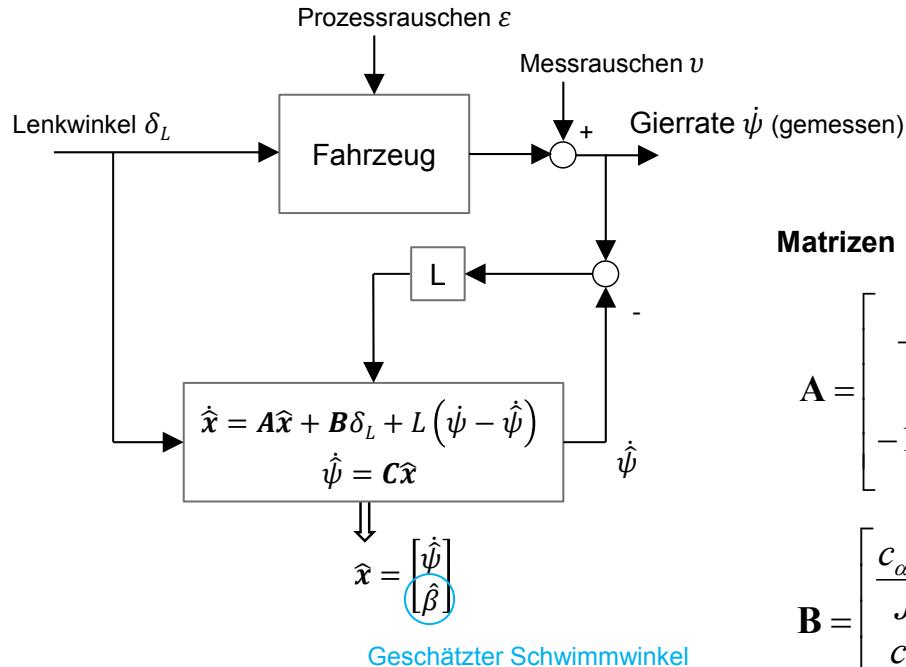
bzw.



$$\frac{d}{dt} \begin{Bmatrix} \dot{\psi} \\ \beta \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{c_{\alpha v}l_v^2 + c_{\alpha h}l_h^2}{J_z v} & \frac{c_{\alpha h}l_h - c_{\alpha v}l_v}{J_z} \\ -1 - \frac{c_{\alpha h}l_h - c_{\alpha v}l_v}{mv^2} & -\frac{c_{\alpha v} + c_{\alpha h}}{mv} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\psi} \\ \beta \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \frac{c_{\alpha v}l_v}{J_z} \\ \frac{c_{\alpha v}}{mv} \end{Bmatrix} \frac{\delta_L}{i_L}$$

Fahrzeugführungsregelung

Schwimmwinkelschätzung – Beobachter



Matrizen

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\frac{c_{av}l_v^2 + c_{ah}l_h^2}{J_z v} & \frac{c_{ah}l_h - c_{av}l_v}{J_z} \\ -\frac{c_{av}l_v}{mv^2} & -\frac{c_{av} + c_{ah}}{mv} \end{bmatrix}$$

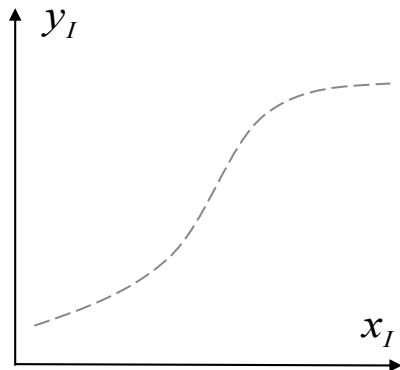
$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \frac{c_{av}l_v}{J_z} \\ \frac{c_{av}}{mv} \end{bmatrix} \quad \mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix}$$

