

# “Projektwettbewerb Einführung in die Regelungstechnik” - Stabilisierung eines Segways auf einer Wippe

Alessio Gaggiano (Kyb 3129632), Shadi Rafe (Kyb 2922872), Truc-Quynh Doan (Kyb 3152793)

## Zusammenfassung

Die folgende Dokumentation beinhaltet die ausführliche Beschreibung unseres Lösungsansatzes und der Ergebnisse der regelungstechnischen Aufgabe “Stabilisierung eines Segways auf einer Wippe”.

## 1. MOTIVATION

Die uns gestellte Regelungsaufgabe verlangte eine Stabilisierung eines Segways auf einer Wippe, die durch ein Feder-Dämpfer-System gelagert wird und mit einem Helligkeitsverlauf versehen ist. Dabei soll das Segway eine Sollposition halten.

## 2. MODELLBESCHREIBUNG

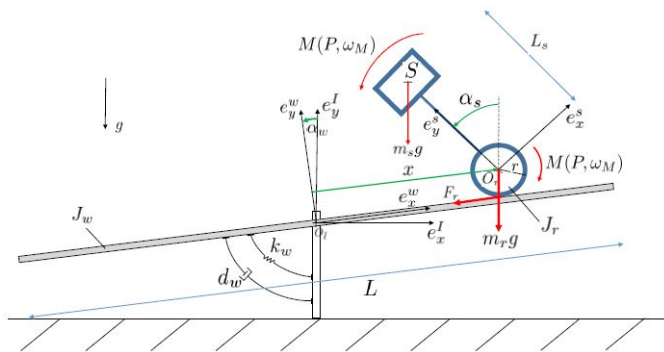


Abbildung 1. Systematischer Aufbau

### 2.1 Wippe

Die Wippe hat eine rechteckige Auflage und ist 1.2m lang und 0.6m breit, auf welcher sich der Roboter vor- und zurückbewegen kann. Da die Bewegungsrichtung des Roboters nur einseitig erfolgt, ergibt sich daraus eine Beschränkung der Strecke von  $[-0.6, 0.6]$ . Die Drehung der Wippe ist auf  $\alpha_w = [-\frac{\pi}{6}, \frac{\pi}{6}]$  beschränkt. Die Mitte der Wippe ist dabei die dunkelste Stelle des Farbverlaufs (vgl. Abb. 2).

### 2.2 Segway

Die Raddrehung des Segways wird ohne Schlupf und ohne Reibung angenommen und der Schwerpunkt der Gesamtmasse ist im Punkt S konzentriert. In der Regelungsaufgabe ist die absolute Drehung des Segways zur Vertikalen auf  $\alpha_s = [-\frac{7\pi}{6}, \frac{7\pi}{6}]$  beschränkt.

### 2.3 Zustandsraum

Mit Hilfe der Lagrange-Gleichungen zweiter Art lässt sich das System mechanisch im Zeitbereich beschreiben und

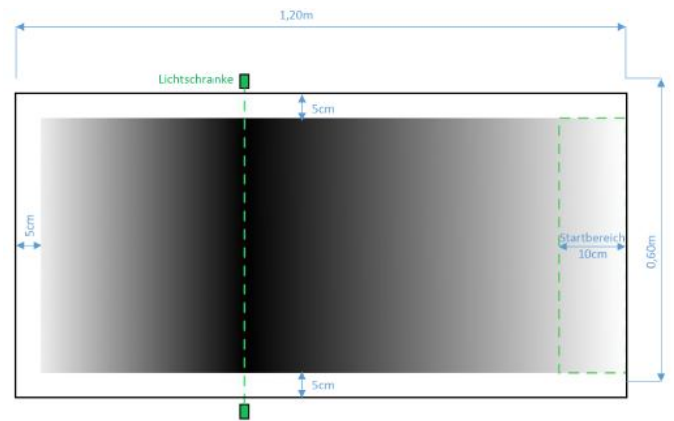


Abbildung 2. Helligkeitsverlauf

daraus ein Zustandsraum herleiten. Dabei hat der Zustandsvektor folgende Form:  $z = [\alpha_w \ \dot{\alpha}_w \ x \ \dot{x} \ \alpha_s \ \dot{\alpha}_s]$

