

Michael Rohm\*, Karl-Heinz Schimmelpfennig\*\*

## Einfluß der Bewegungsgeschwindigkeit beim Pkw-Fußgänger-Unfall

### Zusammenfassung

In Zusammenarbeit mit dem Institut für Kraftfahrwesen Hannover (IKH) wurden Pkw-Fußgänger-Unfälle simuliert, bei denen die Bewegungsgeschwindigkeit des Fußgängers durchgehend von Gehen (ca. 6 km/h) bis Rennen (ca. 18 km/h) nachgestellt werden konnte. Die verwendete Versuchsanlage erlaubte nicht nur eine Variation der Bewegungsgeschwindigkeit des Fußgängers, sondern auch eine Untersuchung der bewegungsspezifischen Körperhaltung. Als weiterer wichtiger Parameter ist der Kollisionspunkt an der Pkw-Front gewählt worden. Der Schwerpunkt im experimentellen Teil wurde auf die Querswurfweite und den Beulenversatz am Fahrzeug gelegt, um anhand dieser Parameter im realen Unfall die Bewegungsgeschwindigkeit eines Fußgängers rekonstruieren zu können.

Im Vorfeld der Versuchsreihe wurde ein zweidimensionales mathematisches Ersatzmodell für die Stoßphase erstellt. Ein hieraus entwickeltes Programm konnte die Querswurfweite unter Zugrundelegung der Stoßhypothese für den zentralen Stoß berechnen. Über eine spätere Validierung des Ersatzmodells war es möglich, Bewegungsgeschwindigkeiten von realen Unfallgeschehen zu berechnen.

Bezüglich der Rekonstruktion für die Bewegungsgeschwindigkeit ist es mit der verwendeten Versuchskonstellation gelungen, für Pkw-Geschwindigkeiten unter ca. 45 km/h einen Rückschluß auf die Fußgänger-Geschwindigkeit zu ziehen. Für Pkw-Geschwindigkeiten größer ca. 45 km/h ist der durch den Pkw eingebrachte Impuls zu dominierend, um eine eindeutige Rekonstruktion zu ermöglichen.

### Summary

In several experiments the impact of a car on a pedestrian was simulated. The experimental setup allowed for variation of the »pedestrian« walking speed between walking (6 km/h) and running (18 km/h). Furthermore the posture of the anthropomorphic test device (ATD) was changed depending on the walking speed.

As another important parameter the point of first contact on the car front could be chosen. In the experimental part the priority was set on the projection distance in transverse direction and the indentation distance to allow in real accidents the reconstruction from the walking speed of the pedestrian. Before the series of experiments started, a mathematical model for the impact between pedestrian and car was programmed to draw conclusions for several other real accidents.

For a car speed below approximately 45 km/h it is possible to draw a conclusion on the pedestrian-speed, with a speed higher than approximately 45 km/h the impuls of the car is too strong to allow a definite reconstruction.

## 1 Einleitung

In der forensischen Praxis ist die Rekonstruktion von Fußgängerunfällen in den Fällen relativ unproblematisch, bei denen neben den Endlagen von Fußgänger und Fahrzeug auch der Kollisionsort bekannt ist und lediglich die Kollisionsgeschwindigkeit des Pkw erarbeitet werden muß. Als erster wichtiger Parameter für die Erarbeitung der Fahrzeuggeschwindigkeit ist die Wurfweite des erfaßten Fußgängers in Längsrichtung zu nennen.

Der Zusammenhang zwischen Fahrzeuggeschwindigkeit und Längswurfweite des Fußgängers ist in den 70er und 80er Jahren durch die Dokumentation zahlreicher realer Unfälle und Simulationsversuche ausreichend genau erarbeitet worden [1, 3, 3, 4].

Auch über die Querswurfweite, die ein Maß für die Bewegungsgeschwindigkeit des Fußgängers darstellt, hat es Studien und Untersuchungen in dieser Zeit gegeben, wobei jedoch der Zusammenhang zwischen der Fußgängergeschwindigkeit und der von der Geschwindigkeit abhängigen Körperhaltung, relativ grob behandelt worden ist.

Als zweiter wichtiger Parameter, vor allem für die Rekonstruktion der Gehrung, steht der Beulenversatz am Pkw zur Verfügung, dessen Abhängigkeit von der Bewegungsgeschwindigkeit ebenfalls noch nicht ausführlich untersucht wurde.

Die vorliegende Arbeit versucht, mit der Wurfrichtung des Fußgängers

\*Dipl.-Ing. Michael Rohm, Sachverständiger im Ing.-Büro Schimmelpfennig + Becke

\*\*Dipl.-Ing. Karl-Heinz Schimmelpfennig, öffentlich bestellter und vereidigter Sachverständiger für Straßenverkehrsunfälle; Lehrbeauftragter an der Universität Hannover Münsterstraße 101, 48076 Münster-Wolbeck

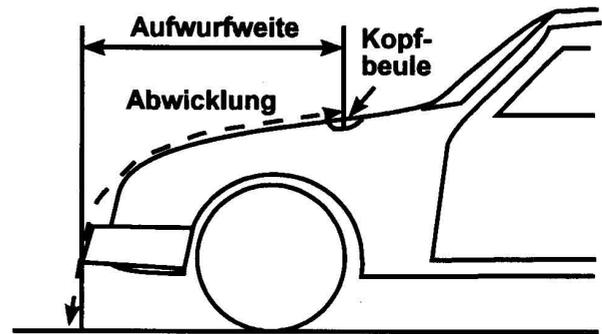


Bild 1 Definition von Abwicklungslänge und Aufwurfweite  
Fig. 1 Definition of throwing-up distance

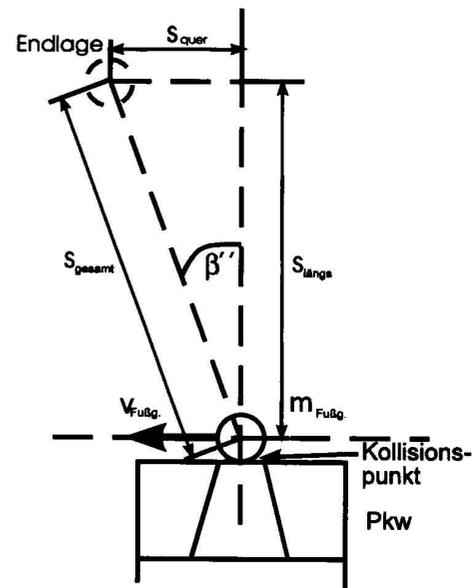


Bild 2 Definition von Längs- und Querswurfweite  
Fig. 2 Definition of projection distances

in Querrichtung und dem Beulenversatz am Fahrzeug die Bewegungsgeschwindigkeit des Fußgängers ausreichend genau zu rekonstruieren. Besonderer Wert wurde im experimentellen Teil darauf gelegt, die verschiedenen Bewegungsgeschwindigkeiten bis hin zum Rennen und die damit verbundene Körperhaltung nachzustellen. Dem experimentellen Teil wurde ein Simulationsmodell vorausgeschickt, mit dem die Querswurfweite zweidimensional berechnet wird.

