Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik
School of Engineering and Design
Technische Universität München

Fahrerassistenzsysteme im Kraftfahrzeug

Prof. Dr.-Ing. Markus Lienkamp

Vorlesungsübersicht

01 Einführung 28.04.2022 – Prof. Lienkamp	**01 Einführung** 28.04.2022 – Prof. Lienkamp	**01 Übung Einführung** 28.04.2022 – Hoffmann
02 Sensorik / Wahrnehmung I 05.05.2022 – Prof. Lienkamp	**02 Sensorik / Wahrnehmung I** 05.05.2022 – Prof. Lienkamp	**02 Sensorik / Wahrnehmung I** 05.05.2022 – Prof. Lienkamp
03 Sensorik / Wahrnehmung II 12.05.2022 – Dr.-Ing. Diermeyer	**03 Sensorik / Wahrnehmung II** 12.05.2022 – Dr.-Ing. Diermeyer	**03 Übung Sensorik / Wahrnehmung II** 12.05.2022 – Schimpe
04 Sensorik / Wahrnehmung III 19.05.2022 – Schimpe	**04 Sensorik / Wahrnehmung III** 19.05.2022 – Schimpe	**04 Übung Sensorik / Wahrnehmung III** 19.05.2022 – Schimpe
05 Funktionslogik / Regelung 02.06.2022 – Dr.-Ing. Winkler	**05 Funktionslogik / Regelung** 02.06.2022 – Dr.-Ing. Winkler	**05 Funktionslogik / Regelung** 02.06.2022 – Dr.-Ing. Winkler
06 Übung Funktionslogik / Regelung 09.06.2022 – Dr.-Ing. Winkler	**06 Funktionale Systemarchitektur** 09.06.2022 – Prof. Lienkamp	**06 Aktorik** 09.06.2022 – Prof. Lienkamp
07 Deep Learning 23.06.2022 – Majstorovic	**07 Deep Learning** 23.06.2022 – Majstorovic	**07 Übung Deep Learning** 23.06.2022 – Majstorovic
08 MMI 30.06.2022 – Prof. Bengler	**08 MMI** 30.06.2022 – Prof. Bengler	**08 MMI Übung** 30.06.2022 – Prof. Bengler
09 Controllability 07.07.2022 – Prof. Bengler	**09 Controllability** 07.07.2022 – Prof. Bengler	**09 Übung Controllability** 07.07.2022 – Winkle
10 Entwicklungsprozess 14.07.2022 – Dr.-Ing. Diermeyer	**10 Entwicklungsprozess** 14.07.2022 – Dr.-Ing. Diermeyer	**10 Übung Entwicklungsprozess** 14.07.2022 – Hoffmann
11 Analyse und Bewertung FAS 21.07.2022 – Dr.-Ing. Feig	**11 Analyse und Bewertung FAS** 21.07.2022 – Dr.-Ing. Feig	**11 Übung Analyse und Bewertung FAS** 21.07.2022 – Dr.-Ing. Feig
12 Aktuelle und künftige Systeme 28.07.2022 – Prof. Lienkamp	**12 Aktuelle und künftige Systeme** 28.07.2022 – Prof. Lienkamp	**12 Aktuelle und künftige Systeme** 28.07.2022 – Prof. Lienkamp

Übung Funktionslogik und Regelung
Dr.-Ing. Franz Winkler

Agenda

1. ACC – Folgereglung
2. Auslegung Störgrößenbeobachter Querführung

Übung Funktionslogik und Regelung
Dr.-Ing. Franz Winkler

Agenda

1. **ACC – Folgereglung**
2. Auslegung Störgrößenbeobachter Querführung

ACC – Folgeregelung

Aufgabenbeschreibung:

Wesentliche Bestandteile einer ACC-Folgeregelung ist die Zielobjektauswahl und die Kaskadenregelung. Für ein nachfolgendes Szenario werden diese Elemente näher betrachtet.

1. Gegeben ist das in Abb. 1 dargestellte Szenario. Objekte, die in einem Korridor von 3 m Breite liegen, werden als relevante Zielobjekte betrachtet. Bewerten Sie, ob das Vorderfahrzeug in Abb. 1 ein für die ACC-Folgefahrt relevantes Zielobjekt darstellt. Das eigene Fahrzeug hat eine Geschwindigkeit von $v_\mathrm{X} = 70$ km/h und weist die aktuelle Gierrate $\dot{\psi} = 2$ °/sec auf. Der Radarsensor lokalisiert das Objekt mit einem lateralen Abstand $y_\mathrm{Sensor} = 5$ m und einem relativen Abstand $d = 70$ m.