$\alpha_w$ : Winkel

$\dot{\alpha}_w$ : Drehgeschwindigkeit der Wippe

$x$ : Position der Radachse

$\dot{x}$ : Drehgeschwindigkeit des Rades

$\alpha_s$ : absoluter Drehwinkel des Segways zur Vertikalen

$\dot{\alpha}_s$ : absolute Drehgeschwindigkeit des Segways

**Messgrößen** Mittels des Lichtsensors wird die Position der Radachse  $x$  über den Farbverlauf der Wippe gemessen. Der eingebaute Gyroskop misst die absolute Drehgeschwindigkeit  $\dot{\alpha}_s$  des Segways.

**Stellgröße** Die uns zur Verfügung stehende Stellgröße entspricht der elektrischen Motorleistung des Segways. Diese ist auf 3.56 Watt beschränkt. Hier wurde zwischen absoluter und relativer Leistung unterschieden. Mit Hilfe einer gegebenen Motorkennlinie für verschiedene Leistungsstufen ließen sich die Stellgrößenbeschränkungen aus den folgenden Zusammenhang ermitteln.

## 3. LÖSUNGSANSATZ

### 3.1 Linearisierung

Die uns vorliegende Modellierung des Regelsystems ist nichtlinear, daher erlaubte dies uns keine einfache Implementierung einer Regelung nach den uns bekannten

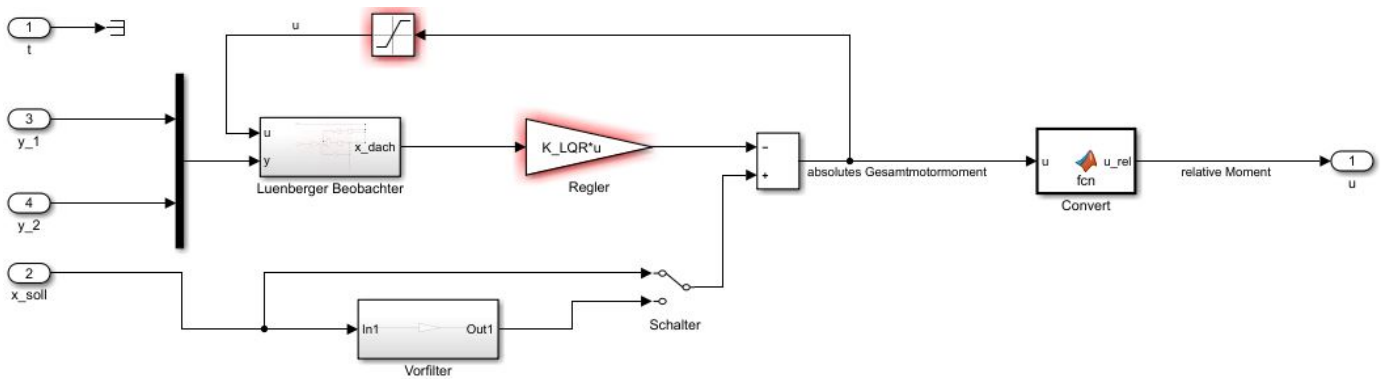


Abbildung 3. Regleraufbau im Simulinkmodell

Methoden der Vorlesung “Einführung in die Regelungstechnik”. Eine Linearisierung des Systems um den stationären Arbeitspunkt war daher nötig. Gegeben waren linearisierte Systemmatrizen, damit Folgefehler vermieden werden konnten.

### 3.2 Stabilität

Wir haben das linearisierte System mittels MATLAB auf Stabilität überprüft. Da alle Eigenwerte negativ waren, ist asymptotische Stabilität garantiert.