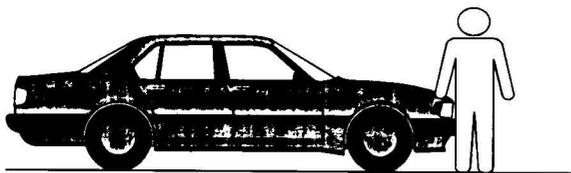
## 2 Kinematik und Dynamik des Pkw-Fußgänger-Unfalls

Der Bewegungsablauf eines Pkw-Fußgänger-Unfalls gliedert sich in zwei Kollisionsphasen. Der *Primärstoß* ist der Aufprall auf das Fahrzeug, und der *Sekundärstoß* beschreibt den Aufprall auf die Straße. Der *Primärstoß* gliedert sich in drei Teilstöße und dauert etwa 0,1 – 0,3 s.

Die erste Berührung zwischen Fußgänger und Pkw findet in der Regel mit dem Stoßfänger statt. Hierbei wirkt auf den Fußgänger sowohl eine rotatorische als auch eine translatorische Kraftkomponente ein. Je weiter der Anstoßpunkt von dem Schwerpunkt des Fußgängers entfernt liegt, desto höher ist der Anteil der rotatorischen Kraftkomponente.

Unmittelbar anschließend erfolgt der Beckenanprall gegen die Haubenvorderkante, wodurch abhängig von der Geometriepaarung die translatorische Kraftkomponente unterstützt wird und eine je nach Anstoßgeschwindigkeit unterschiedliche Verformung der Fronthaube stattfindet. Die dritte Berührung findet auf der Haube oder, bei höheren Anstoßgeschwindigkeiten, direkt an der Windschutzscheibe statt. Hierbei wirkt hauptsächlich eine translatorische Kraftkomponente auf den Fußgänger [5].

Teilstoß a



Teilstoß b

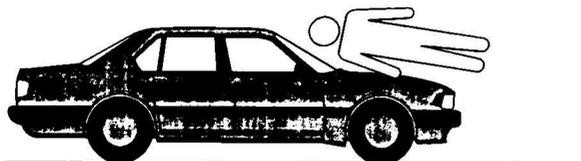


Bild 3 Aufteilung des Primärstoßes in Teilstoß A und B  
Fig. 3 Distribution from the first impact in part A and B

Bewegungsrichtung  
Fußgänger

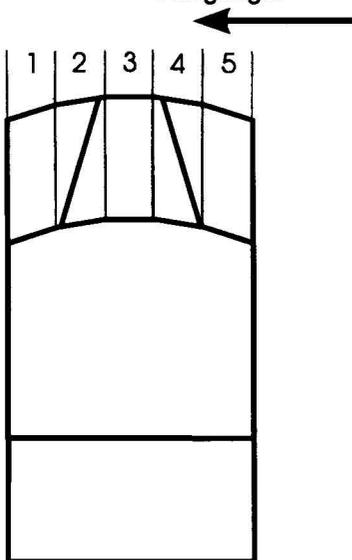


Bild 4 Aufteilung der Front in fünf Kollisionsektoren  
Fig. 4 Distribution of car front into 5 sectors

In der Literatur hat sich für diese drei Teilstöße der Begriff »Aufschöpfvorgang« eingebürgert. Der zur Längsachse des Pkw gemessene Abstand bis zum Aufschlag während der dritten Berührung wird als Abwicklung bezeichnet, der horizontale Anteil als Aufwurfweite (Bild 1). Überlagert werden die translatorischen und rotatorischen Anstoßkomponenten durch eine Drehung um die Hochachse des Fußgängers. Hierbei kommt es zu einem Schleudern der Extremitäten, das ebenfalls beulenursächlich sein kann.

Durch die in den meisten Fällen eingeleitete Vollbremsung lösen sich Fußgänger und Pkw wieder voneinander und es kommt zu dem Sekundärstoß des Fußgängers auf der Straße, der jedoch nicht so verletzungsträchtig wie der Primärstoß ist [6]. Resultierend hieraus kommt dann der Fußgänger im Normalfall, aufgrund einer geringeren Rutschverzögerung, vor dem Pkw zum Liegen.

Fehlt der Bremsvorgang während der Kollisionsphase, kann es zu einem Unter- oder Überfahren des Fußgängers kommen. In der Literatur ist der Hinweis zu finden, daß für den Fall des Unterfahrens die Längswurfweite annähernd identisch mit der beim gebremsten Anstoß ist, unabhängig davon, wo der Pkw zum Stillstand gekommen ist [1]. Die Endlage des Fußgängers läßt sich in Abhängigkeit von bekannter Kollisionsstelle durch Längs- und Querswurfweite beschreiben (Bild 2).

Die Unterfahrproblematik im Hochgeschwindigkeitsbereich wird demnächst in einer gesonderten Veröffentlichung behandelt.

