

Dynamiksimulation eines Fahrradfahrer-Sturzes

K. Hendel, M. Asch, U. Parsche

*Die Untersuchung des dynamischen Verhaltens technischer und biomechanischer Strukturen kann vorteilhaft mittels Computersimulation auf der Basis mechanischer Mehrkörpermodelle erfolgen. Ein wirkungsvolles Werkzeug zur Dynamiksimulation stellt das am Institut für Mechatronik in Chemnitz entwickelte Programmsystem **alaska** dar. Es wird hier auf ein komplexes System angewendet, das aus einem biomechanischen Menschmodell, einem Fahrradmodell mit Reifenmodul und einem Fuzzy-Regler besteht. Mit diesem Modell können zahlreiche Untersuchungen zur Fahrrad-Dynamik und zur Unfallmechanik durchgeführt werden.*

1 Einleitung

Im vorliegenden Beitrag wird das dynamische Verhalten eines Systems Fahrrad-Fahrradfahrer mittels Computersimulation untersucht. Die Grundlage der Untersuchungen bildet ein Mehrkörpermodell dieses Systems, bestehend aus starren Körpern, reibungsfreien Dreh- und Schubgelenken, geometrischen Zwangsbedingungen sowie inneren und äußeren eingepprägten Kräften und Momenten. Zur Stabilisierung dient ein Fuzzy-Regler, der im Normalfall die aufrechte Fahrt gewährleistet.

Das Menschmodell für den Fahrer besitzt den Freiheitsgrad $n = 33$. Die Arme und Beine sind über Schließgelenke mit dem Lenker bzw. den Pedalen geometrisch gekoppelt. Die Parameter bestimmen sich aus Größe, Geschlecht und Alter des zu betrachtenden Menschen.

Die Eigenschaften der Fahrradreifen bildet ein spezieller Reifenmodul nach, der Kräfte und Momente infolge Schlupf, Sturz und Schräglaufwinkel sowie Reibung berechnet.

Mit dem Gesamtmodell werden zahlreiche mögliche Bewegungsabläufe simuliert. Eine wesentliche Zielsetzung besteht in der Untersuchung der Folgen von Schlageinwirkungen und ähnlichen Störungen auf den Fahrer im Zusammenhang mit dem eventuellen Verlust seiner Steuerfähigkeit. Die durchgeführten Simulationen eignen sich zur Begutachtung von Unfällen mit Fahrradfahrern. Sie können ohne prinzipielle Schwierigkeiten auf Unfälle durch verschiedene Hindernisse oder Zusammenstoß mit Autos usw. erweitert werden.

Als Simulationssoftware zur Untersuchung von Mehrkörpersystemen (MKS) wird das am Institut für Mechatronik in Chemnitz entwickelte Programmsystem **alaska** verwendet.

2 Simulationswerkzeug und Methode

alaska ist ein modernes, modular aufgebautes Programmsystem, das sowohl auf PC unter MS-DOS (ab 386) als auch auf Workstations unter UNIX anwendbar ist (Maißer u.a., 1994). Es ist problemlos portierbar und in CAD-Systeme integrierbar.

Der Anwender wird mittels einer grafischen Oberfläche durch das Programm geführt. Im Preprozessor erfolgt mittels Editor die Beschreibung des mechanischen Modells und gewünschter Resultate. Das Eingabeprogramm prüft diese Daten auf syntaktische und weitgehend auf semantische Richtigkeit.

Nach der Erstellung eines syntaktisch richtigen Eingabedatensatzes kann die Konsistenz der vorgegebenen Anfangslage und der Anfangsgeschwindigkeiten mit den geometrischen und kinematischen Zwangsbedingungen im Preprozessor geprüft und gegebenenfalls automatisch korrigiert werden.

Anschließend werden im Berechnungsteil die nichtlinearen (oder bei Bedarf die linearisierten) Bewegungsgleichungen automatisch generiert und numerisch integriert. Die dabei ermittelten "primären" Ergebnisse (Koordinaten, Geschwindigkeiten, Beschleunigungen) bilden die Grundlage für eine umfassende grafische und tabellarische Resultatausgabe im Postprozessor, insbesondere für die Animation des Bewegungsablaufs und die Darstellung des Funktionsverlaufs zahlreicher mechanischer Größen.