### 3.3 Zustandsregler

Da das linearisierte System steuerbar ist, sind die Pole der Strecke mittels eines Regler beliebig vorgebar. Um die optimalen Sollpole zu finden, wurde ein LQR-Regler gewählt, welcher mittels der Gewichtungsmatrizen  $Q$  und  $R$  eingestellt wurde. Durch iteratives Vorgehen haben wir für  $Q$  eine Einheitsmatrix gewählt, was einer gleichstarken Gewichtung der Zustände entspricht.  $R$  wurde auf 1 gesetzt.

### 3.4 Beobachter

Da am eigentlichen System nicht alle Zustände messbar sind, die für die Zustandsregelung mit dem LQR-Regler gebraucht werden, ist die Zuschaltung eines Beobachters nötig. Um diesen zu realisieren muss die Beobachtbarkeit des linearen Systems gewährleistet sein. Diese hat sich durch eine Analyse bestätigt. Hierzu haben wir die Struktur eines Luenberger-Beobachters eingesetzt und parallel zum Regelstreckenmodell geschaltet (vgl. Abb. 3). Für die Wahl der Beobachterpole ist zu beachten, dass sich diese links der Pole des Zustandsreglers befinden, sodass die rekonstruierten Zustände den realen besser folgen. Um das verursachte Rauschen des Beobachters möglichst gering zu halten, dürfen die Pole wiederum nicht zu weit links gesetzt werden (vgl. Abb. 4 und 5). Aufgrund dessen haben wir uns entschieden die Beobachterpole lediglich nur drei Einheiten weiter links der des Zustandsreglers zu setzen, da diese bereits sehr klein waren.

### 3.5 Vorfilter

Aus der Wettbewerbsaufgabe geht hervor, dass das Segway die Wippe nicht nur in der Mitte  $x_{ref} = 0$ , sondern auch

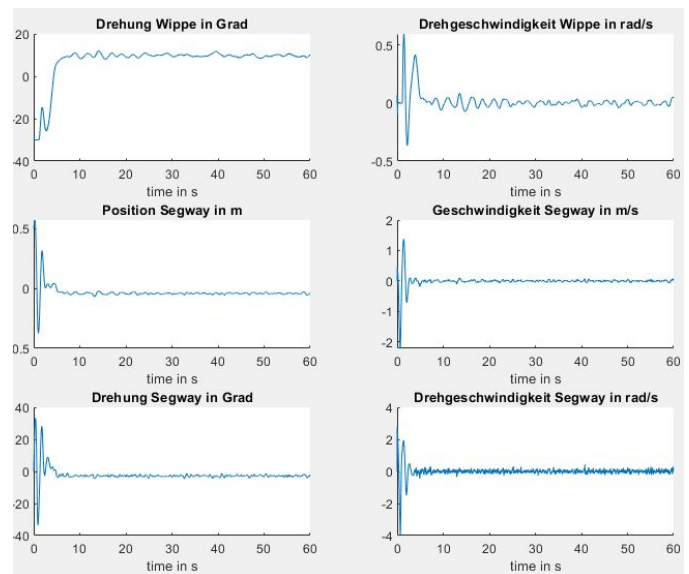


Abbildung 4. Pole um drei Einheiten nach links

für andere Referenzpositionen stabilisieren soll. Wird die Referenzposition  $x_{ref}$  ungleich 0 gewählt, kommt es zu einer bleibenden Regelabweichung. Dieses Problem wurde mit einem Vorfilter gelöst (vgl. Abb. 6 und 7). Wie zu erkennen ist, ist ungeachtet des implementierten Vorfilters, noch eine bleibende Regelabweichung von ca. 0.03 Einheiten festzustellen. Dies scheint sich auf dem Beobachter zurückzuführen, der die Zustände nicht exakt rekonstruieren kann.

