

# Bericht für den Kurs „Projektwettbewerb Konzepte der Regelungstechnik“

Steffen Zeile, Fabian Haas-Fickinger (Gruppe 15)

---

Zusammenfassung Im Rahmen des „Projektwettbewerbs Konzepte der Regelungstechnik“ wurde ein modifizierter LQR Regler entwickelt, um einer zuvor berechneten optimalen Trajektorie folgen.

---

## 1. EINFÜHRUNG

Die Aufgabe des Projektwettbewerbs Konzepte der Regelungstechnik ist es einen Regler zu entwerfen, der ein simuliertes Fahrzeug auf einem Rundkurs derart steuert, dass ein Runde absolviert ohne dabei die Strecke zu verlassen. Ziel des Wettbewerbs ist es eine möglichst geringe Rundenzeit zu erzielen.

Hierbei werden Gaspedalstellung, Lenkwinkel, Bremskraft und Bremskraftverteilung abhängig von den Fahrzeugzuständen geregelt. Die Zustände des dahinterliegenden Fahrzeugmodells, sowie der Verlauf der Streckenränder stehen dem Regler vollständig zur Verfügung.

## 2. KONZEPT

Unser Ansatz besteht darin, vor dem Start der Runde eine zeitoptimale Trajektorie mit Hilfe eines nichtlinearen Programms zu berechnen und diese als Referenz für einen Regler zu nutzen. Daraus resultieren zwei Teilaufgaben, das Optimierungsproblem zu lösen und einen Zustandsregler zu entwerfen.

### 2.1 Optimierungsproblem

Zur Lösung des Optimierungsproblems werden Zustände und Steuerungsgrößen mit Hilfe eines Euler Schemas bzw. Kollokation diskretisiert. Das resultierende nichtlineare Programm wird mit einem gradientenbasierten Solver gelöst. Um das gegebene Fahrzeugmodell für die gradientenbasierte Optimierung nutzbar zu machen, sind einige Anpassungen notwendig. Dabei handelt es sich hauptsächlich um die Einführung eines streckenbezogenen Koordinatensystems sowie der Eliminierung nicht differenzierbarer Funktionen.

Das Streckenkoordinatensystem eingeführt basiert auf dem Verlauf der Streckenmittellinie. Die Fahrzeugposition ist somit gegeben als orthogonaler Abstand zur Streckenmitte  $n$ , Winkel zwischen Streckentangente und Fahrzeuglängsachse  $\xi$  und Distanz zum Start entlang der Streckenmitte  $s$ .

Zudem wurde der Streckenfortschritt  $s$  statt der Zeit  $t$  als unabhängige Variable des Optimierungsproblems genutzt um die Dimension zu reduzieren. Für diesen Zweck musste die Fahrzeugdynamik als Änderung des Zustands über die Strecke formuliert werden.

Die diskrete Gangwahl wurde durch ein Drehmoment-/Geschwindigkeitskennfeld ersetzt. Zielgröße des Optimierungsproblems ist die Minimierung der Fahrzeit.

Da sich verschiedene, teilweise grundlegend unterschiedliche lokale Minima ergeben, wurden zusätzlich Regularisierungsterme in Form von  $\delta^2$ ,  $\ddot{\psi}$  sowie  $\dot{\beta}$  zur Zielgröße hinzugefügt. Dies führt neben einer Reduzierung von Lenkwinkelschwingungen zu einer glatten Dynamik, die das Auftreten instabiler Fahrzustände auf ein Maß begrenzt, das im anschließenden Reglerentwurf tolerabel ist.

### 2.2 Zustandsregler

Die Aufgabe des Zustandsreglers ist die Folgeregelung des Fahrzeuges entlang der vorberechneten, optimalen Trajektorie. Ziel ist es, einen Regler zu entwickeln, der auch für instabile Fahrzustände eine Bahnfolge innerhalb der Streckenbegrenzung garantieren kann. Der Reglerentwurf findet dabei für Längs und Querdynamik getrennt statt. Das verwendete Reifenmodell lässt diese Entkopplung zu. Die Zuordnung der Solltrajektorie zur aktuellen Fahrzeugposition erfolgt ebenfalls über die zurückgelegte Strecke  $s$  entlang der Fahrbahnmittellinie.  $s$  sowie  $n$  und  $\xi$ , die für die Querregelung benötigt werden, berechnet der Regler mit Hilfe des Systems aus 3.  $C$  bezeichnet die Krümmung an der jeweiligen Position.