Dann: $\Theta = \psi + \beta$

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Fahrzeugführungsregelung

Ermittlung der Krümmung



Fahrzeugregelung II

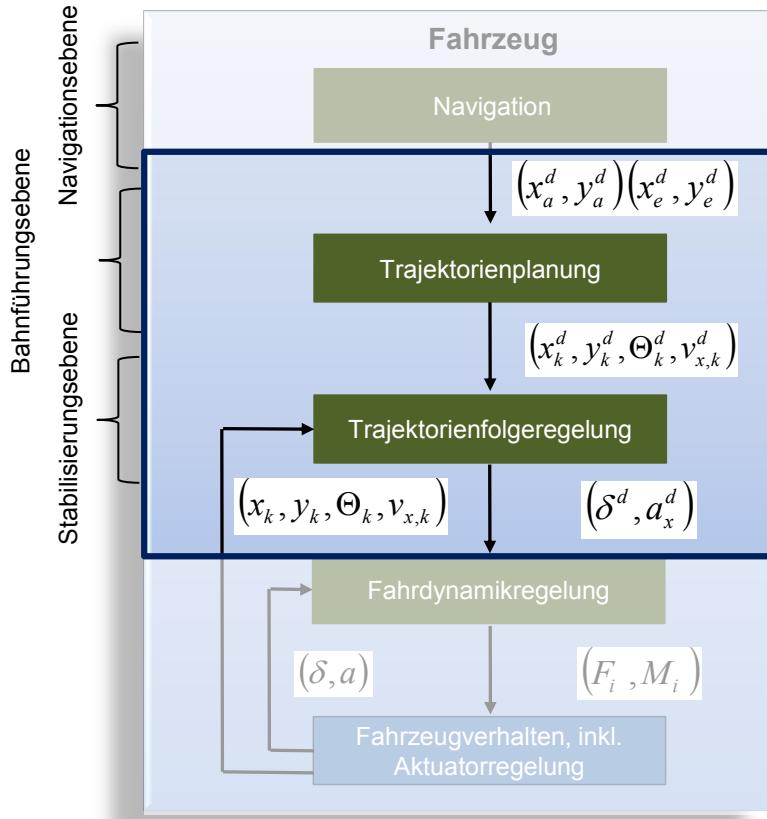
FAS und automatisiertes Fahren



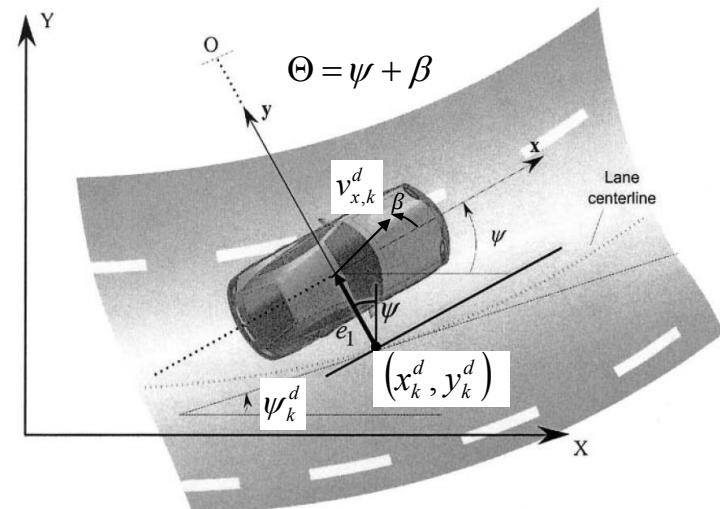
**Prof. Dr.-Ing. Steffen Müller
M. Sc. Andreas Hartmann
Fachgebiet Kraftfahrzeuge • Technische Universität Berlin**

