Fahrzeug - Querregelung

- Dortmund 25.06.2010 -

Dr.-Ing. Xiuxun Yin

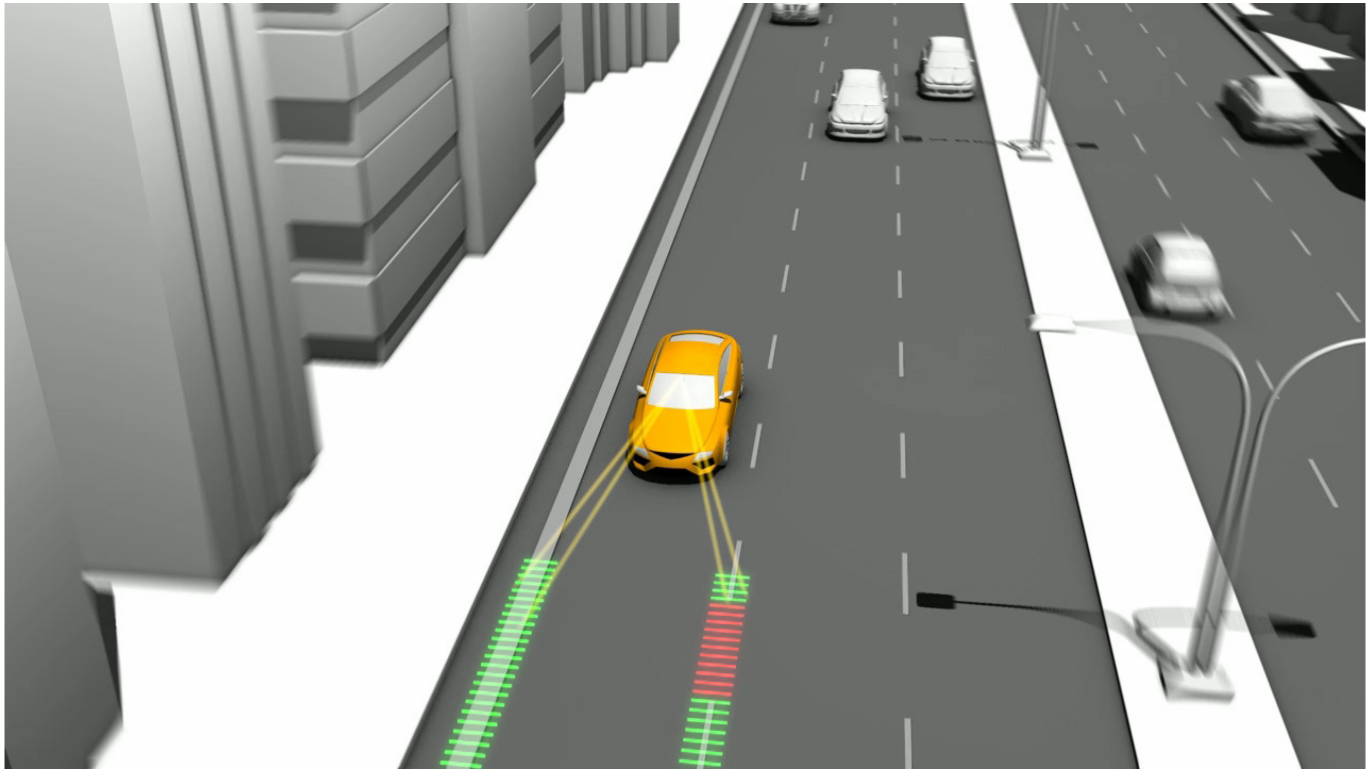
Übersicht

- Einführung
- Fahrdynamik
- Querregelung
- Fahrversuch
- Zusammenfassung

Einführung
Fahrzeugquerführung

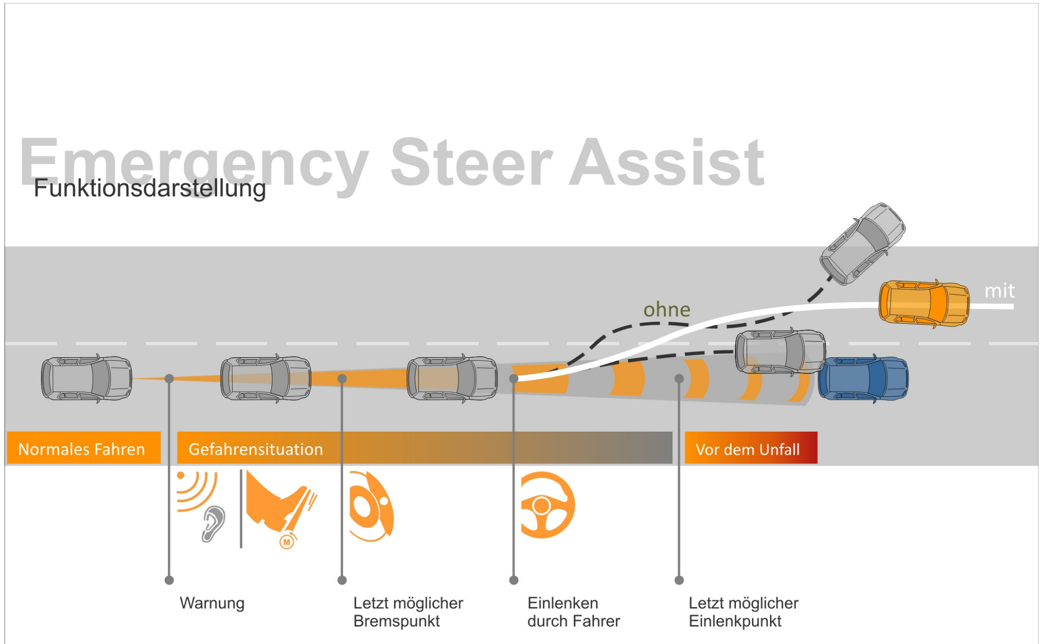
Brauchen wir eine Fahrzeugquerführung?

Beispiel 1:
- Lane Centering Control
- Lane Keeping Support



Einführung
Fahrzeugquerführung

Beispiel 2: Ausweichassistent (ESA)



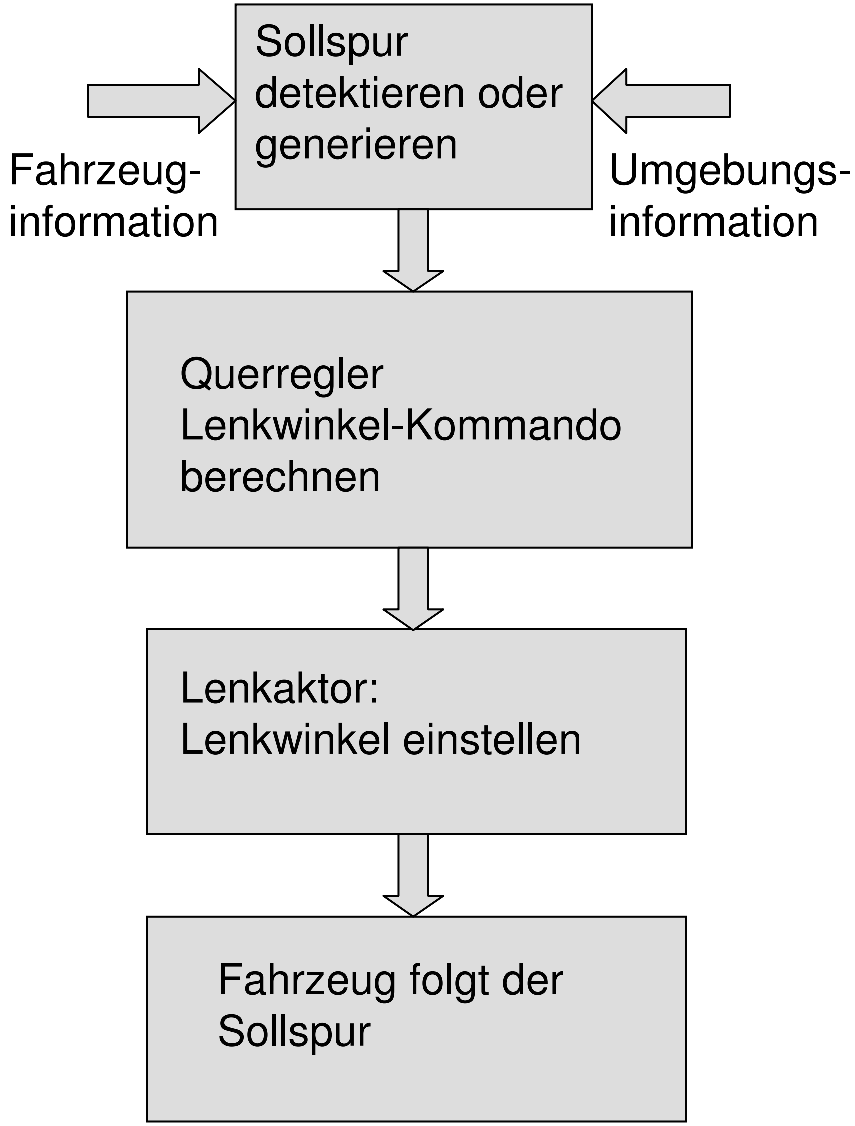
Einführung
Fahrzeugquerführung

Beispiel 3: Baustellenassistent

Einführung
Aufgabe der Querführung

Querführung ist eine durch das Fahrerassistent System ausgeführte Lenkaktivität, um das Fahrzeug so zu führen, dass es dem Sollspurverlauf mit erlaubter Fehlertoleranz folgt.