3 Berechnung der Querswurfweite

Erstes Axiom für das mathematische Modell ist die Annahme eines nahezu vollplastischen Stoßes, welcher sich in Versuchen mit Leichen als Näherung herausgestellt hat [6, 7]. Weiterhin wurde versucht, die vorhandene komplexe Bewegung auf ein zweidimensionales Problem zu reduzieren. Diese Vereinfachung mag etwas grob klingen, jedoch geht es im Ersatzmodell darum, die Querswurfweite zu berechnen und nicht den Bewegungsablauf zu simulieren. Zudem minderte das zweidimensionale Modell den Programmieraufwand und erlaubte, das Problem durch die Hypothese für den zentralen Stoß anzunähern. Grundgedanke des Modells ist, daß sich der reale Stoß (Primärstoß) durch zwei Teilstöße erfassen läßt. Einerseits ist dieses der Stoß an der Front (Teilstoß A) und andererseits der Stoß, der durch den Kontakt auf der Haube oder im Bereich der Windschutzscheibe zustandekommt (Teilstoß B) (Bild 3). Für die Längswurfweite wurde die von Kühnel empirisch gefundene Beziehung

$$s = c_1 * a * v + c_2 * \frac{v^2}{a} \quad (1)$$

herangezogen [1].

Ziel des Ersatzmodells ist es, den Abwurfwinkel des Fußgängers zu bestimmen, da mit ihm über die Längswurfweite auch die Querswurfweite bestimmbar ist.

Übergeordnet wurde berücksichtigt, an welcher Stelle der Front der Stoß stattgefunden hat, da bereits absolvierte Versuche bestätigten, daß die Querswurfweite vom Anstoßpunkt an der Fahrzeugfront abhängt (Bild 4).

Bild 5 zeigt die relevanten und variierbaren Größen für den Teilstoß A. Ein Fußgänger der Masse  $m_{Fu\beta g}$ , bewegt sich mit der Geschwindigkeit  $v_{Fu\beta g}$ , von rechts vor den Pkw.

Nach der Hypothese für den schiefen zentralen Stoß werden die Winkel und Geschwindigkeit mit Hilfe des Impulssatzes für den vollplastischen Stoß berechnet. Mit der Bedingung kleiner Tangentialkräfte im Berührungspunkt erhält man:

$$\beta' = \arctan \frac{\sin^2 \beta * v_{Fu\beta g} * (1 + \frac{m_{Fu\beta g}}{m_{Pkw}})}{\cos \beta * \sin \beta * v_{Fu\beta g} * (1 + \frac{m_{Fu\beta g}}{m_{Pkw}}) - ((v_{Fu\beta g} * \cos \beta - v_{Pkw} * \cos \alpha) * \sin \beta)} \quad (2)$$

$$v'_{Fu\beta g} = \frac{v_{Fu\beta g} * \sin \beta}{\sin \beta'} \quad (3)$$

Die Stoßausgangsgeschwindigkeit des Fußgängers wurde mit dem von Kühnel [1] gefundenen Faktor 0,75 multipliziert, der das Verhältnis zwischen Ablöse- und Kollisionsgeschwindigkeit angibt. Dieser Faktor hängt von der Geometrie der Paarung Pkw/Fußgänger ab und berücksichtigt in stark vereinfachender Form die dritte Dimension der Kollision.

Des weiteren wurde für die Zeit zwischen Teilstoß A und Teilstoß B eine von Golder [8] gefundene Beziehung eingesetzt, die durch eine Hyperbel approximiert wurde.

$$t = \frac{5.1}{v_{Pkw}} \quad (4)$$

Die Ausgangsdaten aus Teilstoß A wurden anschließend als Eingangsdaten für Teilstoß B verwendet, wo wiederum mit der Hypothese für den schiefen zentralen Stoß die Ausgangsdaten für den Fußgänger berechnet werden (Bild 6).

Mit diesen beiden Gleichungen läßt sich dann der Austrittswinkel bestimmen.

$$\beta'' = \arctan \frac{\sin^2 \beta' * v'_{Fu\beta g} * (1 + \frac{m_{Fu\beta g}}{m_{Pkw}})}{\cos \beta' * \sin \beta' * v'_{Fu\beta g} * (1 + \frac{m_{Fu\beta g}}{m_{Pkw}}) - ((v'_{Fu\beta g} * \cos \beta' - v_{Pkw} * \cos \alpha') * \sin \beta')} \quad (5)$$

Da die reduzierte Masse des Fußgängers beim ersten Stoß sehr klein ist, kann der Geschwindigkeitsverlust durch den ersten Teilstoß für den Pkw vernachlässigt werden und nur die durch die Verzögerung erlittene Geschwindigkeitsreduzierung muß berücksichtigt werden.

$$v'_{Pkw} = v_{Pkw} - t * a_{Verz}$$

Entscheidend ist der Winkel  $\beta''$ , da dieser für die Querswurfweite maß-

Bild 5 Modell für Teilstoß A  
Fig. 5 Model for impact A

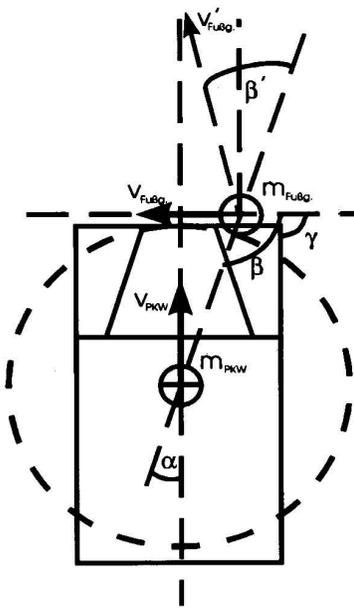
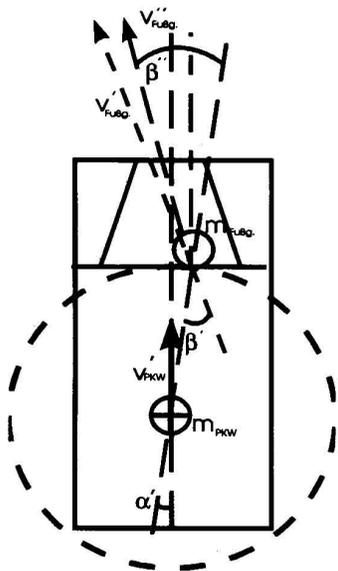


Bild 6 Modell für Teilstoß B  
Fig. 6 Model for impact B



geblich ist. Für die Berechnung der Querwurfweite muß der Winkel noch auf die Längsachse des Fahrzeugs korrigiert werden. Dies geschieht vom Programm automatisch.

