

Bericht zum Kurs “Projektwettbewerb Konzepte der Regelungstechnik”

Maximilian Schmitz, Josias Rühle (Gruppe 20)

Zusammenfassung: In diesem Bericht wird unser Lösungsweg für die regelungstechnische Aufgabe des Kurses “Projektwettbewerb Konzepte der Regelungstechnik” am IST beschrieben. Der für ein Einspurmodell entworfene Regler ist in der Lage auf der gegebenen Rennstrecke eine Rundenzeit von $t_f = 55.5s$ zu erreichen.

1. EINLEITUNG

Ziel des Kurses “Projektwettbewerb Konzepte der Regelungstechnik” ist es, ein Zustandsregler für ein gegebenes Einspurmodell zu entwerfen, der (rein simulativ) das Absolvieren einer gegebenen Rennstrecke mit einer möglichst kleinen Rundenzeit erlaubt. Zusätzlich zum Zustandsregler wird eine auf die Rundenzeit optimierte Trajektorie entworfen, welcher das Modell mit Hilfe des Reglers folgen soll.

2. REGLERENTWURF

In diesem Kapitel wird ein Regler für das Einspurmodell entworfen, der einer gegebenen Trajektorie folgen kann.

2.1 Asymptotische Folgeregelung

Mit der Aufteilung der im Schwerpunkt wirkenden Kräfte in Längs- und Querrichtung

$$F_L = F_{x,r} + F_{x,f} \cos(\delta) - F_{y,f} \sin(\delta) \quad \text{und} \quad (1)$$

$$F_Q = F_{y,r} + F_{x,f} \sin(\delta) + F_{y,f} \cos(\delta), \quad (2)$$

ist die Beschleunigung \ddot{p} des Schwerpunktes durch

$$\ddot{p} = \begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \end{bmatrix} = \frac{1}{m} \underbrace{\begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi \\ \sin \psi & \cos \psi \end{bmatrix}}_{R(\psi)} \begin{bmatrix} F_L \\ F_Q \end{bmatrix} \quad (3)$$

gegeben. Somit lässt sich durch

$$\begin{bmatrix} F_{L,d} \\ F_{Q,d} \end{bmatrix} = m R^{-1}(\psi) [\ddot{p}_d + a_1 (\dot{p}_d - \dot{p}) + a_0 (p_d - p)] \quad (4)$$

eine gewünschte asymptotische Folgeregelung für den Schwerpunkt formulieren.

2.2 Quer- und Längskraftregelung

Da Quer- und Längskraft nicht die tatsächlichen Systemeingänge darstellen und Nulldynamiken auftreten, müssen nun noch die tatsächlichen Systemeingänge δ, ζ, F_b, G und ϕ ermittelt werden.

Zunächst kann die Bremskraftverteilung ζ zu

$$\zeta = 1 \quad (5)$$

gewählt werden, da für unser Modell kein Radschlupf S angenommen wird. Damit wirkt die Bremskraft F_b nur noch in Längsrichtung und die Querkraft vereinfacht sich zu $F_Q = F_Q(\delta)$.

Da der Zusammenhang zwischen F_Q und δ jedoch sehr nichtlinear ist und für eine geringe Rundenzeit das Fahrzeug möglichst in die gewünschte Fahrtrichtung ψ_d gedreht sein sollte, wird der Lenkwinkel zunächst zu

$$\delta_\psi = k_\psi (\psi_d - \psi) \quad (6)$$

gewählt. Da durch diese Wahl auf geraden Strecken ein Fehler in Querrichtung nicht ausgeglichen werden kann, wird F_Q anschließend um diese Stelle linearisiert

$$F_{Q,\text{lin}}(\delta) = F_Q(\delta_\psi) + \frac{dF_Q(\delta_\psi)}{d\delta}(\delta - \delta_\psi) \quad (7)$$

und nach δ aufgelöst. Zusätzlich wird

$$|\delta - \delta_\psi| \leq \delta_{Q,\text{max}} \quad (8)$$

gefordert, da die Linearisierung nur für kleine Abweichungen verlässliche Ergebnisse liefert.