- Vermeidet Unfälle
- Verbessert Fahrsicherheit
- Erhöht Fahrkomfort
- Ermöglicht (Teil-) Autonomesfahren



Übersicht

- Einführung
- Fahrdynamik
- Querregelung
- Fahrversuch
- Zusammenfassung

Fahrdynamik: Einspurmodell

- Einspurmodell
  Beschreibt wesentliche Fahrzeugdynamik

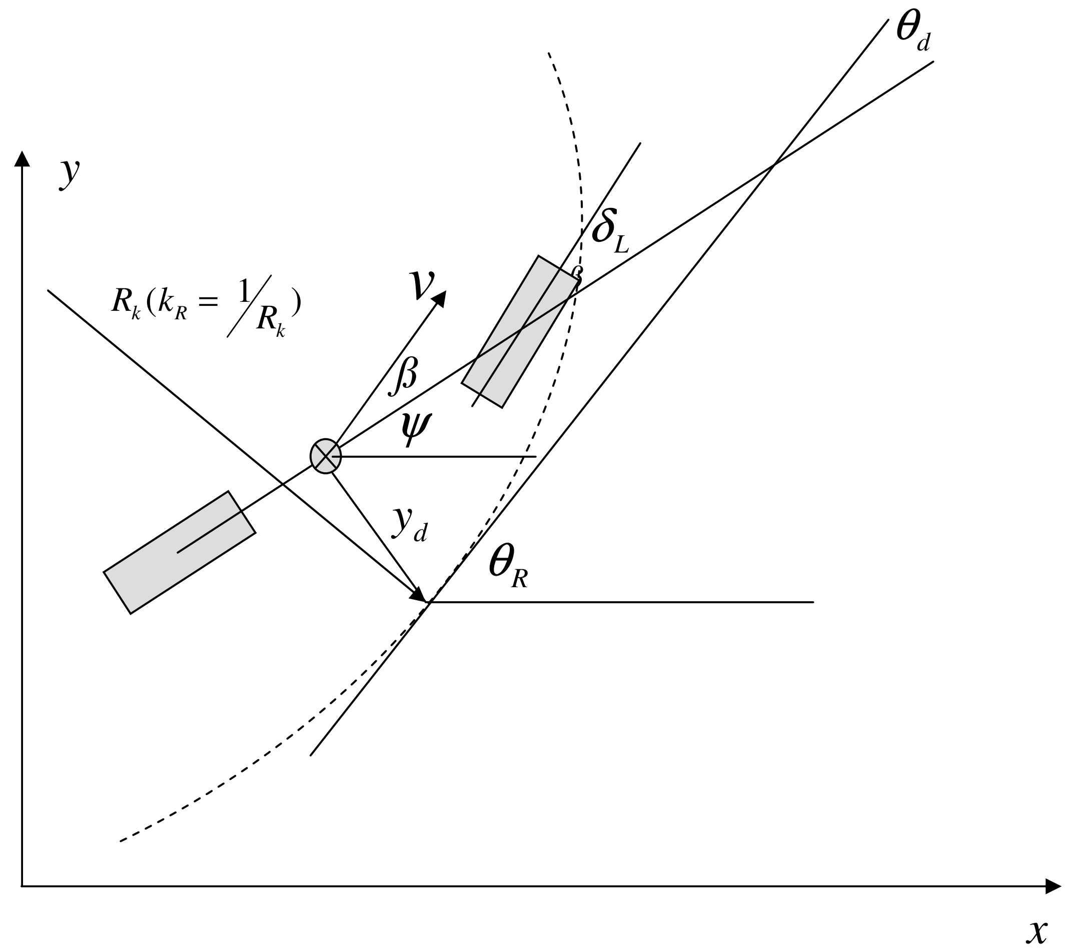
$$\dot{\beta} = \frac{a_{11}}{v}\beta + (\frac{a_{12}}{v^2} - 1)\dot{\psi} + \frac{b_1}{v}\delta_L$$

$$\ddot{\psi} = a_{21}\beta + \frac{a_{22}}{v}\dot{\psi} + b_2\delta_L$$

- Querabweichung- und Kurswinkelfehlerdynamik

$$\dot{y}_d = v\theta_d + v\beta$$

$$\dot{\theta}_d = vk_R - \dot{\psi}$$

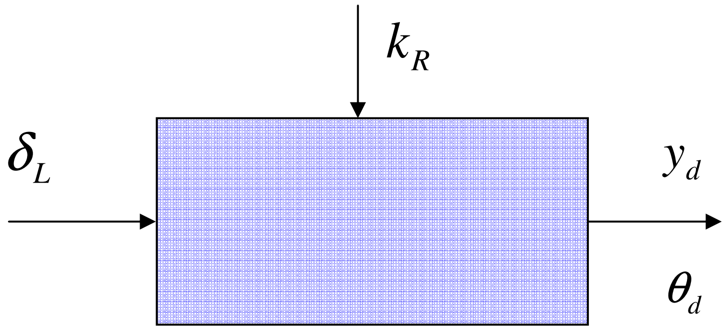


Fahrdynamikmodell

- Gesamte Fahrdynamik

$$\begin{bmatrix} \dot{\beta} \\ \ddot{\psi} \\ \dot{\theta}_d \\ \dot{y}_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & (a_{12}/v^2 - 1) & 0 & 0 \\ a_{21} & a_{22}/v & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ v & 0 & v & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta \\ \dot{\psi} \\ \theta_d \\ y_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_1/v & 0 \\ b_2 & 0 \\ 0 & v \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_L \\ k_R \end{bmatrix}$$

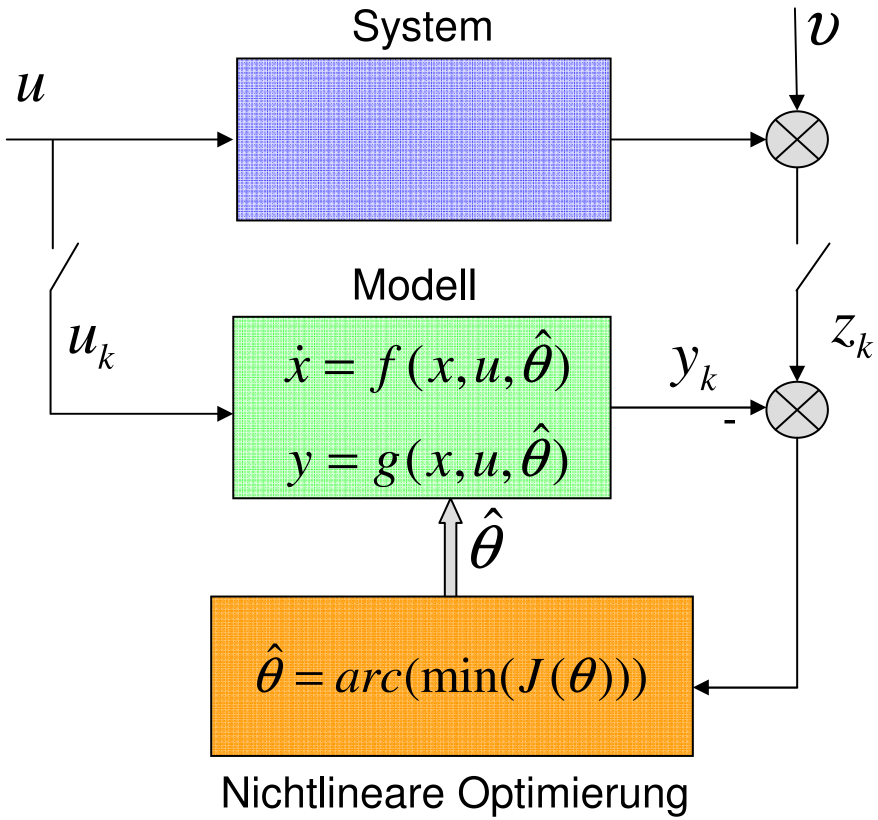
- Eingangsgröße: Lenkwinkel
- Ausgangsgrößen: Querabweichung und Kurswinkelfehler
- Störgröße: Sollspurkrümmung



Fahrdynamik: Identifikation

- Experimentelle Bestimmung des dynamischen Modells eines Systems.
- Das identifizierte Modell soll das Ein-/Ausgangsverhalten hinreichend genau darstellen.
- Die Modellstruktur ist bekannt oder vorgegeben.
- Identifikation der Modellparameter durch nicht-lineare Optimierung der Zielfunktion

$$J(\theta) = \frac{1}{L}\sum_{0}^{L}[z(t_k) - y(t_k)]R^{-1}[z(t_k) - y(t_k)]$$



Identifikation
Modell und Parameter

Fahrzeugmodell:

$$\dot{x} = v\cos(\beta + \psi)$$
$$\dot{y} = v\sin(\beta + \psi)$$
$$\psi = \int \dot{\psi} dt$$
$$\dot{\beta} = \frac{a_{11}}{v}\beta + (\frac{a_{12}}{v^2} - 1)\dot{\psi} + \frac{b_1}{v}\delta_L$$
$$\ddot{\psi} = a_{21}\beta + \frac{a_{22}}{v}\dot{\psi} + b_2\delta_L$$

Zu identifizierende Parameter:

$a_{11}, \quad a_{12}, \quad a_{21}, \quad a_{22}, \quad b_1, \quad b_2$

Gemessen werden:

x : Längengrad (DGPS mit Basisstation)

y : Breitengrad

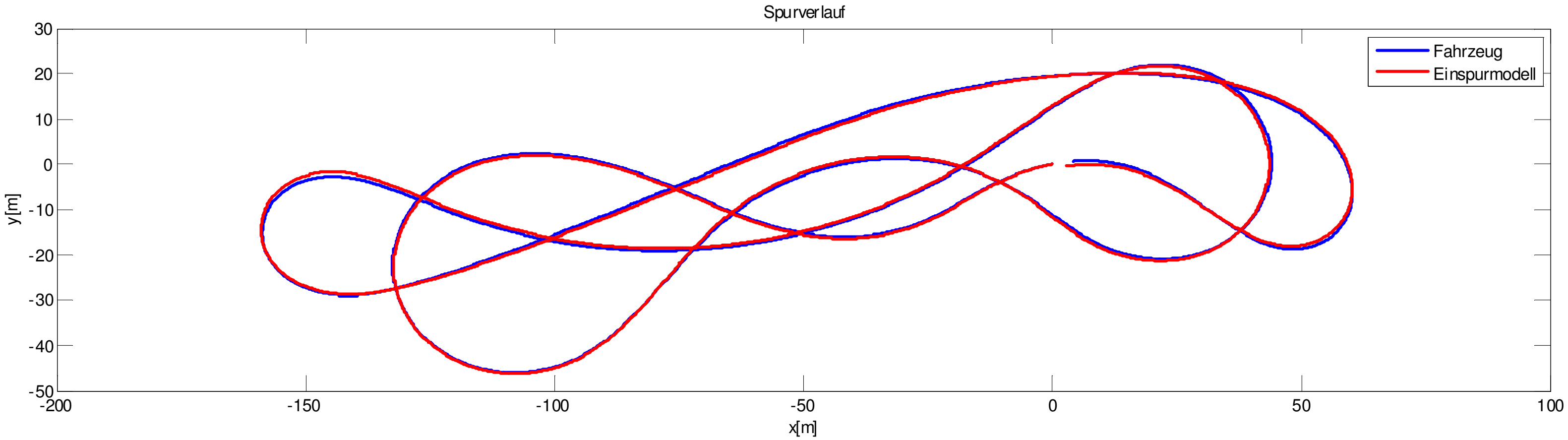
θ_v : Kurswinkel

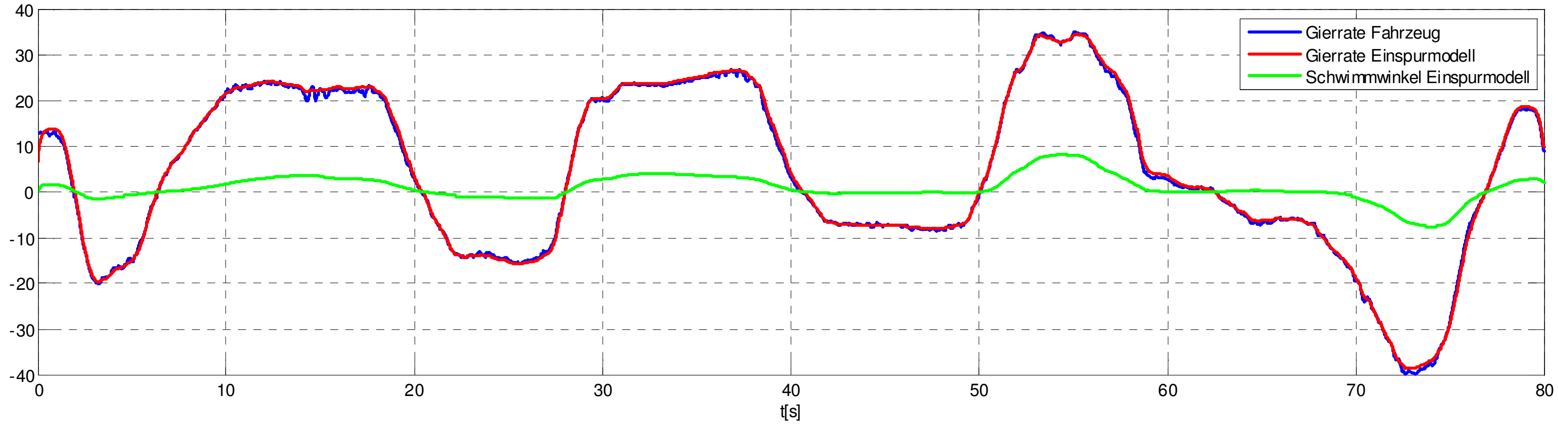
$\dot{\psi}$: Gierrate (ESP Sensor)

v : Längsgeschwindigkeit (Raddrehzahl + DGPS)

δ_L : Lenkwinkel (ESP Lenkwinkelsensor)

Identifikation
Vergleich Messung und identifiziertes Modell





Fahrdynamik
Einfluss des Schwimmwinkels

- Modell mit Schwimmwinkel

$$\begin{bmatrix} \dot{\beta} \\ \ddot{\psi} \\ \dot{\theta}_d \\ \dot{y}_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & (a_{12}/v^2 - 1) & 0 & 0 \\ a_{21} & a_{22}/v & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ v & 0 & v & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta \\ \dot{\psi} \\ \theta_d \\ y_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_1/v & 0 \\ b_2 & 0 \\ 0 & v \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_L \\ k_R \end{bmatrix}$$

- Modell ohne Schwimmwinkel

$$\begin{bmatrix} \ddot{\psi} \\ \dot{\theta}_d \\ \dot{y}_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{22}/v & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & v & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\psi} \\ \theta_d \\ y_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_2 & 0 \\ 0 & v \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_L \\ k_R \end{bmatrix}$$

Fahrdynamik
Lenk-Aktordynamik

Vereinfachte Fahrdynamik

$$\begin{bmatrix} \ddot{\psi} \\ \dot{\theta}_d \\ \dot{y}_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{22}/v & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & v & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\psi} \\ \theta_d \\ y_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_2 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \delta_L$$

Lenk-Aktor mit Lenkwinkelregler

$$\dot{\delta}_L = a_w \delta_L + b_w \delta_c$$

Fahrdynamik
Modell für die Querregelung

Besonderheiten des Models

- LPV:Lineares Parameter-Veränderliches System (**L**inear **P**arameter-**V**arying System)
- Zeitinvariantes lineares System bei v = Konstante.
- Entwurfsmethode linearer Systeme könnte bei sich langsam ändernder Geschwindigkeit gültig sein.

$$\begin{bmatrix} \dot{\delta}_L \\ \ddot{\psi} \\ \dot{\theta}_d \\ \dot{y}_d \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} a_w & 0 & 0 & 0 \\ b_2 & a_{22}/v & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & v & 0 \end{bmatrix}}_{A(v)} \underbrace{\begin{bmatrix} \delta_L \\ \dot{\psi} \\ \theta_d \\ y_d \end{bmatrix}}_{x} + \underbrace{\begin{bmatrix} b_w \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}}_{B} \delta_c$$

$$\dot{x} = A(v) \cdot x + B \cdot u$$

Übersicht

- Einführung
- Fahrdynamik
- Querregelung
- Fahrversuch
- Zusammenfassung

Querregelung

- LQR (Lineare Quadratisch Optimale Regelung)
- LQR mit Luenberger-Beobachter als Störgrößenkompensator
- Gain Scheduling: Geschwindigkeitsabhängige Regler und Beobachter

LQR für geraden Spurverlauf

Lineares quadratisches Optimierungsproblem für das lineare System

$$\dot{x}(t) \;=\; Ax(t) \;+\; Bu(t)$$

durch eine Zustandsrückführung

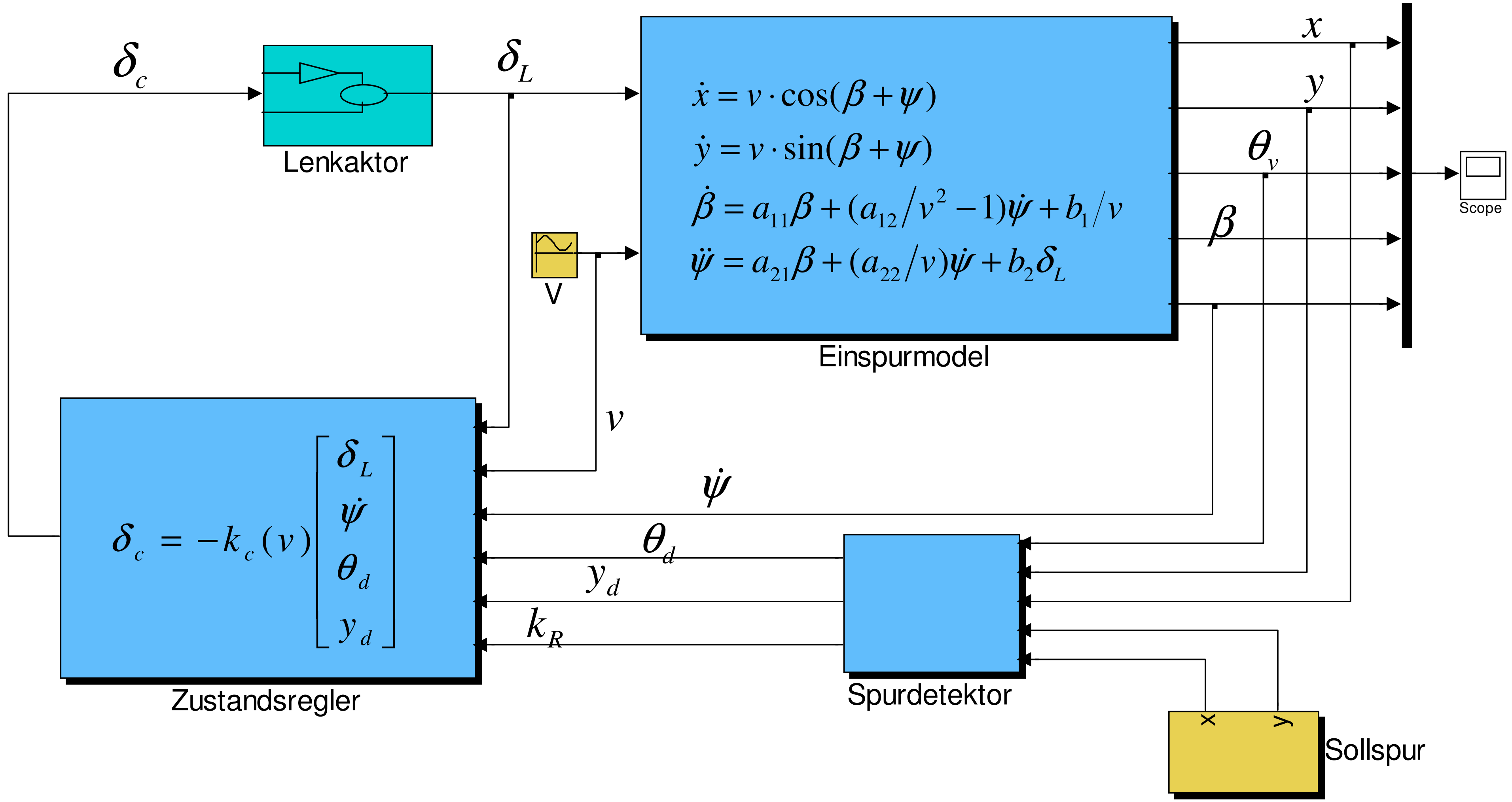
$$u(t) \;=\; -k_c x(t) \;=\; -R^{-1}B^T P x(t)$$