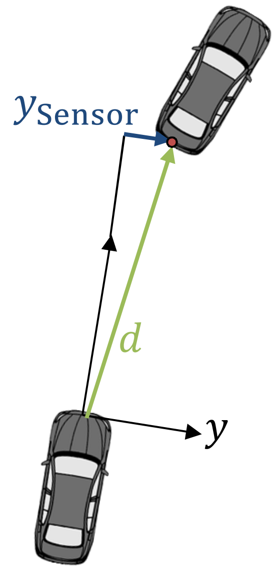


Abbildung 1: Folgefahrt

ACC – Folgeregelung

2. Geben Sie das Blockschaltbild einer ACC-Kaskadenregelung an und zeigen Sie, wie die Eingangsgrößen der Kaskadenregelung aus den Größen des Radarsensors gebildet werden. Der Verstärkungsfaktor der inneren Kaskade ist dabei mit $k_1 = {}^1/_{\tau_v}$ und der der äußeren Kaskade mit $k_2 = {}^1/_{\tau_d}$ definiert.
3. Regelungsauslegung: Die Längsdynamik des Fahrzeugs $G(s) = {}^{a_{\text{ist}}}/_{a_{\text{soll}}}$ wird im Folgenden durch ein PT_1 mit der Zeitkonstanten $\tau_{\text{str}} = 0.1\ sec$ approximiert.
   a. Zur Bestimmung des Produkts der Zeitkonstanten $\tau_{\text{v}} \cdot \tau_{\text{d}}$ soll folgendes Szenario betrachtet werden: Der Abstandsdifferenz von -20 m zum Sollabstand (entspricht einem einscherenden Fahrzeug mit gleicher Geschwindigkeit wie das eigene Fahrzeug) soll nur zu einer leichten Verzögerung von -1 m/s² führen.
   b. Auslegung der inneren Kaskade:
      - Zeigen Sie, für welche Werte von τ_{v} der Regelkreis nur reelle Pole aufweist. Die Übertragungsfunktion des Regelkreises lautet:
        $$G_{\text{v}}(s) = \frac{v_{\text{ist}}}{v_{\text{soll}}} = \frac{1}{s^2\tau_{\text{v}}\tau_{\text{str}} + s\,\tau_v + 1}$$
      - Bestimmen Sie die Zeitkonstante τ_v unter der Bedingung, dass die langsamste Polstelle bei $s = -0.72$ liegt.
   c. Bestimmen Sie damit die Zeitkonstante τ_{d}
   (d. Zeigen Sie, ob damit die gesamte Kaskadenregelung stabil ist)
4. Geben Sie die Bedingung für Kolonnenstabilität an.

ACC – Folgeregelung: Lösung

1. Die geschätzte Krümmung des eigenen Fahrzeugs lautet:

$$\kappa_{\dot\psi} \cong {}^{\dot\psi}/_{v_\mathrm{X}} = \frac{2\,\pi}{180 \cdot {}^{70}/_{3.6}} = 0.0018\ {}^{1}/_{\mathrm{m}}$$

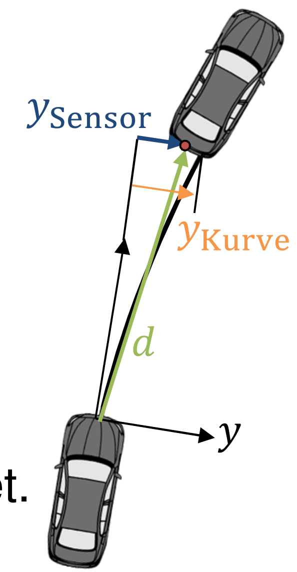
Daraus resultiert eine Querposition in d = 70 m:

$$y_\mathrm{Kurve} = \frac{\kappa_{\dot\psi}}{2} d^2 = 4.4\ \mathrm{m}$$

Versatz des Objekts:

$$\Delta y = y_\mathrm{Kurve} - y_\mathrm{Sensor} = -0.6\ \mathrm{m}$$

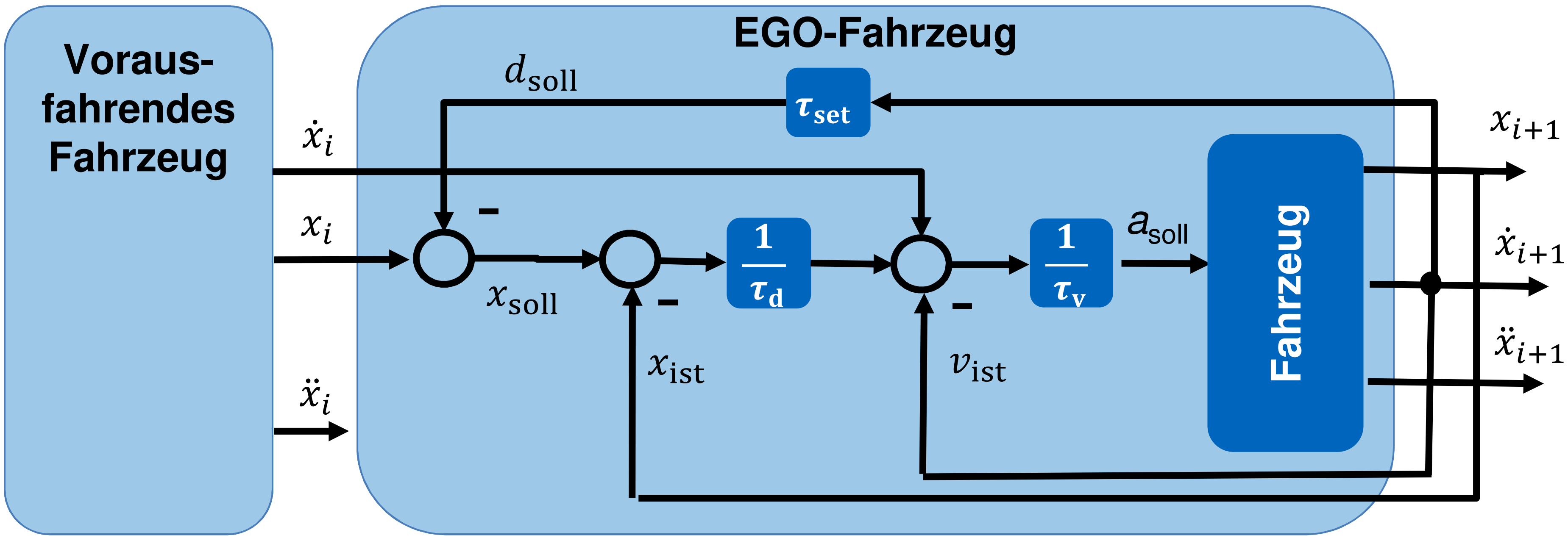
$$|\Delta y| < 1.5\ \mathrm{m}$$



→ Objekt liegt im Fahrschlauch und wird als Zielobjekt betrachet.

ACC – Folgeregelung: Lösung

2. Blockschaltbild:



Messbar:

- Relativabstand d,
- EGO-Geschwindigkeit
- Relativgeschwindigkeit

- $x_{\text{soll}} = x_i - d_{\text{soll}}$, $d_{\text{soll}} = \tau_{\text{set}}\, \dot{x}_{i+1}$
- $x_{\text{ist}} = x_{i+1}$
- Regelfehler: $x_{\text{soll}} - x_{\text{ist}} = x_i - x_{i+1} - \tau_{\text{set}}\, \dot{x}_{i+1} = d - \tau_{\text{set}}\, \dot{x}_{i+1}$

ACC – Folgeregelung: Lösung

3. Regelungsentwurf:

a) $v_{\mathrm{rel}} = \dot{x}_i - \dot{x}_{i+1} = 0$:

$$\ddot{x}_{i+1} = \frac{v_{\mathrm{rel}} + {(d - d_{\mathrm{soll}})}/{\tau_{\mathrm{d}}}}{\tau_{\mathrm{v}}}$$

$$-1\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{sec}^2} = \frac{0 + {(-20\,m)}/{\tau_{\mathrm{d}}}}{\tau_{\mathrm{v}}} \Leftrightarrow \tau_{\mathrm{v}} \cdot \tau_{\mathrm{d}} = 20\ \mathrm{sec}^2$$

b) Bestimmung der Polstellen aus der Führungsübertragungsfunktion:

$$G_{\mathrm{v}}(s) = \frac{1}{s^2 \tau_{\mathrm{v}} \tau_{\mathrm{str}} + s\,\tau_{\mathrm{v}} + 1}$$

