

# Systemidentifikation eines inversen Pendels

Ali Bibi, Oussema Dhaouadi, Rachid Ellouze  
Mat.nr. 03677539 - 03678727 - 03671114  
Technische Universität München, Deutschland  
{ali.bibi, oussema.dhaouadi, rachid.ellouze}@tum.de

**Zusammenfassung**—Motiviert von der hoch entwickelten Steuerungssystemen im Bereich Robotik und Automatisierung wird ein inverses Pendel vorgestellt. Die Identifikation des inversen Pendels in einem komplexen System ist auf Grund der Nichtlinearität und der Dynamik sehr schwierig. Für die Zwecke der Erklärung der Identifikation eines nichtlinearen dynamischen Systems wird auf ein einfaches inverses Pendel beschränkt. Ein trainiertes neuronales Netzwerk zeigt eine erfolgreiche Modellierung des Systems, das alle komplexe interne Elemente des echten Systems annähert.

## I. REELLES SYSTEM - MODELLBILDUNG [Ag.1]

### A. Systembeschreibung [Ag.1-a]

Ein umgekehrtes Pendel ist eines, bei dem sich der Massenmittelpunkt über seinem Drehpunkt befindet, d.h. wo die Schwerkraft zeigt. Das Hauptziel ist es, das Gleichgewicht bei allen Geschwindigkeiten aufrecht zu erhalten, ohne dass der Benutzer eingreifen muss. Es handelt sich somit um ein geregeltes System, was gegenüber externen unterschiedlichen Störungen unempfindlich, robust und stabil ist.

Eine zweidimensionale Version des inversen Pendelsystems mit einem Wagen wird betrachtet, bei dem das Pendel dazu gezwungen ist, sich in der in der vertikalen Ebene zu bewegen. Bei diesem System ist die Steuereingabe die Kraft  $\vec{F}$ , die den Wagen durch ein Motor horizontal bewegt, und die Ausgaben sind die Winkelposition des Pendels  $\theta$  und die horizontale Position des Wagens  $x$ . Es wird ausschließlich die Winkelposition  $y = \theta$  identifiziert, die das System nimmt, nachdem der Wagen mit einer externen Impulskraft  $u = \vec{F}_{ext}$  gestoßen wird. (Abb. 1) Nachdem bei der differentialen Gleichung des dynamischen

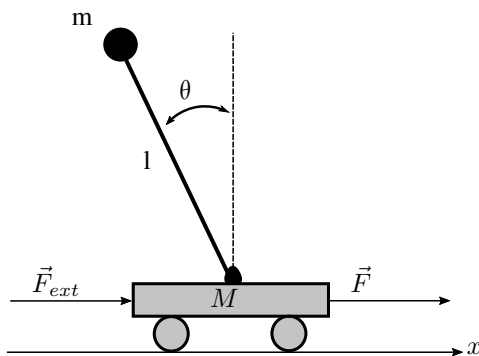


Abbildung 1. Ein inverses Pendelsystem

Systems Nichtlinearitäten auftauchen, ist seine Identifikation von Vorteil.

### B. Anwendungen [Ag.1-b]

Die zahlreichen praktischen Anwendungen des umgekehrten Pendels sind in verschiedenen Bereichen interessant und wichtig. In der Robotik sind hochmoderne Systeme mit umgekehrten Pendeln entwickelt. Diese finden Anwendung im Transport Maschinen, die Objekte ausgleichen müssen oder bei Robotern, die im Haushalt und in der Industrie verwendet werden. Eine berühmteste Anwendung des umgekehrten Pendels ist das Segway (Abb. 2).



Abbildung 2. Der Segway Personal Transporter<sup>1</sup>

### C. Realisierung in Simulink [Ag.1-c]

Das Pendelmodell wird mithilfe der physikalischen Modellierungsblöcke der Simscape-Erweiterung für Simulink erstellt. Die Blöcke in der Simscape-Bibliothek stellen tatsächliche physikalische Komponenten dar. Daher können komplexe dynamische Mehrkörpermodelle erstellt werden, ohne dass mathematische Gleichungen (evtl. schwer darstellbar) auf der Grundlage physikalischer Prinzipien erstellt werden müssen. Abbildung 3 zeigt das physikalische Modell, das das echte geregelte System darstellt. Die physikalischen Größen, die das echte System definieren, sind in der Tabelle I zusammengefasst. Das mit unterschiedlichen Signalen (harmonische Schwingung, Sprungsignal) eingespeiste System zeigt ein stabiles Verhalten der Dynamiken  $\theta$  und  $x$ . Es werden nur die Ausgangsdaten des Winkels  $\theta$  betrachtet. Das Modell ist nun bereit für die Generierung der für die Identifikation notwendigen Messdaten.