soll das Gütekriterium minimiert werden

$$J \;=\; \int_0^\infty [x^T(t)Qx(t) \;+\; u^T(t)Ru(t)]dt$$

Lösung mit Matlab: $k_c \;=\; lqr(A,B,Q,R)$

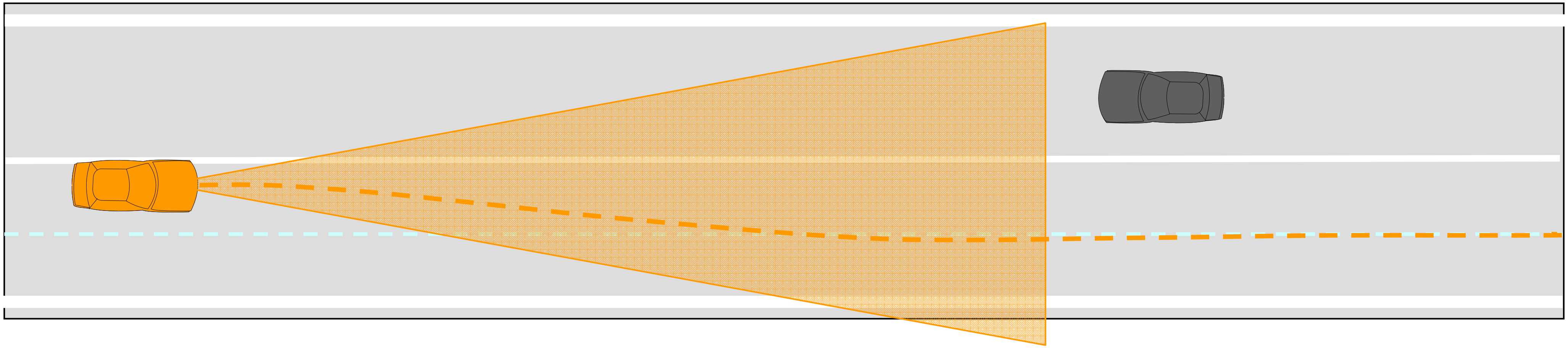
Struktur der Zustandsrückführung



LQR
Simulation für geraden Sollspurverlauf

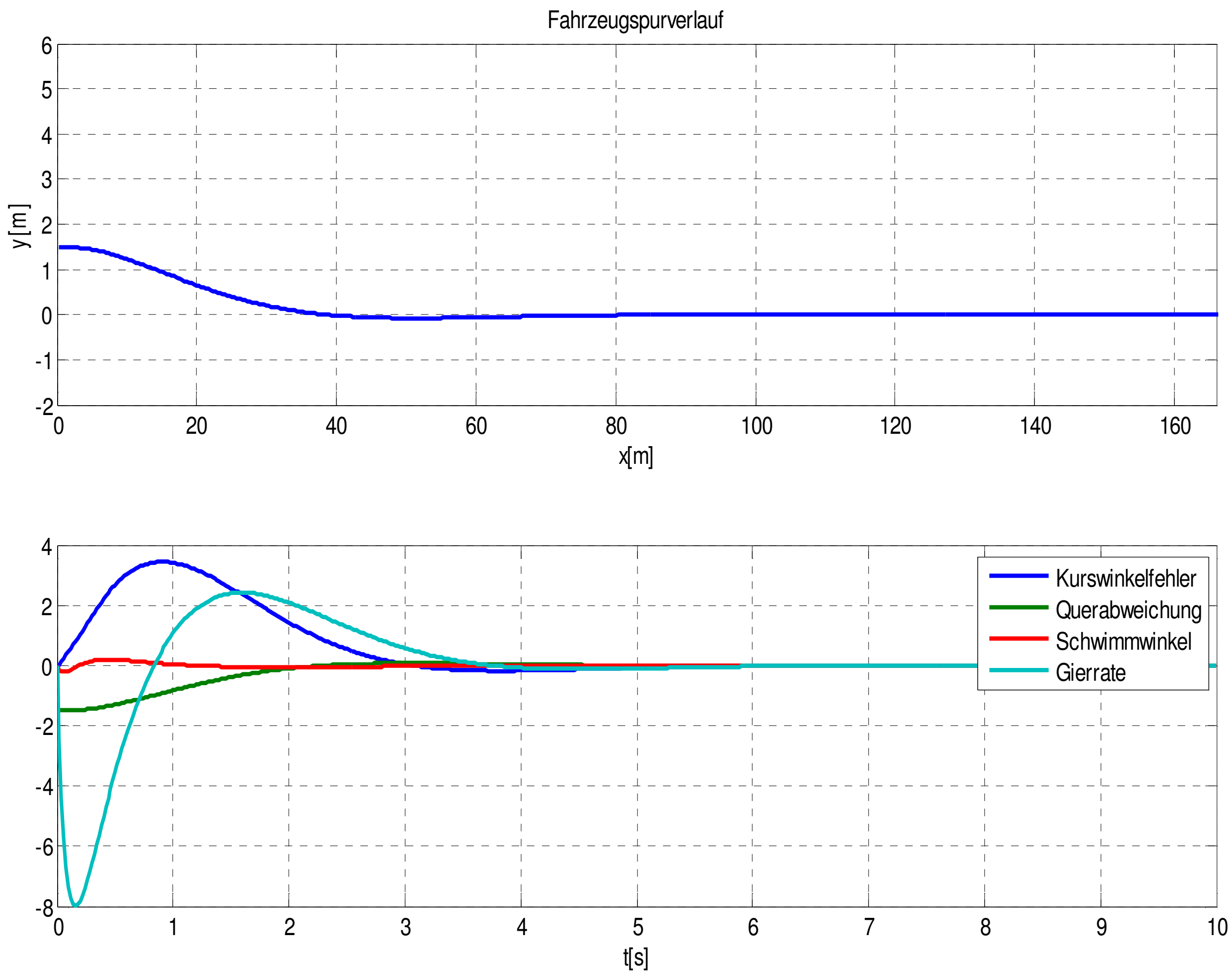
Solllenkwinkel: $\delta_c = -k_c \begin{bmatrix} \delta_L \\ \dot{\psi} \\ \theta_d \\ y_d \end{bmatrix}$, Anfangszustand: $\begin{bmatrix} x(0) \\ y(0) \\ \beta(0) \\ \psi(0) \\ \dot{\psi}(0) \\ \delta_L(0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1.5 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$

Geschwindigkeit: $v = 16.6667\,[\mathrm{m/s}]\ \ (60\ \mathrm{kmh})$



Simulation für geraden Sollspurverlauf

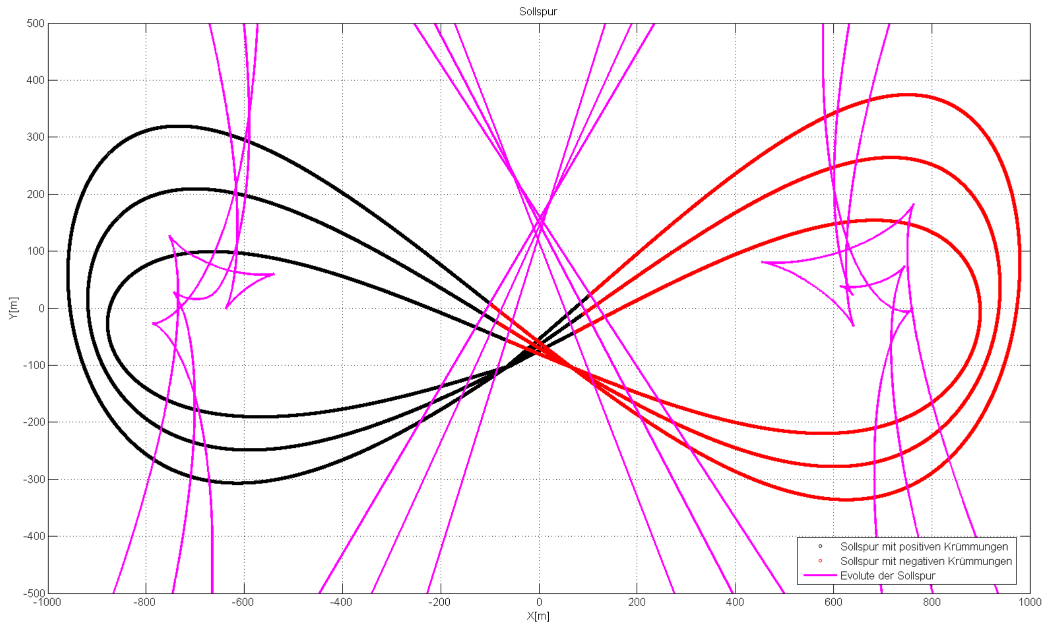
- Keine bleibende Querabweichung und Kurswinkelfehler
- Gute dynamische Ausregelung der Querabweichung