## 4. FAZIT

Unsere Ziele:

1. Stabilisierung des Segways um dessen instabilen Ruhelage (damit das Segway nicht umkippt)
  2. Regelung der Position des Segways auf der Wippe (mit der Begrenzung der Dimension der Wippe)
- wurden durch die folgenden Punkte erreicht:

- Mathematische Modellbeschreibung (Herleitung der Bewegungsgleichungen)
- Festlegung von nominellen Parameterwerten und Systemgrößen mit ihren Begrenzungen
- Linearisierung des nichtlinearen mathematischen Modells um die Ruhelage
- Reglerentwurf

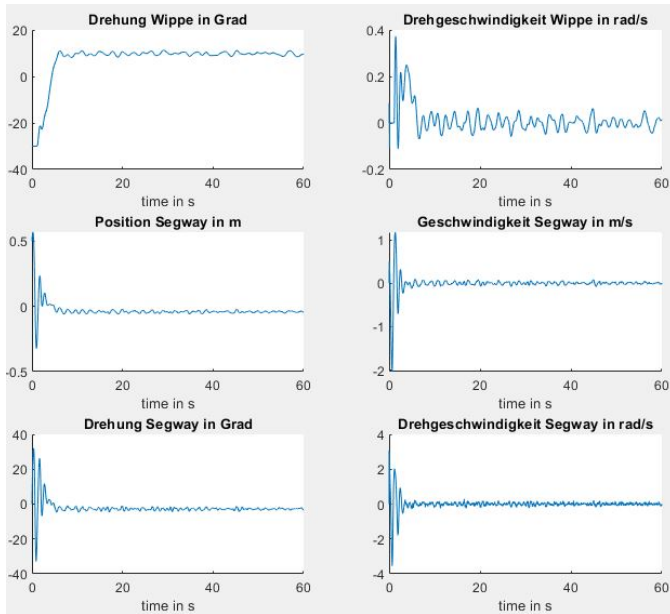


Abbildung 5. Pole um das doppelte nach links

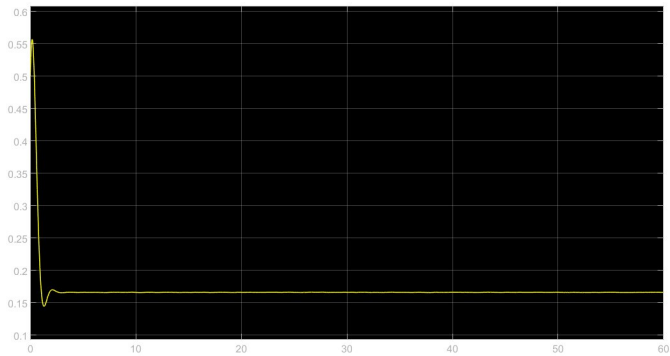


Abbildung 6. Mit Vorfilter

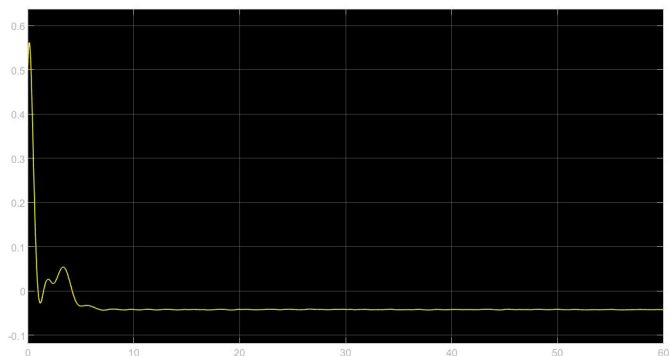


Abbildung 7. Ohne Vorfilter

- Beobachterentwurf
- Implementierung von einem Vorfilter

Sollpositionen werden fast immer erreicht, obwohl diese variiert werden können. Diese kann man im Simulink Modell beliebig eintragen.

Zudem stellte sich heraus, dass durch die Wahl der Anfangsbedingung  $\alpha_s$  auf 0.5 Grad unserer Regler eine bessere Performance zeigt als mit 0 Grad.