Durch Einsetzen der gewünschten Querkraft $F_{Q,d}$ ergibt sich der Lenkwinkel zu

$$\delta = \delta_\psi + \text{clip} \left(\frac{F_{Q,d} - F_Q(\delta_\psi)}{\frac{d}{d\delta} F_Q(\delta_\psi)}, \delta_{Q,\text{max}} \right), \quad (9)$$

wobei die Funktion

$$\text{clip}(x, y) := \begin{cases} x & \text{für } |x| \leq y \\ y \text{ sign}(x) & \text{sonst} \end{cases}, \quad x \in \mathbb{R}, y \geq 0 \quad (10)$$

verwendet wird.

In Längsrichtung kann die Gleichung

$$F_L \stackrel{!}{=} F_{L,d} \quad (11)$$

unter Verwendung von (5) und (9) nach

$$F_{\text{aktiv}}(G, \phi, F_b) := \underbrace{\frac{1}{R} i(G) i_0 T_M(\phi, G) - \text{sign}(v \cos(\beta)) F_b}_{=: F_{\text{Motor}}} \quad (12)$$

aufgelöst werden.

Falls $F_{\text{aktiv}}(G, \phi, v) > 0$ gilt, muss das Auto in Fahrtrichtung beschleunigen. Dementsprechend wird $F_b = 0$ gewählt und F_{Motor} entsprechend eingestellt.

Im Fall $F_{\text{aktiv}}(G, \phi, v) < 0$ und $v \cos(\beta) > 0$ muss das Auto abgebremst werden, was durch

$$\phi = 0 \quad \text{und} \quad F_b = -F_{\text{aktiv}} \quad (13)$$

erreicht werden kann.

Für den Fall, dass $F_{\text{aktiv}} < 0$ und $v \cos(\beta) \leq 0$ ist, müsste das Auto rückwärts fahren, was hier nicht betrachtet wird.

2.3 Motorsteuerung

Um die Motorkraft $F_{\text{Motor}}(\phi, G, v)$ entsprechend einstellen zu können, wird die Motorkennlinie aus Abbildung 1 benötigt.

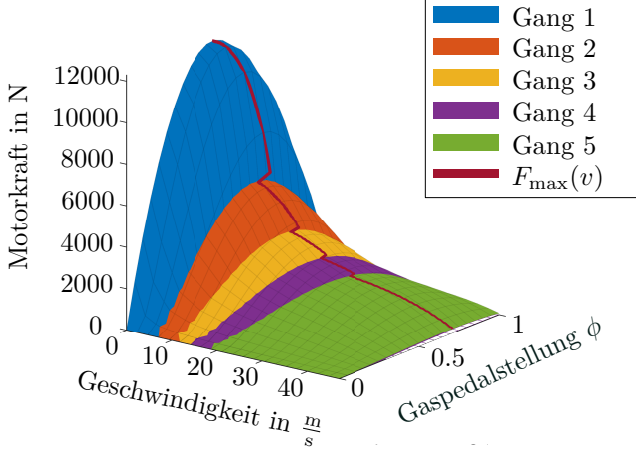


Abbildung 1. Motorkennlinie

Um immer die maximal mögliche Beschleunigung durch Nutzung des maximalen Drehmoments garantieren zu können, muss der Gang zu

$$G_{\text{opt}}(v) = \arg \max_G \left(\max_{\phi} F_{\text{Motor}}(v, \phi, G) \right) \quad (14)$$

$$\approx \begin{cases} 1 & \text{für } v \leq 8.01 \\ 2 & \text{für } 8.01 < v \leq 14.59 \\ 3 & \text{für } 14.59 < v \leq 21.03 \\ 4 & \text{für } 21.03 < v \leq 27.23 \\ 5 & \text{sonst} \end{cases} \quad (15)$$

gewählt werden.