Polstellen: $s_\infty^2\ \tau_{\mathrm{v}}\tau_{\mathrm{str}} + s_\infty\ \tau_{\mathrm{v}} + 1 = 0$

$$s_{\infty 1,2} = \frac{-\tau_{\mathrm{v}} \pm \sqrt{\tau_{\mathrm{v}}^2 - 4\,\tau_{\mathrm{v}}\tau_{\mathrm{str}}}}{2\tau_{\mathrm{v}}\tau_{\mathrm{str}}}$$

ACC – Folgeregelung: Lösung

Reelle Pole: $\tau_\mathrm{v}^2 - 4\,\tau_\mathrm{v}\tau_\mathrm{str} \;\geq 0$

$\tau_\mathrm{v} > 0$

→ $\tau_\mathrm{v} \geq 4\,\tau_\mathrm{str}$

Rechts gelegene Polstelle:

$$s_\infty = \frac{-\tau_\mathrm{v} + \sqrt{\tau_\mathrm{v}^2 - 4\,\tau_\mathrm{v}\tau_\mathrm{str}}}{2\tau_\mathrm{v}\tau_\mathrm{str}}$$

→ $\tau_\mathrm{v} = \frac{4\tau_\mathrm{str}}{1-(2\tau_\mathrm{str}\,s_\infty+1)^2} = 1{,}5\ \mathrm{sec}$

c) Bestimmung von τ_d:

$$\tau_\mathrm{d} = \frac{20\ \mathrm{sec}^2}{\tau_\mathrm{v}} = 13\ \mathrm{sec}$$

ACC – Folgeregelung: Lösung

d) Gesamtübertragungsfunktion:

$$G_{\mathrm{x}}(s) = \frac{x_{\mathrm{ist}}}{x_{\mathrm{soll}}} = \frac{\frac{1}{\tau_{\mathrm{d}}} G_{\mathrm{v}}(s) \frac{1}{s}}{1 + \frac{1}{\tau_{\mathrm{d}}} G_{\mathrm{v}}(s) \frac{1}{s}} = \frac{1}{s^3 \tau_{\mathrm{d}} \tau_{\mathrm{v}} \tau_{\mathrm{str}} + s^2 \tau_{\mathrm{v}} \tau_{\mathrm{d}} + s\, \tau_{\mathrm{d}} + 1}$$

Stabilitätsnachweis mit Routh-Hurwitz:

$$G(s) = \frac{Z(s)}{N(s)}$$

$$N(s) = b_n\, s^n + \cdots + b_1 s + b_0$$

Hier: $\mathrm{n} = 3, \quad b_3 = \tau_{\mathrm{d}} \tau_{\mathrm{v}} \tau_{\mathrm{str}}, \; b_2 = \tau_{\mathrm{d}} \tau_{\mathrm{v}}, \quad b_1 = \tau_{\mathrm{d}}, \; b_0 = 1$

Bedingungen:

$$b_i > 0 \quad \forall i$$

$$b_2 b_1 - b_0 b_3 > 0$$

$b_2 b_1 - b_0 b_3 = \tau_{\mathrm{d}}^2 \tau_{\mathrm{v}} - \tau_{\mathrm{d}} \tau_{\mathrm{v}} \tau_{\mathrm{str}} = 266 > 0$ → Regelkreis ist stabil

ACC – Folgeregelung: Lösung

4)

$$|V(\omega)| = \frac{|A_{i+1}(\omega)|}{|A_i(\omega)|} \leq 1 \ \ \forall\, \omega \geq 0$$

ACC – Folgeregelung: Lösung

Anmerkung: Stabilitätsnachweis mit Routh-Hurwitz:

$$G(s) = \frac{Z(s)}{N(s)}$$

$$N(s) = b_n\, s^n + \cdots + b_1 s + b_0$$

- Notwendige Bedingung:

$$b_i > 0 \quad \forall i$$

- Notwendige und hinreichende Bedingung:

  Ein System ist dann und nur dann BIBO-stabil, wenn gilt:

$$b_n > 0 \quad \text{und alle } n \text{ Hurwitzdeterminanten } D_i > 0, i = 1 \dots n$$

Mit

$$\begin{array}{cccccccccc}
 & D_1 & D_2 & D_3 & & & & & D_{n-1} & \\
D_n = & \multicolumn{9}{l}{\begin{vmatrix}
b_{n-1} & b_{n-3} & b_{n-5} & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & 0 \\
b_n & b_{n-2} & b_{n-4} & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & 0 \\
0 & b_{n-1} & b_{n-3} & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & 0 \\
0 & b_n & b_{n-2} & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & 0 \\
0 & 0 & b_{n-1} & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & 0 \\
\cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\
\cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\
0 & 0 & 0 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & b_0
\end{vmatrix}}
\end{array}$$

Übung Funktionslogik und Regelung
Dr.-Ing. Franz Winkler

Agenda

1. ACC – Folgereglung
2. **Auslegung Störgrößenbeobachter Querführung**

Auslegung Störgrößenbeobachter Querführung

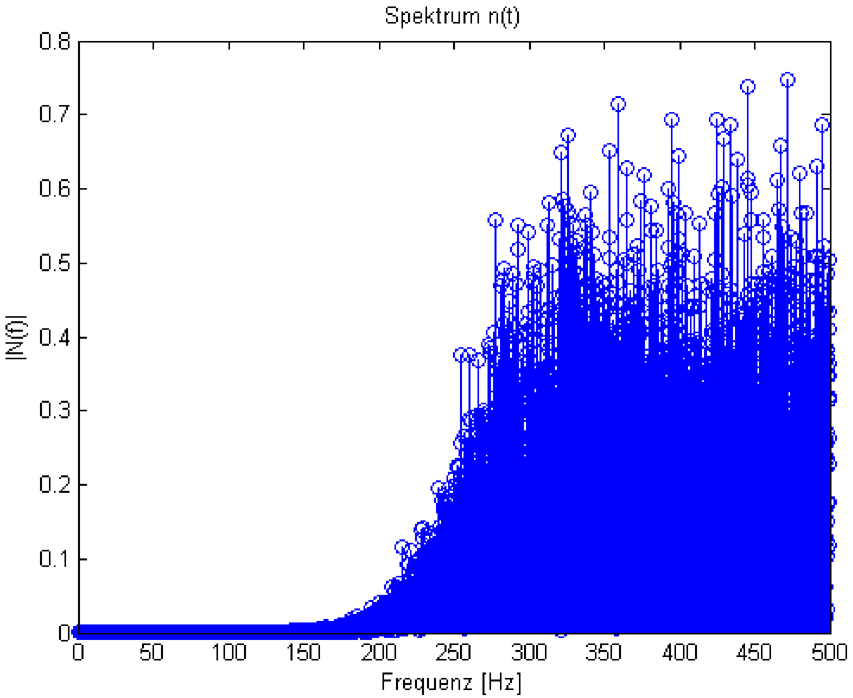
Aufgabenbeschreibung:

Zur Sicherstellung der stationären Genauigkeit einer Querführungsregelung soll ein Störgrößenbeobachter zum Einsatz kommen. Die Strecke wird vereinfacht als PT_1 mit der Zeitkonstante $\tau_{\mathrm{str}} = 0.1\ sec$ angenommen.

1. Nennen Sie Vorteile eines Störgrößenbeobachters im Vergleich zu einem Integralanteil im Regler.
2. Geben Sie das Blockschaltbild eines Störgrößenbeobachters zur Kompensation von Störungen z am Eingang der Strecke an. Die gemessene Ausganggröße soll dabei durch ein Messrauschen überlagert sein.
3. (Bestimmen Sie die Störübertragungsfunktion.)
4. Welche Kriterien muss die Ersatzübertragungsfunktion im Störgrößenbeobachter erfüllen? Geben Sie eine geeignete Ersatzübertragungsfunktion an.