Insbesondere für Teilstoß B stellt die Annahme eines zentralen Stoßes eine starke Vereinfachung dar, da genaugenommen kein direkter Stoß stattfindet, sondern vielmehr die Reibungskräfte zwischen Fronthaube und Fußgänger entscheidend sind. Um diesen Fehler auszugleichen, wurde versucht, einen Korrekturfaktor während der Versuche zu bestimmen, der dann postulierend mit in das Programm eingefügt werden kann.

#### 4 Experimenteller Teil

Favorisiert wurde für die Konstruktion der Versuchsanlage eine mechanische Kopplung der Antriebe von Fußgänger und Pkw (Bild 7), da bei getrennten Antrieben Synchronisationsprobleme erwartet wurden. Realisiert wurde dies durch eine Untersetzung mittels eines Rollenzuges (Flaschenzug-Prinzip), der sämtliche ganzzahligen Untersetzungsverhältnisse bis 1 : 8 ermöglichte. Hierdurch ließ sich die Anstoßstelle gut vorausbestimmen. Der Rollenzug wurde aus Platzgründen direkt an der Laufschiene des Dummies montiert, an der der Dummy mittels eines Schlittens aufgehängt war. Der an der Schiene befestigte Rollenzug untersetzte die Fahrzeuggeschwindigkeit mindestens 1 : 2. Die Fahrzeuggeschwindigkeit konnte mittels einer Lichtschranke, die

Bild 7 Prinzipskizze der Versuchsanlage  
Fig. 7 Sketch of the experimental plant

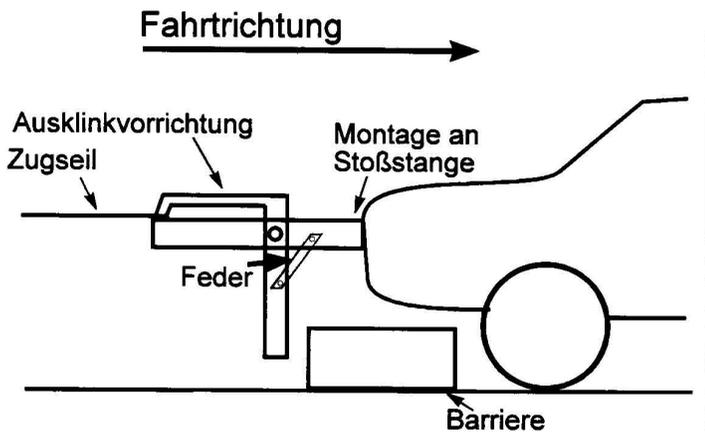
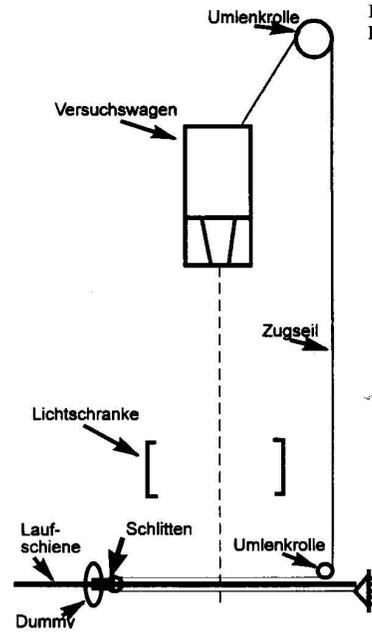


Bild 8 Prinzipskizze der Ausklinkmimik  
Fig. 8 Sketch of disengage equipment

unmittelbar vor der Kollisionsstelle angebracht war, bestimmt werden. Die Verbindung zwischen Schlitten und Versuchswagen wurde mit einem speziellen vorgereckten Seil hergestellt.

Da die Kollisionsstelle gut bestimmbar war, wurde der Schlitten so konstruiert, daß der Dummy unmittelbar vor der Kollision mechanisch ausgeklinkt werden konnte. Realisiert wurde dieses durch einen verstellbaren Stopper, der an beliebiger Stelle an die Laufschiene geschraubt werden konnte. Die Simulation eines realen Unfalls wurde durch diesen Mechanismus begünstigt, da einerseits der Dummy nicht am Kopf aufgehängt war, wenn er mit dem Fahrzeug kollidierte und andererseits im günstigsten Falle auch die Reibung durch das Eigengewicht auf dem Asphalt berücksichtigt werden konnte.

Um zu gewährleisten, daß der Dummy eine ruhige Bewegung ausführte, wurde der Schlitten über eine manuell verstellbare Bremse verzögert. Im Vorfeld gefundene Ergebnisse über die Körperhaltung eines Menschen wurden über eine Zweipunkt-Aufhängung realisiert (jeweils ein Aufhängungspunkt am Kopf und Becken). Mit dieser Vorrichtung war es möglich, den Dummy (Hybrid-I, 50%-Mann) mit einer gebeugten Körperhaltung in die Kollision zu bewegen. Die beiden Aufhängungspunkte wurden, wie oben beschrieben, simultan mechanisch ausgeklinkt.

Für die Ausklinkung des Zugseils wurde eine mechanisch arbeitende Mimik konstruiert, die anstelle der hinteren Stoßstange an den Versuchsfahrzeugen montiert wurde (Bild 8). Die Ausklinkmimik wurde während der Kollision betätigt. (Versuchstechnisch war dieses nicht mehr von Belang, da der Dummy sich in diesem Moment schon nicht mehr am

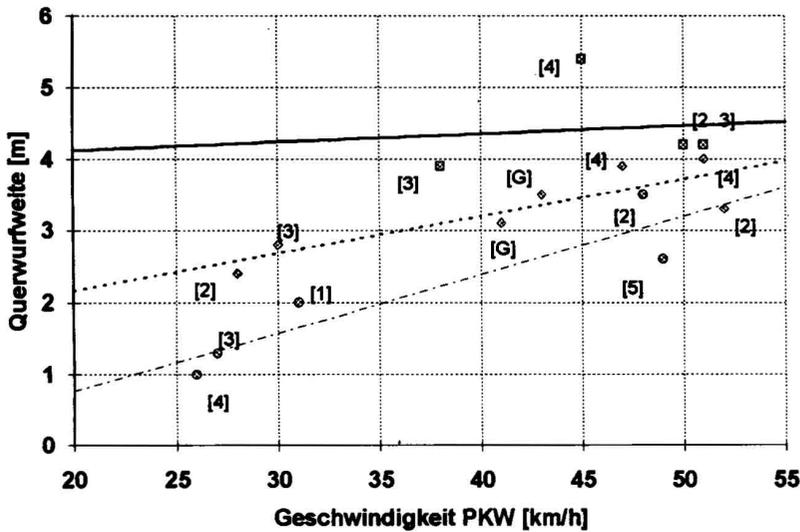


Bild 9 Querwurfweite-Trendanalyse  
Fig. 9 Projection distance in transversal direction