Basierend auf dieser Gangwahl, kann eine inverse Motorkennlinie berechnet werden.

Diese ist in Abbildung 2 dargestellt und ordnet bei gegebener Geschwindigkeit jedem gewünschten Motormoment eine entsprechende Gaspedalstellung zu. Falls das gewünschte Moment nicht erreicht werden kann, wird die Pedalstellung für das bei dieser Geschwindigkeit maximal mögliche Moment verwendet.

Tabelle 1. verwendete Regelparameter

Parameter	Value
Verstärkung Lenkwinkel-Regler k_{ψ}	4
Max. Linearisierungseinfluss $\delta_{Q, \max}$	0.1 rad
Verstärkung Folgeregelung a_0	20
Verstärkung Folgeregelung a_1	20

2.4 Trajektorie

Für die Folgeregelung wird eine Trajektorie für p_d , \dot{p}_d und \ddot{p}_d benötigt. Außerdem wird der gewünschte Gierwinkel ψ_d benötigt, welcher durch

$$\psi_d = \text{unwrap}(\arctan2(\dot{p}_{d,2}, \dot{p}_{d,1})) \quad (16)$$

immer in Richtung der gewünschten Geschwindigkeit zeigt.

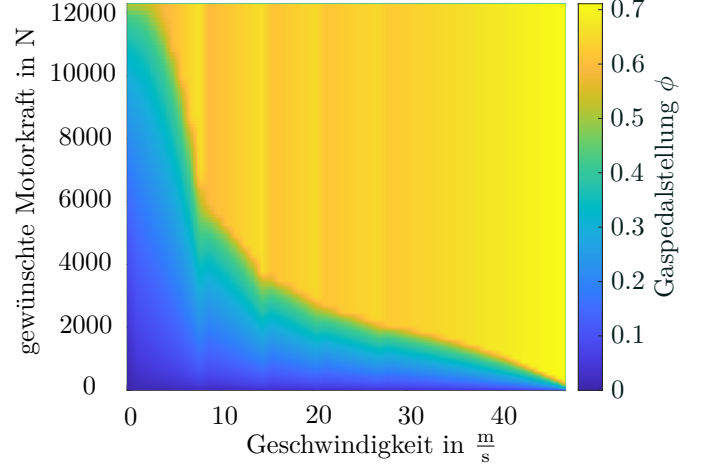


Abbildung 2. Inverse Motorkennlinie bei optimaler Gangwahl

Zunächst wird für die Erstellung einer Trajektorie ein Spline durch manuell aus der Rennstreckenmitte verschobene Punkte gelegt und anschließend durch einen Optimierer zeitindiziert. Mit der dadurch gewonnenen Trajektorie, dessen Bahn in Abbildung 3 dargestellt ist, kann eine Rundenzeit von ungefähr 70s erreicht werden.

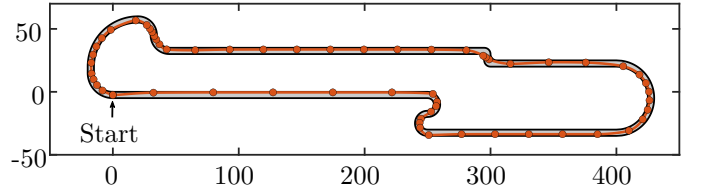


Abbildung 3. manuell erstellte Bahn

Da sich die Verwendung einer guten Trajektorie auch in deutlich schnelleren Rundenzeit widerspiegelt, wird für die Erstellung ein Trajektorienplaner [GRO] verwendet, der die Rundenzeit auf unserem Modell basierend optimiert.