Fahrzeugführungsregelung

Regelungsaufgabe



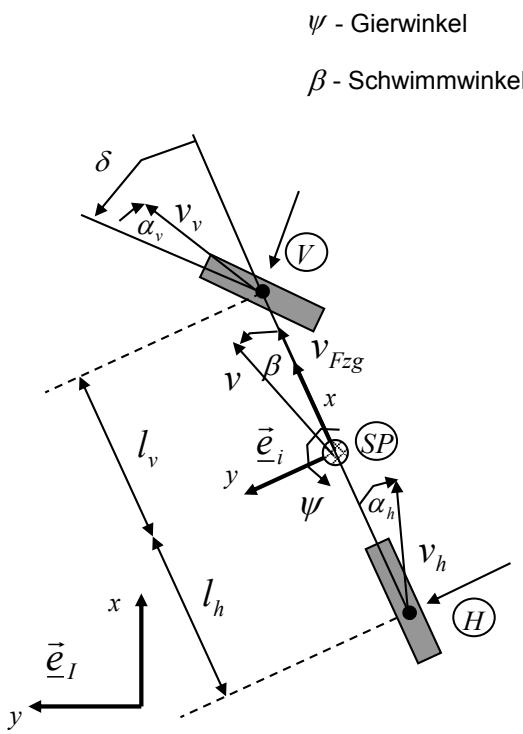
Fahrzeugführungsregelung



Quelle: Nach Rajamani: Vehicle Dynamics and Control.

Fahrzeugführungsregelung

Fahrzeugmodell – Lineares ESM für Bahnfehler



ψ - Gierwinkel

β - Schwimmwinkel

Die nichtlin. Bewegungsgleichung lautet zunächst

$$m \dot{v}_y + m v_x \dot{\psi} = F_{\eta v} \cos \delta_v + F_{\eta h} + F_{\xi v} \sin \delta$$

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

Mit

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

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

und v -Komponenten in x_i -Richtung

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

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

bzw. v -Komponenten in y_i -Richtung

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

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

$$v_y = v \sin \beta$$

$$\approx v \beta$$

Fahrzeugführungsregelung

Fahrzeugmodell – Lineares ESM für Bahnfehler

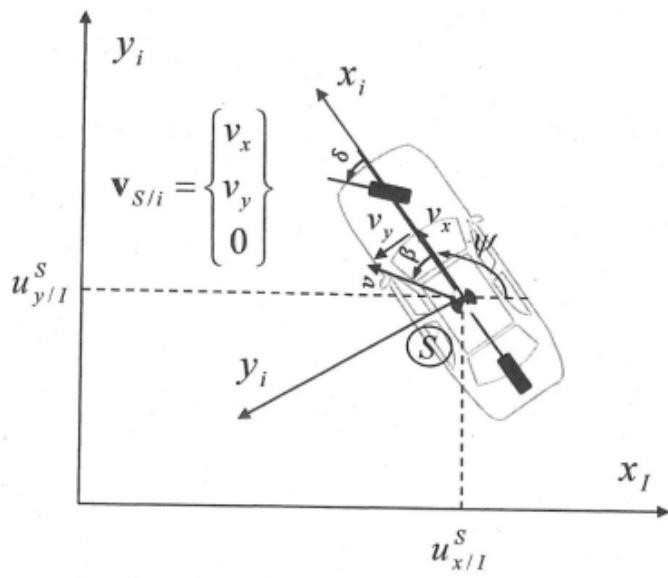
Die lineare Zustandsraumgleichung des Einspurmodells ausgedrückt in Querabweichung ($\nu_y = \dot{u}_y$) und Gierrate lautet dann

$$\frac{d}{dt} \begin{Bmatrix} u_y \\ \dot{u}_y \\ \psi \\ \dot{\psi} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{c_{av} + c_{ah}}{mv_x} & 0 & -\nu_x - \frac{c_{av}l_v - c_{ah}l_h}{mv_x} \\ 0 & mv_x & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{c_{av}l_v^2 + c_{ah}l_h^2}{J_z\nu_x} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_y \\ \dot{u}_y \\ \psi \\ \dot{\psi} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} 0 \\ \frac{c_{av}}{m} \\ 0 \\ \frac{c_{av}l_v}{J_z} \end{Bmatrix} \delta$$

Die behandelten Regelgrößen seien nun die Querabweichung $e_1(t)$ und Orientierungsabweichung $e_2(t)$.