Sollspurverlauf mit sich ändernder Krümmung

Sollspur:

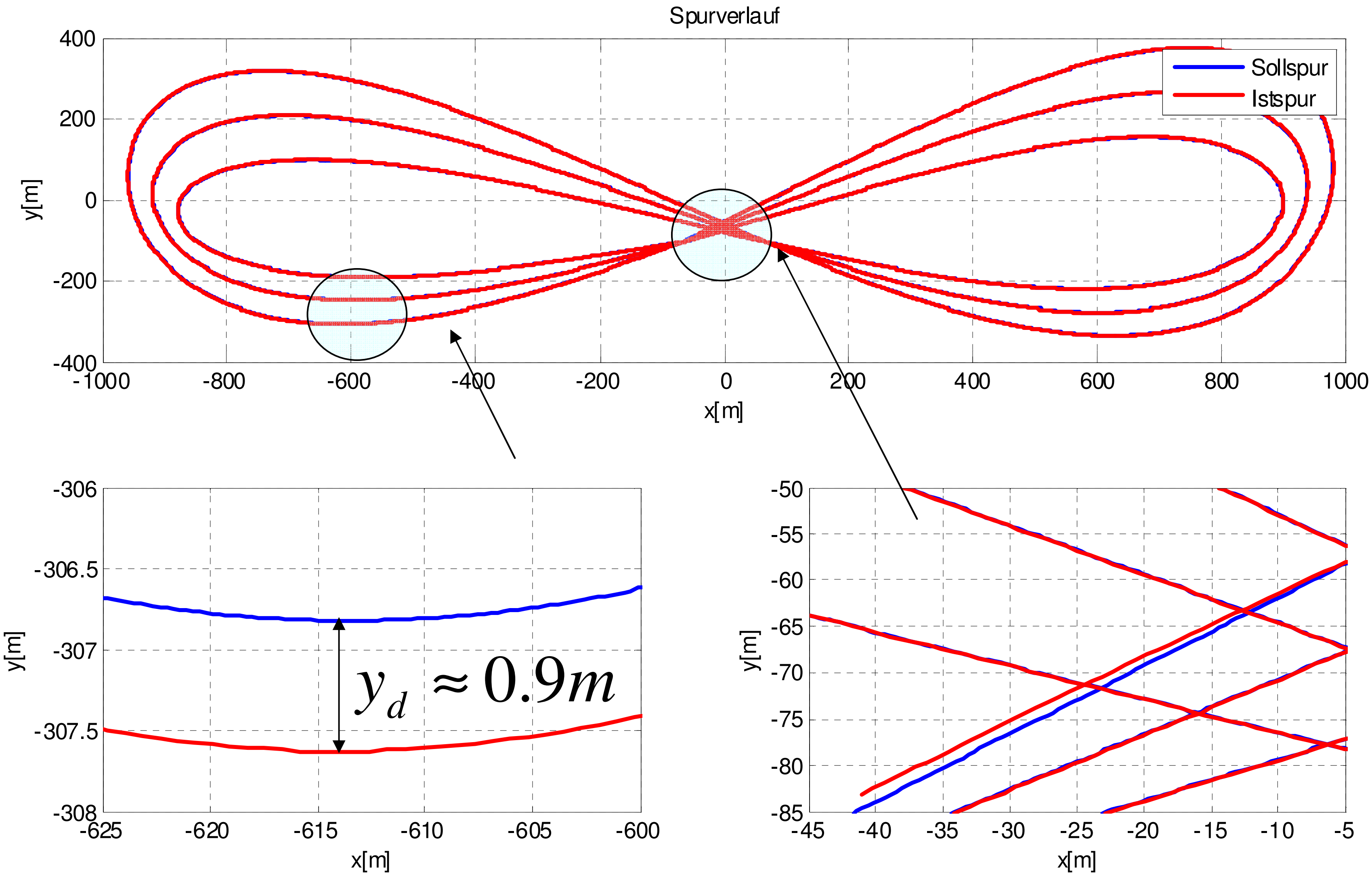
- Krümmung variieren kontinuierlich
- Größte Krümmung 0.0109, entspricht Krümmungsradius 91.8m
- Positive und negative Krümmung (Links- und Rechtskurve)



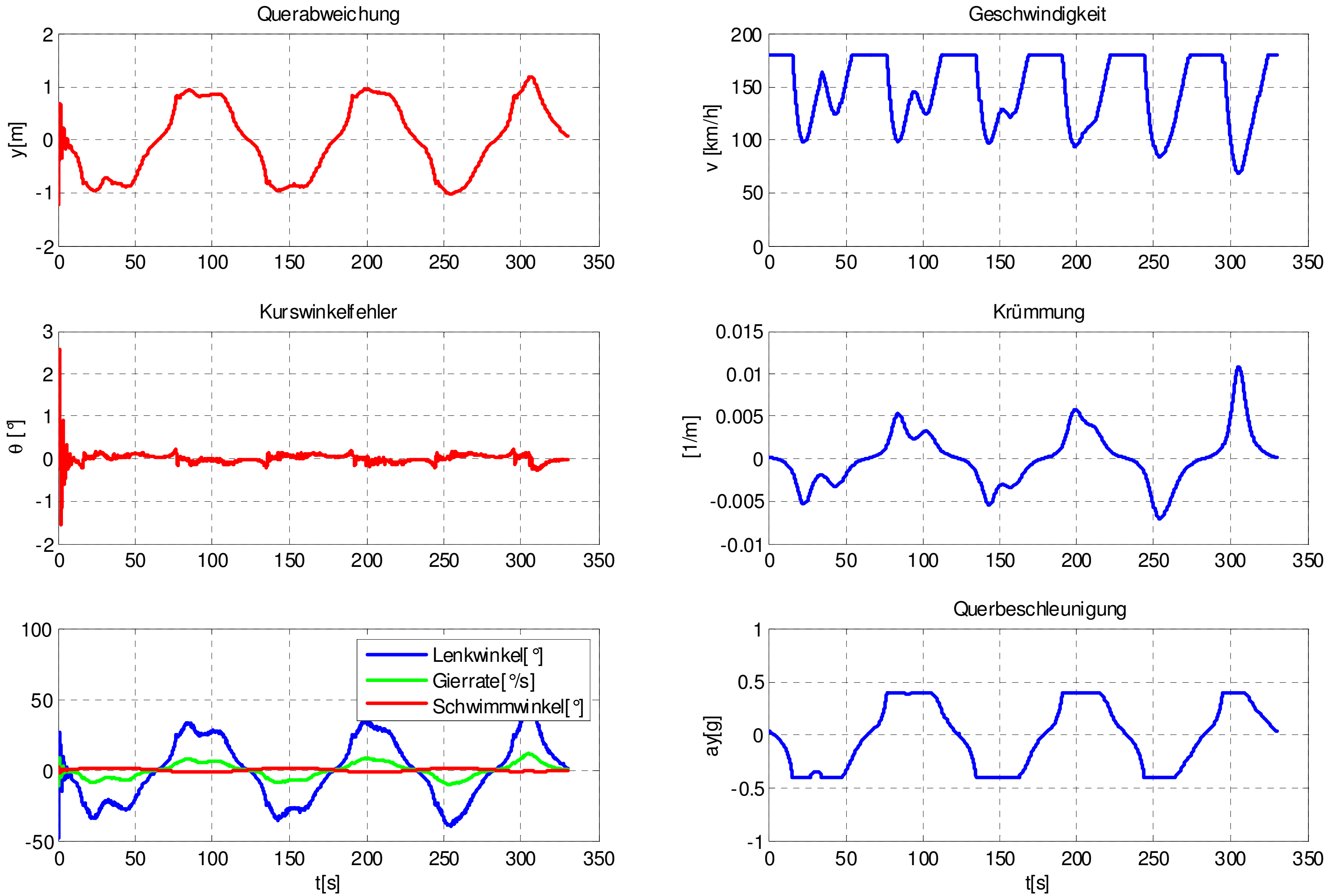
Simulationskonfiguration

- Geschwindigkeit 68 - 180 kmh
- Querbeschleunigung 0.4g (an möglichen Strecken)
- Anfangsquerabweichung ca. 1.0 m