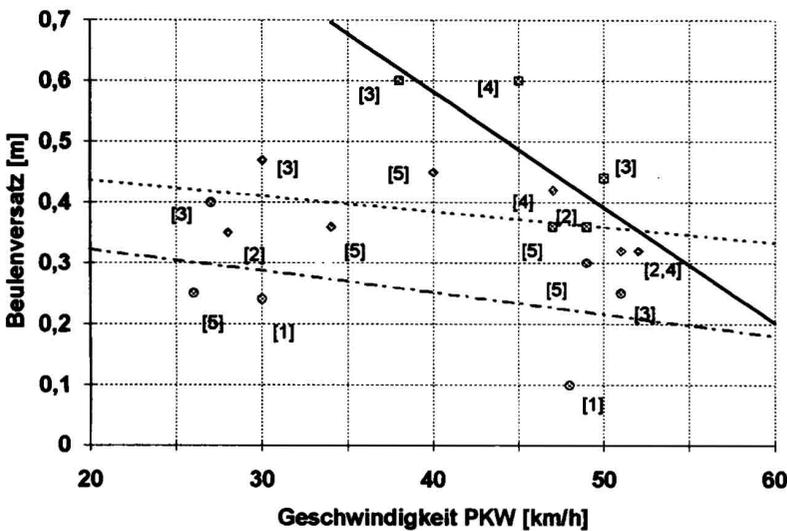


Bild 10 Beulenversatz-Trendanalyse  
Fig. 10 Indentation distance

Schlitten befand. Wichtig war die Ausklimmimik, um die Bewegungskopplung zwischen Dummy und Pkw zu trennen.

Als Versuchsfahrzeug wurde der Opel Ascona B gewählt. Er kann als klassisches Ponton-Fahrzeug angesehen werden, welches Rückschlüsse auf Keil- und Kastenfahrzeuge zuläßt, da es stoßtechnisch zwischen diesen beiden Fahrzeugformen einzuordnen ist.

Die Tachometer der Fahrzeuge wurden vor den Versuchen mittels einer Lichtschranke geeicht.

Um den Unfall auch anhand der Beschleunigungen rekonstruieren zu können, wurden exemplarisch zwei Fahrzeuge mit UDS ausgerüstet. Ebenfalls sollte hiermit die Frage untersucht werden, ob der UDS auch schon bei geringen Geschwindigkeiten von Pkw und Fußgänger den Unfall speichert. Der UDS wurde im Fußraum auf der Beifahrerseite montiert.

## 5 Versuchsergebnisse

Insgesamt wurden 20 Versuche durchgeführt und ausgewertet. Die zum Vergleich mit dem Simulationsmodell herangezogenen Versuche sind in **Tabelle 1** zusammengefaßt. Sie erfüllen alle vom Programm geforderten Restriktionen.

Die Abhängigkeit der Querwurfweite vom Kollisionspunkt an der Front ist teilweise nachvollziehbar. So ist z.B. anhand der ersten drei Versuche (1/1-1, 1/1-3 und 1/1-4) nachzuvollziehen, daß die Querwurfweite von 2 m im linken Kollisionssektor (In Gehrichtung) bis auf 1 m im rechten Kollisionssektor abfällt. Berücksichtigen muß man allerdings hierbei, daß nicht alle drei Versuche eine identische Geschwindigkeit aufweisen und der Wert von 2 m etwas hoch sein dürfte. Wäre hier die Geschwin-

digkeit wie in Versuch 1/1-3 und 1/1-4 eingehalten worden, so würden die Ergebnisse noch etwas näher zusammenrücken. Der Grund hierfür dürfte in der relativ geraden Kontur, bezüglich der Fahrzeugpfeilung und der Haubenwölbung, des Opel Ascona B liegen.

In Gehrichtung des Fußgängers kam es in den Kollisionssektoren 1 und 2 häufig dazu, daß der Dummy neben das Fahrzeug fiel. Insgesamt konnte bei sechs Versuchen ein seitliches Abgleiten des Dummies registriert werden. Bei allen fünf Versuchen ist das seitliche Abgleiten auch anhand der Beschädigungen zu rekonstruieren. Erkennbar ist es anhand der auf dem Kotflügel seitlich liegenden Beule. Lediglich bei einem Versuch (3/1-2) kam es zu keinem Sekundärkontakt auf der Haube, welches mit der hohen Fußgängergeschwindigkeit (20 km/h) und der relativ geringen Pkw-Geschwindigkeit (39 km/h) begründet werden kann.

Die Längs- und Querwurfweiten wurden hierdurch erheblich beeinflusst. Z.B. wurde in Versuch 6/1-2 eine Längswurfweite von 12,3 m gemessen. Nach der klassischen Längswurfweitenparabel ergebe dies eine Geschwindigkeit von max. ca. 43 km/h, tatsächlich lagen aber 50 km/h vor. Verwertet man die Ergebnisse aus allen Kollisionssektoren in einem Diagramm und faßt die Geschwindigkeiten des Fußgängers unter den Oberbegriffen Gehen, Laufen und Rennen zusammen, so ergibt sich **Bild 9**. Die Zahlen in den Klammern geben den Kollisionssektor an.