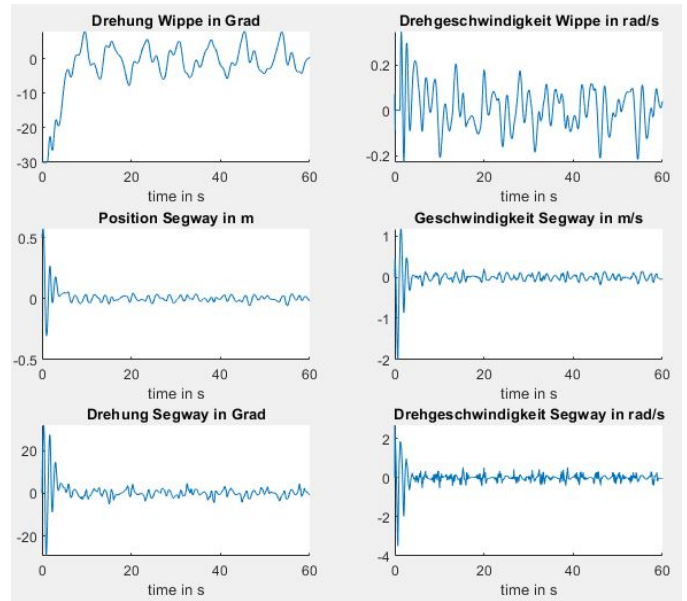


Abbildung 8.  $\alpha_s = 0$

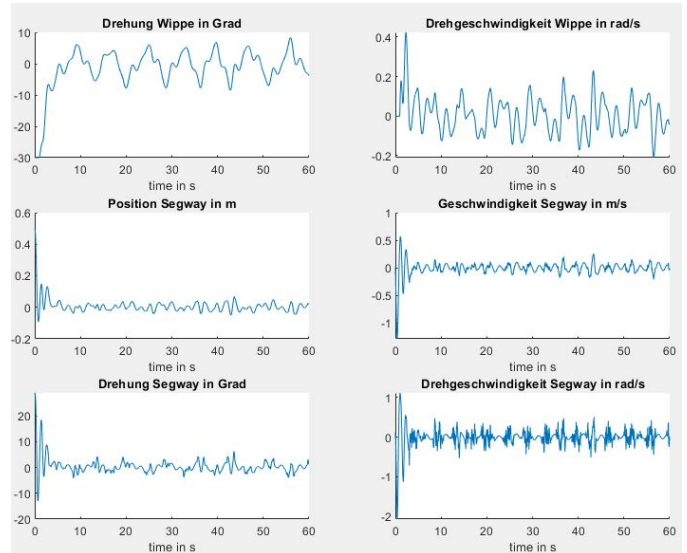


Abbildung 9.  $\alpha_s = 0.5$

## LITERATUR

- Matlab dokumentation, a. URL <http://de.mathworks.com/help/matlab/index.html>.  
 Interaktive tutorials zu matlab und simulink, b. URL [http://www.mathworks.de/academia/student\\_center/tutorials/index.html](http://www.mathworks.de/academia/student_center/tutorials/index.html).  
 Institut fuer Systemtheorie und Regelungstechnik Prof. Dr.-Ing. F. Allgoewer. Handout: Zustandsrekonstruktion mittels beobachter, beobachtbarkeit und separationsprinzip, January 2012. URL <http://www.ist.uni-stuttgart.de/education/courses/ERT/> Uni Stuttgart.  
 Institut fuer Systemtheorie und Regelungstechnik Prof. Dr.-Ing. F. Allgoewer. Handout: Erweiterte regelkreisstrukturen, February 2016. URL <http://www.ist.uni-stuttgart.de/education/courses/ERT/> Uni Stuttgart.

M.Sc. Tim Martin. Projekt- wettbewerb stabilisierung eines segways auf einer wippe, SoSe 2019. Universitaet Stuttgart Institut fuer Systemtheorie und Regelungstechnik.

Martin [SoSe 2019] mat [b] fuer Systemtheorie und Regelungstechnik Prof. Dr.-Ing. F. Allgoewer [2012] fuer Systemtheorie und Regelungstechnik Prof. Dr.-Ing. F. Allgoewer [2016] mat [a]