Fahrzeugführungsregelung

Fahrzeugmodell – Lineares ESM für Bahnfehler



(a) Ermittlung der Dynamik von \$e_1(t)\$

Für die Querbeschleunigung gilt

$$a_{y/i} = \ddot{v}_y + \dot{\psi} v_x \quad \text{folgt aus } a_{y/i}^{rot} = R \dot{\psi}^2 \\ v_x = R \dot{\psi}$$

Die Soll-Beschleunigung sei (Def.)

$$a_{y/i}^{soll} = \dot{\psi}_{soll} v_x$$

D.h. Verstellen wie
Picard-Methode,
Berechnet, aber beliebig,
 $\dot{\psi} = 0$

Für die Dynamik von \$e_1(t)\$ gilt somit unter der Annahme \$\dot{\psi} = \text{const.}\$

$$\dot{e}_1(t) = \int_t (a_{y/i} - a_{y/i}^{soll}) dt = v_y - \dot{\psi} (v_x - v_{x/soll}) = v_y - \dot{\psi} e_2(t)$$

Fahrzeugführungsregelung

Fahrzeugmodell – Lineares ESM für Bahnfehler

(b) Ermittlung der Dynamik von $\dot{e}_2(t)$

Mit $e_2(t) = \varphi - \varphi_{\text{soll}}$ folgt für $\dot{e}_2(t)$

$$\dot{e}_2(t) = \ddot{\varphi} - \ddot{\varphi}_{\text{soll}}$$

Die BDGL des ESTL kann dann in $e_1(t)$ und $e_2(t)$ ausgedrückt werden. Zunächst schreiben wir

$$v_y = \dot{e}_1(t) - v_x \dot{e}_2(t)$$

$$v_y = \dot{e}_1(t) - v_x e_2(t)$$

$$\ddot{\varphi} = \ddot{e}_2(t) + \cancel{\ddot{\varphi}_{\text{soll}}}^0$$

$$\dot{\varphi} = \dot{e}_2(t) + \dot{\varphi}_{\text{soll}}$$

Fahrzeugführungsregelung

Fahrzeugmodell – Lineares ESM für Bahnfehler

Mit der IDGRL des ESM

$$\ddot{\vartheta}_y = a \dot{\vartheta}_y + b \dot{\varphi} + c \cdot \delta$$

$$\dot{\varphi} = d \dot{\vartheta}_y + f \dot{\varphi} + g \delta$$

ergibt sich

$$\ddot{e}_1(t) = (\dot{\vartheta}_x + b) \dot{e}_2(t) + a \ddot{\varphi}_1(t) - a \dot{\vartheta}_x e_2(t) + b \ddot{\varphi}_{\text{soh}} + c \delta$$

$$\ddot{e}_2(t) = d \dot{e}_1(t) - d \dot{\vartheta}_x e_2(t) + f \dot{e}_2(t) + f \ddot{\varphi}_{\text{soh}} + g \delta$$