Die Generierung der Bewegungsgleichungen erfolgt vorteilhaft im Lagrange-Formalismus. Die Bewegung eines holonom-skleronomen MKS mit dem Freiheitsgrad n wird beschrieben durch die Bewegung seines repräsentierenden Punktes $q = (q^a) = (q^1, \dots, q^n)$ im n -dimensionalen Konfigurationsraum R^n (q^a : verallgemeinerte Koordinaten).

repräsentierenden Punktes $q = (q^a) = (q^1, \dots, q^n)$ im n -dimensionalen Konfigurationsraum R^n (q^a : verallgemeinerte Koordinaten).

Mit der kinetischen Energie T und den verallgemeinerten Kräften Q_a lauten die Lagrangeschen Bewegungsgleichungen 2. Art

$$\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}^a}\right)' - \frac{\partial T}{\partial q^a} = Q_a \quad (1)$$

wobei $\partial_a, \dot{\partial}_a$ partielle Ableitungen nach verallgemeinerten Koordinaten bzw. Geschwindigkeiten bezeichnen.

Für die kinetische Energie gilt

$$T = \frac{1}{2} g_{ab}(q) \dot{q}^a \dot{q}^b \quad (2)$$

womit die Gleichungen (1) in expliziter Form lauten

$$g_{ab}(q) \ddot{q}^b + \Gamma_{abc}(q) \dot{q}^b \dot{q}^c = Q_a(q, \dot{q}, t) \quad (3)$$

(Es gilt stets die Einsteinsche Summenkonvention.)

Damit sind neben der symmetrischen, positiv definiten Metrik g_{ab} des R^n die Christoffel-Symbole 1. Art Γ_{abc} eingeführt

$$\Gamma_{abc} := \frac{1}{2} (\partial_b g_{ac} + \partial_c g_{ab} - \partial_a g_{bc}) \quad (4)$$

Alle Objekte der Gleichungen (3) können algebraisch, d. h. ableitungsfrei, unter Verwendung sogenannter kinematischer Grundfunktionen generiert werden (Maißer, 1988).

Die linearisierten Gleichungen von (3) folgen aus der Betrachtung einer gestörten Bewegung (Hendel, 1992).

$$q^a(t) = q^a(t) + x^a(t)$$

Existieren in den MKS-Modellen geschlossene kinematische Ketten oder/und kinematisch gesteuerte Größen, müssen zusätzlich geometrische Zwangsbedingungen

$$f^b(q, t) = 0 \quad (5)$$

berücksichtigt werden ($b_1 \leq n$). Die Gleichungen (3) enthalten in diesem Fall neben den verallgemeinerten Kräften auch verallgemeinerte Reaktionen und werden dann gemeinsam mit den Gleichungen (5) gelöst.

3 Mehrkörpermodell des Systems

Zur Beschreibung des Modells in **alaska** wird das System in eine Anzahl meist starrer Körper zerlegt, die über die Parameter Masse, Lage des Massenmittelpunktes und Trägheitsmomente beschrieben werden. Benachbarte Körper sind jeweils durch geeignete Gelenke, z. B. Dreh-, Schub-, Kardan- oder Kugelgelenke geometrisch miteinander verbunden. Bei den sich bildenden kinematischen Ketten sind auch Verzweigungen und geschlossene Strukturen erlaubt. Auf die Körper dürfen äußere eingeprägte Kräfte mit beliebigem Kraftgesetz wirken sowie Kraftkoppellemente, die zwischen Anlenkpunkten zweier Körper oder in Gelenken angeordnet sind. Für die Realisierung geometrischer Kopplungen, die zu geschlossenen kinematischen Schleifen führen, das Einfrieren von Bewegungsmöglichkeiten u. ä. können geometrische Zwangsbedingungen in das Modell aufgenommen werden.

Im vorliegenden Fall werden zunächst ein MKS-Modell für das Fahrrad und ein biomechanisches Menschmodell geschaffen. Beide Modelle ergeben durch geometrische Kopplung über Sattel, Lenker und Pedalen ein Gesamtmodell, das mittels eines stabilisierenden Fuzzy-Reglers für die Simulation von Fahrradfahrten geeignet ist.