Die durchgezogenen Linien in Bild 9 wurden mit einer arithmetischen Regressionsanalyse bestimmt. Deutlich zu entnehmen ist der Grafik die Tendenz, daß bei hohen Pkw-Geschwindigkeiten ( $v_{Pkw} > 45$  km/h) eine eindeutige Zuordnung für eine Bewegungsgeschwindigkeit des Fußgängers nicht getroffen werden kann. Erklärt wird dieses dadurch, daß bei

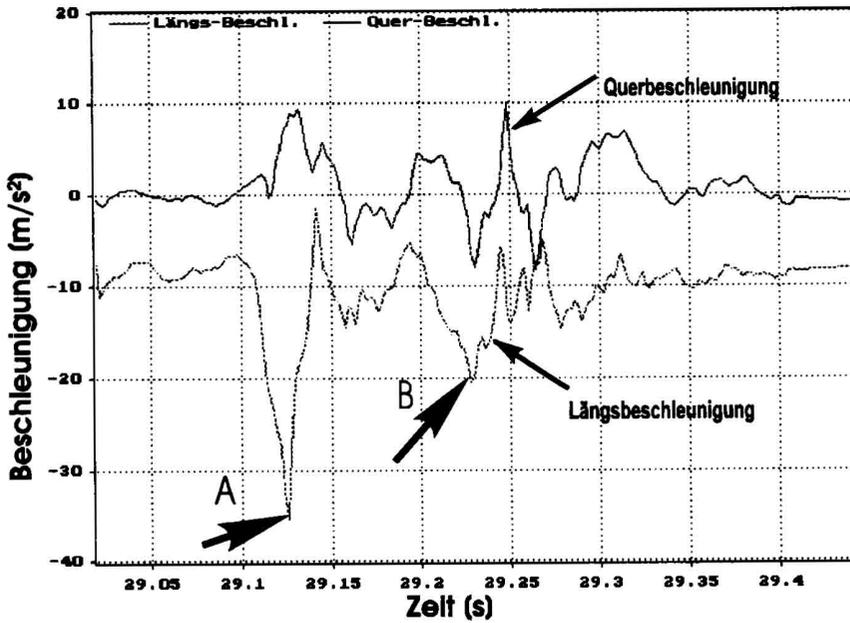


Bild 11 UDS-Meßschrieb  
Fig. 11 Acceleration during an experiment (recorded by »UDS«)

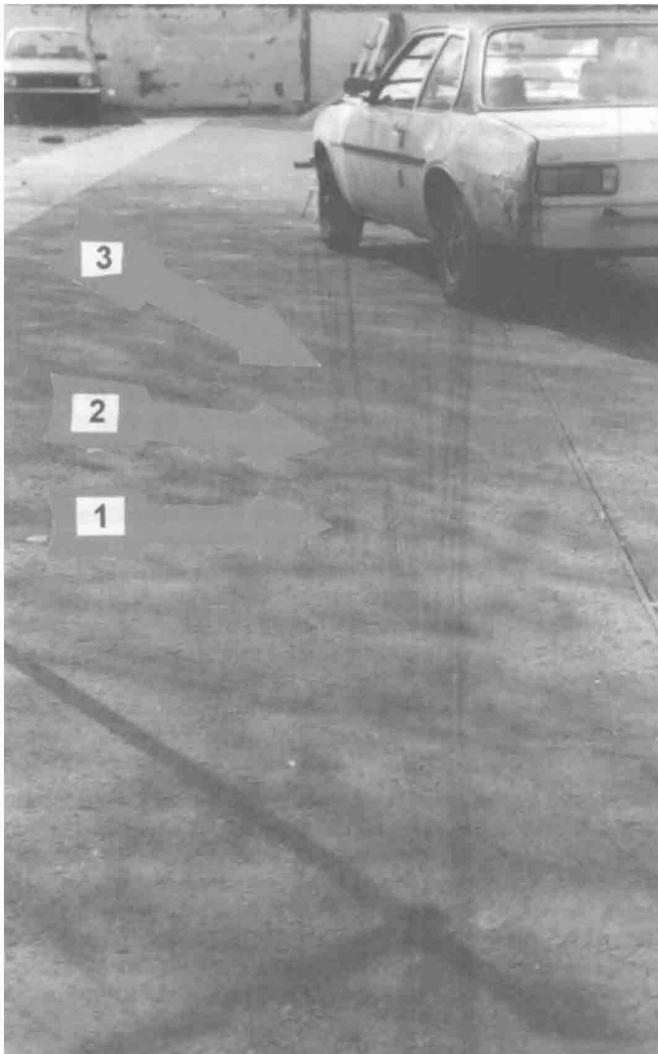


Bild 12 Spurennick aufgrund starker Radlasterhöhung  
Fig. 12 Skid-marks caused by a car-pedestrian collision

hohen Pkw-Geschwindigkeiten der durch die Fußgängergeschwindigkeit eingebrachte Impuls gegenüber dem hohen Impuls des Pkw vernachlässigbar wird. Bei geringen Fahrzeuggeschwindigkeiten ( $v_{Pkw} < 40$  km/h) und hohen Querwurfweiten ( $s > 4$  km) kann bei der vorhandenen Versuchskonstellation eindeutig auf eine rennende Bewegungsgeschwindigkeit des Dummies geschlossen werden.

Der letzten Spalte von Tab. 1 sind die gemessenen Beulenversätze zu entnehmen. Auffallend sind die hohen Beulenversätze bei rennender Bewegung des Dummies (Bild 10).

Insgesamt ergibt sich auch bei Berücksichtigung der Körperhaltung eine breite Streuung und es kommt zu einem Toleranzfeld, das eine Zuordnung zu einer bestimmten Bewegungsgeschwindigkeit erschwert. Eine Ausnahme stellen die hohen Beulenversätze ( $s > 0,6$  m) bei rennender Bewegung des Dummies und niedrigen Pkw-Geschwindigkeiten ( $v_{Pkw} < 45$  km/h) dar.

Auch hier kann man die Tendenz verfolgen, daß bei höheren Pkw-Geschwindigkeiten ( $v_{Pkw} > 45$  km/h) eine eindeutige Zuordnung für eine Bewegungsgeschwindigkeit des Dummies nicht mehr möglich ist.

Eine signifikante Abhängigkeit von den Kollisionssektoren ergibt sich nicht. Grund hierfür ist der Umstand, daß der Dummy nicht immer *genau seitlich* erfaßt wird. Anscheinend ergeben sich schon bei geringen Änderungen der Anstoßkonfiguration starke Auswirkungen auf den Beulenversatz. Da sich die genaue Anstoßkonfiguration in der Realität ebenfalls schwer ermitteln läßt, scheint der Beulenversatz als Rekonstruktionshilfe nur bedingt einsetzbar.

