

Beispiel 2.21: Radfahren

Das simulationstechnische Modell des Radfahrens wird der Literatur entnommen (EYCKHOFF, 1974), wo es für die Bestimmung der Parameter eines Radfahrer-Modells eingeführt wird (Bild 2.112).

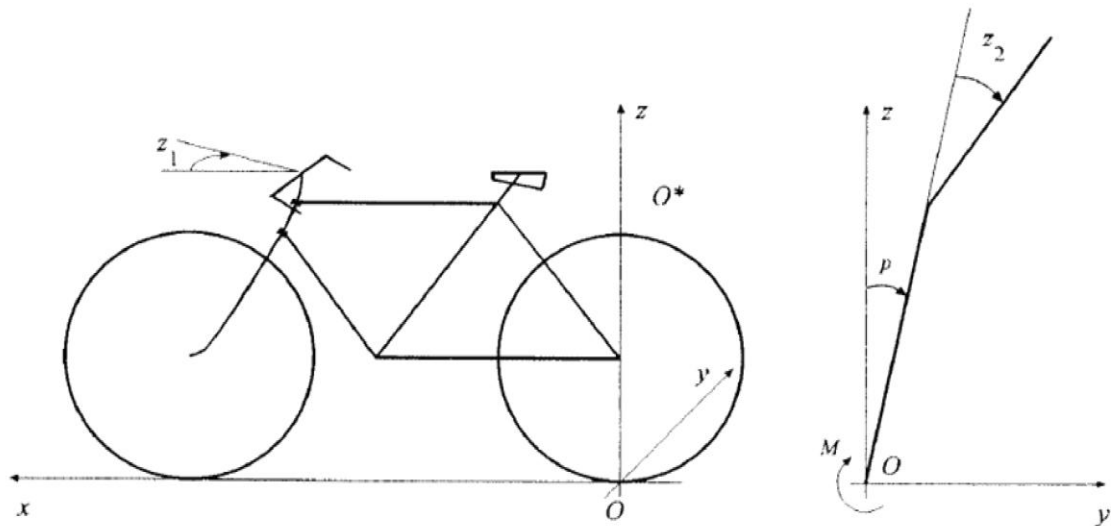


Bild 2.112 Variablen des Radfahrmodells (nach EYCKHOFF, 1974)

Folgende Größen werden verwendet:

- $z_1(t)$: Winkel zwischen Lenker und Fahrradrahmen
- $z_2(t)$: Winkel zwischen oberem Teil des Radfahrerkörpers und Fahrradrahmen
- $p(t)$: Winkel zwischen O - z -Achse und Fahrradrahmen
- J : Trägheitsmoment von Fahrrad und Radfahrer bezüglich der O - x -Achse
- M : statisches Moment von Fahrrad und Radfahrer bezüglich der O - x -Achse
- J^* : Trägheitsmoment des oberen Teils des Radfahrerkörpers bezüglich der O^* - x^* -Achse
- M^* : statisches Moment des oberen Teils des Radfahrerkörpers bezüglich der O^* - x^* -Achse
- c : Abstand der O^* - x^* -Achse von der O - x -Achse
- v : Vorwärtsgeschwindigkeit
- g : Erdbeschleunigung
- A, B : Konstanten

Mit einer Reihe von Vereinfachungen gelangt EYCKHOFF (1974) zu folgender Momentengleichung:

$$A \cdot v \cdot \dot{z}_1(t) + B \cdot v^2 \cdot z_1(t) = J \cdot \ddot{p}(t) - M \cdot g \cdot p(t) + (J^* + c \cdot M^*) \cdot \dot{z}_2(t) - M^* \cdot g \cdot z_2(t)$$

die entsprechend der in Bild 2.113 angegebenen Form in VisSim implementiert wird^{*)}.