3.1 Mehrkörpermodell des Fahrrades

Das Fahrradmodell berücksichtigt 10 elementare Bewegungsmöglichkeiten, die die erforderliche Funktionalität gewährleisten (kinematisches Schema in Bild 1). Neben dem Rahmen mit dem Freiheitsgrad $n = 6$ beinhaltet das Modell Drehbewegungen des Lenkers, der Tretkurbel und der Räder.

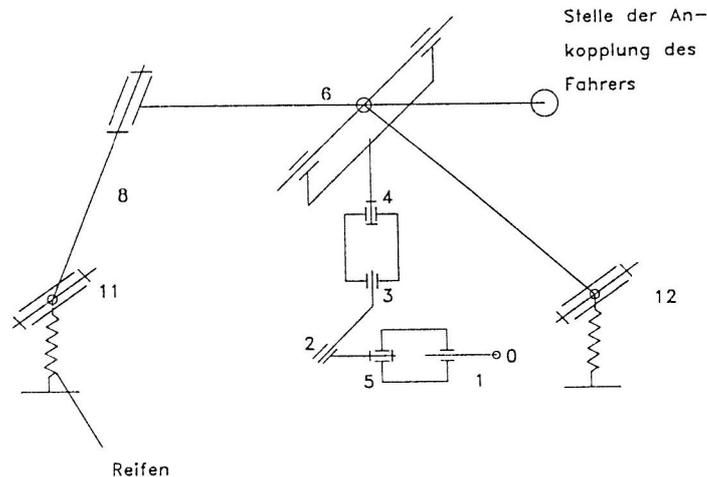


Bild1. Kinematik des Fahrradmodells

Die Fahreigenschaften des Fahrrades werden wesentlich durch die von den Reifen aufgenommenen Kräfte und Momente bestimmt. Der von **alaska** bereitgestellte Reifenmodul berücksichtigt Reifenfederkräfte, Reibkräfte und -momente durch Schlupf, Seitenführungskräfte aus Schräglauf und Radsturz sowie daraus abgeleitete Momente, Rückstellmomente um die Lenkachse und Reibmomente aus Lagerreibung und Rollwiderstand. Die vom Reifenmodul benötigten Kennlinien wurden in Zusammenarbeit mit Reifen- und Fahrradfirmen (Continental AG Korbach, Diamant Chemnitz) bestimmt. Zur Vereinfachung wird die Gabel des Vorderrades wie bei Mountainbikes oder Trekkingrädern gerade modelliert.

3.2 Mehrkörpermodell des Fahrers

Das dem Fahrer zugrunde liegende Menschmodell ist in Abb. 2 dargestellt. Mit der nicht abgebildeten Anbindung des Fahrers über den Sattel ergeben sich 35 elementare Bewegungsmöglichkeiten.

Ausgangspunkt für die Gewinnung der kinematischen und dynamischen Parameter des Fahrers ist ein parametrisierbares Menschmodell (Arui u.a., 1989). Im vorliegenden Fall wurde ein Junge im Alter von 13 Jahren mit einem Gewicht von 68 kg und einer Körpergröße von 1.65 m angenommen. Mit der Sporthochschule Köln erfolgte eine Abstimmung der Daten.

Bei der Modellierung des Fahrers wird auf die Ausführung der Hände und Füße verzichtet. Die Massen und Trägheitsmomente dieser Körperteile sind in den Unterarmen bzw. Unterschenkeln berücksichtigt.