$$\dot{s} = \frac{v \cos(\beta) \cos(\xi) - v \sin(\beta) \sin(\xi)}{1 - nC} \quad (1)$$

$$\dot{n} = v \cos(\beta) \sin(\xi) + v \sin(\beta) \cos(\xi) \quad (2)$$

$$\dot{\xi} = \dot{\psi} - C\dot{s} \quad (3)$$

- (1) Längsregelung Der Entwurf der Längsregelung basiert auf der Idee der Vorausschau. Mit Hilfe der Vorausschaudistanz  $ds$  wird eine Sollbeschleunigung berechnet, die notwendig ist, damit das Fahrzeug im Abstand  $ds$  von der aktuellen Position die Sollgeschwindigkeit erreicht. Da die Sollbeschleunigung  $a_{x,Soll}$  mit einem Differenzenquotienten basierend auf einer Vorausschaudistanz ermittelt wird, ist eine Transformation in die Zeitdomäne mit Hilfe von  $\dot{s}$  notwendig.  $a_{x,Soll}$  ergibt sich zu 4.

$$a_{x,Soll} = \dot{s} \frac{v_{Soll} - v}{ds} \quad (4)$$

Eine zusätzliche Vorsteuerung ist nicht notwendig. Die Sollbeschleunigung wird dann mit Hilfe der Modellgleichungen des Antriebsstranges auf ein Solldrehmoment am Rad umgerechnet. Aus dem Drehmoment-/Geschwindigkeitskennfeld, das bereits für die Optimierung erzeugt wurde, folgt die Gangwahl. Das aus der Optimierung resultierende Sollgeschwindigkeitsprofil entlang der Fahrbahnmittellinie zeigt 1.

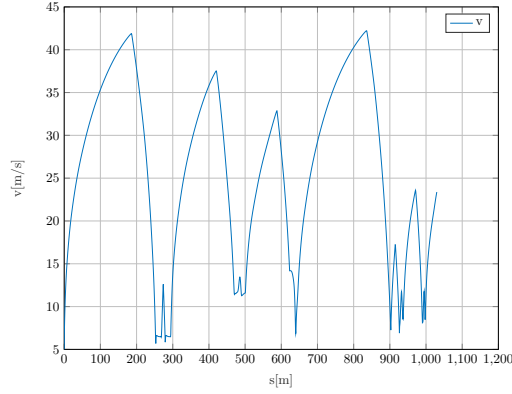


Abbildung 1. Sollgeschwindigkeit  $v_{Soll}$  über zurückgelegte Distanz entlang der Fahrbahnmittellinie  $s$ .

- (2) Querregelung Strukturell lässt sich die verwendete Querregelung in eine Vorsteuerung sowie einen Regler aufteilen. Die einzige Ausgangsgröße ist der Lenkwinkel  $\delta$ . Die Vorsteuerung basiert auf dem Lenkwinkel der Optimierungstrajektorie. Die Zuordnung erfolgt erneut über die zurückgelegte Distanz entlang der Fahrbahnmittellinie. Der Regler wird als klassischer LQR ausgelegt. Die korrespondierenden Zustände  $x_{LQR}$  zeigt 5.

$$x_{LQR} = \begin{bmatrix} v \\ \dot{\psi} \\ \beta \\ n \\ \xi \end{bmatrix} \quad (5)$$

Die Linearisierung erfolgt dabei jeweils bei Geradeausfahrt auf der Fahrbahnmittellinie bei verschiedenen Geschwindigkeiten  $v_i$ . Die notwendige Jacobimatrix der Fahrzeug- und Streckenmodelldynamik liegt als Nebenprodukt des Optimierungsproblems bereits vor. Die Stellgrößengewichtung  $R$  wird zu 1 gewählt, die Zustandsgewichte  $Q$  zeigt 6.

$$Q = \text{diag}([0 \ 0.2 \ 0.2 \ 50 \ 10]) \quad (6)$$

Die sich ergebenden  $k$  werden in Abhängigkeit der aktuellen Fahrzeuggeschwindigkeit  $v$  linear interpoliert. 7 zeigt  $k$  exemplarisch für  $v = 15 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ .

$$k_{15} = [0 \ 0.164 \ -7.197 \ 7.0711 \ 10.991] \quad (7)$$

### 3. ERGEBNIS

Mit Hilfe der dargestellten Methode konnte eine Rundenzeit von  $t_f = 53.263\text{s}$  unter Einhaltung der Streckenbegrenzung erreicht werden. Die benötigte Berechnungszeit beträgt  $t_{\text{sim}} = 316.29775\text{s}$ . 2 zeigt die gefahrene Linie, 3 die Fahrzeuggeschwindigkeit.