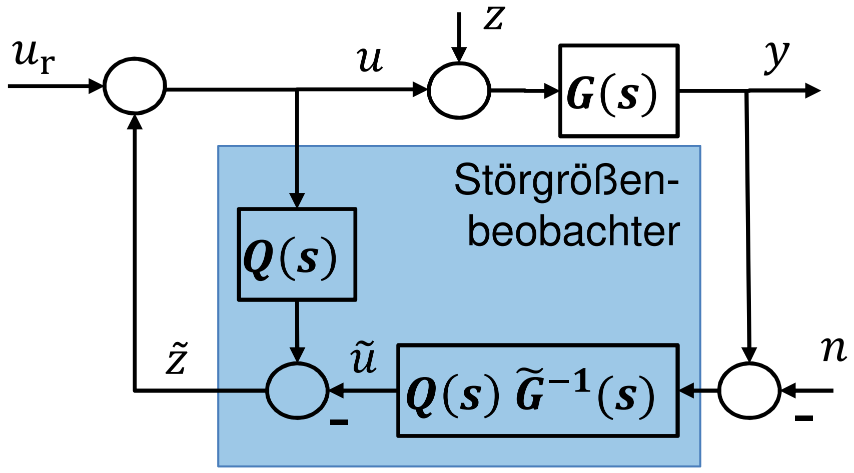
Auslegung Störgrößenbeobachter Querführung

5. Das Messrauschen *n*(t) weißt das in Abb. 2 dargestellte Frequenzspektrum auf. Geben Sie eine geeignete Übertragungsfunktion für das Filter *Q*(s) an.



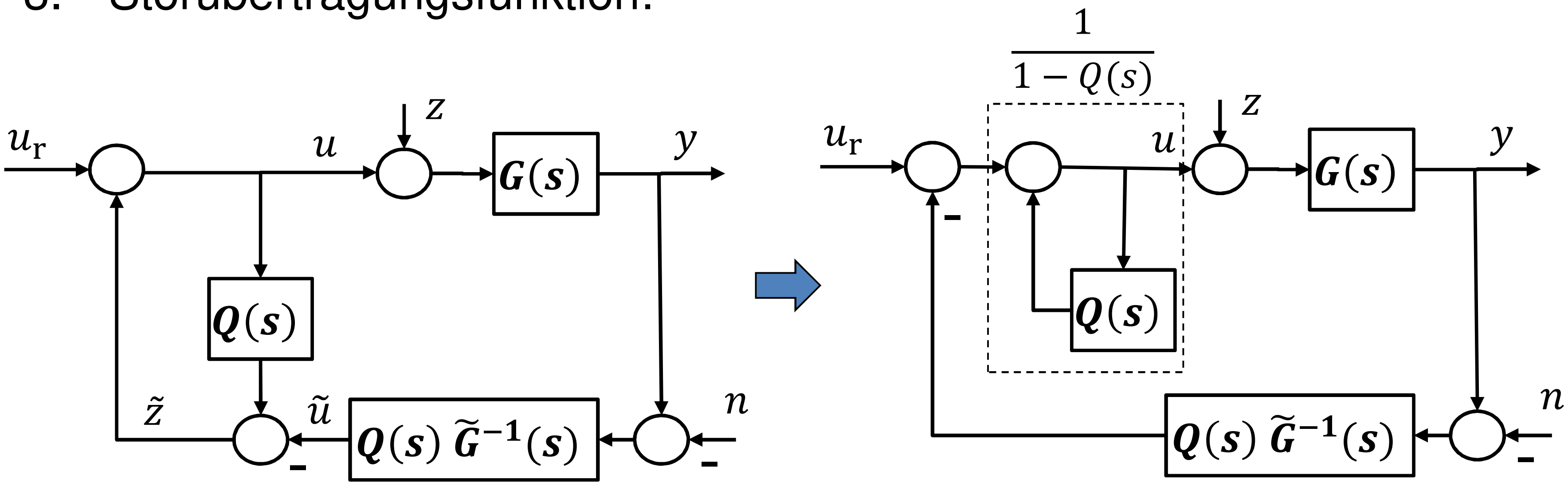
Auslegung Störgrößenbeobachter Querführung: Lösung

1. Vorteile eines Störgrößenbeobachters:
   - Möglichkeit, Begrenzungen direkt zu berücksichtigen.
   - Einstellbarer Grad der Störkompensation.
   - Vermeidung von Windup.
   - Berücksichtigung von nicht messbaren Störgrößen.
2. Blockschaltbild Störgrößenbeobachter:



Auslegung Störgrößenbeobachter Querführung: Lösung

3. Störübertragungsfunktion:



$$G_z(s) = \frac{Y(s)}{Z\,(s)} = \frac{G(s)}{1 + G(s)Q(s)\tilde{G}^{-1}(s)\frac{1}{1-Q(s)}} = \frac{G(s)\tilde{G}(s)(1-Q(s))}{\tilde{G}(s) + \left(G(s) - \tilde{G}(s)\right)Q(s)}$$

Auslegung Störgrößenbeobachter Querführung: Lösung

4. Ersatzübertragungsfunktion:
   - Bedingungen für $\tilde{G}(s)$:
     - Relativer Grad von $G(s)$ und $\tilde{G}(s)$ muss gleich sein.
   - Relativer Grad von $G(s) = 1$:

$$G(s) = \frac{1}{1 + s\,\tau_{\mathrm{str}}}$$

   - PT_1 ist eine mögliche Übertragungsfunktion:

$$\tilde{G}(s) = \frac{1}{1 + s\,\tilde{\tau}}$$

Auslegung Störgrößenbeobachter Querführung: Lösung

5. Auslegung des Filters $Q(s)$:
   - Bedingungen für $Q(s)$:
     - Filter $Q(s)$ muss schnell genug sein.
     - Der relative Grad von $Q(s)$ muss größer als oder gleich sein wie der von $\tilde{G}(s)$.
     - Störunterdrückung bei niedrigen Frequenzen muss gewährleistet sein.
     - Unterdrückung von Messrauschen bei hohen Frequenzen.
   - ➢ Beispielsweise ein Tiefpassfilter mit passendem relativen Grad erfüllt diese Bedingungen.

   - Relativer Grad $Q(s) \geq 1$:

$$Q(s) = \frac{1}{1 + s\,\tau_{\mathrm{Q}}}$$

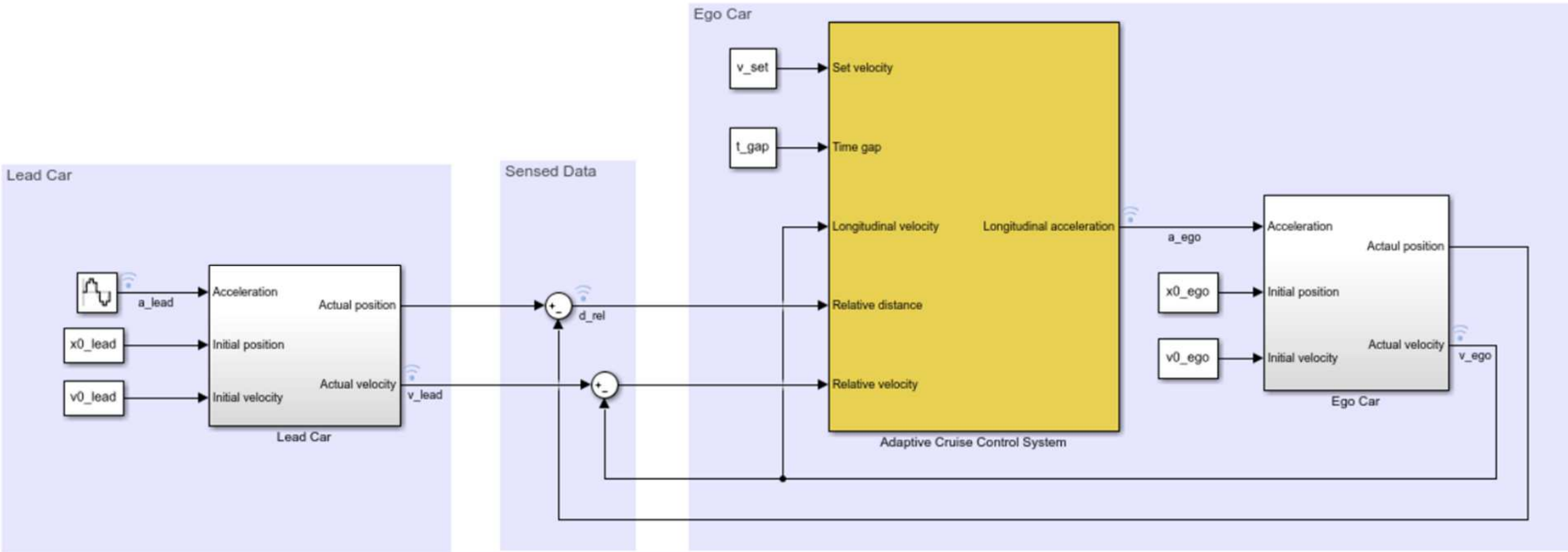
Auslegung Störgrößenbeobachter Querführung: Lösung

- Bestimmung Eckfrequenz von *Q*(*s*):
  - Das Messrauschen hat relevante Amplituden über 150 Hz.
  - Die für das System relevanten Frequenzen sind unter 50 Hz.