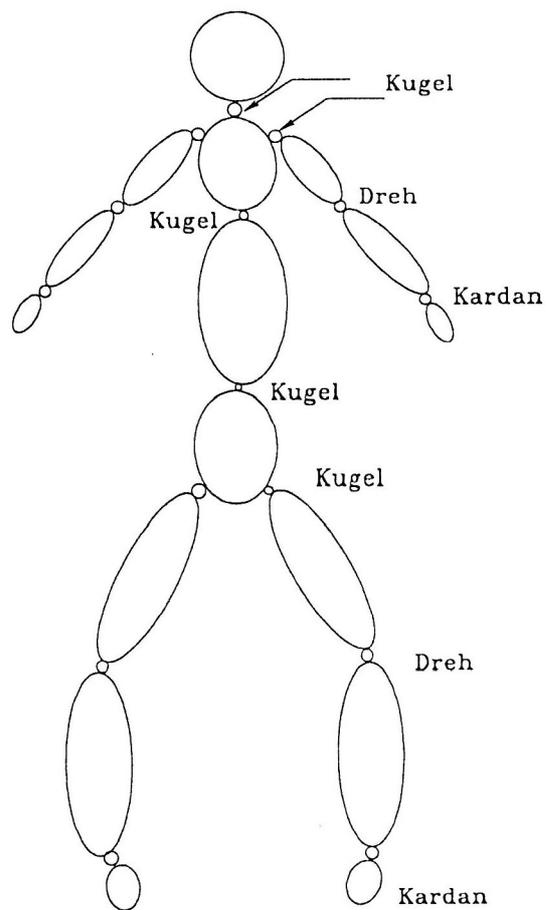


Bild. 2. Kinematik und Topologie des Menschmodells

Elastische Eigenschaften von Knochen bleiben unberücksichtigt. Die Gelenke werden reibungsfrei modelliert. Die Existenz von Gelenkflüssigkeit begründet diese Annahme.

Eine Besonderheit stellen die unterschiedlichen Bewegungseinschränkungen menschlicher Gelenke dar. Das Ellbogengelenk kann sich beispielsweise nur zwischen 0 Grad und 180 Grad bewegen, der Kopf sich nur um bestimmte Winkel drehen usw. Einige der wichtigsten Einschränkungen dieser Art werden im Modell durch spezielle Kraftgesetze mit sogenannten Bistop-Funktionen, die wie zweiseitige Anschläge wirken, realisiert.

3.3 Fuzzy-Regler

Das System Fahrer-Fahrrad ist instabil. Zur Stabilisierung ist ein Regelungsprozeß notwendig, der die aufrechte Fahrt gewährleistet und geschickte Steuerungsmanöver eines Radfahrers simuliert.

Im vorliegenden Modell wird diese Aufgabe einem Fuzzy-Regler übertragen. Bei einem solchen Regler werden die Ein- und Ausgangsgrößen geeigneten Klassen "unscharf" zugeordnet. Die Bestimmung der Ausgangsgröße erfolgt jeweils durch die Auswertung des Zugehörigkeitsgrades der Eingangsgrößen zu festgelegten Klassen mittels geeigneter Regeln. Ein solcher Regler benötigt für seine Entscheidungen nicht die mathematische Beschreibung des Systems und ist für die Lösung der hier vorliegenden Aufgabe gut geeignet.

Als Eingangsgrößen werden die Abweichung des aktuellen Wankwinkels des Fahrrades vom Soll-Wankwinkel und die Abweichungsänderung verwendet. Als Ausgangsgröße wird ein Moment für die Lenkung des Fahrrades berechnet (Parsche, 1993).

3.4 Merkmale des Gesamtmodells

Zunächst wird der Fahrer mit Dreh-/Schubgelenk über den Sattel mit dem Fahrrad verbunden. Außerdem erfolgt über Kardangelenke eine geometrische Kopplung der Unterarme an die Lenkstange und der Unterschenkel an die Pedalen auf der Tretkurbel. Diese Kardangelenke werden zu Schließgelenken erklärt und erzeugen somit geschlossene kinematische Ketten.

Das Fahrrad bewegt sich durch eine vorgegebene Anfangsgeschwindigkeit und durch Antriebe auf die Tretkurbel und das Hinterrad. Der Antrieb des Hinterrades wird eingeschaltet, wenn die Geschwindigkeit der Tretkurbel unter Berücksichtigung der Übersetzung die des Hinterrades übersteigt. Durch die Kopplung der Unterschenkel des Fahrers an die Pedalen kann die Tretbewegung realistisch nachgebildet werden.

Zur Vereinfachung des Modells und zur Rechenzeitverkürzung wurden zeitweise einige Gelenke "eingefroren", d. h. durch kinematischen Zwang ihrer Beweglichkeit beraubt. Die Funktionalität des Gesamtmodells leidet dadurch nicht.

Eine Besonderheit stellt die Berücksichtigung von sogenannten Schwabbelmassen am Oberrumpf dar. Über Schubgelenke sind zusätzliche verschiebbare Massen angeordnet, die sich bei starken Beschleunigungen gegenüber dem Knochengestüt bewegen.