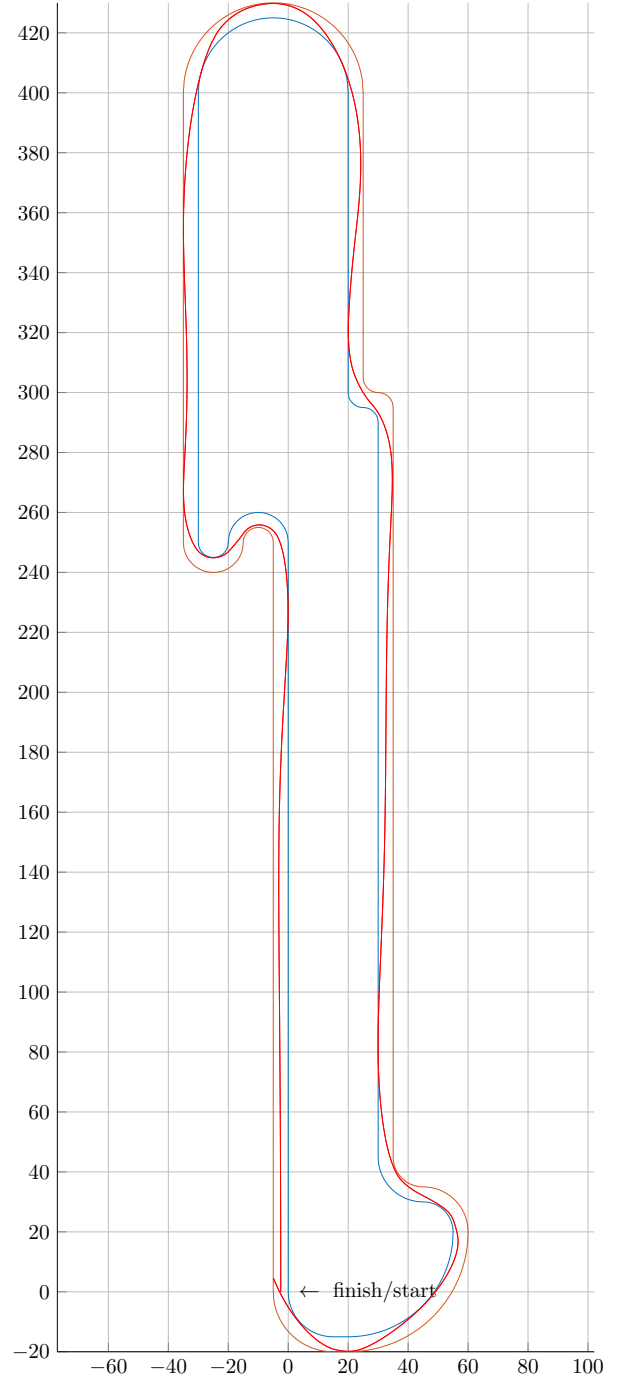


Abbildung 2. Fahrlinie.

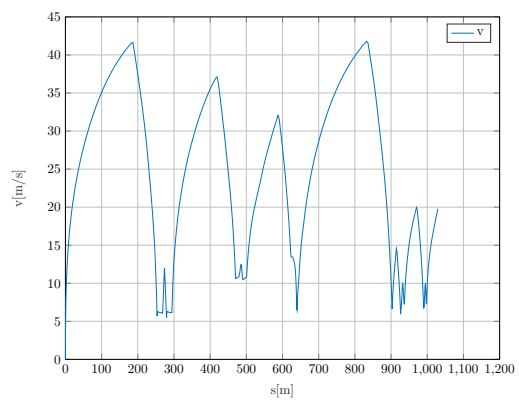


Abbildung 3. Fahrzeuggeschwindigkeit  $v$  über  $s$ .