Fahrzeugführungsregelung

Fahrzeugmodell – Lineares ESM für Bahnfehler

Mit

$$\dot{v}_y = av_y + b\dot{\psi} + c\delta$$

$$\ddot{\psi} = dv_y + f\dot{\psi} + g\delta$$

ergibt sich

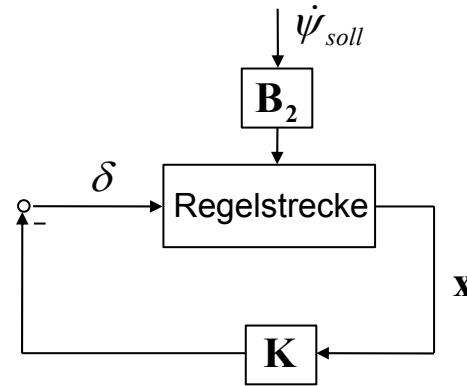
$$\frac{d}{dt} \begin{Bmatrix} e_1 \\ \dot{e}_1 \\ e_2 \\ \dot{e}_2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{c_{av} + c_{ah}}{mv_x} & \frac{c_{av} + c_{ah}}{m} & -\frac{c_{av}l_v - c_{ah}l_h}{mv_x} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -\frac{c_{av}l_v - c_{ah}l_h}{J_z v_x} & \frac{c_{av}l_v - c_{ah}l_h}{J_z} & -\frac{c_{av}l_v^2 + c_{ah}l_h^2}{J_z v_x} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} e_1 \\ \dot{e}_1 \\ e_2 \\ \dot{e}_2 \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} 0 \\ \frac{c_{av}}{m} \\ 0 \\ \frac{c_{av}l_v}{J_z} \end{Bmatrix} \delta + \begin{Bmatrix} 0 \\ -v_x - \frac{c_{av}l_v - c_{ah}l_h}{mv_x} \\ 0 \\ -\frac{c_{av}l_v^2 + c_{ah}l_h^2}{J_z v_x} \end{Bmatrix} \dot{\psi}_{soll}$$

$$\overset{\circ}{x}(t) = \underline{A} \underline{x}(t) + \underline{B}_1 \underline{s} + \underline{B}_2 \overset{\circ}{\psi}_{soll}$$

Zustandsgleichung der Regelstrecke

Fahrzeugführungsregelung

Reglungsaufgabe - Zustandsregelung



Regelgesetz

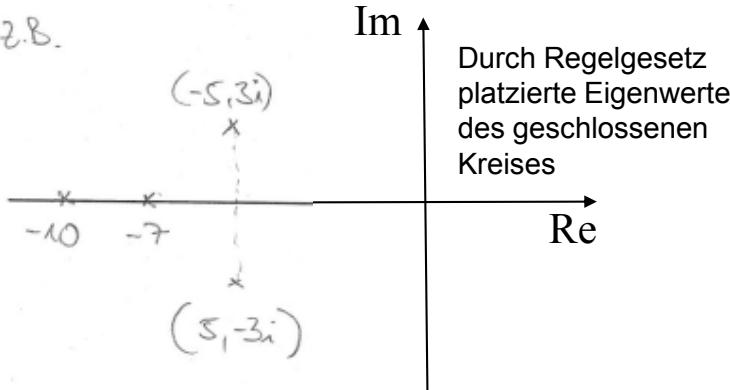
$$\delta(t) = -\mathbf{K}x(t) = -k_1 e_1 - k_2 e_2 - k_3 e_3 - k_4 e_4$$

Einführung liefert

$$\dot{x}(t) = (\mathbf{A} - \mathbf{B}_1 \mathbf{K})x(t) + \mathbf{B}_2 \dot{\psi}_{soll}$$

Reglerentwurf durch „Polplatzierung“

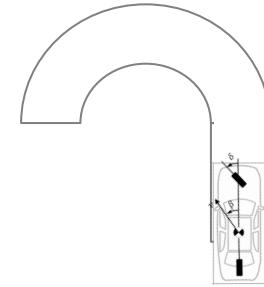
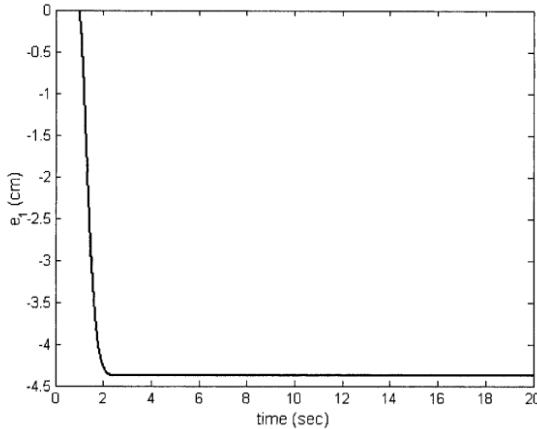
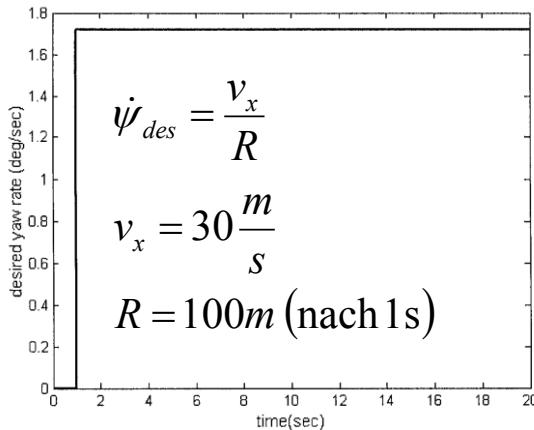
z.B.