  - ➢ Wahl der Eckfrequenz bei 100 Hz:

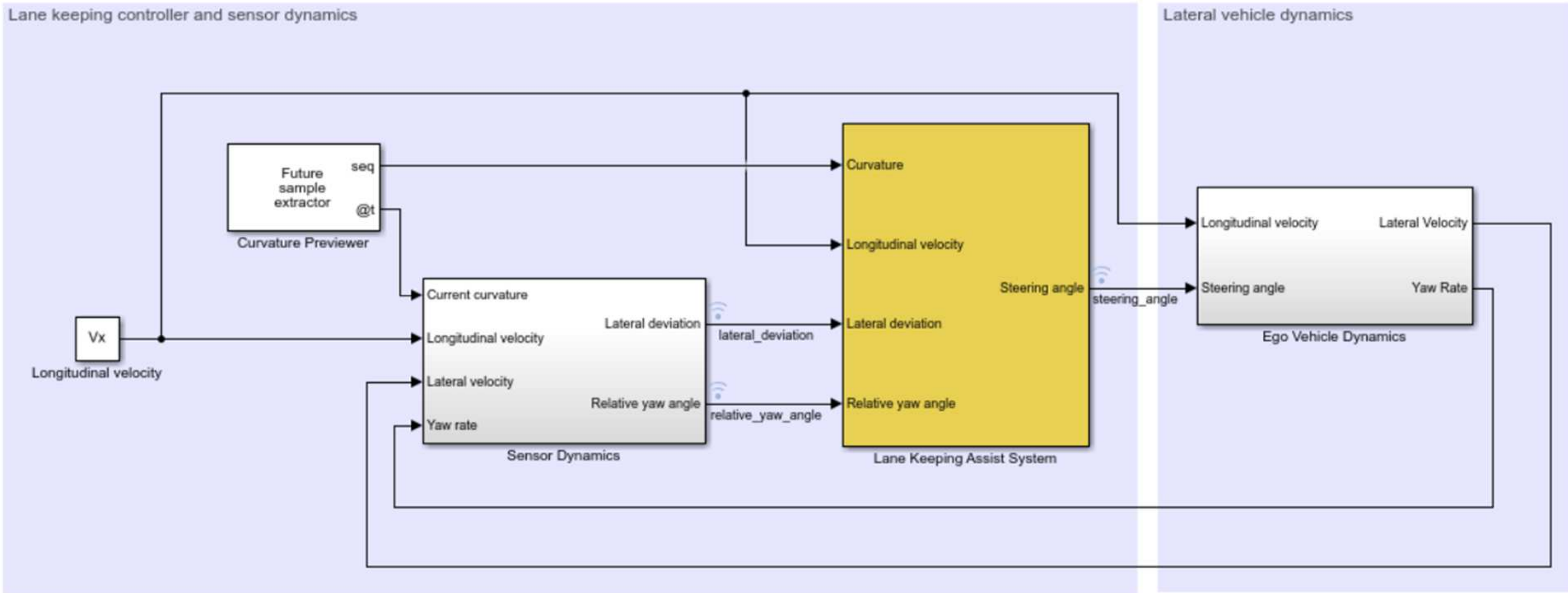
$$f_{\mathrm{Q}} = 100\ \mathrm{Hz} \ \rightarrow \ \omega_{\mathrm{Q}} = 2\pi f_{\mathrm{Q}} \ \rightarrow \ \tau_{\mathrm{Q}} = \frac{1}{\omega_{\mathrm{Q}}} = 1.6\ \mathrm{msec}$$

Adaptive Cruise Control System Using Model Predictive Control



→ https://www.mathworks.com/help/mpc/ug/adaptive-cruise-control-using-model-predictive-controller.html

Lane Keeping Assist System Using Model Predictive Control



→ https://www.mathworks.com/help/mpc/ug/lane-keeping-assist-system-using-model-predictive-control.html