Simulierter Fahrzeugspurverlauf

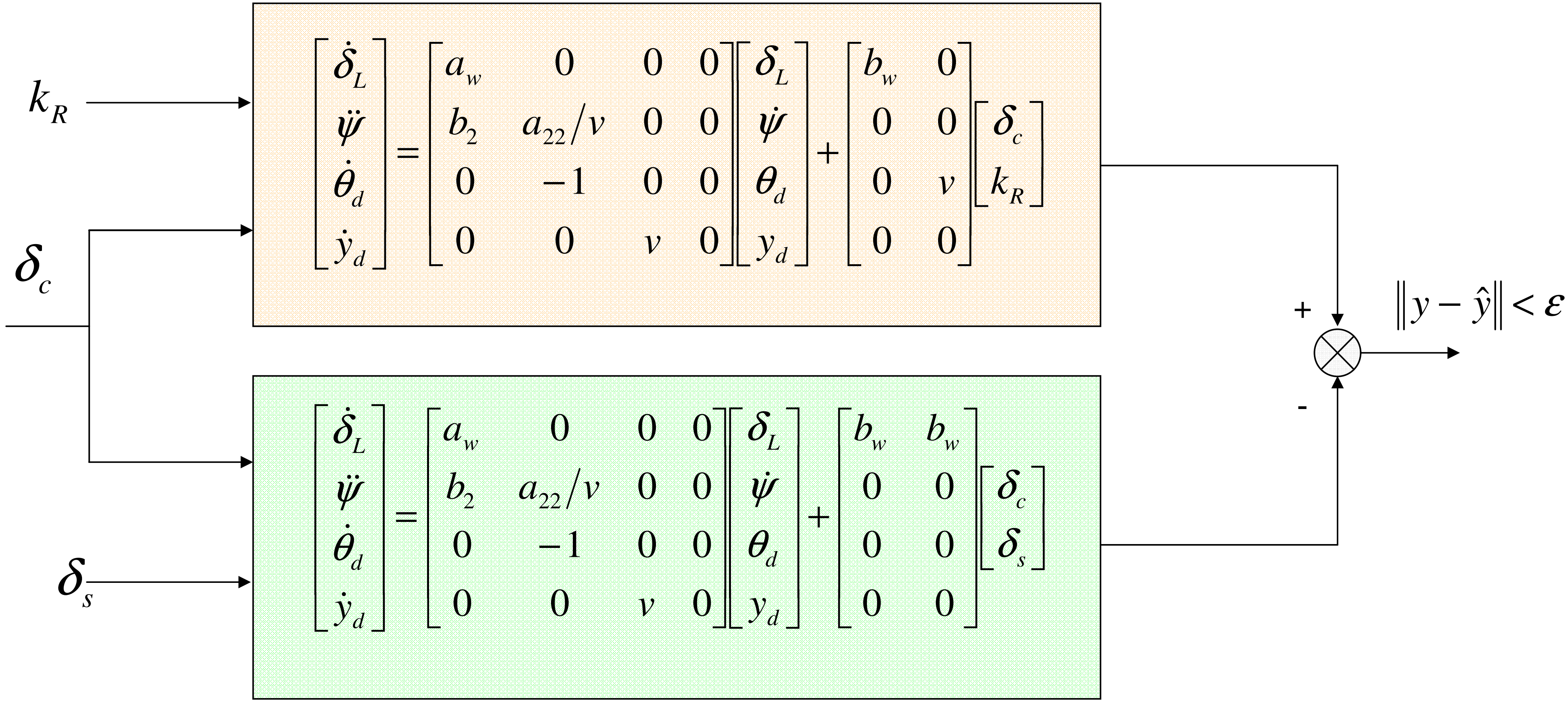


LQR: Inakzeptable große Querabweichung



Störgrößenbeobachter
Krümmung als Störung am Lenkwinkel

Suche nach einem Lenkwinkelkommando δ_s, das die gleiche Auswirkung wie die Sollspurkrümmung auf die Fahrdynamik hat.



$$\begin{bmatrix}\dot{\delta}_L\\ \ddot{\psi}\\ \dot{\theta}_d\\ \dot{y}_d\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}a_w & 0 & 0 & 0\\ b_2 & a_{22}/v & 0 & 0\\ 0 & -1 & 0 & 0\\ 0 & 0 & v & 0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\delta_L\\ \dot{\psi}\\ \theta_d\\ y_d\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}b_w & 0\\ 0 & 0\\ 0 & v\\ 0 & 0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\delta_c\\ k_R\end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix}\dot{\delta}_L\\ \ddot{\psi}\\ \dot{\theta}_d\\ \dot{y}_d\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}a_w & 0 & 0 & 0\\ b_2 & a_{22}/v & 0 & 0\\ 0 & -1 & 0 & 0\\ 0 & 0 & v & 0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\delta_L\\ \dot{\psi}\\ \theta_d\\ y_d\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}b_w & b_w\\ 0 & 0\\ 0 & 0\\ 0 & 0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\delta_c\\ \delta_s\end{bmatrix}$$

Luenberger-Beobachter als Störgrößenbeobachter

Störlenkwinkel δ_s als eine Zustandsvariable betrachten und mit Luenberger-Beobachter alle Zustände beobachten.

$$\begin{bmatrix} \dot{\delta}_L \\ \ddot{\psi} \\ \dot{\theta}_d \\ \dot{y}_d \\ \dot{\delta}_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_w & 0 & 0 & 0 & b_w \\ b_2 & a_{22}/v & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & v & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_L \\ \dot{\psi} \\ \theta_d \\ y_d \\ \delta_s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_w \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \delta_c \quad \Rightarrow \quad \begin{aligned} \dot{x} &= A_o(v)x + B_o u \\ y &= C_o x \end{aligned}$$

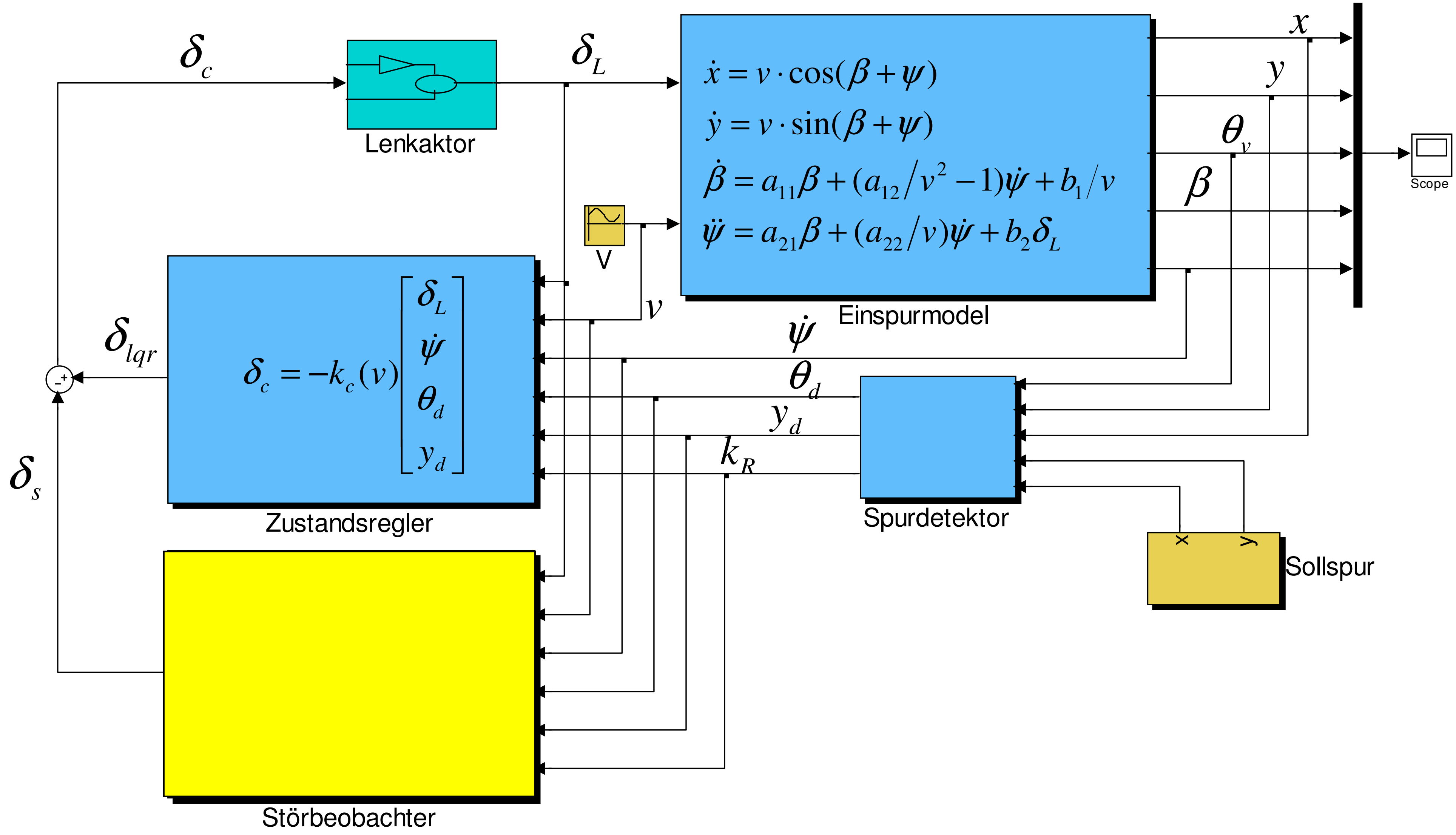
Luenberger-Beobachter

$$\boxed{\begin{aligned} \dot{\hat{x}}_o &= A_o(v)\hat{x}_o + B_o u + k_o(y - C_o x_o) \\ \hat{y}_o &= C_o \hat{x}_o \end{aligned}}$$