4 Ergebnisse

Das Gesamtmodell diente als Basis für zahlreiche Simulationen. Ausgehend von einem realen Unfall, dessen Rekonstruktion das Ziel der Forschungsarbeiten darstellte, wurden neben der Geradeausfahrt die Wirkung unterschiedlich starker Störungen und auftretende Sturzvarianten untersucht (Hendel, 1994). Mit Hilfe des Simulationsprogramms alaska können nach der Berechnung eines dynamischen Ablaufs alle interessierenden Resultate ausgegeben werden, so daß eine spezifische, aufgabenbezogene Auswertung erfolgt.

4.1 Geradeausfahrt

Mit der Geradeausfahrt wird der Nachweis der Funktionsfähigkeit des Modells erbracht. Es wurden verschiedene Anfangsgeschwindigkeiten sowie verschiedene Anfangswankwinkel für die Testung des Fuzzy-Reglers gewählt.

Der Radfahrer fährt in diesen Simulationen auf ebenem Weg. Seine Anfangsgeschwindigkeit erhöht sich durch ständiges Treten. Der Fuzzy-Regler sichert die aufrechte Fahrt und stabilisiert sie durch geeignete zustandsabhängige Lenkmomente.

Durch das Treten des Fahrers ergeben sich periodische Schwankungen u. a. des Wankwinkels $Q(5)$ und des Lenkwinkels $Q(7)$ (Abb. 3). Die leichte Zunahme der Amplituden und der Komplexität der Formen für diese Schwankungen sind mit der Erhöhung der Geschwindigkeit $QP(1)$ verbunden und eventuell auf eine noch nicht optimale periodische Antriebsfunktion für die Tretbewegung zurückzuführen.

Diese Simulationen können bis zu einer Prozeßzeit von 60 s ausgedehnt werden.

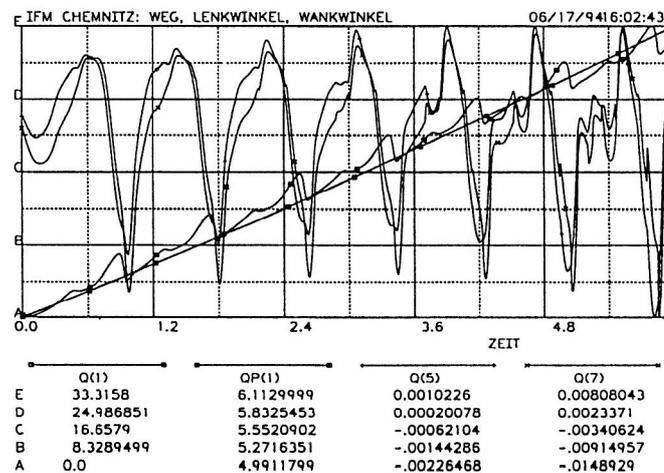


Bild 3. Weg, Geschwindigkeit, Wank- und Lenkwinkel

4.2 Gestörte Fahrt

Störungen können verschiedene Ursachen haben, beispielsweise das Abrutschen eines Fußes von der Pedale, eine plötzliche Windböe oder eine Schlageinwirkung.

Die Kraftfunktion für die Modellierung der Störungen lautet jeweils

$$F = Ke^{-p(t-t_0)^2} \quad (6)$$

Mit den Konstanten K und p können die Amplitude und die Breite ("Härte") der Kraftfunktion bestimmt werden.

In allen Simulationen erfolgt zunächst eine normale Geradeausfahrt mit dem Treten des Fahrers, ehe nach einer Prozeßzeit von 1.1 s die störende Kraftfunktion eingepreßt und der Tretvorgang beendet wird. Der Angriffspunkt der Kraft befindet sich am Kopf.

