

## ■ Kippen verboten

Ein Segway fällt auch bei ungeübten Fahrern nicht um. Dafür sorgt ein ausgeklügeltes Zusammenspiel von Sensoren, Motoren und Regelungsalgorithmen.

Im Sommer sausen sie wieder vermehrt durch die Städte: Segways, die eigenartigen Zweiradroller. Touristen nutzen sie zur Stadtrundfahrt, sogar Polizisten fahren damit Streife. Dabei überrascht es immer wieder, dass die Vehikel nicht umkippen. Selbst wenn der Pilot zum ersten Mal fährt, steht er wie festgenagelt kerzengerade, und das Beschleunigen und Abbremsen durch Verlagern des Körperschwerpunkts funktioniert problemlos.

Eine ausgefeilte Regelungstechnik ermöglicht es dem Segway, den Fahrer in einer labilen Gleichgewichtslage in der Senkrechten zu halten. Seehunde können das ohne technische Hilfsmittel: Sie balancieren Gegenstände auf ihrer Nase. Die ersten Raumfahrt-Ingenieure lösten eine vergleichbare Aufgabe und entwickelten eine Regelung, damit das Triebwerk beim Start die Nase der Rakete nicht überholt. Heute gibt es sogar Raketen, die wieder aufrecht landen können.

In der Physik ist das Problem als inverses Pendel bekannt (Abb. 1). Dabei ist Gewicht auf einer am Fußpunkt beweglich gelagerten Stange verteilt. Weil das System den Zustand geringster Gesamtenergie anstrebt, droht die Stange ständig wegzukippen. Um das zu verhindern, muss sie verschiebbar gelagert sein, z. B. auf einem motorisierten



Fotolia / Jack E.

Braucht keiner, macht aber Spaß: Der Segway ist das ideale Freizeitvehikel für Stadtrundfahrten oder kurze Ausflüge.

Wagen. Bringen kleinste Störungen das Pendel aus der Ruhelage, lässt sich die Befestigung immer unter dem Schwerpunkt des Pendels halten. Für diese Stabilisierung ist fortwährend eine Regelung nötig.

Das inverse Pendel ist ein Klassiker der Regelungstechnik. Um Störungen auszugleichen, messen Sensoren in schneller Folge die

Abweichung des Systems vom Sollzustand – beim inversen Pendel die Neigung der Stange. Ein Regler berechnet daraus, wie der Aktor – der Motor des Wagens – reagieren muss. Die Steuereinheit treibt ihn entsprechend an. Bei einem geschlossenen Regelkreis setzt der Regler jede gemessene Differenz in eine Aktion um. Beim Segway durchläuft die Steuerung den Regelkreis etwa hundertmal pro Sekunde.

Der Segway Personal Transporter, den Dean Kamen erfunden hat und der seit 2001 in Bedford (USA) produziert wird, besitzt als Sensoren mehrere Gyroskope, die Winkeländerungen messen. Daraus berechnet der Regler die Neigung des Gefährts. Verlagert der Pilot sein Gewicht zum Beschleunigen nach vorn oder zum Bremsen nach hinten, setzt der Segway die Änderungen in Bewegung um – im Gegensatz zum inversen Pendel, das im Idealfall zur Ruhe kommen soll (Abb. 2). Die Elektromotoren in den

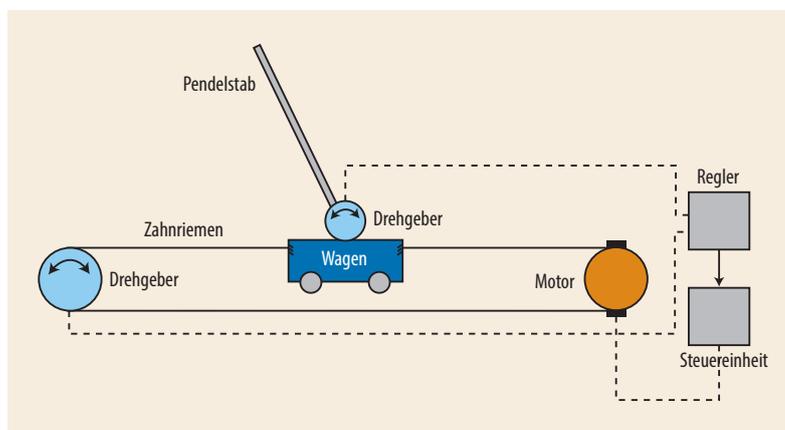


Abb. 1 Um den Pendelstab zu stabilisieren, bewegt sich der Wagen immer so, dass er den Schwerpunkt des Stabes unterstützt. Dazu berechnet ein Regler

aus den Informationen der Drehgeber die erforderliche Bewegung. Eine Steuereinheit treibt den Motor des Wagens entsprechend an.

Rädern des Segways beschleunigen so, dass das Gefährt nicht umkippt: je größer die Neigung, desto höher die Beschleunigung.