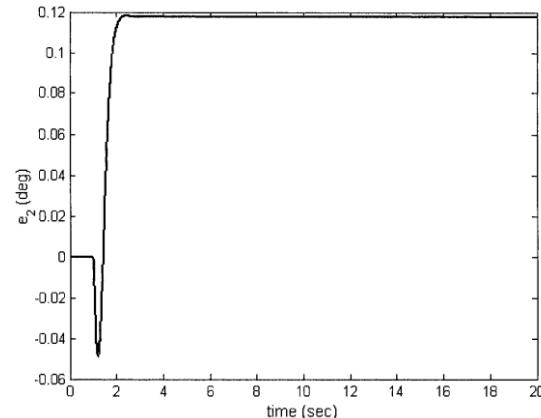
Da die Regelstrecke $(\mathbf{A}, \mathbf{B}_1)$ vollständig steuerbar ist, können die Eigenwerte von $(\mathbf{A} - \mathbf{B}_1 \mathbf{K})$ beliebig platziert werden.

Fahrzeugführungsregelung

Reglungsaufgabe - Zustandsregelung



Vorgabe der Eigenwerte führt zu Reglermatrix \mathbf{K} .



Damit ergibt sich aber bleibende Regelabweichung

Fahrzeugführungsregelung

Sollwertfolge und Störunterdrückung

Die Forderung nach Sollwertfolge und Störunterdrückung bedeutet, dass $\lim_{t \rightarrow \infty} \underline{x}(t) = 0$.

Mit

$$\dot{\underline{x}}(t) = A \underline{x}(t) + B_1 \underline{s}(t) + B_2 \dot{q}_{\text{soll}}$$

$$\underline{s}(t) = -K \underline{x}(t)$$

folgt im stationären Zustand

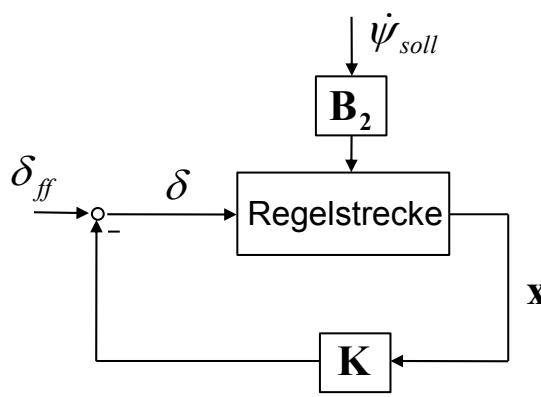
$$0 = (A - B_1 K) \underline{x}(t) + B_2 \dot{q}_{\text{soll}} \quad \text{bzw.}$$

$$\underline{x}_{ss}(t) = -(A - B_1 K)^{-1} B_2 \dot{q}_{\text{soll}}$$

Störung wird im Allgemeinen nicht unterdrückt \Rightarrow Sollwertfolge $\underline{x}(t) = 0$ wird auch für $t \rightarrow \infty$ nicht erreicht.