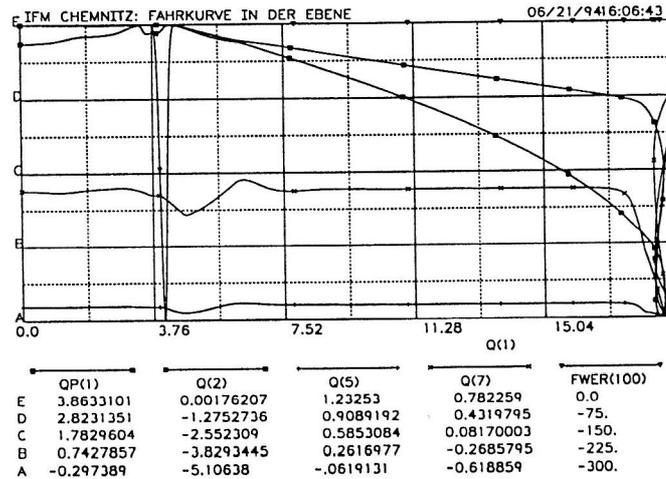


Bild 4. Ergebnisse einer gestörten Fahrt ohne Bewußtseinsverlust des Fahrers

4.2.1 Ausbalancieren der Störung

In zahlreichen Computersimulationen werden die wesentlichen Parameter der Störung variiert. Der Parameter p aus Gleichung (6) differierte von $p = 50$ ("weiche" Störung) bis $p = 800$ ("harte" Störung). Außerdem werden die Stärke der Störung, die von $K = 100$ N bis $K = 700$ N schwankt, die Richtung der störenden Kraft und die Geschwindigkeit des Fahrrades variiert.

Für die erste Gruppe von Simulationen bestand darüber hinaus die Voraussetzung, daß der Fahrer trotz der Störung seine Steuerfähigkeit behält und versucht, durch Lenkmanöver die Wirkung der störenden Kraft auszugleichen und das Fahrrad zu stabilisieren.

Es zeigt sich, daß es dem Fahrer bei harten Schlägen immer gelingt, nach kurzer Zeit die Fahrt zu stabilisieren. Erst nach einem angenommenen Ausrollen würde er bei sehr langsamer Geschwindigkeit stürzen (Bild 4). (In dieser Darstellung ist auch die seitliche Entfernung zur ursprünglichen Fahrtrichtung $Q(2)$ angegeben.)

Im Falle relativ weicher Schläge ($p = 50$) genügt dagegen schon eine Amplitude von $K = 200$ N für eine Destabilisierung (Bild 5), während er bei $K = 100$ N noch ausbalancieren kann (Bild 6).

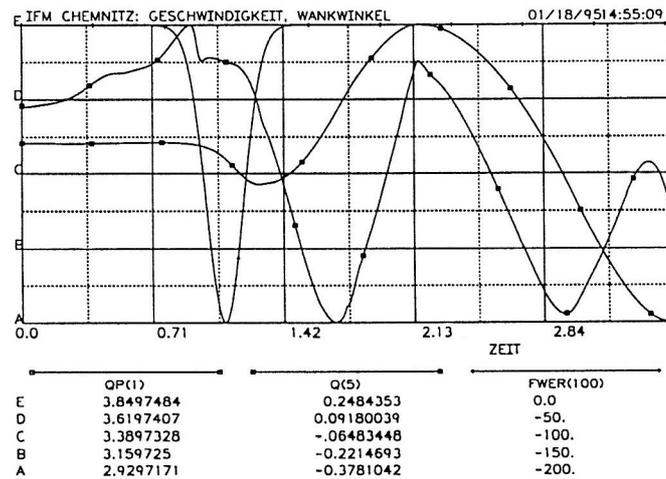


Bild 5. Geschwindigkeit und Wankwinkel während einer gestörten Fahrt (weicher Schlag mit einer Amplitude von 200 N)

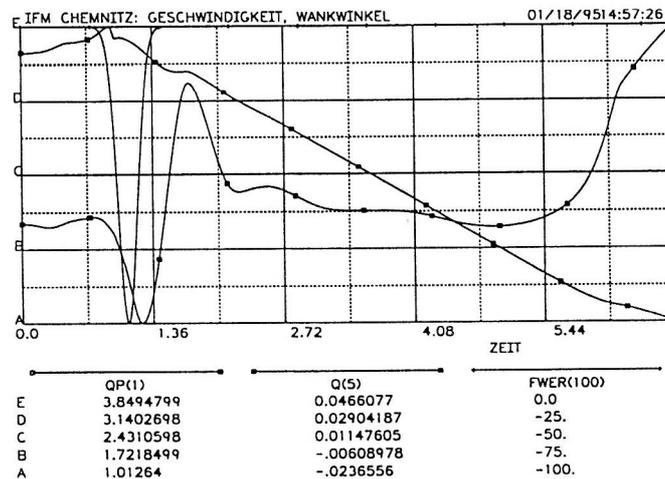


Bild 6. Geschwindigkeit und Wankwinkel während einer gestörten Fahrt (weicher Schlag mit einer Amplitude von 100 N)