### Robust oder agil

Das am häufigsten genutzte Regelungskonzept ist der PID-Regler, wobei das Kürzel für Proportional, Differential und Integral steht. Der Regler wertet die detektierten Abweichungen auf drei Arten aus: Der Proportional-Anteil berücksichtigt die aktuelle Abweichung. Der Differential-Anteil bewertet ihre Änderungsrate, um den weiteren Verlauf zu prognostizieren. Der Integral-Anteil summiert die vergangenen Abweichungen und agiert als „Gedächtnis“ des Reglers.

Die Gewichtung der drei Anteile bestimmt die Dynamik des Systems und das gewünschte Verhalten abhängig vom Neigungsverlauf. Ein agiles System reagiert unmittelbar auf Bewegungen des Piloten und lässt hohe Beschleunigungen zu. Dazu ist der Differential-Anteil stark gewichtet, der Integral-Anteil gering. In der Folge könnte sich der aktuelle Stelleingriff deutlich vom vorherigen unterscheiden, was das System destabilisieren kann. Dagegen machen ein hoher Integral-Anteil und ein geringer Differential-Anteil ein gutmütig-robustes System träge.

Aus Sicherheitsgründen arbeitet ein Segway mit der robusten Variante: Gewicht und Größe des Fahrers oder die Fahrbahnbeschaffenheit beeinflussen die Stabilität nicht. Selbst bei geringem Tempo bringen weder böiger Wind noch

Bordsteinkanten die Regelung außer Tritt.

Auch agilere Regelungsvarianten lassen sich umsetzen. Dazu sollte der Regler des Segways aber genau auf den Fahrer abgestimmt sein und beispielsweise dessen Gewicht und über dessen Größe die Lage des Körperschwerpunkts kennen. Dann kann eine adaptive Regelung, welche diese Systemparameter an die Wahl der Regelungsparameter koppelt, ein stabiles Fahren ermöglichen. Beim Segway haben aber auch die Fahrsituation und die Fahrbahnoberfläche Einfluss auf die Stabilität. Das Fahren auf Kopfsteinpflaster oder über Bordsteinkanten stellt eine Herausforderung dar. Für die technische Umsetzung müsste man ein Gütekriterium definieren, das für die unterschiedlichen Situationen ein Optimum aus Agilität und Stabilität festlegt und sich beim Fahren per Knopfdruck einstellen lässt.

### Zu Fall gebracht

Dass selbst robust geregelte Segways zu überwältigen sind, zeigen Videoclips im Internet, in denen Segway-Piloten unangenehme Bekanntschaft mit dem Asphalt machen. Insbesondere eine Bewegungsabfolge überfordert die Steuerung: starkes Beugen nach vorne, sofort darauf starkes Zurücklehnen und gleich wieder starkes Beugen nach vorne. Die eher träge Regelung versucht vehement, die schnellen Bewegungen auszugleichen, kann ihnen aber nicht folgen. Der Motor bringt nicht genug Kraft auf, um ein ausreichendes Gegenmo-

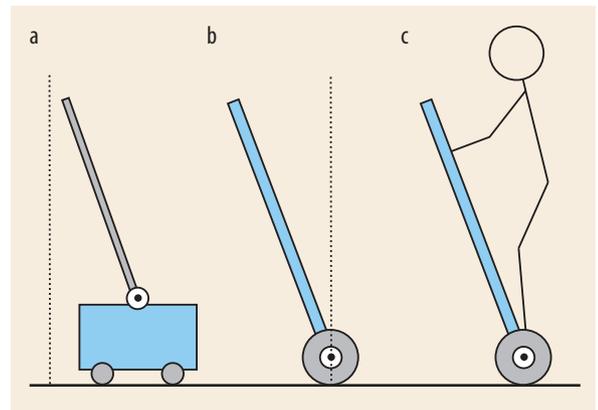


Abb. 2 Die Regelungstechnik des Segways leitet sich vom inversen Pendel ab. Dort bestimmt die Neigung der Stange, in welche Richtung der Wagen fahren muss (a). Beim Segway befinden sich die Antriebe direkt an der Pendelstange in den Rädern (b). Verlagert der Fahrer sein Gewicht, ändert sich die Neigung der Stange. Die Regelung übersetzt das in Fahrbefehle (c).

ment zu erzeugen. Bei der zweiten Vorwärtsbewegung des Körpers ist die Steuerung häufig noch damit beschäftigt, die vorherige Rückwärtsbewegung auszugleichen. Der Motor dreht also in die falsche Richtung: Statt die Lage zu stabilisieren, schaukelt sich der Segway auf und wirft seinen Piloten wie ein bockendes Pferd nach vorn ab.

Um solche Situationen zu vermeiden und auch im Gewimmel der Stadt sicher unterwegs zu sein, schadet es nicht, vor dem ersten Ausflug ein bisschen zu üben.

\*

Ich danke Dr. Moritz Schulze Darup vom Lehrstuhl Regelungstechnik und Systemtheorie der Ruhr-Universität Bochum.

Bernd Müller