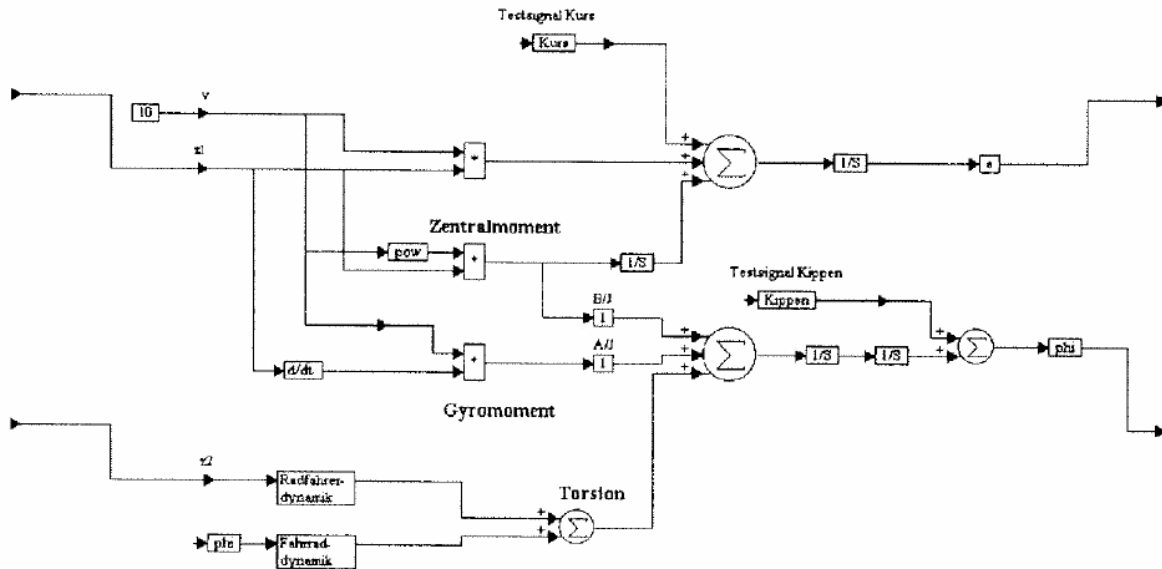


Bild 2.113 Implementierung des Radfahrmodells (nach EYCKHOFF, 1974)

Zu den einzelnen Terme in der Momentengleichung werden folgende Angaben gemacht:

$A \cdot v \cdot \dot{z}_1(t)$	gyroskopisches Moment des Vorderrads
$B \cdot v^2 \cdot z_1(t)$	Zentrifugalmoment bei Kurvenfahrt
$J \cdot \ddot{p}(t) - M \cdot g \cdot p(t)$	Moment bei Auslenkung des Fahrradrahmens und des Radfahrerkörpers von der Gleichgewichtsposition
$(J^* + c \cdot M^*) \cdot \dot{z}_2(t) - M^* \cdot g \cdot z_2(t)$	Moment bei Auslenkung des oberen Teils des Radfahrerkörpers vom Fahrradrahmen

Ziel der Untersuchung ist die Bestimmung von Regelungsstrategien, mit denen das Fahrrad bei konstanter Geschwindigkeit v in aufrechter Position gehalten wird (Stabilisierungsaufgabe). Hierzu wird angenommen, daß die Stabilisierung von den Radfahrern in einer zweischleifigen Regelung bewältigt wird: zum einen durch Lenkbewegungen und zum anderen durch Ausgleichsbewegungen des Oberkörpers. Beide Regelungsschleifen

^{*)} In der betreffenden Literaturstelle ist eine kleine Unstimmigkeit zwischen der angegebenen Gleichung und dem hierauf basierenden Strukturbild. Die hier vorgenommene Implementierung orientiert sich an letzterem.

benutzen die Winkelabweichung $p(t)$ von der aufrechten Position als Eingangsgröße. Als Regelalgorithmus wird jeweils ein PID-Regler mit vorgeschaltetem Totzeitglied

$$z_1(t) = a_{11} \cdot p(t - \tau_1) + \int a_{12} \cdot p(t - \tau_1) \cdot dt + a_{13} \cdot \frac{dp(t - \tau_1)}{dt}$$

$$z_2(t) = a_{21} \cdot p(t - \tau_2) + \int a_{22} \cdot p(t - \tau_2) \cdot dt + a_{23} \cdot \frac{dp(t - \tau_2)}{dt}$$

zugrundeliegt, wobei letzteres das Reaktionsverhalten einschließlich der neuromuskulären Verzögerungen nachbilden soll (JOHANNSEN et al., 1977).

Von EYCKHOFF werden keine Angaben zu den Parametern der Fahrrad- und Radfahrerdyamik gemacht, so daß die Simulationaufgabe zunächst darin bestehen soll, das System Radfahrer-Fahrrad qualitativ nachzubilden. Für den ersten Schritt der Simulation werden alle Parameter des gesamten Systems mit Ausnahme der Reglerparameter 1 gesetzt und untersucht, ob es einen Parametersatz für die beiden Regelalgorithmen gibt, mit dem die Stabilisierung gelingt.