Von der resultierenden Trajektorie, wird ausschließlich die Bahn mit einer festen Zeitschrittweite von $h_{\text{traj}} = 0.03s$ im Regler abgespeichert. Die anderen für den Regler benötigten Größen werden während der Laufzeit im Regler durch Differenzenquotienten und einer linearen Interpolation berechnet.

3. ERGEBNIS

Mit dem entworfenen Regler und der durch den Trajektorienplaner gewonnenen Trajektorie können wir eine Rundenzeit von unter 55.5s erreichen (exakt 55.478s). Dabei werden die Abstände zum Straßenrand in vielen Kurven gerade so noch eingehalten. Schnellere Rundenzeiten sind jedoch durchaus noch möglich, da insbesondere die Längsdynamik nicht optimal ausgenutzt wird. Zusätzlich wird am Rundenende darauf geachtet, dass ein Weiterfahren innerhalb der Beschränkungen möglich wäre.

LITERATUR

Global Racetrjectory Optimization - Institute of Automotive Technology. Quellcode: https://github.com/TUMFTM/global_racetrjectory_optimization

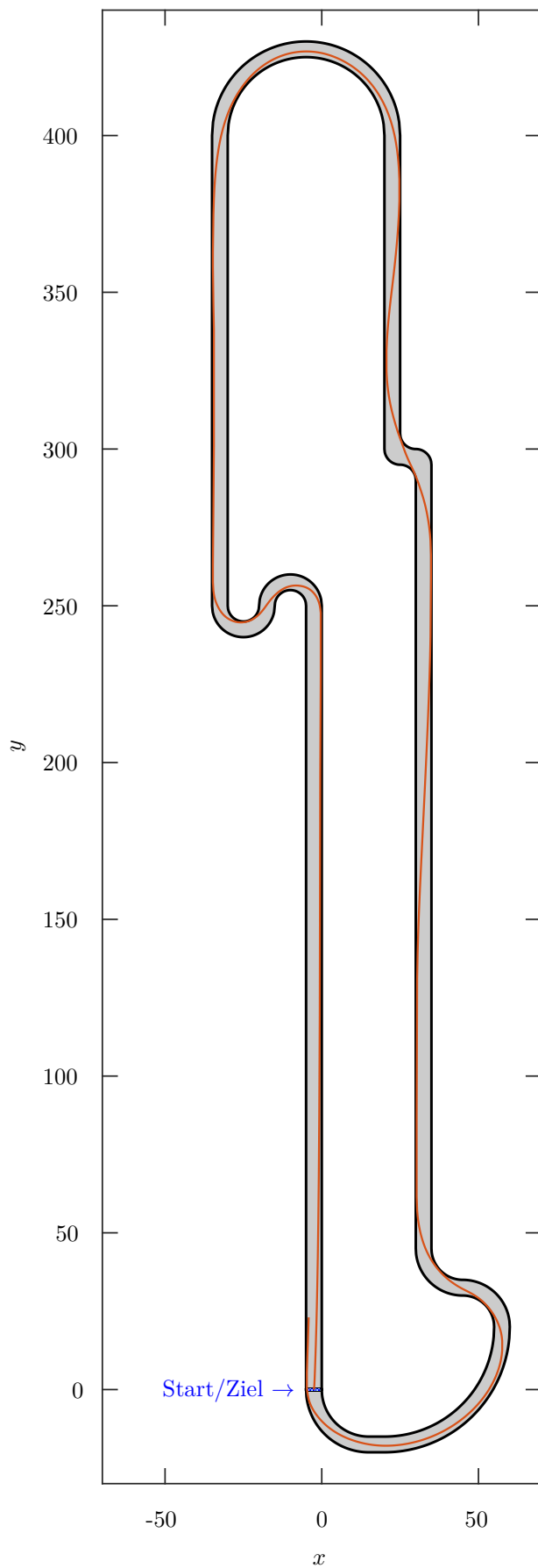


Abbildung 4. Simulierte Bahn unter Verwendung des finalen Reglers