4.2.2 Sturz nach Störung

Im Gegensatz zum vorherigen Punkt wird nun vorausgesetzt, daß der Fahrer kurze Zeit nach der Störung (dem Schlag) sein Bewußtsein und damit seine Steuerfähigkeit infolge der Störung verliert.

In diesem Fall ergibt sich ein Bewegungsablauf, der qualitativ einem realen Unfallgeschehen entspricht, das hier im wesentlichen zu untersuchen war. Der Fahrer erhält einen Schlag von links und versucht, den dadurch drohenden Sturz nach rechts durch eine spontane Lenkbewegung nach rechts zu verhindern. Weitere Reaktionen des Fahrers erfolgen wegen der eintretenden Steuerunfähigkeit nicht und er stürzt infolge der Wirkung von Zentrifugalkräften nach links.

Dieser prinzipielle Bewegungsablauf wurde in Abhängigkeit von der Schlagstärke, der Schlagrichtung und der Fahrradgeschwindigkeit bezüglich wichtiger Beobachtungsgrößen untersucht. Tabelle 1 zeigt einen Auszug von Resultaten.

Schlagstärke [N]	300	400	500	600	700
zurückgelegter Weg vom Schlag bis zum Sturz [m]	5.9	6.6	6.9	9.7	7.9
seitliche Entfernung des Sturzortes vom Weg [m]	-1.3	-1.7	-2.3	-3.6	-2.9
Wankwinkel infolge des Schlages [rad]	-0.03	-0.05	-0.08	-0.11	-0.14
Lenkwinkel infolge der Störung [rad]	-0.087	-0.096	-0.109	-0.109	-0.113
Geschw. des Fahrerkopfes beim Aufprall [m/s]	-5.8	-5.8			-4.9
Beschl. des Fahrerkopfes beim Aufprall [m/s ²]	-13.9	-14.0			-13.8

Tabelle 1. Einzeldaten ausgewählter Versuche

In Bild 7 sind einige Bilder aus der Animation des Sturzes zusammengestellt.

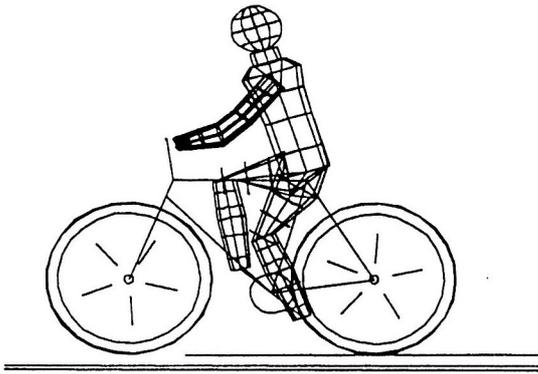
5 Zusammenfassung

Für die Dynamiksimulation eines Radfahrers in verschiedenen Fahrsituationen ist ein Mehrkörpermodell in Verbindung mit einem Fuzzy-Regler gut geeignet. Damit ist vor allem ein wichtiges Werkzeug für die Begutachtung und Rekonstruktion von Unfällen mit Fahrrädern gegeben.

Das Fahrradmodell hat den Freiheitsgrad $n = 10$ und ist mit einem Reifenmodul ausgestattet. Die Modellierung des Menschen mit 13 Körpern berücksichtigt sogenannte Schwabbelmassen und die Bewegungseinschränkungen der menschlichen Gelenke.