Für die Ermittlung der Bewegungsrichtung ist der Beulenversatz geeignet. In den Versuchen wurde selbst bei hohen Differenzgeschwindigkeiten zwischen Pkw und Dummy immer ein positiver<sup>1</sup> Beulenversatz gemessen.

## 6 Weitere Detailergebnisse

Zur Auswertung des UDS wurden die Längs- und Querbeschleunigung aus dem Speicher ausgelesen. Bild 11 zeigt eine Kollision mit einer Pkw-Geschwindigkeit von 47 km/h und einer Fußgängergeschwindigkeit von 12 km/h (Versuch 5.2-4).

Man erkennt deutlich den mit A bezeichneten ersten Anstoß an der Front und den mit B bezeichneten Stoß auf der Haube. In beiden Fällen kommt es zu nennenswerten Querbeschleunigungen, welches einerseits damit begründet werden kann, daß der Dummy nicht voll mittig vom Fahrzeug erfaßt wird und andererseits mit der Eigengeschwindigkeitskomponente des Dummies erklärt werden kann.

Sehr gut kann man einen zeitlichen Versatz bei Teilstoß B zwischen Längs- und Querbeschleunigung erkennen. Dieser Versatz dürfte dadurch zustandekommen, daß durch den Dummyaufschlag eine starke Radlasterhöhung stattfindet, und der Pkw so einseitig überbremst, wel-

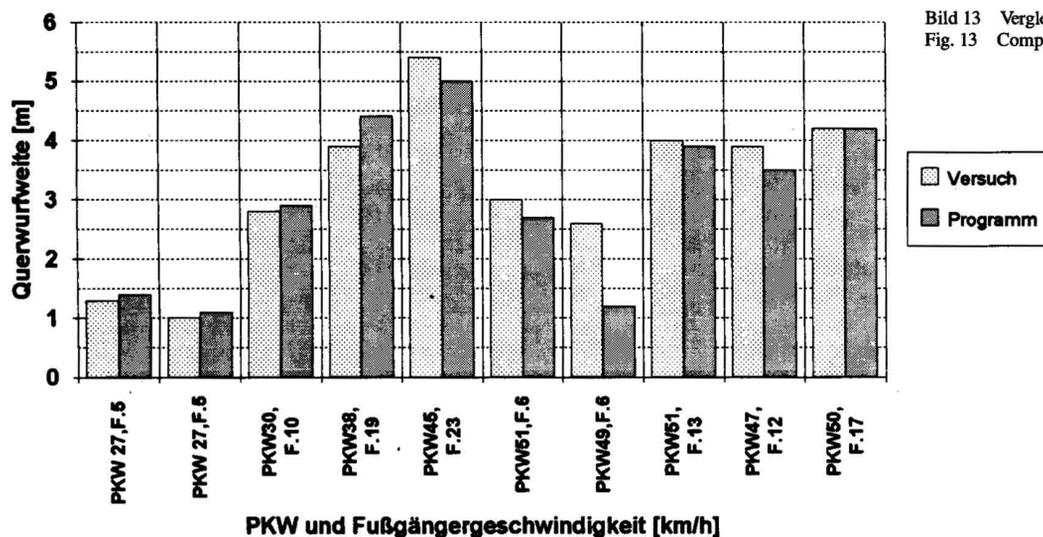


Bild 13 Vergleich von Simulations- und Versuchsergebnissen  
Fig. 13 Comparison from simulation- and experimental results

Geschw. PKW [km/h]	Geschw. Fußg. [km/h]	Versuchsr.	Koll.- Sektor	Längswurfweite [m]	Querwurfweite [m]	Beulenversatz [m]
30,6	6,1	1/1-1	1	5,1	2,0	0,24*
26,6	5,3	1/1-3	3	4,3	1,3	0,4
26,6	5,3	1/1-4	4	4,0	1,0	0,25
27,9	9,3	2/1-2	2	6,9	2,4	0,35*
29,6	9,9	2/2-3	3	7,6	2,8	0,47
39,0	19,5	3/1-2	2	3,9	2,7	*
38,2	19,1	3/1-3	3	10,1	3,9	0,6
45,2	22,6	3/1-4	4	10,8	5,4	0,6
50,9	6,4	4/1-1	1	15,1	3,0	0,1
47,6	6,0	4/2-1	1	9,8	3,5	0,1*
48,5	6,1	4/1-5	5	15,6	2,6	0,3
51,9	13,0	5/1-2	2	11,9	3,3	0,32*
51,1	12,8	5/1-4	4	17,2	4,0	0,32
46,7	11,7	5/2-4	4	15,2	3,9	0,42
49,8	16,6	6/1-2	2	12,3	4,2	0,35*
50,1	16,7	6/1-3	3	16,2	4,2	0,44

\* Dummy fällt seitlich

Tabelle 1 Übersicht der durchgeführten Versuche  
tab. 1 A Experimental serie

ches eine nennenswerte Querbeschleunigung zur Folge hat. Durch diese Überbremsung kann es zu einem Spurenknicke kommen, der als Rekonstruktionsmittel von Wichtigkeit ist. Bild 12 zeigt solch einen Spurenknicke und verdeutlicht, wie stark der Pkw sich durch diese Radlasterhöhung drehen kann. Auch wenn die Spurenauswertung durch die zahlreichen an gleicher Stelle stattfindenden Versuche etwas erschwert wurde, so erkennt man doch deutlich die Spurendickung im Punkt 1. Anschließend federt der Pkw im Punkt 2 wieder etwas aus. Bei Punkt 3 erkennt man dann eine normale Spurenzeichnung bei Vollbremsung. Die Drehung des Pkw findet immer zu der Seite statt, an der die Radlast erhöht wird. Diese Systematik ließ sich sogar bei Eckstößen in Sektor 5 beobachten, tritt jedoch häufiger in Gehrichtung des Dummies auf. Begründet wird dieses damit, daß es aufgrund der Bewegungsgeschwindigkeit und der Körperhaltung selten zu einer ausgeprägten Radlasterhöhung in Sektor 5 kommt.