Fahrzeugführungsregelung

Regelungsaufgabe – mit Vorsteuerung



Mit Vorsteuerung δ_{ff}

$$\delta(t) = -k_x x(t) + \delta_{ff}$$

Sogt im stationären Zustand

$$\underline{x} = (\underline{A} - \underline{B}_1 \underline{k}) \underline{x}(t) + \underline{B}_1 \underline{\delta}_{ff} + \underline{B}_2 \dot{\psi}_{soll} \quad \text{bzw.}$$

$$x_{ss}(t) = -(A - B_1 k)^{-1} (B_1 \delta_{ff} + B_2 \dot{\psi}_{soll})$$

Symbolische Auswertung (z.B. mit Matlab) liefert

$$\begin{cases} e_{1,ss} \\ \dot{e}_{1,ss} \\ e_{2,ss} \\ \dot{e}_{2,ss} \end{cases} = \begin{cases} \frac{\delta_{ff}}{k_1} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{cases} + \left\{ \begin{array}{c} -\frac{1}{k_1} \frac{mv_x^2}{Rl} \left[\frac{l_h}{c_{av}} - \frac{l_v}{c_{ah}} + \frac{l_v}{c_{ah}} k_3 \right] - \frac{1}{k_1 R} [l - l_h k_3] \\ 0 \\ \frac{1}{R c_{ah} l} [l_v m v_x^2 - c_{ah} l l_h] \\ 0 \end{array} \right\}$$

Stationär Bereich
für $\dot{\psi}_{soll} = \frac{v_x}{R}$
 $\dot{\beta} = 0$

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Fahrzeugführungsregelung

Stabilität der Regelstrecke

Die charakteristische Gleichung lautet $\det(\lambda I - A) = 0$, d.h.

$$\det \begin{bmatrix} \lambda & -1 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda + \frac{c_{\alpha v} + c_{\alpha h}}{mv_x} & -\frac{c_{\alpha v} + c_{\alpha h}}{m} & \frac{c_{\alpha v} l_v - c_{\alpha h} l_h}{mv_x} \\ 0 & 0 & \lambda & -1 \\ 0 & \frac{c_{\alpha v} l_v - c_{\alpha h} l_h}{J_z v_x} & -\frac{c_{\alpha v} l_v - c_{\alpha h} l_h}{J_z} & \lambda + \frac{c_{\alpha v} l_v^2 + c_{\alpha h} l_h^2}{J_z v_x} \end{bmatrix} = 0$$

Fahrzeugführungsregelung

Steuerbarkeit der Regelstrecke

Ein System

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}\mathbf{u}(t)$$

$$\mathbf{x}(0) = \mathbf{x}_0$$

heißt **vollständig steuerbar**, wenn es in endlicher Zeit t_e von jedem **beliebigen Anfangszustand** \mathbf{x}_0 durch eine geeignet gewählte Eingangsgröße $\mathbf{u}_{[0,t_e]}$ in einen **beliebig vorgegebenen Endzustand** $\mathbf{x}(t_e)$ überführt werden kann.

Fahrzeugführungsregelung

Steuerbarkeit der Regelstrecke

Satz:

Das System (\mathbf{A}, \mathbf{B}) ist genau dann vollständig steuerbar, wenn die Steuerbarkeitsmatrix \mathbf{S}_S den Rang n hat:

Rang $\mathbf{S}_S = n$ mit

$$\mathbf{S}_S = [\mathbf{B} \quad \mathbf{AB} \quad \mathbf{A}^2\mathbf{B} \dots \mathbf{A}^{n-1}\mathbf{B}]$$

Hierbei

$$\left\{ \dot{\mathbf{x}}(t) \right\} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} \end{bmatrix} \left\{ \mathbf{x}(t) \right\} + \begin{bmatrix} \mathbf{B} \end{bmatrix} \left\{ \mathbf{u}(t) \right\}$$

Fahrzeugführungsregelung

Regelungsaufgabe – mit Vorsteuerung

Hieraus folgt für $e_{l,ss} = 0$ mit $l = l_v + l_h$ und $v_{ch}^2 = \frac{c_{av} c_{ah} l^2}{m(c_{ah} l_h - c_{av} l_v)}$

Fahrzeugführungsregelung

Regelungsaufgabe – mit Vorsteuerung

Ist $e_{2,ss} \neq 0$ ein Problem bzw. wie kann $e_{2,ss}$ interpretiert werden?