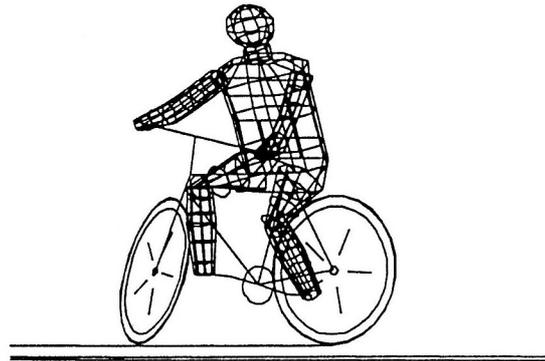
Das am Institut für Mechatronik entwickelte Mehrkörpersimulationsprogramm **alaska** erwies sich als ein wirkungsvolles Werkzeug, auch für die Untersuchung weiterer Probleme der Unfallmechanik, wie z. B. von Crash-Vorgängen mit PKW (Härtel, 1992). Zukünftige Untersuchungen von Unfällen, auch unter Beteiligung von Fußgängern und von anderen Fahrzeugen, stellen kein grundsätzliches Problem dar.

$T = 0.700$



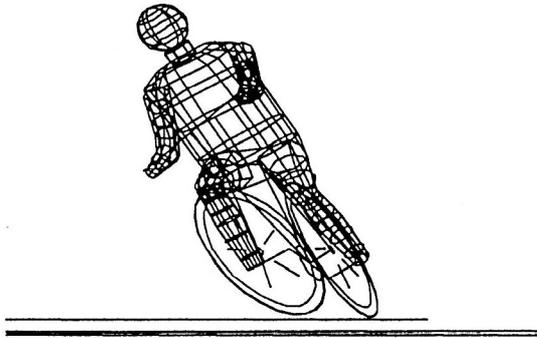
a)

$T = 7.450$



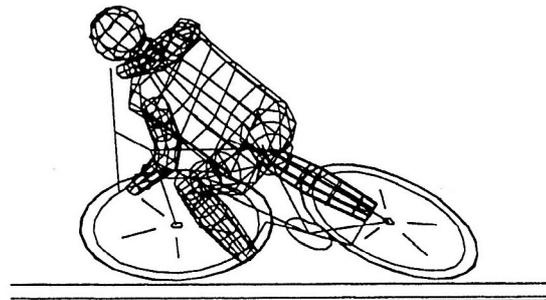
b)

$T = 9.950$



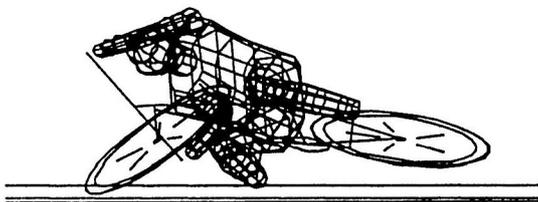
c)

$T = 10.200$



d)

$T = 10.400$



e)

Bild 7. Szenen des Fahrradunfalls

Literatur

1. Aruin, A. S.; Saziorski, W. M.: Ergonomische Biomechanik (russ.). Maschinenbau, Moskau, 1989.
2. Härtel, T.: Insassendynamik bei Offset-Crash von Automobilen. Diplomarbeit, Institut für Mechatronik, Chemnitz, 1992.
3. Hendel, K.: Qualitative und quantitative Untersuchungen der Dynamik von Mehrkörpersystemen mittels Störungsgleichungen und 1. Integralen. Dissertation, Uni Leipzig, Verlag Hänsel-Hohenhausen, Mikroedition, ISBN 3-89349-688-2, (1992).
4. Hendel, K.: Gutachten - Rechnerische Simulation von Bewegungsabläufen im Zusammenhang mit der Todesermittlung xxx. Institut für Mechatronik, Chemnitz, 1994.
5. Maißer, P.: Analytische Dynamik von Mehrkörpersystemen. ZAMM 68 (1988) 10, S. 462-481.
6. Maißer, P. u.a.: **alaska** 2.1 - Software zur Simulation der Dynamik von Mehrkörpersystemen. Benutzerhandbuch, Institut für Mechatronik, Chemnitz, 1994.
7. Parsche, U.: FUZZY-Regelung in der Mehrkörperdynamik. Praktikumsbericht, Institut für Mechatronik, 1993.

Anschrift: Dr. Klaus Hendel, Dipl.-Ing. Marcus Asch, Dipl.-Ing. Uwe Parsche, Institut für Mechatronik e. V. an der TU Chemnitz, Reichenhainer Straße 88, 09126 Chemnitz.