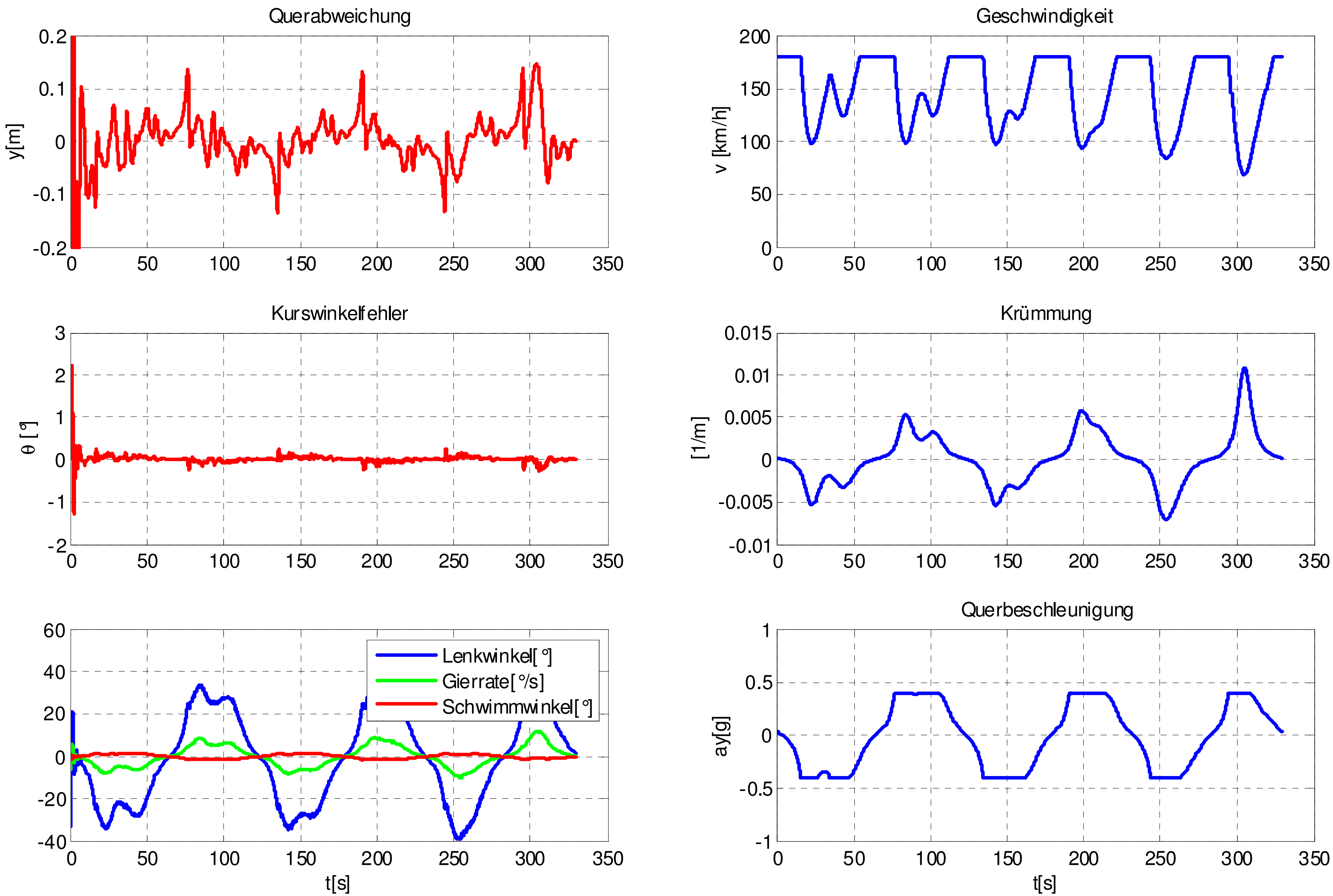
Beobachtermatrix

$$\boxed{k_o(v) = lqr(A_o^{\,T}(v), C_o^{\,T}, Q_o(v), R_o)}$$

Struktur LQR mit Störgrößenkompensation

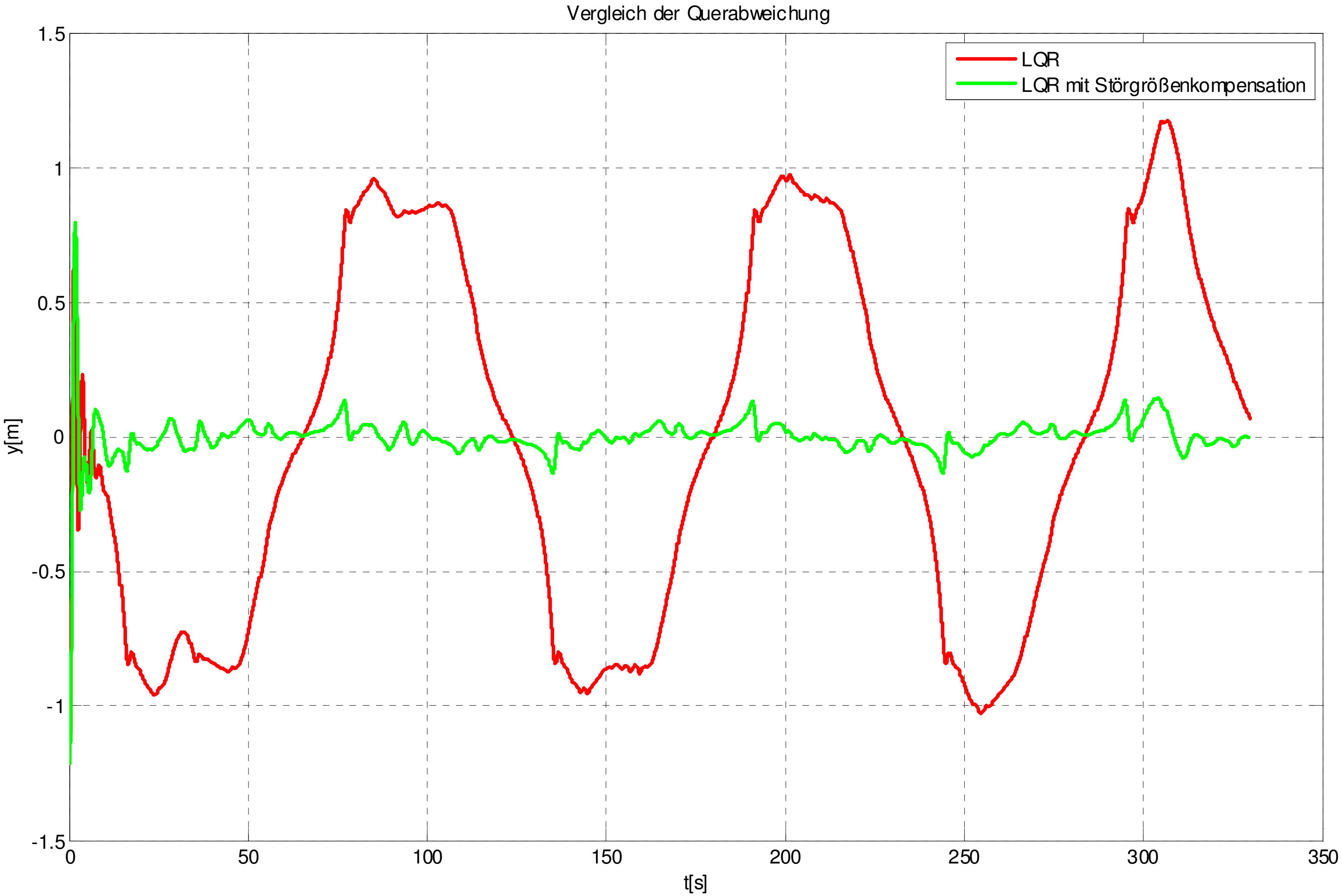


LQR mit Störgrößenkompensation



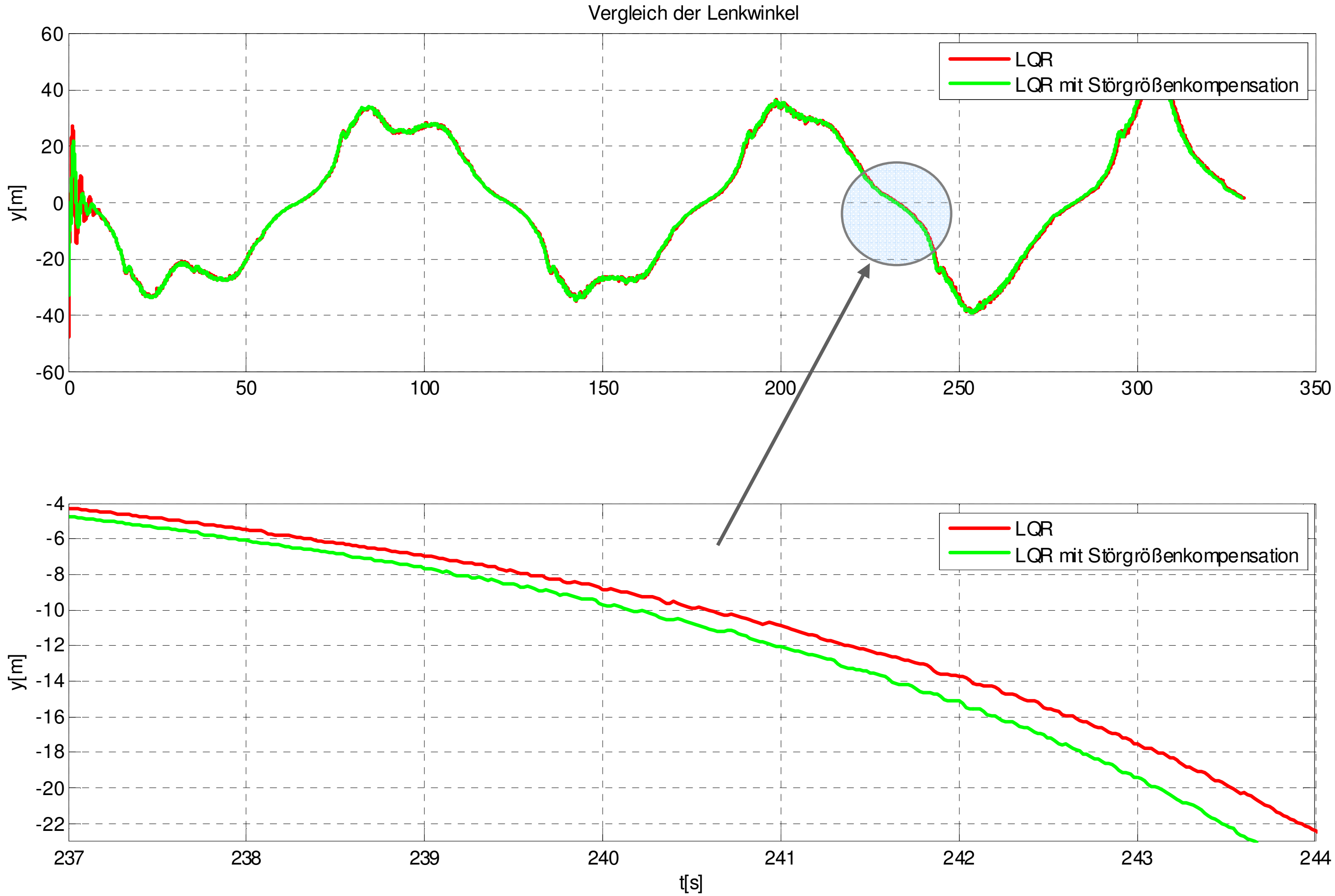
Vergleich der Querabweichungen

Deutlich kleinere Querabweichungen bei LQR mit Störgrößenkompensation



Vergleich der Lenkwinkel

Schnellere Reaktion des LQRs mit Störgrößenkompensation



LQR mit Gain Scheduling

Entwurf des Reglers und Beobachters für die

diskrete konstante Geschwindigkeit

$$k_c(v_i) = lqr(A(v_i), B, \boxed{Q(v_i)}, R), \qquad v_i = 15,20,25,30,....$$

$$k_o(v_i) = lqr(A_o^T(v_i), C_o^T, \boxed{Q_o(v_i)}, R_o)$$

Anwenden für alle sich ändernde

Geschwindigkeiten durch Interpolation

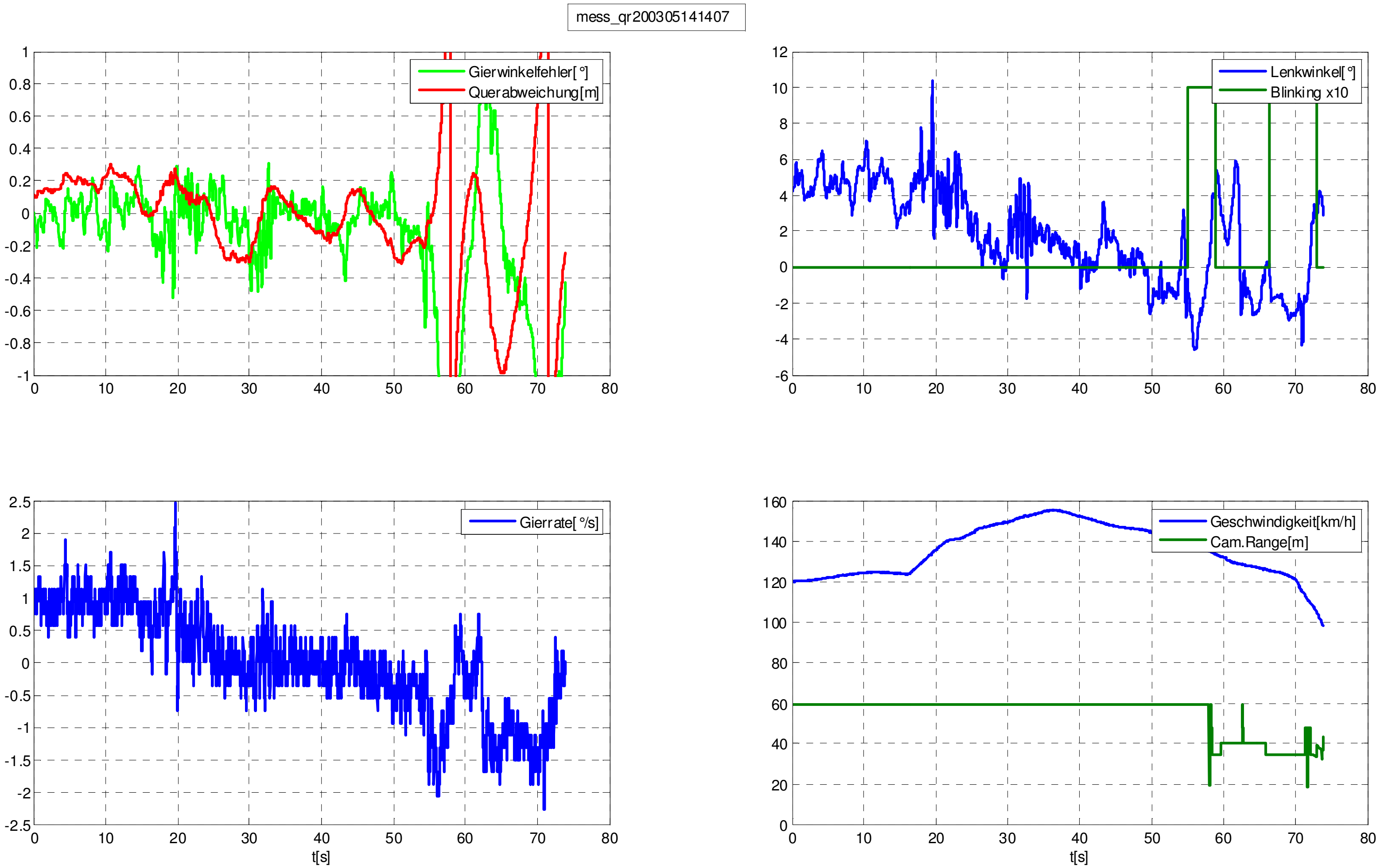
$$k_c(v) = (k_c(v_{i+1}) - k_c(v_i))\frac{v - v_i}{v_{i+1} - v_i} + k_c(v_i), \qquad v_i < v < v_{i+1}$$