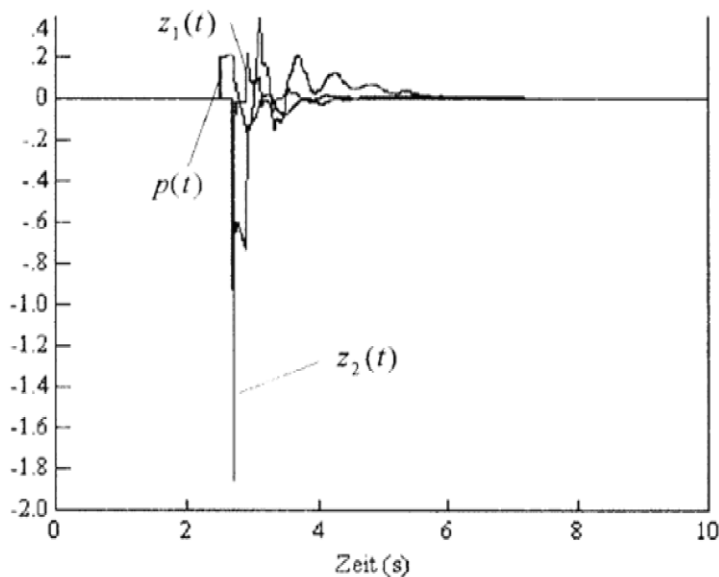


Bild 2.114 Erste Simulationsergebnisse zur Stabilisierung der aufrechten Position des Fahrrades

Hierbei werden die beiden Totzeiten $\tau_1 = \tau_2 = 0,2$ s gesetzt, was einer Art „Naturkonstante“, beispielsweise den typischen Verzögerungszeiten bei visumotorischen Aufgaben, entspricht. Die Reglerparameter werden mit Hilfe des Verfahrens von POWELL (s. Abschnitt 2.3.2.1) so bestimmt, daß das Gütefunktional

$$Q = \int_0^T (p^2(t) + e^2(t)) dt$$

zum Minimum wird, wobei $p(t)$ die Abweichung von der aufrechten Position, $e(t)$ die Kursabweichung (vgl. Bild 2.113) und T die Simulationsdauer bedeuten. Bild 2.114 zeigt erste Simulationsergebnisse, die mit den Reglerparametern $a_{11} = 0,1$, $a_{12} = 0,0001$, $a_{13} = 0,07$, $a_{21} = 2,7$, $a_{22} = 4,5$ und $a_{23} = 0,1$ erzielt werden und die nun diskutiert werden sollen. Dabei wird bei Geradeausfahrt mit einer Geschwindigkeit von $v = 10$ [m/s] eine impulsförmige Störauslenkung aus der aufrechten Position um $0,2$ [rad] $\approx 11^\circ$ als Testsignal gewählt.

Als erstes fällt auf, daß nach dem Störimpuls entsprechend der gewählten Totzeiten korrekterweise zunächst keine Reaktion erfolgt. Nach ca. $0,2$ s ist ein erheblicher Ausschlag des Winkels $z_2(t)$ zwischen Radfahreroberkörper und Fahrradrahmen von fast 110° zu beobachten, der umso befremdlicher erscheinen muß, als diese Bewegung mit einem Impuls eingeleitet wird. Gleichzeitig wird, ebenfalls impulsförmig, ein Lenkwinkel $z_1(t)$ von ca. 55° ausgeführt. Entsprechend den Konventionen der Richtung der geometrischen Größen erfolgt dieser Lenkwinkelausschlag nicht, wie eigentlich zu erwarten wäre, in der Richtung, in die das Fahrrad zu kippen droht, sondern in die entgegengesetzte Richtung. Alles in allem liegt somit ein Modell vor, das in seiner Struktur zwar korrekt sein mag, dessen hier gewählte Parameter jedoch ganz offensichtlich fragwürdig sind.

Es sei ausdrücklich darauf hingewiesen, daß das Modellverhalten bewußt so grotesk gestaltet worden ist, um die Anwendbarkeit der oben genannten heuristischen Regeln der Simulation besser demonstrieren zu können.

◇