Um den Einfluß der Körperhaltung zu dokumentieren, wurden Versuche mit identischen Geschwindigkeiten und einer Variation der Körperhaltung absolviert. Exemplarisch sollen hier Versuch 4/1-1 und 4/2-1 herausgegriffen werden. In 4/1-1 wurde der Dummy lediglich am Kopf aufgehängt und in Versuch 4/2-1 wurde ein Versatz zwischen Becken

und Kopf von ca. 10 cm eingestellt. Deutlich wird, daß der Versatz zwischen Becken und Kopf einen wichtigen Einfluß hat. In Versuch 4/2-1 kam es zwar noch zu einem Sekundärkontakt auf der Motorhaube, jedoch rutschte der Dummy anschließend seitlich weg und die Längswurfweite betrug 9,8 m. Auch hier würde die Anwendung der Längswurfweitenparabel eine niedrigere Geschwindigkeit angeben (max. ca. 38 km/h). Der Einfluß der Körperhaltung bezüglich der Möglichkeit des seitlichen Abrutschens ist eminent.

## 7 Validierung

Das mit relativ einfachen Mitteln erstellte Simulationsmodell gibt die realen Verhältnisse gut wieder. Der in Abschnitt 3 definierte Korrekturfaktor wurde für die Versuche mit gehendem und laufendem Dummy zu 1,2 und für den rennenden Dummy zu 0,9 bestimmt. Da die Größenordnung nicht wesentlich durch die Faktoren verändert wird, ergaben auch die im Vorfeld mit dem Korrekturfaktor 1 errechneten Werte eine gute Korrelation zwischen Simulations- und Versuchsergebnissen. Bild 13 vergleicht Simulations- und Versuchsergebnisse.

Bis auf Versuch 4/1-5 (Pkw 49 km/h, Fußgänger 6 km/h) stimmen Versuchs- und Simulationsergebnisse gut überein. Zuzüglich der fünf Versuche, bei denen das Simulationsmodell erkannt hat, daß der Dummy neben das Fahrzeug fällt, ergeben sich lediglich zwei »Ausreißer«. Die Simulationsgüte des Programms scheint hiermit für Geschwindigkeiten bis ca. 60 km/h ausreichend. Die im Vorfeld getroffenen Vereinfachungen geben die realen Verhältnisse gut wieder.

## 8 Zusammenfassung

Nicht alle Ergebnisse sind aufgrund der begrenzten Anzahl der Versuche gesichert, jedoch ergeben sich folgende Trends und Teilergebnisse:

- ein großer Beulenversatz ( $s > 0,55$  m) deutet bei einer Pkw-Geschwindigkeit  $< 45$  km/h auf eine rennende Bewegungsgeschwindigkeit des Fußgängers;
- die Querwurfweite kann bei Pkw-Geschwindigkeiten unterhalb ca. 45 km/h als Rekonstruktionshilfe für die Bewegungsgeschwindigkeit des Fußgängers herangezogen werden;
- deutet sich bei der Rekonstruktion eines Pkw-Fußgänger-Unfalls an, daß der Fußgänger seitlich neben das Fahrzeug gefallen sein könnte, so sind die aus den »klassischen« Wurfweiten-Diagramm ermittelten Geschwindigkeiten kritisch zu beachten.
- eine Spurendickung ist auf jeden Fall dem Kontakt auf der Haube zuzuordnen, d.h. die Spurendickung tritt zeitlich verzögert zum Kollisionsort auf; ein Spurenknicke kann hierzu noch einmal zeitlich verzögert auftreten, wenn es durch den Haubenaufschlag des Dummies zu einer einseitigen Radlasterhöhung kommt.
- die Körperhaltung spielt für den Beulenversatz keine eminent wichtige Rolle, dennoch kann sie für ein seitliches Abrutschen des Fuß-

gänger vom Fahrzeug maßgeblich sein. Dieses ist jedoch keine unmittelbare Rekonstruktionshilfe für die Bewegungsgeschwindigkeit des Fußgängers.

Bezüglich des Simulationsmodells ergeben sich zufriedenstellende Ergebnisse, so daß das Programm für reale Unfälle, bis Pkw-Geschwindigkeiten von ca. 60 km/h, angewendet werden kann. Jedoch dürfen die Simulationsergebnisse nicht unreflektiert angewendet werden, sondern es muß strengstens geprüft werden, ob alle vom Programm geforderten Restriktionen eingehalten worden sind.

Kritisch hingewiesen sei darauf, daß diese von wissenschaftlicher Seite gelieferten Ergebnisse nicht immer rezeptartig in der Praxis anzuwenden sind, sondern nur dann, wenn die realen Unfallbedingungen wenigstens annähernd mit den Versuchskonditionen übereinstimmen. Für Interpretationen in bezug auf ähnliche Unfälle sei auf den Abschnitt 2 verwiesen, in dem erläutert wird, inwiefern geänderte Versuchsparameter die Ergebnisse beeinflussen.

<sup>1</sup> Positiv entspricht Beulenversatz in Gehrichtung des Dummies.

#### Literaturnachweis

- [1] Kühnel A. (1980): Der Fahrzeug-Fußgänger-Unfall und seine Rekonstruktion. Dissertation TU Berlin
- [2] Becke M., Schimmelpfennig K.-H.: Rutschweite von Fußgängern. Der Verkehrsunfall, Heft 10 u. 12/1981
- [3] Becke M., Schimmelpfennig K.-H.: Rutschweite von Fußgängern auf nasser Fahrbahn. Der Verkehrsunfall, Heft 12/1986
- [4] Kühnel A., Rau H.: Der Zusammenstoß Fahrzeug-Fußgänger unter Berücksichtigung der Eigenbewegung des Fußgängers; Der Verkehrsunfall, Heft 1/2 1974
- [5] Gotzen L, Flory P. J., Otte D.: Der Fußgängerunfall – Seine Verletzungssituation und Kollisionsmechanik; Unfallheilkunde 83, 1980
- [6] Kramer M.: Berechnung der Verletzungsschwere in Fußgänger-Fahrzeug-Unfällen, Verkehrsunfall, Heft 6, 1977
- [7] Stürtz G., Appel H., Gotzen L.: Kinematik des realen Fußgängerunfalls, Verkehrsunfall, Heft 7/1976
- [8] Schimmelpfennig K.-H., Golder U.: Die Bedeutung einer Blockierspurverdickung bei Fußgängerunfällen, Verkehrsunfall, Heft 5, 1989 ■