$$k_o(v) = (k_o(v_{i+1}) - k_o(v_i))\frac{v - v_i}{v_{i+1} - v_i} + k_o(v_i)$$

Übersicht

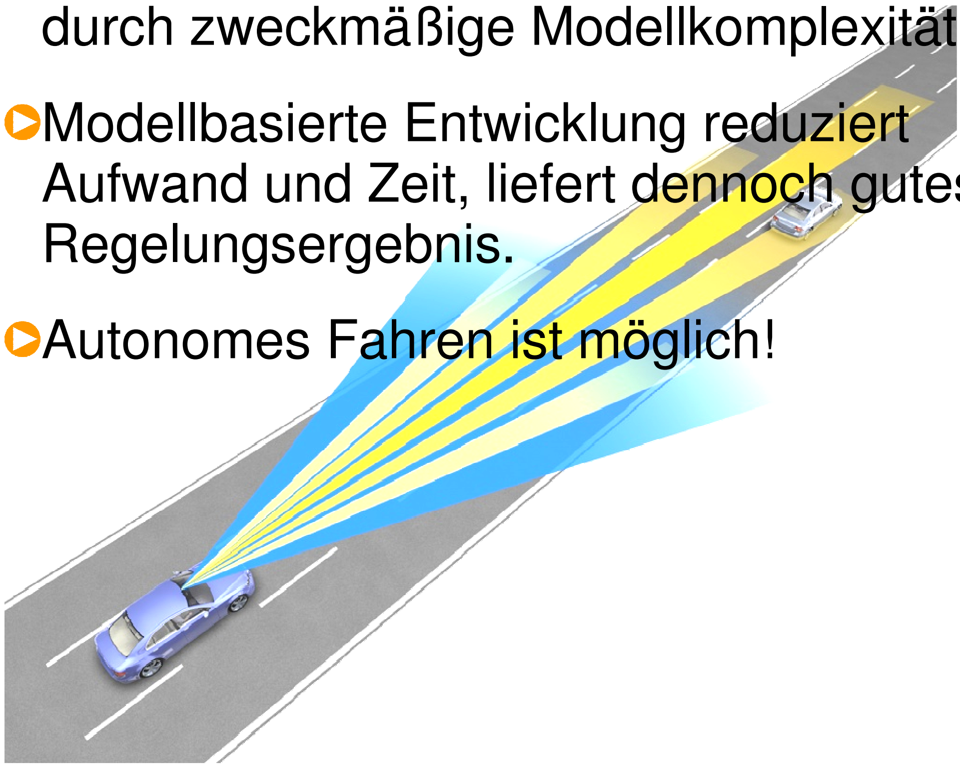
- Einführung
- Fahrdynamik
- Querregelung
- Fahrversuch
- Zusammenfassung

Fahrversuch



Zusammenfassung

- Identifikation als mächtiges Werkzeug zur Erlangung eines guten anwendbaren Modells.
- Vereinfachter Regler-/Beobachterentwurf durch zweckmäßige Modellkomplexität .
- Modellbasierte Entwicklung reduziert Aufwand und Zeit, liefert dennoch gutes Regelungsergebnis.
- Autonomes Fahren ist möglich!



$$\delta_c = -k_c(v)\begin{bmatrix}\delta_L \\ \dot{\psi} \\ \theta_d \\ y_d\end{bmatrix} - \delta_s$$

$$\dot{\hat{x}} = A_o\hat{x} + B_o u + k_o(y - C_o\hat{x})$$

$$k_c = [0.2994 \quad 2.0638 \quad -13.5262 \quad -0.5271]$$

$$k_o = \begin{bmatrix} 0.0051 & -0.0049 & -0.0593 \\ 0.0020 & -0.0018 & -0.0216 \\ -0.0018 & 0.0061 & 0.0844 \\ -0.0216 & 0.0844 & 2.0538 \\ 0.0051 & -0.0049 & -0.0593 \end{bmatrix}$$