## II. BLACKBOX MODELLIERUNG MIT NEURONALEM NETZ [Ag.2]

Da der Signalfluss  $\vec{F}_{ext} \rightarrow \theta$  von nichtlinearen dynamischen Komponenten verarbeitet wird, bildet das System eine

<sup>1</sup>Quelle: <https://shop.segway.com/de-de/11/-ninebot-by-segway-one-e>





Abbildung 7. Kostenfunktion - Trainingsphase

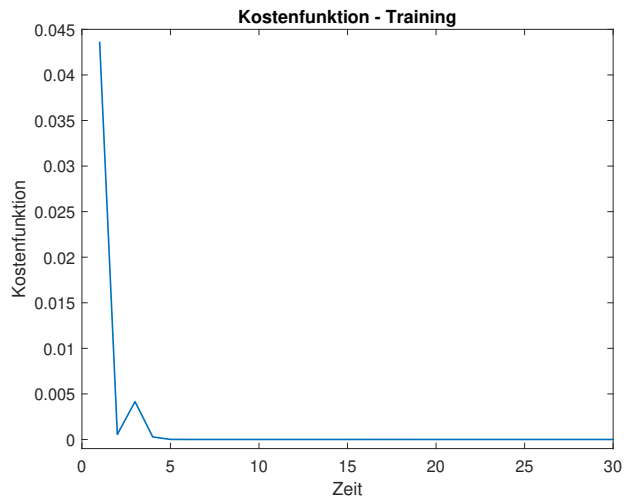


Abbildung 8. Ausgangssystem / Ausgangsmodell - Validierungsphase

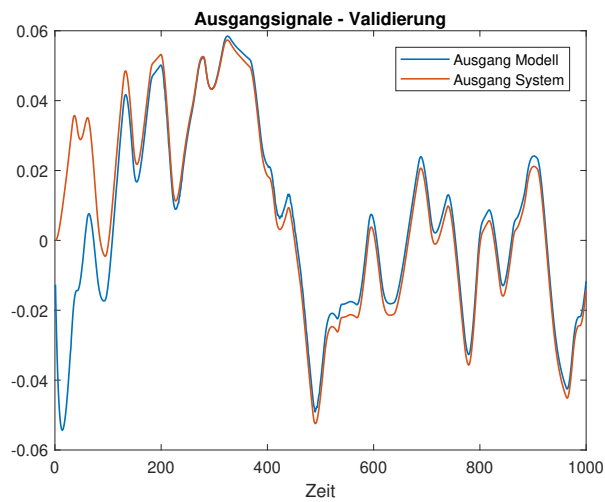


Abbildung 9. Kostenfunktion - Validierungsphase

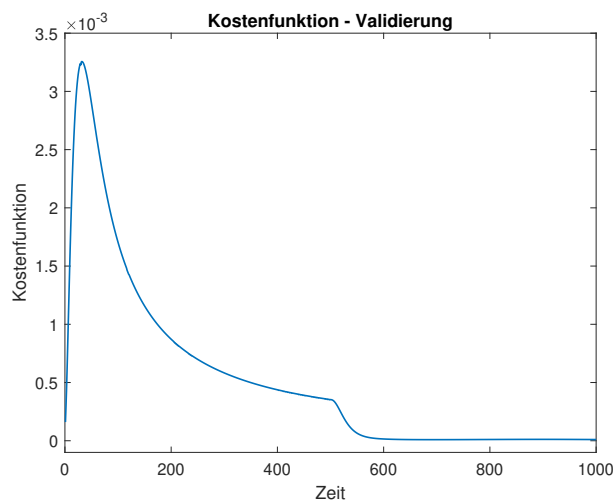
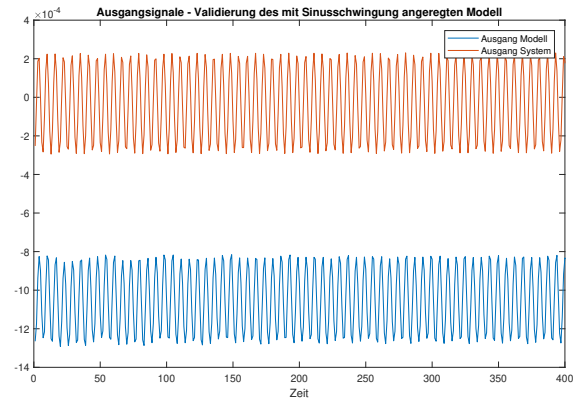


Abbildung 10. Ausgangssystem / Ausgangsmodell - Validierungsphase des mit Sinusschwingung angeregten Modell



zerparameter sind notwendig für eine gute Modellierung. Dank seiner Verzögerungseinheiten (TDLs) ist ein GDNN dazu fähig, eine sehr gute eine Annäherung von einem dynamischen System zu lernen.

## LITERATUR

- [1] Christian Endisch, "Systemidentifikation in der Mechatronik", Technische Hochschule Ingolstadt 2013.